



دانش تجهیزات فرآیندی برای اپراتورها و مهندسان

تألیف:

نورمن لیبرمن

(Norman Lieberman)

مترجمان:

مهدی زارع بردج، سروش ذیگلری

یادداشت مؤلف:

امیدوارم که این کتاب به شما کمک کرده باشد. اگر مشکلی در فرآیند، یا سوالی در رابطه با این نوشته دارید، از طریق ایمیل norm@liberman-eng.com با من در میان بگذارید.

فهرست مطالب

۲۸	مقدمه: طراحی آفرینش جهان
۲۹	پیش‌گفتار مؤلف:
۳۲	پیش‌گفتار مترجمان:
۳۵	۱- اصول پایه عملیات‌های فرآیندی و مهندسی
۳۵	چکیده:
۳۵	کلمات کلیدی:
۳۹	چیزهایی که در مورد آن‌ها نگرانم
۴۰	آینده بدون پالایشگاه‌ها
۴۲	ملاحظات ایمنی
۴۳	۲- عوامل تأثیرگذار بر راندمان تفکیک سینی
۴۳	چکیده:
۴۳	کلمات کلیدی:
۴۴	تأثیر افزایش بخار آب ریویلر
۴۵	ماندگی و راندمان سینی
۴۶	محاسبات راندمان سینی
۴۹	مشکل سینی‌های دریچه‌ای
۴۹	بهینه‌سازی راندمان تفکیک سینی
۵۰	ماهیت راندمان سینی
۵۲	ΔP هیدرولیک
۵۴	متعادل‌سازی ΔP خشک و ΔP هیدرولیک
۵۵	بهینه‌سازی راندمان سینی - دیدگاه طراحی فرآیند

بهبودسازی راندمان سینی - تعمیرات	۵۶
بهبودسازی راندمان سینی - عملیات	۵۶
مهندسی فرآیند در عمل	۵۸
سینی‌های کلاهی	۶۰

۳- نقش رفلکس در برج‌های تقطیر

چکیده:	۶۱
کلمات کلیدی:	۶۱
محدودیت‌های فشار بخار	۶۶
فرآیند تقطیر دو مرحله‌ای	۶۷
منشأ برج تقطیر	۶۹
حذف دنباله نفتا	۷۰
نتیجه	۷۱

۴- سینی‌های تقطیر چگونه کار می‌کنند؟

چکیده:	۷۳
کلمات کلیدی:	۷۳
ماندگی و راندمان سینی	۷۵
تأثیر کف	۷۶
مزایای رفلکس	۷۶
تجمع مایع پائین‌ریز	۷۷
راندمان سینی	۷۸
صفحات سینی کلاهی	۸۰

۵- ماندگی زدایی بخارها

چکیده:	۸۱
--------------	----

کلمات کلیدی:	۸۱
جداسازی مایع - مایع	۸۳
جداسازهای بخار - مایع	۸۴
دسته لوله‌های گردابی	۸۶
اسپری‌های روغن شست‌شو	۸۶
توزیع بخار	۸۶
ته‌نشینی آب از فاز مایع هیدروکربنی	۸۷
ادغام‌گرها	۸۸
فوم (کف)	۹۰
خلاصه	۹۰

۶- شبکه‌های روغن شست‌شوی برج تفکیک‌کننده

چکیده:	۹۲
کلمات کلیدی:	۹۲
بخش روغن شست‌شوی واحد ککساز تأخیری	۹۴
ارتفاع زیاد شبکه در واحد ککسازی	۹۵
مشکلات مربوط به توزیع روغن شست‌شو	۹۶
انتخاب فاکتور "C" جهت ماندگی‌زدایی با تکیه بر ته‌نشین‌سازی با استفاده از نیروی گرانشی	۹۸
شبکه روغن شست‌شوی برج خلأ	۹۹

۷- خطای نصب، باعث طغیان برج تفکیک‌کننده می‌شود

چکیده:	۱۰۲
کلمات کلیدی:	۱۰۲
بررسی افت فشار یک برج	۱۰۴
اندازه‌گیری فشار مشاهده‌شده	۱۰۴

بازرسی از اجزاء داخلی برج ۱۰۶

نتیجه ۱۰۸

۸- جداسازی روغن - آب ۱۱۰

چکیده: ۱۱۰

کلمات کلیدی: ۱۱۰

کنترل pH ۱۱۱

افت فشار ولو کنترلی ۱۱۲

بهبود توزیع کننده خوراک ۱۱۴

ادغام گر ها ۱۱۵

بافل های ته نشینی شیب دار ۱۱۶

اندازه ذرات و سرعت ته نشینی ۱۱۸

خلاصه ۱۱۹

ملاحظات ایمنی ۱۲۰

۹- هیدرولیک - هد؛ فشار؛ سرعت ۱۲۲

چکیده: ۱۲۲

کلمات کلیدی: ۱۲۲

رابطه فشار، هد و سرعت ۱۲۳

فشار آب حمام من ۱۲۴

تبدیل فشار هد به سرعت ۱۲۵

تبدیل فشار به فوت هد ۱۲۶

پمپ های گریز از مرکز ۱۲۷

ضرایب اریفیس ۱۲۸

تبدیل سرعت برگشتی به فشار ۱۳۰

سوراخ‌های متعادل کننده فشار..... ۱۳۱

۱۰- مشکلات متداول هیدرولیک..... ۱۳۲

چکیده:..... ۱۳۲

کلمات کلیدی:..... ۱۳۲

تبدیل سرعت به فشار..... ۱۳۳

میرایی ضربه قوچ آب..... ۱۳۴

انسداد بخار..... ۱۳۶

آب‌بندی کندانس..... ۱۳۸

ضربه قوچ بخار..... ۱۴۲

خلاصه..... ۱۴۲

۱۱- استفاده از هیدرولیک در مشکلات فرآیند..... ۱۴۴

چکیده:..... ۱۴۴

بازیابی فشار..... ۱۴۶

انسداد بخار در یک خط امولسیون..... ۱۴۷

افت فشار لوله‌های آب خنک‌کننده..... ۱۴۹

راندمان تفکیک سینی..... ۱۵۱

افت فشار سینی‌های دودکشی..... ۱۵۳

۱۲- عیب‌یابی مدارهای آب خنک‌کننده..... ۱۵۵

چکیده:..... ۱۵۵

کلمات کلیدی:..... ۱۵۵

برج‌های خنک‌کننده..... ۱۵۶

دمای حباب مرطوب..... ۱۵۷

فشار آب..... ۱۵۸

- زمان، دما و pH ۱۵۸
- بررسی افت فشار ۱۵۹
- اتلافات اصطکاکی در خط لوله آب ۱۶۰
- رسوبات سخت ۱۶۱
- کنترل pH آب ۱۶۲
- یک محدودیت موضعی ۱۶۳
- نشت هوا به ورودی ۱۶۴
- دستورالعمل برای حباب مرطوب ۱۶۴
- ملاحظات ایمنی ۱۶۶
- ۱۳- درافت و گردش ترموسیفون** ۱۶۷
- چکیده: ۱۶۷
- کلمات کلیدی: ۱۶۷
- درافت، گردش ترموسیفون و پمپ حبابی ۱۷۱
- پمپ حبابی ۱۷۴
- گردش آب، چقدر سریع است؟ ۱۷۶
- اتلاف درافت کوره ۱۷۸
- گردش ترموسیفون ۱۷۹
- رفتن به خانه ۱۸۱
- ۱۴- مفاهیم انتقال گرمای نهان** ۱۸۲
- چکیده: ۱۸۲
- کلمات کلیدی: ۱۸۲
- محل‌های تشکیل هسته جوش ۱۸۴
- شرایط محدودیت شار حرارتی ۱۸۶

- پوشش تیوب‌های فلزی سینتری ۱۸۷
- اثر نرخ گردش بر حداکثر فلاکس در ریپویلر ۱۸۷
- انسداد بخار ۱۸۸
- تأثیر ونت کردن بخار ۱۹۰
- رابطه گرمای محسوس با گرمای نهان بخار آب ۱۹۰
- تبدیل گرما به انرژی جنبشی ۱۹۱
- تأثیر جاذبه مولکولی ۱۹۲
- انبساط هیدروژن ۱۹۳
- اثرات گرمای نهان ۱۹۴
- تبخیر ۱۹۵
- اتلاف حرارت محیط ۱۹۵
- اثر سورفکتانت‌ها بر تولید کف ۱۹۶
- ۱۵- جریان بخار آب عبوری از ریپویلرها ۱۹۸**
- چکیده: ۱۹۸
- کلمات کلیدی: ۱۹۸
- افت عملکرد ریپویلر ۲۰۰
- تجمع میعانات ۲۰۰
- از بین رفتن آب‌بندی کندانس ۲۰۲
- گازهای غیرقابل چگالش در بخار آب ۲۰۲
- فقدان گردش ترموسیفون ۲۰۳
- تعمیرات بزرگ ۲۰۴
- تصحیح اشتباه طراحی ۲۰۵
- انسداد بخار ۲۰۶

افزایش گردش ترموسیفون..... ۲۰۶

منابع..... ۲۰۷

۱۶- تبادل حرارت در کندانسورها و ریپویلرها..... ۲۰۸

چکیده:..... ۲۰۸

کلمات کلیدی:..... ۲۰۸

انسداد بخار..... ۲۰۹

نشستی لوله ریپویلر پروپان زدا..... ۲۱۱

ونت کردن از یک ریپویلر ترموسیفون عمودی..... ۲۱۲

تجمع کربن دی اکسید..... ۲۱۲

نشستی هوا در کندانسورهای سطحی..... ۲۱۳

بافل هوای کندانسور سطحی..... ۲۱۴

موقعیت ورودی آب خنک کننده..... ۲۱۴

تأثیر لوله های صاف ریپویلر..... ۲۱۶

مافوق گرم زدایی بخارها..... ۲۱۷

منابع..... ۲۱۸

۱۷- واحد تقطیر نفت خام - رسوب مبدل حرارتی..... ۲۱۹

چکیده:..... ۲۱۹

کلمات کلیدی:..... ۲۱۹

نفت خام باید در کدام سمت باشد؟..... ۲۲۱

چرا لوله ها کثیف می شوند؟..... ۲۲۲

تأثیر بر انتقال حرارت..... ۲۲۳

زبری سطح..... ۲۲۴

افزایش تعداد گذرهای بخش تیوب..... ۲۲۵

رسوب‌زدایی آن-لاین..... ۲۲۷

سرعت جریان متقاطع در قسمت پوسته..... ۲۲۸

۱۸- راهنمای افزایش ظرفیت واحدهای فرآیندی..... ۲۳۰

چکیده:..... ۲۳۰

کلمات کلیدی:..... ۲۳۰

تاریخچهٔ موردی برج تبخیر آبی نفت خام..... ۲۳۱

مقایسهٔ شبیه‌سازی..... ۲۳۲

اصول طراحی..... ۲۳۴

مدل‌سازی برج تقطیر..... ۲۳۵

انتخاب راندمان سینی..... ۲۳۵

معادلهٔ حالت..... ۲۳۷

افت فشار در خطوط فرآیند..... ۲۳۸

اندازه‌گیری سختگیرانه فاکتورهای اصطکاک درون خط لولهٔ فرآیند..... ۲۴۱

شبکهٔ مبدل‌های پیش‌گرمایش نفت خام..... ۲۴۱

ترکیب محصولات تحتانی برج خلأ..... ۲۴۴

داده‌های آزمون عملکرد..... ۲۴۴

۱۹- مشکلات موجود در مدل‌سازی کامپیوتری واحدهای فرآیندی..... ۲۴۶

چکیده:..... ۲۴۶

کلمات کلیدی:..... ۲۴۶

شبیه‌سازی کامپیوتری تفکیک‌کننده‌ها..... ۲۴۸

سرعت ته‌نشینی روغن - آب..... ۲۵۰

راندمان مبدل حرارتی..... ۲۵۱

افت فشار در لوله‌ها..... ۲۵۳

محدودیت‌های هیترهای احتراقی ۲۵۴

روش‌های موثر طراحی ۲۵۵

ملاحظات ایمنی ۲۵۷

خطرات نیتروژن ۲۵۷

۲۰- آیا مدل‌سازی کامپیوتری، واقعیت را نشان می‌دهد؟ - نقطه انجماد دیزل ۲۵۸

چکیده: ۲۵۸

کلمات کلیدی: ۲۵۸

تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی ۲۶۰

حرف آخر ۲۶۲

محدودیت‌های نقطه انجماد، دود و ابر ۲۶۲

محدودیت نقطه مه ۲۶۲

۲۱- تأثیر پیش‌گرمایش هوای احتراق بر روی هیتر احتراقی ۲۶۴

چکیده: ۲۶۴

کلمات کلیدی: ۲۶۴

تأثیر بر روی دمای شعله ۲۶۷

تأثیر بهبود اختلاط هوا و سوخت ۲۶۸

هوای اضافی ۲۶۹

تأثیر پیشگرم‌کن هوا ۲۶۹

نقص دیواره تیوب‌های تابشی ۲۷۰

۲۲- از سرویس خارج شدن ایمن هیتر احتراقی، در اثر نقص تیوب ۲۷۲

چکیده: ۲۷۲

کلمات کلیدی: ۲۷۲

نقص تیوب هیتر ۲۷۳

حد بالای انفجار ۲۷۴

بخار آب خفه کننده ۲۷۵

توقف نصب جعبه های بخار ۲۷۷

اقدامات اصلاحی ۲۷۷

رفتن به خانه ۲۷۹

۲۳- برج های خلأ ۲۸۰

چکیده: ۲۸۰

کلمات کلیدی: ۲۸۰

جت ها چگونه کار می کنند؟ ۲۸۲

عملکرد غیر خطی ازکتورها ۲۸۴

رفع مشکل ۲۸۵

محدودیت فشاربخار آب ۲۸۵

کندانسورهای سطحی خلأ توربین بخار ۲۸۶

نقش کندانسور «ب» ۲۸۷

۲۴- ارتقای عملکرد برج خلأ ۲۸۹

چکیده: ۲۸۹

کلمات کلیدی: ۲۸۹

کاهش محتوای نفت گاز پسماند ۲۹۰

افزایش دمای منطقه تبخیر آبی ۲۹۱

راه اندازی ازکتور بخار آب یدکی ۲۹۲

سیلیکا در نازل بخار ۲۹۴

بخار آب مرطوب ۲۹۶

جریان آب خنک کننده ۲۹۷

انتخاب مواد لوله ۲۹۸

نشستی پایه درین ۲۹۹

خلاصه ۲۹۹

۲۵- اژکتورهای خلأ همانند کمپرسورهای سرچاهی هستند ۳۰۰

چکیده: ۳۰۰

کلمات کلیدی: ۳۰۰

سیستم خلأ - اژکتورهای بخار ۳۰۲

تبدیل گرما به سرعت ۳۰۴

اژکتور بخار آب، به عنوان یک کمپرسور ۳۰۵

اژکتورهای بخار همگرا - واگرا ۳۰۸

از بین رفتن تقویت صوتی ۳۰۹

بازیابی گاز طبیعی ۳۱۰

۲۶- کندانسورهای سطحی خلأ توربین بخار ۳۱۱

چکیده: ۳۱۱

کلمات کلیدی: ۳۱۱

کندانسورهای خلأ ۳۱۲

کندانسور سطحی ۳۱۴

تصحیح فشار بارومتریک ۳۱۶

محدودیت‌های خلأ به علت فشار بخار آب ۳۱۷

توان دمنده هوای واحد FCU ۳۱۸

ارتقاء شغلی ۳۱۸

تجمع میعان‌ات و از بین رفتن آب‌بندی کندانس ۳۲۰

۲۷- کاربرد عملی ترمودینامیک ۳۲۱

چکیده:	۳۲۱
کلمات کلیدی:	۳۲۱
بخار آب در اژکتورهای خلأ	۳۲۲
خصوصیات بخار آب اشباع	۳۲۵
مشاهدات میدانی	۳۲۷
توربین‌های بخار	۳۲۸
منابع	۳۳۰

۲۸- بخار آب، چگونه در موتورها، توربین‌ها و اژکتورهای خلأ کار انجام می‌دهد

چکیده:	۳۳۱
کلمات کلیدی:	۳۳۱
موتور بخار آب رفت و برگشتی	۳۳۲
کریول کوین	۳۳۲
ترمودینامیک	۳۳۳
نمودار مولیر	۳۳۵
توربین‌های بخار	۳۳۷
تبدیل فشار بخار آب به توان	۳۳۷
اندازه حرکت بخار آب	۳۳۸
عمکلرد گاورنر توربین	۳۳۹
پورت یا شیرهای دستی	۳۳۹
انبساط آنتروپی ثابت	۳۴۰
راندمان توربین	۳۴۱
اژکتور خلأ	۳۴۱
تبدیل اندازه حرکت به فشار	۳۴۲

خلاصه..... ۳۴۳

۲۹- پمپ‌های سانتریفیوژ (گریز از مرکز)..... ۳۴۴

چکیده:..... ۳۴۴

کلمات کلیدی:..... ۳۴۴

سرعت، ارتفاع (هد) و فشار..... ۳۴۷

تبدیل سرعت به فشار جریان..... ۳۴۸

عملکرد پروانه پمپ..... ۳۴۹

تبدیل سرعت به هد..... ۳۵۰

رابطه هد با فشار خروجی..... ۳۵۱

منحنی پمپ..... ۳۵۲

پمپ‌های جابجایی مثبت..... ۳۵۴

جریان روغن آب‌بند به پمپ‌های بدون حرکت (کار)..... ۳۵۵

ملاحظات ایمنی..... ۳۵۵

مزایای NPSH در دسترس اضافی..... ۳۵۶

۳۰- پمپ‌های گریز از مرکز: NPSH مورد نیاز اولیه..... ۳۵۷

چکیده:..... ۳۵۷

کلمات کلیدی:..... ۳۵۷

مشکلات راه‌اندازی..... ۳۵۸

افت فشار سیال خط لوله و نازل..... ۳۶۰

ضریب بوپال..... ۳۶۲

علائم کاویتاسیون..... ۳۶۲

الزامات NPSH اولیه..... ۳۶۴

محاسبه NPSH مورد نیاز..... ۳۶۶

افزایش دبی فرآیند.....	۳۶۷
افزایش NPSH در دسترس اولیه در فلش درام واحد تقطیر نفت خام.....	۳۶۸
گام‌های عملی برای به حداقل رساندن کاویتاسیون.....	۳۶۸
خلاصه.....	۳۷۰
مثال‌هایی درباره چرخه NPSH.....	۳۶۹
NPSH مورد نیاز اولیه.....	۳۷۰
پاسخ.....	۳۷۰
حجم خط لوله.....	۳۷۲
کنترل فشار ورودی.....	۳۷۳
صافی‌های ورودی پمپ.....	۳۷۶
۳۱- طرز کار کمپرسورها.....	۳۷۸
چکیده:.....	۳۷۸
کمپرسورهای گریز از مرکز در مقایسه با کمپرسورهای محوری.....	۳۸۱
کمپرسورهای گریز از مرکز.....	۳۸۲
منحنی عملکرد کمپرسور گریز از مرکز.....	۳۸۳
توقف سرچ.....	۳۸۴
مزیت کنترل فشار مکش در کمپرسورهای گریز از مرکز.....	۳۸۵
شکل منحنی کمپرسور.....	۳۸۷
شیر ضد سرچ.....	۳۸۸
کمپرسورهای رفت و برگشتی.....	۳۸۹
چرخه کارنو.....	۳۹۲
پروفایل دما.....	۳۹۲
تنش بیش از حد بر روی میل‌پیستون.....	۳۹۲

۳۹۳..... سخن پایانی

۳۹۴..... ملاحظات ایمنی

۳۹۵..... **۳۲- علت وقوع پدیده سرج در کمپرسورهای گریز از مرکز**

۳۹۵..... چکیده:

۳۹۵..... کلمات کلیدی:

۳۹۸..... ملاقات دختران در هواپیما

۳۹۹..... سرج و افت سرعت آیرودینامیکی

۴۰۰..... دلایل سرج کمپرسور گریز از مرکز

۴۰۱..... هد پل تروپیک

۴۰۲..... اثر سرج

۴۰۲..... نقش شیر یکطرفه در خروجی کمپرسور

۴۰۳..... پیشگیری از وقوع سرج

۴۰۴..... واحد آلکیلاسیون من در تگزاس سیتی

۴۰۵..... کنترل کردن دمای جریان برگشتی بخار

۴۰۶..... خلاصه

۴۰۷..... **۳۳- سیستم تبرید**

۴۰۷..... چکیده:

۴۰۷..... کلمات کلیدی:

۴۰۸..... محدودیت تبرید

۴۰۹..... پالایشگاه الدورادو

۴۱۰..... شهر الدورادو

۴۱۲..... ترکیبات مبرد

۴۱۳..... افزایش فراریت مبرد

یک آزمایش ارزش هزاران محاسبه دارد ۴۱۵

محدودیت‌های کندانسور ۴۱۶

بیرون کشیدن مبرد ۴۱۶

رسوب گرفتگی ۴۱۷

مبرد اجباری ۴۱۸

نتیجه ۴۱۹

۳۴- کمپرسورهای رفت و برگشتی ۴۲۰

چکیده: ۴۲۰

کلمات کلیدی: ۴۲۰

فاصله آزاد حجمی اولیه ۴۲۱

چرخه کارنو ۴۲۳

فاصله آزاد حجمی اولیه ۴۲۶

سوپاپ‌های کمپرسور رفت و برگشتی ۴۲۷

انبساط گاز ۴۲۹

مکش ۴۲۹

دلایل ناکارآمدی تراکم ۴۳۰

عزیمت به خانه ۴۳۱

تنش بر روی میل پیستون ۴۳۲

محدودیت گردش بوتان ۴۳۳

اختلاف فشار در امتداد پیستون ۴۳۳

کار تراکمی ۴۳۵

تنش بیش از حد بر روی میل پیستون ۴۳۵

کارخانه پلاستیک آرلانکسئو ۴۳۶

کاربرد کنترل کامپیوتری..... ۴۳۷

تأثیر وزن مولکولی بر کمپرسورهای رفت و برگشتی..... ۴۳۷

دو ماه بعد..... ۴۳۹

تأثیر وزن مولکولی بر اندازه‌گیری جریان..... ۴۴۰

تأثیر وزن مولکولی بر کمپرسور رفت و برگشتی..... ۴۴۰

محدودیت دمای خروجی کمپرسور رفت و برگشتی..... ۴۴۱

۳۵- ارتعاشات خط لوله..... ۴۴۳

چکیده:..... ۴۴۳

کلمات کلیدی:..... ۴۴۳

ضربه قوچ بخار آب..... ۴۴۶

اجتناب از جریان لخته‌ای..... ۴۴۶

تأثیر تبخیر در هیتر..... ۴۴۷

نگهدارنده‌های لوله..... ۴۴۸

ارتعاشات شیر کنترل..... ۴۴۸

فرکانس طبیعی موزون..... ۴۴۹

۳۶- مشکلات اندازه‌گیری متغیرهای فرآیندی..... ۴۵۰

چکیده:..... ۴۵۰

کلمات کلیدی:..... ۴۵۰

فشارها..... ۴۵۱

اثر کاهش سرعت..... ۴۵۳

دما..... ۴۵۴

سطح مایعات..... ۴۵۶

دبی‌ها..... ۴۵۸

نمونه‌ها..... ۴۶۰

۳۷- تمیز کردن تجهیزات فرآیندی..... ۴۶۲

چکیده:..... ۴۶۲

کلمات کلیدی:..... ۴۶۲

ستون‌های تقطیر پر شده..... ۴۶۳

شستن برج‌های پر شده از پایین به بالا..... ۴۶۴

برج‌های سینی دار..... ۴۶۶

تمیز کردن سمت لوله مبدل‌های حرارتی..... ۴۶۷

آب‌فشانی (هیدروبلاست) دسته لوله‌های U شکل..... ۴۶۸

تمیز کاری با اسید..... ۴۶۹

تمیز کردن سمت پوسته..... ۴۷۰

کولرهای هوایی..... ۴۷۱

شست‌شوی نواری لوله‌های خنک‌کننده هوایی..... ۴۷۲

لوله‌های جابجایی هیتر احتراقی..... ۴۷۳

حذف کک از درون لوله‌های تشعشعی..... ۴۷۳

خرد کردن و آب‌فشانی کردن..... ۴۷۴

تمیز کردن سطح خارجی لوله‌های کوره..... ۴۷۵

روتور کمپرسور..... ۴۷۵

خلاصه..... ۴۷۶

۳۸- آموختن قواعد مهندسی فرآیند..... ۴۷۷

چکیده:..... ۴۷۷

کلمات کلیدی:..... ۴۷۷

وظیفه مهندس فرآیند..... ۴۷۹

شیوهٔ آموختن ۴۸۰

تعامل با اپراتورها ۴۸۲

یادگرفتن از کارکنان تعمیرات ۴۸۳

بازرسی داخل برج ۴۸۳

یادگیری از آزمون‌های عملکردی ۴۸۴

نتیجه ۴۸۶

۳۹- روش‌های تقریبی محاسبهٔ فرآیند ۴۸۷

افت فشار ۴۸۹

گرما ۴۹۰

وزن‌های مولکولی رایج ۴۹۰

حجم و وزن‌ها ۴۹۱

۴۰- چگونه یک ارائه فنی داشته باشید ۴۹۳

چکیده: ۴۹۳

کلمات کلیدی: ۴۹۳

قوانین نورم: ۴۹۴

جلوه‌های بصری ۴۹۵

آماده‌سازی جزوه ۴۹۶

مقدمهٔ ارائه شما ۴۹۷

تشریح محاسبات ۴۹۷

چینش فیزیکی ۴۹۸

فرضیات ۴۹۸

ارائهٔ معادلات ۴۹۸

٪۳۰ زمان شوخطبعی ۴۹۹

سؤال پرسیدن ۵۰۰

نظرات جنسیت زده ۵۰۱

تلفن های همراه ۵۰۲

۴۱- اصول ایمنی یک پالایشگاه ۵۰۳

چکیده: ۵۰۳

کلمات کلیدی: ۵۰۳

موقعیت مکانی شیر اطمینان ۵۰۴

نمایش سطح مایعات (لول) ۵۰۴

اندازه گیری جریان ۵۰۵

شرکت نفت بریتانیا سال ۲۰۰۵ - انفجار برج تفکیک رافینیت - شهر تگزاس ۵۰۶

پیش زمینه ۵۰۷

دلایل اصلی و بنیادین انفجار رافینیت ۵۰۸

ارتفاع سطح سیالات (لول) چگونه اندازه گیری می شود ۵۰۹

جرم ویژه در مقایسه با دما ۵۱۰

آیا فشار برج تفکیک، بیش از حد بود ۵۱۰

نمایانگر جریان پایین برج، معیوب بود ۵۱۱

لوپ آب بند ۵۱۲

سؤال نهایی ۵۱۲

۴۲- خطرات H_2S ، بخار آب، نیتروژن و آب داغ ۵۱۴

چکیده: ۵۱۴

کلمات کلیدی: ۵۱۴

آروبا - مناطق ساحلی ۵۱۵

شرکت نفت آمریکا - شهر تگزاس ۵۱۶

- پالایشگاه «X» - بای تاون، تگزاس..... ۵۱۶
- شرکت انرژی‌های تجدید پذیر افق سبز نورکو - لوئیزیانا..... ۵۱۷
- شرکت نفت آمریکا - تگزاس..... ۵۱۷
- کرپوس کریستی - مناطق ساحلی..... ۵۱۷
- پالایشگاه «X» - بومانت..... ۵۱۸
- شرکت نفت آمریکا-تگزاس سیتی..... ۵۱۸
- شرکت انرژی‌های تجدیدپذیر افق سبز نورکو - لوئیزیانا..... ۵۱۸
- آموکو - وایتینگ، ایندیانا..... ۵۱۹
- پالایشگاه یونوکال (سیتگو کنونی) - شیکاگو..... ۵۱۹
- نفت تنکو - نیواورلئان..... ۵۱۹
- پالایشگاه X - نورکو، لوئیزیانا..... ۵۲۰
- پالایشگاه یونوکال (سیتگو کنونی) - شیکاگو..... ۵۲۰
- یک تجربه شخصی نزدیک به مرگ..... ۵۲۱
- کار کردن برای ایمنی..... ۵۲۱
- ۴۲- ایمنی - نگرش یا مهندسی؟..... ۵۲۳
- چکیده:..... ۵۲۳
- کلمات کلیدی:..... ۵۲۳
- آلکیلاسیون اسید سولفوریک..... ۵۲۴
- مرطوب در مقایسه با خشک..... ۵۲۵
- دستورالعمل راه‌اندازی برج پروپان‌زدا..... ۵۲۵
- یک خطای طراحی..... ۵۲۶
- تغییرات طراحی اصلاحی..... ۵۲۷
- خلاصه..... ۵۲۷

۴۴- خطرات کنترل فرآیند نامناسب..... ۵۲۹

چکیده:..... ۵۲۹

کلمات کلیدی:..... ۵۲۹

برج دفع HF واحد آلکیلاسیون..... ۵۳۰

کربنات‌ها در آب خوراک بویلر..... ۵۳۲

فشار کلاهدک مجاری ریبویلر..... ۵۳۲

عواقب نشتی در لوله‌ها..... ۵۳۳

شیر تخلیه میعانات..... ۵۳۳

اصلاح طراحی..... ۵۳۴

تله بخار..... ۵۳۴

۴۵- ایمنی فرآیندی پالایشگاه..... ۵۳۶

چکیده:..... ۵۳۶

کلمات کلیدی:..... ۵۳۶

عملیات واحد آلکیلاسیون با سولفوریک اسید..... ۵۳۸

طراحی واحد آلکیلاسیون..... ۵۳۸

ماهیت اسید سولفوریک..... ۵۳۹

تصحیح دستورالعمل راه اندازی واحد..... ۵۴۰

واحد آلکیلاسیون شماره ۲ _ تگزاس..... ۵۴۱

حادثه اول..... ۵۴۱

حادثه دوم..... ۵۴۲

حادثه سوم..... ۵۴۳

حادثه چهارم و آخر..... ۵۴۳

درسی که آموختم..... ۵۴۴

سخن آخر..... ۵۴۵

ملاحظات ایمنی..... ۵۴۵

ملاحظات ایمنی..... ۵۴۵

۴۶- جلوگیری از مرگ و فاجعه..... ۵۴۷

چکیده:..... ۵۴۷

کلمات کلیدی:..... ۵۴۷

شرکت نفت بریتانیا - فوران سکوی نفتی شناور دیپواترهایزون..... ۵۴۹

پالایشگاه نفت بریتانیا شهر تگزاس - انفجار برج تفکیک رافینیت..... ۵۵۰

پالایشگاه یونوکال (سیتگو کنونی) - شیکاگو - خرابی برج استخراج آمین-LPG..... ۵۵۲

انفجار نورکو - شرکت نفت شل..... ۵۵۴

فاجعه یونیون کاربید- بوپال..... ۵۵۶

شهر تگزاس، آموکو- مرگ توسط نیتروژن..... ۵۵۸

خلاصه..... ۵۵۹

۴۷- نقش مهندسی ما در عصر گرمایش جهانی..... ۵۶۰

چکیده:..... ۵۶۰

توضیح به پرسنل مدیریتی پالایشگاه..... ۵۶۲

شروع حیات..... ۵۶۲

فتوسنتز:..... ۵۶۳

چه اتفاقی برای اکسیژن افتاد..... ۵۶۳

نتایج افزایش اکسیژن در جو..... ۵۶۴

غلظت کنونی CO₂ در اتمسفر..... ۵۶۵

کاهش انتشار گرما توسط U-۲۳۵..... ۵۶۶

توزیع کننده CO₂..... ۵۶۶

۵۶۷..... پروژه‌های بقاء انرژی

۵۶۸..... پتانسیل تولید CO2

۵۶۹..... چرخه بازخورد مثبت

۵۶۹..... مشکل زمان

۵۷۰..... منابع:

۵۷۱..... ۴۸- ممانعت از انتشار CO2

۵۷۱..... چکیده:

۵۷۱..... کلمات کلیدی:

۵۷۸..... راندمان سینی برج تقطیر

۵۷۸..... طراحی مبدل حرارتی

۵۸۰..... هیترهای احتراقی - اکسیژن اضافی

۵۸۱..... نشت هوای سرگردان - ناحیه تشعشعی

۵۸۲..... نشت هوای سرگردان به ناحیه جابجایی

۵۸۳..... سیستم‌های خلأ

۵۸۴..... خنک‌کن‌های هوایی

۵۸۶..... کمپرسورهای گریز از مرکز

۵۸۷..... کمپرسورهای رفت و برگشتی

۵۸۸..... گسترش آینده بشر بر روی سیاره زمین

۵۸۹..... تراز بودن کف سینی‌ها

۵۸۹..... استفاده از بندهای نردهای

۵۹۰..... بهینه‌سازی فشار در برج‌های تقطیر

۵۹۰..... مبدل‌های حرارتی - سمت پوسته

۵۹۱..... مبدل حرارتی - سمت لوله

- هیت‌های احتراقی ۵۹۲
- توربین‌های بخار استخراجی ۵۹۲
- توربین‌های بخار ۵۹۳
- موتور محرکه پمپ‌های گریز از مرکز ۵۹۴
- کمپرسورهای گریز از مرکز دور- ثابت ۵۹۴
- کمپرسورهای رفت و برگشتی ۵۹۵
- بازیابی میعان‌ات بخار آب ۵۹۵



مقدمه: طراحی آفرینش جهان

جهان ما ۱۳۴۸۰۰۰۰۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح بر اثر انفجار بزرگ (بیگ بنگ) به وجود آمد. کسری از انرژی در پروتون‌ها، نوترون‌ها، الکترون‌ها و فوتون‌ها به هم آمیخت. این ذرات ساده و اولیه، قابلیت تبدیل شدن به اشکالی نظیر هیدروژن، اکسیژن، کربن و در نهایت ستارگان، سیارات و زندگی را با همه پیچیدگی‌ها و زیبایی‌هایش داشتند. خالق، محصولات بیگ‌بنگ را قادر ساخت تا به درختان و قورباغه‌ها تبدیل شوند. بدین ترتیب خالق جهان اجازه داد تا بدون هیچ دخالتی دئوکسی ریبونوکلیک اسید^۱ها به من و شما تبدیل شوند.

من به عنوان یک مهندس طراح، نقشی مشابه را بر عهده دارم. من به طراحی فرآیندهای مختلف در واحدهای پالایشگاهی می‌پردازم. بعد از رسم نمودارهای جریان فرآیند^۲ و برگه‌های ثبت داده^۳، مخلوقاتی را که خلق کرده‌ام به دست اپراتورها و مهندسان می‌سپارم و آن‌ها را ترک می‌کنم. من به ندرت نحوه کارکرد واحدی را که طراحی کرده‌ام، بررسی یا اصلاح می‌کنم.

فناوری توسعه می‌یابد. مشخصات محصول تغییر می‌کند. تجهیزات خورده می‌شوند و کاتالیست‌های جدید، توسعه خواهند یافت و طراحی‌های اصلی من به تدریج منسوخ می‌شود. این طبیعت جهان و سیاره ماست.

اما گاهی اوقات تمایل دارم تا اصول بنیادی طراحی اصلی خود را به اپراتورهای فرآیند و مهندسان بخش پشتیبانی فنی یادآوری کنم. این کتاب به همین دلیل نگارش شده است. کتاب حاضر، شامل هیچ ایده جدید یا فناوری مدرنی نیست. این کتاب صدایی از گذشته برای یادآوری مفاهیم اساسی مهندسی فرآیند به خواننده است. این مفاهیم، پایه و اساس عملکرد واحدهایی است که ما در آن کار می‌کنیم.

^۱ دئوکسی ریبو نوکلئیک اسید: DNA

^۲ نمودار جریان فرآیند، PFD: Process Flow Diagram

^۳ Data Sheet: برگه‌های ثبت داده



پیش گفتار مؤلف:

من همیشه می‌خواستم به فردی مهم تبدیل شوم. می‌خواستم به جلسات و ملاقات‌های مهم با افراد مهم دیگر بروم. آرزو داشتم رهبر یک تیم یا یک مدیر باشم؛ به فردی بسیار مهم تبدیل شوم یا حتی روزی یک مدیرعامل یا مدیر عملیات باشم و در حقیقت به جای کانکس یک دفتر برای خودم می‌خواستم.

بنابراین در سال ۱۹۸۰ پس از ۱۶ سال تجربه و خدمت در شرکت نفت آمریکا^۱ واقع در شیکاگو^۲ آن را ترک کردم. من در پالایشگاه گود هوپ^۳ واقع در لوئیزیانا^۴ به عنوان مدیر خدمات فنی، استخدام شده بودم. تعداد ۱۸ نفر پرسنل، زیر نظر من در واحدی که مشغول بودم، کار می‌کردند. آن‌ها اکثراً جوان بودند و به من گزارش کار ارائه می‌دادند. چند روز پس از تصدی در سمت جدیدم، یکی از اعضای گروه‌هم به دفترم مراجعه کرد و پس از در زدن گفت:

«ببخشید جناب لیبرمن^۵! یک لحظه وقت دارید؟ امکان دارد برایم توضیح دهید چگونه افت فشار^۶ ناشی از جریان آب را در یک لوله محاسبه می‌کنند؟»

«باشه دیو^۷. من بعد از نهار برمی‌گردم و با تو صحبت می‌کنم.»

اما من هیچ وقت برنگشتم. چرا که طریقه محاسبه افت فشار (DP) ناشی از جریان در یک لوله پخش‌کننده بدون هیچگونه برآمدگی^۸ را نمی‌دانستم. من نمی‌فهمیدم که DP، عمدتاً ناشی از شتاب گرفتن، تلاطم و اصطکاک آب در داخل لوله است.

^۱ نفت آمریکا: American Oil

^۲ شیکاگو: Chicago

^۳ پالایشگاه گود هوپ: Good Hope Refinery

^۴ لوئیزیانا: Louisiana

^۵ لیبرمن: Lieberman

^۶ افت فشار، DP: Pressure Drop

^۷ دیو: Dave

^۸ لوله پخش‌کننده بدون برآمدگی: Smooth Hole

این ماجرا بعد از ۱۶ سال کار به عنوان مهندس ارشد فرآیند در شرکت نفت آمریکا برایم اتفاق افتاد. یعنی پس از اخذ مدرک کارشناسی ارشد از دانشگاه پردو^۱، گذراندن دوره کارشناسی در کالج کوپر یونیون^۲ واقع در نیویورک^۳ که یکی از بهترین کالج‌های امارات متحده آمریکاست.

همان‌طور که در جایگاه ویژه دفترم نشسته بودم، مشغول تهیه جدولی شدم که شامل محاسبات فرآیندی سایر مواردی بود که نمی‌دانستم چگونه آن‌ها را بدون کمک گرفتن از شبیه‌سازهای کامپیوتری انجام دهم. سپس متوجه شدم دلیل این که نمی‌دانم چگونه محاسبات اساسی را انجام دهم این است که هیچ درکی از نحوه کارکرد تجهیزات فرآیندی یا حتی دنیای پیرامون‌مان ندارم.

برای مثال من نمی‌دانستم که:

۱. چه عواملی باعث ایجاد درافت^۴ در هیترهای احتراقی^۵ می‌شود؟
۲. چه عواملی سبب ایجاد گردش ترموسیفون^۶ در ریویلرها^۷ می‌شوند؟
۳. چه عواملی بر راندمان جداسازی سینی‌های^۸ تقطیر تاثیر دارد؟
۴. چرا انتقال حرارت در کندانسورها به دلیل تجمع گازهای غیرقابل چگالش کاهش می‌یابد؟
۵. چرا تجمع میعان‌ات در کندانسورهای سطحی، توربین‌ها را کند می‌کند؟
۶. چرا در تیوب هیترهای احتراقی^۹، کک^{۱۰} تشکیل شده و باعث سوراخ شدن تیوب می‌شود؟
۷. چه عواملی باعث خراب شدن آب‌بند مکانیکی^{۱۱} پمپ می‌شود؟
۸. چه عواملی سبب ایجاد پدیده سرج^{۱۲} در کمپرسورهای گریز از مرکز و خرابی آن‌ها می‌شود؟
۹. نحوه عملکرد عریان‌سازهای بخار آب^{۱۳} چگونه است؟

^۱ Purdue: پردو

^۲ Cooper Union: کالج کوپر یونیون

^۳ New York: نیویورک

^۴ Draft: مکش، درافت

^۵ Fired Heaters: هیترهای احتراقی

^۶ Thermosyphon Circulation: گردش ترموسیفون، اگر بخشی از مایع تبخیر شود، این مایع به ارتفاع بالاتری جریان می‌یابد. نیروی رانش آن اختلاف چگالی بین مایع چگال تر و مخلوط مایع و بخار کم چگال تر می‌باشد.

^۷ Reboiler: ریویلر، جوشاننده، منبع گرمای ورودی به یک برج تقطیر

^۸ Tray: سینی

^۹ Furnace: کوره

^{۱۰} Coke-up: تشکیل کک

^{۱۱} Mechanical Seal: آب‌بند مکانیکی

^{۱۲} Surge: پدیده سرج، موج غلتان، یک حالت عملیاتی ناپایدار و خطرناک یک کمپرسور گریز از مرکز می‌باشد.

^{۱۳} Steam strippers: عریان‌سازهای بخار آب

۱۰. تجهیزات پالایشگاهی چگونه از قوانین ترمودینامیکی پیروی می‌کنند؟

۱۱. نحوه عملکرد اژکتورهای خلأ^۱ چگونه است؟

۱۲. دلایل استفاده از حلقه‌های بازخورد مثبت در سیستم‌های کنترلی چیست؟

۱۳. انسداد بخار^۲ چیست؟

۱۴. جریان^۳ و ارتفاع سطح سیال^۴ چگونه اندازه‌گیری می‌شوند؟

بنابراین تصمیمی گرفتم. یا می‌توانم یک مدیر خدمات فنی مهم شوم و در جلسات مهم با سایر مدیران والامقام شرکت کنم یا این که می‌توانم نحوه عملکرد تجهیزات فرآیندی را یاد بگیرم. اکنون پس از ۴۰ سال، هنوز هم در حال یادگیری هستم. هر بار که برای عیب‌یابی به یک واحد فرآیندی می‌روم، چیز جدیدی یاد می‌گیرم. چیزی هیجان‌انگیز و خارق‌العاده که باعث می‌شود مهندس بهتری شوم. هدف اصلی من در این فصول، به اشتراک‌گذاری دانش و تجربه شخصی‌ام در مورد اصول و مبانی تجهیزات فرآیندی است. اگر به عنوان یک اپراتور نمی‌توانید شرح دهید که تجهیزات فرآیندی چگونه کار می‌کنند، به این معناست که خودتان هنوز آن را یاد نگرفته‌اید.

شبیه‌سازی‌های کامپیوتری و مدل‌سازی‌های رایانه‌ای جایگزین خوبی برای بررسی و حل موارد پیچیده هستند. اما برای داشتن درک اساسی از مبانی و اصول مهندسی شیمی به هیچ وجه کافی نیستند. امیدوارم که این کتاب، شما را در مسیر دانش و درک بیشتر مسائلی که امروزه شخصاً در حال یادگیری و حل آن‌ها هستم، یاری کند.

باعث افتخار است که سوالات خود در مورد متن این کتاب و یا مسائل مرتبط با کارتان را بپرسید تا پاسخگویتان باشم.

NORM LIBERMAN

norm@liberman-eng.com

^۱ Vacuum Ejector: اژکتورهای خلأ

^۲ Vapor Lock: انسداد بخار

^۳ Flow: جریان

^۴ Level: لول، ارتفاع سطح سیال، تراز



پیش گفتار مترجمان:

سپاس خداوند مهربان را که به انسان توانایی و دانایی بخشید تا به بندگان شفق و دردت، مهربانی کند و در حل مشکلاتشان یاریشان نماید؛ از راحت خویش بگذرد و آسایش هم‌نوعان را مقدم دارد؛ با او معامله کند و در این خلوص انباز نگیرد و خوش باشد که پروردگار سمیع و بصیر است. ترجمه متون لاتین کاری بس دشوار، وقت گیر و به مراتب سخت‌تر از تألیف آن‌هاست چرا که علاوه بر تسلط کامل بر مطالب اصلی کتاب، انتخاب مناسب‌ترین و ساده‌ترین کلمات برای فهماندن مقصود مولف به خواننده، زمان‌بر است. به همین دلیل، ترجمه مراجع لاتین در حوزه صنعت بسیار محدودتر از کتب تألیفی به زبان فارسی است. تمام سختی‌های این کار را به جان خریدیم تا نتیجه آن را از صمیم قلب به مهندسان و اپراتورهای واحدهای بهره‌برداری پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس تقدیم کنیم؛ آنان که بخش اعظم عمر مفیدشان به جای محیط خانواده و دوستان، در خدمت صنعت سپری می‌شود. نفرات شیفت‌های کاری که تعهد آن‌ها به وظیفه‌شان سبب شده، حتی زمان تحویل سال به جای آن که در کنار خانواده و عزیزان‌شان باشند و چشم‌شان به ساعت باشد تا لحظه تحویل سال را جشن بگیرند، چشم به گیج فشار، دما و جریان عبوری بدوزند تا چرخ صنعت روان بچرخد و به معیشت مردم ایران فشاری وارد نشود. همان کسانی که در زمان شیوع ویروس کرونا، حتی یک روز شغل خود را ترک نکردند و بار دیگر در مسیر تحقق شعار تا پای جان برای ایران، غیرت و شرف خود را به همگان نشان دادند. همانان که ممکن است اولین اشتباه‌شان فارغ از ضرر و زیان مالی به قیمت جان‌شان تمام شود. همان کسانی که ...

همچنین کمال تشکر و قدردانی صمیمانه از مدیریت پژوهش و توسعه شرکت نفت ستاره خلیج فارس به دلیل همراهی، بازخوانی و تلاش در راستای ارتقاء سطح علمی کتاب را به عمل می‌آوریم.

مهندسی فرآیند بیشتر یک مهارت است تا یک علم. از این رو استادانی که کتاب‌های مرجع را می‌نویسند و در کلاس‌های مهندسی به تدریس می‌پردازند، اما فاقد تجربه میدانی در زمینه عیب‌یابی مشکلات فرآیندی هستند، در تحقق هدف خود، که آماده‌سازی مردان و زنان جوان برای حل مشکلات فرآیندی صنایع مختلف است، موفق نخواهند بود. اگر یک مهندس فرآیند، قادر به درک نواقص تجهیزات فرآیندی و به ویژه مشکلات کنترل فرآیند نباشد، برای طراحی تجهیزات جدید یا فعالیت به عنوان سرپرست یک واحد بهره‌برداری آماده نخواهد بود. عمده مطالب آورده شده در این کتاب، نحوه عملکرد تجهیزات فرآیندی را به صورت مثال‌های عملی و نمونه‌های آموزنده، به اپراتورها و مهندسان فرآیند، آموزش می‌دهد. از آن‌جا که اغلب مشکلات ایجادشده در واحدهای فرآیندی باید توسط مهندسان واحد حل شوند، این کتاب روش‌های موفق را برای اجرای برخی از این راه‌حل‌ها ارائه می‌دهد.

مفاهیم توضیح داده شده، بر اساس تجارب شخصی و میدانی جناب آقای مهندس نورمن لیبرمن با بیش از ۵۸ سال سابقه در زمینه بهره‌برداری از تجهیزات و واحدهای فرآیندی است. در این کتاب همچنین توضیحاتی در مورد عملکرد انواع تجهیزات از جمله هیترها، کوره‌های احتراق، پمپ‌های گریز از مرکز، برج‌های تقطیر، جت‌های خلأ، کمپرسورهای رفت و برگشتی، توربین‌های بخار، ریپویلرها، کولرهای هوایی و ... ارائه می‌شود. تمامی تصاویر مورد استفاده در کتاب لاتین با نرم افزار ویزیو بازطراحی شده‌اند تا خواننده علاوه بر مطالعه ترجمه لغات به کاربرده شده در تصاویر، احساس بهتری را نسبت به تصاویر کم کیفیت و کپی شده تجربه کند.

ترجمه حاضر را بری از عیب و خطا نمی‌دانیم و امیدواریم ما را از نقطه نظرات و پیشنهادات سودمند خود برای رفع هرگونه مشکلات احتمالی، آگاه سازید.

مهدی زارع بردج - سروش دیگلی

mehttizaremohandesi@gmail.com

شماره تماس: ۰۹۱۷۵۹۰۰۸۴۹

تقدیم به باغبانان باغ آهنی مهندسان نفت و شیمی

اصول پایه عملیات‌های فرآیندی و مهندسی

چکیده:

بهینه‌سازی هوای اضافی در یک هیتر احتراقی. به حداقل رساندن انتشار اکسیدهای نیتروژن. پیش‌گرمایش هوا می‌تواند سبب صرفه‌جویی در مصرف انرژی شود، اما ظرفیت هیتر را کاهش می‌دهد. توربین‌های بخار، محتوای گرمای بخار آب را به کار تبدیل می‌کنند. استفاده از بخار آب مافوق گرم برای توربین، توان خروجی آن را کاهش می‌دهد. افزایش بار حرارتی ریبویلر، می‌تواند از طغیان برج تقطیر جلوگیری کند. گرمای نهان بخار آب در فشارهای بالاتر کاهش می‌یابد. کاهش وزن مولکولی گاز باعث افزایش پدیدهٔ سرج در کمپرسورهای گریز از مرکز می‌شود.

کلمات کلیدی:

گرمای نهان؛ پدیدهٔ سرج؛ کمپرسور؛ تقطیر؛ انتقال حرارت؛ ترمودینامیک؛ پیش‌گرمایش هوا

راستش را بخواهید، شما وقت‌تان را در طول ۴ سال دورهٔ دانشگاهی برای اخذ مدرک مهندسی یا در طول ۲ سال کارآموزی در کلاس‌های آموزشی کارورزی تلف می‌کنید. این موضوع تقصیر من نیست. اما هم اکنون باید به‌عنوان یک مهندس فرآیند در پالایشگاه یا یک کارمند محوطه در مجتمع پتروشیمی بدانید که پمپ‌ها، کمپرسورها، مبدل‌های حرارتی، برج‌های تقطیر، کولرهای هوایی، هیترها یا گرم‌کن‌های حرارتی، بویلرهای بخار^۱، توربین‌ها و اژکتورهای خلأ در واقع کار شما را انجام می‌دهند.

دلیل این که متوجه نشدید که استادتان در مورد نحوهٔ عملکرد تجهیزات فرآیندی چه می‌گوید، این است که خود او نیز این موضوع را متوجه نشده است. هر چه را که می‌نویسم، از تجربیات و مشاهدات میدانی خودم نشأت گرفته است. برای مثال:

۱. افزایش بیش از حد هوای احتراق^۲ در هیترهای احتراقی^۳ باعث می‌شود که لوله‌های درون محفظهٔ احتراق خنک شوند؛ اما بار فرآیندی جذب‌شده توسط هیتر افزایش می‌یابد.
۲. می‌توان اکسیدهای نیتروژن (NO_x) را با افزایش جریان هوا در ورودی هوای^۴ ثانویه و کاهش جریان هوا در ورودی هوای اولیه کاهش داد.
۳. پیش‌گرمایش هوای احتراق در یک هیتر، موجب کاهش ظرفیت جذب حرارتی آن می‌شود.
۴. انرژی لازم برای چرخش یک توربین بخار از فشار بخار آب به دست نمی‌آید؛ بلکه منشأ آن گرمای محسوس بخار آب است.
۵. استفاده از بخار آب مافوق گرم^۵ در توربین بخار سبب کاهش سرعت توربین می‌شود.
۶. اژکتور خلأ بخار آب در واقع نوعی کمپرسور گازی چند مرحله‌ای است؛ اما در این دستگاه، قطعاً مکانیکی متحرک وجود ندارد.
۷. یکی از راه‌های جلوگیری از طغیان^۶ برج تقطیر، افزایش بار حرارتی ریبویلر^۷ است.

^۱ Steam boiler: بویلرهای بخار

^۲ Combustion Air: هوای احتراق

^۳ Fired Heaters: هیترهای احتراقی

^۴ Air register: ورودی هوا

^۵ Superheating steam: بخار مافوق گرم

^۶ Flooding: طغیان

^۷ Reboiler: ریبویلر، جوشاننده، منبع گرمای ورودی به یک برج تقطیر

۸. با ثابت ماندن بار حرارتی ریپویلر، کاهش دمای بالای برج تقطیر ضمن رفلاکس^۱ بیشتر، جریان بخار را زیاده‌تر می‌کند.
۹. سینی‌های کلاهکی^۲ قدیمی در مقایسه با انواع جدید خود، راندمان جداسازی بهتر و افت فشار کمتری دارند.
۱۰. برای راه‌اندازی پمپ گریز از مرکز لازم است فشار ورودی^۳ پمپ کنترل شود؛ نه فشار تخلیه^۴ آن.
۱۱. مقدار هد^۵ پمپ‌های گریز از مرکز، با تغییر چگالی مایع پمپ‌شده، تغییر نمی‌کند.
۱۲. افزایش بار بر روی یک الکترو موتور پمپ فعلی با جریان متناوب، سرعت آن را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.
۱۳. پمپ‌های موتوری گریز از مرکز ساخت آمریکا در مقایسه با پمپ‌های اروپایی ۲۰ درصد سریع‌تر هستند. چرا؟ چون آمریکایی هستند.
۱۴. ظرفیت یک ریپویلر بوتان با وجود خوردگی جزئی در تیوب‌های قدیمی آن، در مقایسه با ریپویلری با لوله‌های کاملاً جدید، بیشتر است.
۱۵. وجود مقدار کمی هوا یا CO₂ در بخار آب باعث می‌شود که ظرفیت ریپویلر بخار آب یا کندانسور سطحی توربین بخار، ۵۰ درصد کمتر شود.
۱۶. گرمای نهان^۶ چگالش بخار آب، به محض کاهش فشار بخار آب به شدت بالا می‌رود.
۱۷. دمای خوداشتعالی بنزین^۷، به شدت بالاتر از قیر است.
۱۸. هیدروژن با منبسط‌شدن گرم می‌شود؛ اما بقیه گازها با منبسط‌شدن سرد می‌شوند.
۱۹. با کاهش وزن مولکولی گاز، احتمال وقوع پدیده سرج^۸ در کمپرسورهای گریز از مرکز افزایش پیدا می‌کند.

رفلاکس، جریان برگشتی، روشی در تقطیر صنعتی و آزمایشگاهی است که طی آن بخارات خروجی از انتهای برج تقطیر پس از سرد شدن در Reflux^۱ خنک‌کننده، مجدداً به برج تقطیر بازگردانده می‌شود.

^۲ Bubble Cap Trays: سینی‌های کلاهکی

^۳ Suction Pressure: فشار مکش

^۴ Discharge Pressure: فشار تخلیه

^۵ Head: هد، میزان ارتفاع حداکثری که یک پمپ می‌تواند با غلبه بر جاذبه، سیال را به آن ارتفاع ارسال کند.

^۶ Latent Heat: گرمای نهان، گرمایی است که ماده در هنگام تبدیل از حالتی به حالت دیگر از دست داده یا جذب می‌کند. نام دیگر گرمای نهان «گذار» است.

^۷ Autoignition Temperature: دمای خوداشتعالی، پایین‌ترین دمای است که یک ماده بدون هیچ محرک خارجی مانند جرقه یا شعله در جو معمولی خود به خود آتش می‌گیرد.

^۸ Surge: سرج، بروز ناپایداری در جریان عبوری از کمپرسور می‌تواند باعث شود که فشار خروجی تولید شده توسط کمپرسور کمتر از فشار پایین دست آن شود. در این حالت گاز خروجی به درون کمپرسور برگشت می‌کند و یک حرکت سیکلی در جریان گاز ایجاد خواهد شد. به عبارت دیگر پدیده سرج زمانی اتفاق می‌افتد که کمپرسور قادر به تولید هد کافی جهت غلبه بر مقاومت پایین دست خود نباشد.

۲۰. بستن جزئی ولو^۱ خروجی آب خنک‌کننده در مبدلی که ۶۰ فوت بالاتر از زمین نصب شده است، می‌تواند باعث افزایش جریان آب آن شود.
۲۱. افزایش ارتفاع سطح^۲ مایع در بویلر^۳، ممکن است سبب کاهش نشان‌گر سطح بویلر و باز شدن ولو کنترل سطح آب خوراک بویلر^۴ شود؛ حتی اگر ارتفاع سطح فعلی مایع بویلر بیش از مقدار لازم باشد.
۲۲. اگر وزن مولکولی گاز کاهش یابد، حتی در صورتی که حجم واقعی جریان گاز تغییر نکرده باشد، جریان سنج گاز، کاهش نرخ شارش گاز^۵ را نشان خواهد داد.
۲۳. ممکن است در قسمت فوقانی محفظه احتراق هیتز، فشاری بالاتر از فشار اتمسفر ایجاد شود؛ گرچه خلأ قابل توجهی در قسمت پایینی محفظه احتراق هیتز^۶ وجود داشته باشد.
۲۴. با افزایش گرمای ورودی مبدل، احتمال کاهش نرخ گردش ترموسیفون وجود دارد.
۲۵. کاهش فشار عملیاتی برج، روشی کارآمد برای افزایش راندمان تفکیک برج تقطیر است.
۲۶. در کمپرسور گریز از مرکز، آمپر^۷ موتور با افزایش وزن مولکولی زیادتر می‌شود؛ اما در کمپرسور رفت‌و برگشتی با افزایش وزن مولکولی، آمپر موتور^۸ کاهش می‌یابد.
۲۷. رسوب‌گرفتنی لوله‌های پره‌دار^۹ موجود بر روی یک خنک‌کننده هوایی جریان اجباری^{۱۰}، علی‌رغم کاهش شدید جریان هوای خنک‌کننده از دسته لوله، بار آمپر موتور فن را افزایش نمی‌دهد.
۲۸. احتمال دارد فشار خروجی مبدل حرارتی بیشتر از فشار ورودی باشد؛ حتی اگر هر دو نقطه فشار، ارتفاع برابری داشته باشند.
۲۹. معمولاً بستن یک ولو کنارگذر^{۱۱} در اطراف کندانسور، باعث کاهش فشار بالادستی کندانسور می‌شود.

^۱ Valve: ولو، شیر

^۲ Level: ارتفاع سطح مایع، لول

^۳ Boiler: دیگ بخار، جوشاننده

^۴ Boiler feed water: آب خوراک بویلر

^۵ Gas Flow Rate: نرخ شارش گاز

^۶ heater's firebox: محفظه احتراق هیتز

^۷ Amps, Ampere: (آمپر): مقدار جریانی که موتور در بار نامی، ولتاژ و فرکانس نامی از شبکه الکتریکی دریافت می‌کند.

^۸ Reciprocating Compressor: کمپرسور رفت‌و برگشتی یا کمپرسور پیستونی، به کمپرسورهایی با جابه‌جایی مثبت اطلاق می‌شود که در آن پیستون‌ها در میل‌لنگ حرکتی دورانی ایجاد کرده و باعث رساندن گاز به فشار بالا می‌شود.

^۹ Fin tubes: لوله‌های پره‌دار، لوله‌هایی که سطح تیوب‌های آن‌ها، دنداندار یا گسترده می‌باشد.

^{۱۰} Forced Draft Air Cooler: مبدل خنک‌کننده هوایی دمشی یا جریان اجباری هوا، بوسیله مکش فن از بالا در برج‌های خنک‌کننده

^{۱۱} By-Pass Valve: شیر بای‌پس، شیر کمکی، ولو فرعی، ولو گذرگاه

شاید نکات مذکور برایتان باورنکردنی باشد. اصول فرآیندی مربوط به تک تک آن‌ها را در فصل‌های بعدی توضیح خواهیم داد. کاربرد این مفاهیم و سایر مفاهیمی که در فصل‌های بعدی به آن‌ها می‌پردازم، باعث می‌شود که بسیاری از مشکلات فرآیندی حل شده و ظرفیت و کارایی صدها واحد فرآیندی نیز بیشتر شود.

فکر می‌کنم بیشتر افراد شبیه من هستند. متوجه شده‌ام که یادگیری مطالب جدید با خواندن، گوش دادن (یا فقط دیدن)، کاری دشوار است. اما وقتی برای حل یک مشکل از تلاش و فکر خودم استفاده می‌کنم، تا آخر عمرم آن راه حل در خاطرم می‌ماند و آن را یاد می‌گیرم. به عنوان شخصی که از سال ۱۹۶۴ بی‌وقفه مشغول حل مشکلات مهندسی فرآیند در این زمینه بوده‌ام، به شما می‌گویم که روش فوق به معنای فرصت‌های بسیاری برای یادگیری است.

جای بسی خوشحالی است که در صنعتی مشغول فعالیت هستیم که در آن، ماهیت تجهیزات در طول شش دهه گذشته تغییر چندانی نکرده است. برای این که بتوانید به اپراتور یا مهندس فرآیندی ماهر تبدیل شوید، همچنان زمان و عزم جزم، موضوع مهمی هستند و اعتقاد دارم مادامی که تلاش کنیم تا ماهیت هیدروکربن‌ها، مواد معدنی، آب و هوا را مطابق اهداف انسانی خود تغییر دهیم؛ این موضوع همیشه صادق خواهد بود.

چیزهایی که در مورد آن‌ها نگرانم

پیچیده‌ترین فعالیتی که بشر می‌تواند انجام دهد، عیب‌یابی تجهیزات فرآیندی پالایشگاه است. ۵۴ سال است که در این حیطه فعالیت می‌کنم و به سختی توانستم بفهمم که چه کار می‌کنم. مشکل اصلی اینجاست که معمولاً تجهیزات فرآیندی در مرحله اول به خوبی طراحی نمی‌شوند. پس از آن نیز اشتباهات اولیه طراحی با موارد زیر ترکیب می‌شوند:

- خوردگی^۱؛
- جرم‌گرفتگی^۲؛
- عملکرد نادرست؛
- شرایط متغیر محیطی؛
- خوراک پیش‌بینی نشده؛

^۱ Corrosion: خوردگی

^۲ Fouling: جرم‌گرفتگی

• تغییر مشخصات محصول؛

علی‌رغم تجارب زیادی که در این موضوع داشتم، اغلب برای حل مشکلات فرآیندی دعا می‌کنم. هرچند متوجه شده‌ام به جای این که منتظر امدادهای غیبی باشم، بهتر است بعضی از اصول اولیه فرآیندی را یاد بگیرم؛ از جمله:

- چگونه باد روی مکش^۱ تأثیر می‌گذارد؟
- چگونه بار حرارتی ری‌بویلر^۲ بر گردش ترموسیفون اثر می‌گذارد؟
- چگونه گازهای تراکم‌ناپذیر موجب انسداد بخار^۳ در کندانسورهای بخار آب می‌شوند؟
- چه چیزی راندمان تفکیک سینی را تعیین می‌کند؟
- نقش واقعی بخار آب در عریان‌سازهای^۴ بخار آب چیست؟
- پمپ‌های گریز از مرکز چگونه انرژی را به فشار تبدیل می‌کنند؟
- چگونه می‌توان توربین‌های بخار آب و موتورهای بخار آب را به لحاظ ترمودینامیکی توصیف کرد؟
- تأثیر رفلکس بر جریان بخار در یک ستون تقطیر چیست؟
- چه عاملی باعث وقوع پدیده سرج (تلاطم و بازگشت مولکول‌های گاز) در کمپرسورهای گریز از مرکز می‌شود؟
- چگونه هیتر احتراقی که مملو از سوخت شده و دود سیاه و آتش از دودکش^۵ آن خارج می‌شود، منفجر نمی‌شود؟

همچنین، در مورد ایمنی فرآیند نیز به طور مفصل بحث خواهم کرد. فصل آخر این نوشتار، بر اساس تجارب عدیده بد پالایشگاهی من، به بررسی مشکلات خاصی می‌پردازد.

آینده بدون پالایشگاه‌ها

دنای من، یعنی دنیایی که با وسایل نقلیه هیدروکربن‌سوز احاطه شده است، در طول ۲۰ یا ۳۰ سال آینده به پایان

^۱ مکش، درافت: Draft

^۲ ری‌بویلر، جوشاننده، منبع گرمای ورودی به یک برج تقطیر: Reboiler

^۳ انسداد بخار: Vapor Binding

^۴ عریان‌سازهای بخار آب: Steam strippers

^۵ دودکش: Stack

می‌رسد. بسیاری از اطلاعاتی که در مورد واحدهای کک‌سازی تأخیری^۱، واحدهای غلظت‌شکن^۲، کراکینگ کاتالیزوری^۳، هیدروکراکینگ^۴ و رفرمینگ نفتا^۵ دارم، دیگر ربطی به آینده بشر در حمل‌ونقل نخواهند داشت.

به عقیده من، حتی با فرارسیدن دوره‌ای که دیگر نیازی به بنزین و گازوئیل نداشته باشیم، بشر همچنان باید هیدروکربن‌ها را برای کاربردهای زیر فرآوری کند:

- سوخت جت؛
- آسفالت جاده‌ها؛
- روغن‌های روانکاری؛
- پلاستیک‌ها؛
- پتروشیمی‌ها؛
- آندهای کربنی؛
- پوشش‌های سقف شینگل^۶؛
- روغن بچه؛
- موم (واکس).

با این وجود، بخش اعظم فناوری پالایش نفت از بین رفته و به‌عنوان یادگاری از گذشته به فراموشی سپرده می‌شود. با این حال، یقین دارم مادامی که ما به فناوری صنعتی نیاز داریم، بشر همچنان از موارد زیر استفاده خواهد کرد:

- پمپ‌های گریز از مرکز؛
- مبدل‌های حرارتی؛
- کمپرسورهای گاز؛
- جداکننده‌های مایع و بخار؛
- موتورهای الکتریکی؛
- ستون‌های تقطیر؛

^۱ delayed cokers: کک‌سازهای تأخیری

^۲ Visbreakers: کاهش گرانشی

^۳ fluid catalytic crackers: کراکینگ کاتالیزوری

^۴ Hydrocracking: هیدروکراکینگ

^۵ Naphtha reforming: رفرمینگ نفتا

^۶ Roofing shingles: پوشش‌های سقف شیب‌دار (شینگل)

- ولوهای کنترلی؛
- لوله‌ها، شیرآلات و اتصالات.

تصور می‌کنم اگر تصادفاً دوباره به‌صورت مهندس فرآیند تناسخ پیدا کنم، باز هم در سال ۳۰۱۸ موقعیت شغلی‌ای خواهم داشت. فکر نمی‌کنم مهارت‌هایی که در طول زندگی فعلی‌ام فرا گرفته‌ام، تا آن زمان کاملاً منسوخ شده باشند.

از سوی دیگر، حتی اگر خودم را در دنیای اموات بیابم و خود شیطان از من استقبال کند نیز، احساس می‌کنم که در خانه خودم هستم. به محض این‌که شیطان به تجربه گسترده من در زمینه کارخانه‌های گوگرد و هیت‌های احتراقی پی ببرد، مطمئناً مرا در بخش مهندسی فرآیند جهنم استخدام می‌کند.

ملاحظات ایمنی

نفوذ هیدروکربن به سرویس خنک‌کننده آب می‌تواند دلیل تشکیل مخلوط‌های قابل انفجار در زیر صفحات توزیع کننده برج‌های خنک‌کننده باشد. این موضوع مخصوصاً هنگام خنک‌سازی جریان‌های بوتان (شرکت نفت آموکو^۱ - شهر تگزاس^۲) موجب مشتعل شدن برج‌های خنک‌کننده می‌شود. شاید بهتر باشد هر ماه خروجی‌های آب خنک‌کننده را بررسی کنید تا ببینید بخارهای قابل احتراق در آن‌ها وجود دارد یا خیر. می‌توانید از ابزاری استفاده کنید که کارمندان محوطه بهره‌برداری از آن برای صدور مجوز ورود و عمل استفاده می‌کنند. بخارها در بخش زیرین صفحات توزیع جمع می‌شوند. یکی دیگر از علائم و نتایج نشت هیدروکربن‌ها در آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده^۳، تجمع لجن^۴ در این صفحه‌ها است.

یادداشت نویسنده: در صورت نیاز به طرح پرسش در مورد این نوشتار یا به طور کلی در مورد کارت‌ان، لطفاً آن‌ها را برایم به آدرس norm@lieberman-eng.com ارسال کنید.

^۱ نفت آموکو: Amoco Oil

^۲ شهر تگزاس: Texas City

^۳ آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده: Cooling water return

^۴ تجمع لجن: Sludge buildup



عوامل تأثیرگذار بر راندمان تفکیک سینی

چکیده:

راندمان جریان‌سازی آب ترش، نه تنها تابعی از نرخ بخار آب است؛ بلکه راندمان سینی نیز در نتیجه آن دخیل است. راندمان سینی با نسبت DP بخاری که از سوراخ‌های سینی جریان می‌یابد، به وزن مایع روی صفحه سینی متغیر است. افت فشاربخار، که مقدار آن بسیار ناچیز است، باعث می‌شود که سوراخ‌های سینی مایعات را عبور دهند. به احتمال زیاد، صفحه سینی از نقطه پایین خود نشستی داشته باشد. بخار نیز به سمت بالای صفحه سینی جریان می‌یابد. نتیجه این دو عمل، آبراهه‌سازی بخار-مایع و کاهش راندمان تفکیک سینی است.

کلمات کلیدی:

راندمان؛ سوراخ‌های سینی؛ صفحه سینی؛ بند خارجی؛ ارتفاع سرریز مایع؛ آبراهه‌سازی، مجاری ریزش مایع

چند ماه قبل مشغول کار بر روی بهبود عریان‌ساز آب پس‌ماند^۱ در پالایشگاهی بودم. مشکل، وجود حدود PPM^2 ۱۰۰۰ آروماتیک محلول در آب عریان‌سازی شده بود. همچنین، لازم بود که ظرفیت واحد را از ۵۰ به GPM^3 ۸۰ برسانم.

برج با ۳۰ سینی دریچه‌ای مجهز شده بود (شکل ۲-۱). در شکل ۲-۲ نمایی از عریان‌ساز را نشان داده‌ام.

یک مهندس فرآیند باتجربه، باید هر پروژه بهینه‌سازی را با انجام آزمایشی در واحد بهره‌برداری آغاز کند. در این مورد، از جری، کارمند اتاق کنترل خواستم که نرخ خوراک را از ۵۰ به GPM ۶۰ برساند و بار حرارتی ریبویلر^۴ را از ۴۰۰۰ پوند در ساعت بخار به ۴۸۰۰ پوند در ساعت افزایش دهد. یعنی هم نرخ خوراک آب و هم میزان بخار آب ریبویلر را ۲۰ درصد افزایش دهد. جری با افزایش ۲۰ درصدی بار حرارتی ریبویلر مخالف بود. «آقای نورم^۵، این مقدار بخار آب، وحشتناک است! اما اگر این کاریست که شما می‌خواهید، انجامش می‌دهم.» از اخطار جری تعجب کردم. چه چیزی طبیعی‌تر از این بود که متناسب با نرخ خوراک، بار حرارتی ریبویلر را بیشتر کنیم؟

متوجه شدم که هشدار جری به‌خاطر ظرفیت بویلر^۶ است که در آن بخارات عریان‌ساز آب ترش، سوزانده می‌شدند. این بویلر به‌خاطر تأمین هوای احتراق خود از بلوئر هوا^۷ مکش اجباری^۸ محدودیت داشت (شکل ۲-۲). نوسانات ناگهانی هیدروکربن‌های قابل احتراق می‌تواند به ورودی هوای احتراق بویلر، آسیب برساند.

تأثیر افزایش بخار آب ریبویلر

پیش‌بینی می‌کردم که افزایش نرخ خوراک آب و بار حرارتی ریبویلر تا ۲۰ درصد باعث شود تا جریان سوخت به بویلر و نرخ هوای مورد نیاز احتراق آن ۲۰٪ افزایش یابد. اما این اتفاق نیفتاد. نرخ سوخت و نرخ هوای احتراق هر دو به میزان ۴۰٪ بیشتر شدند. دوبرابر آنچه که پیش‌بینی کرده بودم!

^۱ Waste Water Stripper: عریان‌ساز آب پس‌ماند

مخفف "Parts-Per-Million"، قسمت در میلیون یا نسبت ۱/۱۰۰۰۰۰۰ است. در محلول‌ها معادل میلی‌گرم در لیتر یا گرم بر متر مکعب است. PPM ^۲

مخفف "Gallons Per Minute"، گالن در دقیقه است. هر گالن آمریکا تقریباً معادل ۳/۷۸ لیتر است. GPM ^۳

ریبویلر، جوشاننده، منبع گرمای ورودی به یک برج تقطیر: Reboiler^۴

نورم: Norm^۵

بویلر، دیگ بخار، جوشاننده: Boiler^۶

دمنده هوا، بلوئر: Air Blower^۷

مکش اجباری، در این آرایش لوله‌ها در قسمت دمنده فن قرار دارند؛ یعنی فن زیر مجموعه لوله‌ها قرار می‌گیرند. Forced Draft^۸

چه اتفاقی افتاده بود؟

ماندگی^۱ و راندمان سینی

تنها احتمال برای راندمان جداسازی نامناسب در بخار آب ریپویلر^۲، افزایش تماس بین بخار آب و پساب ترش بود. فاکتور عریان سازی^۳، ثابت است:

$$S = \frac{VK}{L} \quad (1 - 2)$$

که در این معادله:

$$K = VP_{H.C.} \div P_T$$

V = تعداد مول های بخار آب؛

L = تعداد مول های آب؛

$P_{H.C.}$ = فشار بخار^۴ هیدروکربن های محلول؛

P_T = فشار برج.

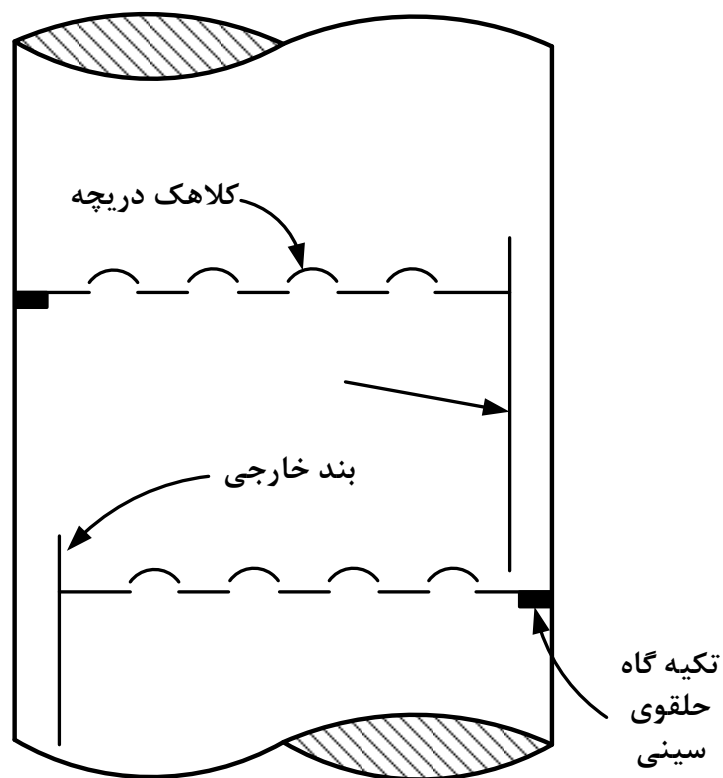
تنها احتمال این بود که به خاطر تماس بهتر بخار-مایع، راندمان عریان سازی نیز افزایش یافته است. یعنی راندمان تفکیک سینی بهتر شده است.

^۱ Entrainment: ماندگی، هرگاه سرعت گاز زیاد باشد، مقداری از قطرات مایع روی سینی ها را، با خود حمل می کند و به سمت سینی بالایی حرکت می دهد. با این کار مایع سینی زیرین با مایع سینی بالا مخلوط شده و نیروی محرکه انتقال جرم در سینی بالایی کاهش می یابد. در نتیجه راندمان کم می شود. بنابراین افزایش سرعت گاز تا حدی که سبب افت راندمان در اثر پدیده ماندگی نگردد، قابل قبول خواهد بود.

^۲ Reboiler: ریپویلر، جوشاننده، منبع گرمای ورودی به یک برج تقطیر

^۳ Stripping Factor: فاکتور عریان سازی

^۴ Vapor pressure: فشار بخار



شکل ۱-۲ سینی تقطیر.

محاسبات راندمان سینی

در دانشگاه، روش‌های متعددی برای محاسبه بازده تفکیک سینی به من آموزش داده شد. من تمام معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی، مکانیک کوانتوم ذرات و تاریخچه دودمان هابسبورگ^۱، را فراموش کرده‌ام. در کاربردهای فرآیندی معمولی، راندمان تفکیک سینی به موارد زیر مرتبط است:

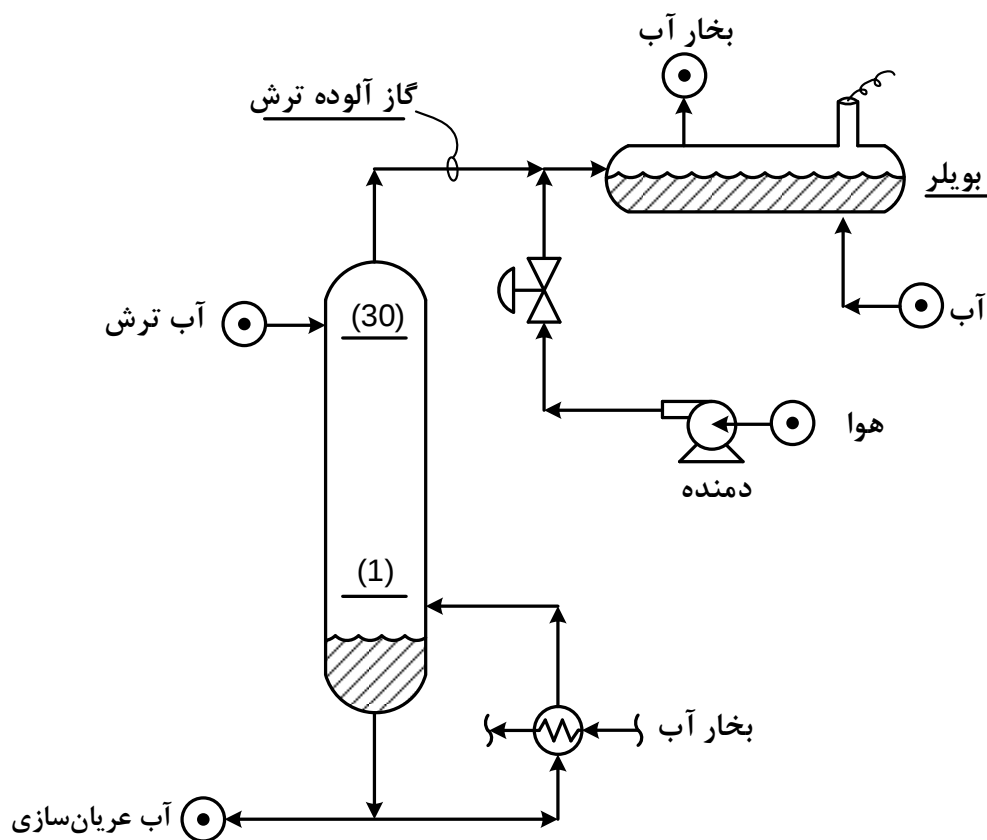
- ناترازی یا تاب برداشتن^۲ صفحه یا کف سینی^۳؛

^۱ House of Hapsburg: دودمان هابسبورگ، زمانی برجسته‌ترین خانه‌های سلطنتی اروپا بوده است.

^۲ Levelness or Sagging: ناترازی یا تاب برداشتن

^۳ Tray Deck: صفحه یا کف سینی

- شرشر کردن^۱، چکه کردن^۲ یا نشتی از کف سینی؛
- تراز بودن بند خارجی^۳؛
- ماندگی مایع؛
- طول مسیر جریان؛
- از دست رفتن آببندی مجاری ریزش^۴؛
- گرادیان هیدرولیک صفحه سینی.



شکل ۲-۲ برج عریان ساز آب ترش.

^۱ Dumping: شرشر کردن، هرگاه شدت گاز فوق العاده کم باشد، کل مایع روی سینی از منافذ به پایین می‌ریزد و مایعی به محل ریزش نمی‌رسد (ناودان‌ها). به این پدیده دامپینگ می‌گویند.

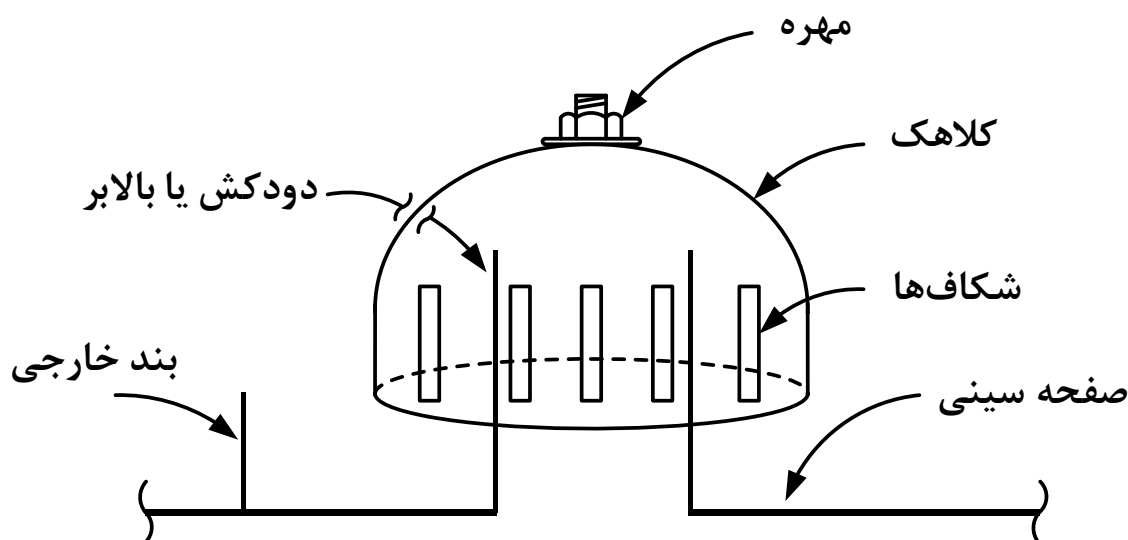
^۲ Weeping: در صورتی که شدت گاز خیلی کم باشد، قسمت اعظم مایع ممکن است از منافذ سینی به پایین چکه کند و لذا جریان کاملی از مایع در سراسر سینی وجود نخواهد داشت. پدیده چکه کردن، اصولاً در سینی‌های دریچه‌ای بوجود نمی‌آید، حتی اگر دبی گاز خیلی کم شود، دریچه‌ها بسته شده و مانع از ریزش مایع به پایین می‌گردد. ولی در سینی‌های مشبک اگر قطر سوراخ‌ها بزرگتر از حد لازم انتخاب گردد، پدیده ویپینگ بیشتر صورت خواهد گرفت.

^۳ Outlet Weir: بند سرریز یا بند خارجی

^۴ Downcomer: مجاری ریزش مایع، ناودانی، پائین‌ریز

با توجه به تجربیاتی که دارم، ترکیبی از دو عامل اول، مسبب کاهش راندمان تفکیک در پالایشگاه‌ها و کارخانه‌های مواد شیمیایی است. مشکل نشستی سینی، به دلیل ناترازی سینی‌ها یا افتادگی سر سینی بوده و با محاسبه منطقی قابل حل نیست. هرچند این مقدار در هنگام انجام تعمیرات برج، اندازه‌گیری شده است؛ اما به دلیل انبساط حرارتی صفحه سینی، پس از جریان مجدد، تغییر می‌کند.

قبل از دهه ۱۹۵۰، زمانی که از سینی‌های کلاهکی^۱ استفاده می‌شد (شکل ۲-۳)، این مشکل وجود نداشت. سینی‌های کلاهکی حتی اگر کمی از حالت تراز خارج شوند، دچار نشستی نمی‌شوند. اما امروزه در بیشتر برج‌های تقطیر از سینی‌های دریچه‌ای^۲ استفاده می‌شود (شکل ۲-۴). سینی‌های دریچه‌ای یک درپوش متحرک دارند که با نیروی بخاری که به سمت بالا در حرکت است، به سمت بالا کشیده می‌شود. اگر این نیروی بخار خیلی ضعیف باشد، کلاهک دریچه^۳ می‌بایست بسته شود تا از نشستی سینی جلوگیری به عمل آید.

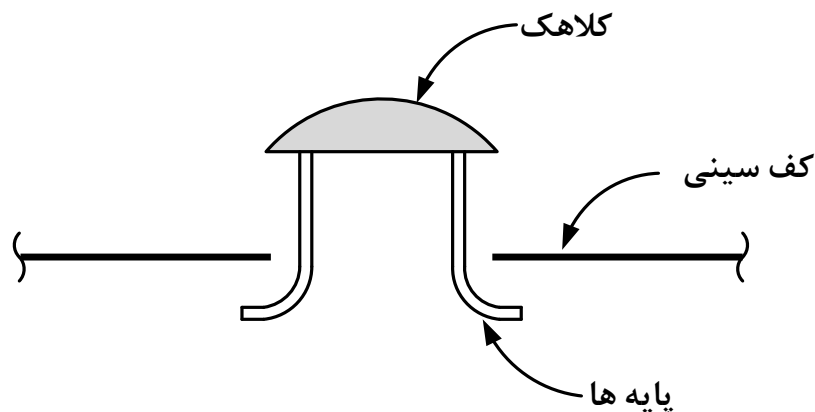


شکل ۲-۳ سینی کلاهکی. توجه کنید که ارتفاع بالابر، بالاتر از لبه فوقانی بند خارجی ست تا صفحه سینی نشت نکند.

^۱ Bubble Cap Trays: سینی‌های کلاهکی

^۲ Valve Tray: ولو تری، سینی دریچه‌ای

^۳ Valve cap: کلاهک دریچه



شکل ۲-۴ در سینی دریچه‌ای، احتمال نشت وجود دارد.

مشکل سینی‌های دریچه‌ای

در شکل ۲-۴ نمایی از سینی دریچه‌ای را نشان داده‌ام. دو مشکل اصلی در طراحی کلاهک دریچه عبارتند از:

- کلاهک به‌خاطر نمک‌ها، فرآورده‌های خورنده و سایر آلودگی‌ها به صفحه سینی می‌چسبد.
- کلاهک تقریباً به اندازه سینی غربالی^۱ نشتی دارد. شاید اگر صفحه سینی سطحی کاملاً افقی بود، این مشکل ایجاد نمی‌شد. از تجارب خود در عملیات فرآیندی دریافته‌ام که همان‌طور که سرعت بخار (و ΔP سینی) با تغییر نرخ بخار تغییر می‌کند، راندمان تفکیک سینی نیز تغییر خواهد کرد.

بهینه‌سازی راندمان تفکیک سینی

سه مسیر برای بهینه‌سازی راندمان سینی تقطیر وجود دارد:

- طراحی فرآیند؛
- تعمیرات؛
- عملیات.

در این مبحث، فرض می‌کنم:

- سینی‌های غربالی،

^۱ Sieve Tray: سینی غربالی

- سینی‌های شبکه‌ای،
- سینی‌های دریچه‌ای (شکل ۲-۴) و
- سینی‌هایی که بند خارجی ندارند^۱

سینی‌های مشبکی هستند که سینی‌های زیر را حذف می‌کنند:

- سینی‌های کلاهی (شکل ۲-۳)،
- سینی‌های کلاهک تونلی^۲،
- سینی‌های تک‌شیب^۳،
- سینی‌های دیسکی و دوناتی^۴.

۹۹ درصد برج‌های تقطیر جدید دارای سینی‌های مشبک هستند و تمام آن‌ها تحت تأثیر مشکلات کفه سینی قرار دارند:

- شرشر کردن؛
- نشستی کردن؛
- چکه کردن؛

منظور از بهینه‌سازی راندمان تفکیک سینی این است که سینی طوری کار کند تا چکه کردن صفحه آن به حداقل برسد؛ اما بدون آنکه سرعت بخار بیش از حد زیاد شود؛ چرا که موجب افزایش ماندگی مایع می‌شود.

ماهیت راندمان سینی

بهینه‌سازی راندمان تفکیک سینی، شبیه بهینه‌سازی برنامه دوییدن است:

- دوییدن ۰/۱ مایل در هفته موجب اضافه وزن می‌شود.
- دوییدن روزانه ۸ مایل موجب مشکلات زانو می‌شود.

^۱ Tab tray: سینی‌هایی که بند خارجی ندارند.

^۲ Tunnel Cap Trays: سینی‌های فنجان‌ی تونلی

^۳ Shed Trays: سینی‌های تک‌شیب

^۴ Disc and Donut type Trays: سینی‌های دیسکی و دوناتی

• بهینه‌ترین حالت، ۴ مایل در روز و ۵ روز در هفته است.

این حالت، تعادلی بین فعالیت و استراحت است.

همچنین، راندمان سینی، تعادلی بین موارد زیر است:

• ΔP خشک^۱

• ΔP هیدرولیک^۲

افت فشار سینی خشک همان افت فشار جریان بخار است که در اثر افزایش سرعت بخار در هنگام عبور از منافذ سینی به وجود می‌آید. معمولاً سطح مقطع سوراخ کف سینی ۱۰ تا ۱۴ درصد از مساحت صفحه سینی است. سرعت متداول در عبور از منافذ معمولی ("V")، ۱۰-۲۵ فوت بر ثانیه است.

افت فشار (ΔP خشک) بخار عبوری از منافذ روی سینی به این ترتیب محاسبه می‌شود:

$$DP = \frac{D_v}{D_L} \cdot K \cdot V^2 = \text{اینچ مایع} \quad (2 - 2)$$

که در این معادله:

D_v = چگالی بخار

D_L = چگالی مایع

$0.3 = K$ (در سینی‌های غربالی)

$0.9 = K$ (در سینی‌های دریچه‌ای)

$0.6 = K$ (در سینی‌های شبکه‌ای)

در محاسبه ΔP خشک فرض می‌شود صفحه‌های سینی تمیز هستند. مطمئناً در یک پالایشگاه، احتمال این موضوع ضعیف است. بیشتر صفحه‌های سینی حاوی موارد زیر هستند:

^۱ افت فشار سینی خشک: ΔP خشک

^۲ افت فشار هیدرولیک سینی: ΔP هیدرولیک

- سولفیدهای آهن
- کلریدهای آمونیوم
- نمک‌های آمین
- کک
- پلیمرها و صمغ‌ها
- ذرات ریز کاتالیست
- سیلیکات‌ها و کربنات‌ها

همچنین، احتمال دارد که سینی‌ها، ΔP پایین‌تری نسبت به حد انتظار داشته باشند؛ زیرا:

- در کلاک‌های دریچه‌ای، دمندگی (دمیدگی) رخ می‌دهد.
- به‌خاطر مونتاژ نامناسب صفحات سینی، صفحه سینی شکاف‌دار می‌شود.
- صفحه‌های سینی از تکیه‌گاه حلقوی^۱ سینی می‌لغزند.
- صفحه سینی دچار خوردگی می‌شود.

احتمال دارد ΔP خشک محاسبه‌شده برای یک سینی مطابق واقعیت نباشد.

ΔP هیدرولیک

ایدهٔ راندمان سینی بر مبنای حفظ تعادل بین دو نیرو استوار است:

- ΔP خشک
- ΔP هیدرولیک

افزایش بیش از حد ΔP خشک منجر به ماندگی قطرات مایع می‌شود. قطرات سیال از یک سینی پایین‌تر با نیروی زیادی به سینی بالایی وارد می‌شوند. مواد سنگین‌تر به سینی بالایی دمیده می‌شوند و راندمان سینی کاهش می‌یابد.

^۱ تکیه‌گاه حلقوی: Support Ring

مقدار بالای ΔP هیدرولیک موجب پدیده چکه کردن در صفحه سینی می‌شود. قطرات مایع در سینی فوقانی به طور مستقیم به سینی زیرین نشت پیدا می‌کنند. این موضوع اجازه می‌دهد تا ترکیبات سبک‌وزن به سینی زیرین چکه کنند و راندمانی سینی کمتر می‌شود. ΔP هیدرولیک بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$\Delta P \text{ هیدرولیک} = \text{ارتفاع سرریز مایع}^1 + \text{ارتفاع بند خارجی}^2$$

شاید این فرمول دقیقاً درست نباشد. مشکل، ایجاد فوم (کف) است. یک قوطی کوکاکولا را در یک شیشه بریزید. در ابتدا، شیشه پر از کفی قهوه‌ای رنگ خواهد شد. چند دقیقه صبر کنید. اکنون نصف لیوان کوکاکولا خواهید داشت. چرا؟ برای این که چگالی کف، ۵۰ درصد چگالی مایع هواده‌ی نشده^۳ است. من ارتفاع بند خارجی را به دو تقسیم می‌کنم تا مقدار فوم را محاسبه کنم. این یک فرض آموزشی است.

بند، «ارتفاع سرریز مایع» است که به وزن مایع روی سینی اضافه می‌شود. دقیقاً مانند ارتفاع آبی که از لبه سد سرریز می‌شود^۴. ارتفاع سرریز مایع به نرخ مایع سرریز شده از لبه بند خارجی بستگی دارد؛ یعنی «لود روی بند خارجی»^۵. برای محاسبه لود روی بند خارجی، مقدار جریان مایع را بر حسب GPM (گالن بر دقیقه) در سرریز بند خارجی مشخص کنید. سپس آن را بر طول بند خارجی (بر حسب اینچ) تقسیم کنید:

$$\text{لود روی بند خارجی} = \text{اینچ طول بند خارجی} / \text{GPM}$$

برای محاسبه ارتفاع سرریز در هر اینچ «مایع شفاف»^۶ به این ترتیب عمل می‌شود:

$$\text{ارتفاع سرریز مایع} = (\text{لود روی بند خارجی})^{0.67} \text{ (۰/۴)}$$

فرمول «بند خارجی فرانسیس»^۷ که در مورد سدها مناسب است؛ اساساً برای کاربرد در سینی‌های برج تقطیر مناسب نیست. چرا؟ برای این که مایعی که از بند خارجی سرریز می‌شود، مایع شفاف مانند آب نیست؛ بلکه مخلوط کف‌مانندی از بخار و مایع است.

^۱ Crest Height: ارتفاع سرریز مایع

^۲ Weir Height: ارتفاع بند خارجی

^۳ Non Aerated Liquid: مایع هواده‌ی شده

^۴ Overflowing: سرریز شدن

^۵ Weir loading: لود روی بند خارجی، در یک سینی تقطیر، دبی حجمی جریان مایع، تقسیم بر اینچ طول بند خارجی

^۶ Clear Liquid: مایع شفاف

^۷ فرمول «فرانسیس برای بند»: Francis Weir Formula

من فیلم‌هایی در مورد سینی‌های تقطیر مجتمع‌های پالایشگاهی دیده‌ام و متوجه شده‌ام که ارتفاع سرریز مایع بیشتر به چند اینچ کف شباهت دارد. بنابراین، محاسبه ارتفاع سرریز مایع صرفاً تخمین تقریبی از عمق مایع روی سینی است که با لود روی بند خارجی مرتبط است.

به طور خلاصه، وزن مایع روی کف سینی که من آن را « ΔP هیدرولیک» می‌نامم، بر حسب اینچ مایع بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$\text{وزن مایع} = \left(\text{لود روی بند خارجی} \right)^{0.67} + 0.4 \left(\frac{\text{ارتفاع بند}}{2} \right)$$

متعادل‌سازی ΔP خشک و ΔP هیدرولیک

وجود کلاهک‌های دریچه‌ای بر روی سینی‌ها باعث توقف نشتی در صفحه سینی نمی‌شود. این کلاهک‌ها هیچ هدف و مزیتی ندارند و همانند ولوهای یک‌طرفه^۱ ریز و کوچک عمل نمی‌کنند تا از نشت مایع از صفحه سینی جلوگیری کنند. این ΔP خشک است که جریان بخار را از منافذ روی سینی عبور می‌دهد تا از نشت مایع صفحه سینی جلوگیری کند.

اگر یک سینی به درستی تراز شده باشد، نشتی صفحه سینی هیچ نقش مهمی نخواهد داشت. قطرات مایع همچنان با بخارهای بالارونده، به خوبی تماس برقرار می‌کنند. اما سینی‌های واقع در برج‌هایی با قطر بزرگ، همگی در یک سطح نیستند. بنابراین:

- مایع از نقاط فرو رفته صفحه سینی، نشت پیدا می‌کند.
- بخار، مسیری را پیدا می‌کند که کمترین مقاومت را دارد و از نقاط مرتفع صفحه سینی بالا می‌رود.
- نتیجه، آبراهه‌شدن^۲ مایع - بخار و کاهش راندمان تفکیک سینی است.

افزایش ΔP خشک با افزایش جریان بخار، که در اثر افزایش بار حرارتی ریبویلر^۳ ایجاد می‌شود، مشکل ناترازی کف سینی را تا حدی برطرف می‌کند. اما افزایش سرعت بخار در برخی نقاط سبب افزایش ارتفاع فوم و یا ارتفاع اسپری در سینی پایینی می‌شود و کف را به سینی بالا می‌پاشد. این موضوع نیز راندمان تفکیک سینی را کاهش می‌دهد.

^۱ شیر یکطرفه: Check valve

^۲ Channeling: آبراهه‌سازی، از بین رفتن کارایی تماس در اثر توزیع غیر یکنواخت جریان.

^۳ Reboiler: ریبویلر، جوشاننده، منبع گرمای ورودی به یک برج تقطیر

مشکل ما در محاسبه تعادل بهینه بین ΔP خشک و ΔP هیدرولیک این است که نسبت به موارد زیر آگاه نیستیم:

- ناترازی صفحه سینی؛
- ضخامت رسوب در صفحه سینی؛
- ناترازی بندهای خارجی؛
- کفدار بودن مایع روی صفحه سینی؛
- ارتفاع واقعی سرریز مایع فوم از بالای بند خارجی؛
- ناترازی مجاری ریزش‌ها؛
- مسدود شدن کلاهک‌های دریچه‌ای یا چسبیدن آن‌ها به صفحه سینی؛
- نشستی مایعات در اطراف تکیه‌گاه حلقوی سینی.

بهینه‌سازی راندمان سینی - دیدگاه طراحی فرآیند

بهینه‌سازی راندمان سینی از منظر طراحی فرآیند، کار بسیار ساده‌ای به نظر می‌رسد. کافی است سطح مقطع منافذ صفحه سینی را با توجه به موارد زیر محاسبه کنید:

- ΔP خشک باید حدوداً با ΔP هیدرولیک مساوی باشد.
- اگر ΔP خشک کمتر از نصف ΔP هیدرولیک باشد، می‌توان انتظار داشت کارایی سینی به‌خاطر نشت صفحه آن افت کند.
- اگر ΔP خشک دو برابر ΔP هیدرولیک باشد، احتمالاً مایع از روی سینی مکیده می‌شود و می‌توان انتظار داشت کارایی سینی به‌خاطر طغیان فواره‌ای^۱ (یعنی ماندگی) کاهش پیدا کند.

در دهه ۱۹۵۰ یعنی زمانی که هنوز از سینی‌های «کلاهکی» استفاده می‌کردیم (شکل ۲-۳)، نشت صفحه سینی مسئله مهمی نبود. اما این موضوع در صورت استفاده از سینی‌های مشبک (حتی سینی‌های دریچه‌ای)، به یک مشکل جدی تبدیل می‌شود؛ زیرا در تفکیک‌کننده‌های پالایشگاهی با قطر بزرگ، سینی‌ها در یک سطح (تراز) نیستند. سینی‌ها به مرور زمان سطح پایین‌تری پیدا می‌کنند.

^۱ Jet flood: طغیان فواره‌ای

بهینه‌سازی راندمان سینی - تعمیرات

در زمان انجام تعمیرات، می‌خواهیم دو مورد را بهبود بخشیم: تراز بودن کف سینی و تراز بودن بند خارجی. تراز بودن کف سینی به بهترین نحو با تراز لیزری نجاری^۱ اندازه‌گیری می‌شود. حداکثر مقدار قابل قبول برای ناترازی یک سینی که بر روی راندمان آن تأثیر نامطلوبی نمی‌گذارد، ۵۰٪ انحراف از ΔP خشک محاسبه شده است. هرچه سینی بیشتر تراز باشد، راندمان تفکیک آن نیز افزایش می‌یابد.

اگر ΔP خشک نسبت به ناهمواری کف سینی بسیار کوچک باشد، برای افزایش آن می‌توان درصد خاصی از کلاهک‌های دریچه‌ای را مسدود^۲ کرد. بدین ترتیب، ظرفیت سینی به‌خاطر محدود شدن جریان، کاهش می‌یابد؛ اما برای افزایش راندمان تفکیک سینی باید این هزینه را پرداخت کنیم.

ناترازی بندهای خارجی نیز مشکل دیگری است. اگر «ارتفاع سرریز مایع» به اندازه‌ای نباشد که بتواند از انتهای ارتفاع یک بند خارجی سرریز شود، مایعی که پشت این قسمت از بند خارجی جمع می‌شود، راکد می‌ماند. بخش‌هایی که حاوی مایع ساکن‌اند، دارای راندمان تفکیک صفر هستند. برای برطرف کردن مشکل ناترازی بند خارجی، باید بندهای نرده‌ای^۳ را در لبه بالایی بندهای خارجی موجود جوش بدهیم. با این کار ارتفاع سرریز مایع بیشتر شده و جریان مایع یکنواخت‌تری در صفحه سینی ایجاد می‌شود (شکل ۲-۵).

افزون بر این، بندهای نرده‌ای با افزایش عمق فوم روی کفه سینی، ظرفیت سینی را کمتر می‌کنند؛ اما برای افزایش راندمان تفکیک سینی لاجرم این هزینه را می‌پردازیم.

بهینه‌سازی راندمان سینی - عملیات

به آزمون عریان‌سازی پساب برمی‌گردیم. من با بررسی نرخ جریان هیدروکربن به بویلر در نرخ‌های مختلف خوراک، بر روی راندمان عریان‌ساز در کاهش آروماتیک‌های سبک آب عریان‌سازی شده نظارت می‌کردم. نرخ خوراک را از ۵۰ به ۶۰ GPM و بار حرارتی ری‌بویلر^۴ را از ۴۰۰۰ به ۴۸۰۰ پوند بر ساعت افزایش دادم تا با افزایش ۲۰ درصدی خوراک مطابق شود.

متعجب شدم که نرخ گاز سوختی به بویلر نه ۲۰ درصد، بلکه بیش از ۴۰ درصد افزایش یافت. دلیل آن چه بود؟

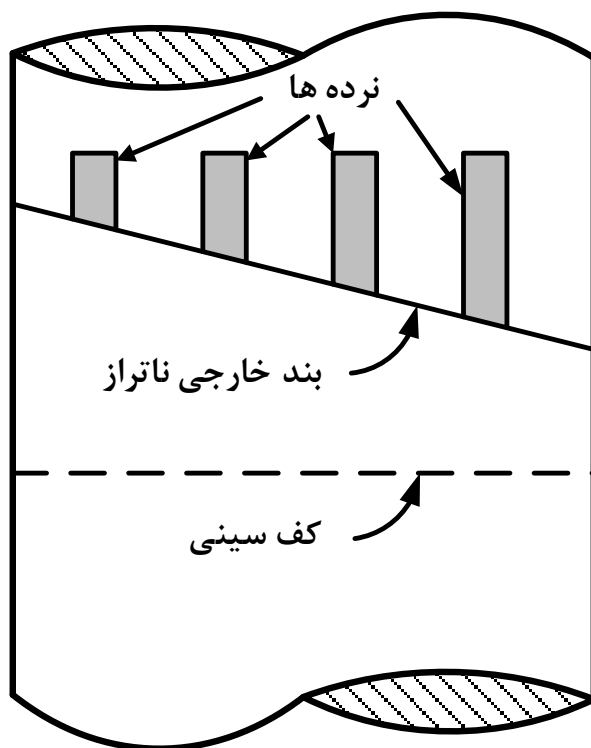
^۱ Carpenter's laser level: تراز لیزری نجاری

^۲ Plug off: مسدود کردن

^۳ Picket weirs: بندهای نرده‌ای

^۴ Reboiler: ری‌بویلر، جوشاننده، منبع گرمای ورودی به یک برج تقطیر

نسبت بخار به مایع ثابت باقی ماند. به علاوه، فراریت آروماتیک‌ها تغییری نکرد. به عنوان یک مهندس فرآیند معتقدم «فاکتور عریان‌سازی» ثابت باقی ماند.



شکل ۲-۵ بندهای نرده‌ای، ممکن است راندمان عملکرد سینی را، بهبود بخشند.

راندمان عریان‌سازی تابعی از دو عامل است:

۱. فاکتور عریان‌سازی (معادله ۱-۲)؛
۲. تعداد سینی‌های عریان‌سازی از دیدگاه تئوری یا راندمان سینی.

افزایش راندمان عریان‌سازی تنها می‌تواند نتیجه افزایش راندمان سینی باشد. یعنی ΔP سینی را بیشتر کرده بودم و به این ترتیب:

- نشستی کفه سینی کاهش یافت.

اما،

- ماندگی بیش از حد مایع ایجاد نشد.

افزایش نرخ بخار عریان سازی موجب افزایش DP سینی و نزدیک شدن آن به حد بهینه شد. من این مقدار را DP بهینه سینی می نامم. «نقطه اولیه طغیان»^۱، افت فشاری است که برحسب اینچ مایع بیان می شود و حدود ۱۸ تا ۲۶ درصد فاصله بین سینی هاست. در پایین تر از این DP، سینی های مشبک نشتی پیدا می کنند. در مقادیر بالاتر نیز سینی ها به دلیل ماندگی مایع یا طغیان فواره ای دچار کاهش راندمان تفکیک می شوند.

اما رسیدن به ۱۸ تا ۲۶ درصد DP سینی، برای بهینه سازی راندمان تفکیک سینی مورد نظر، به شرایط خاصی وابسته است.

DP بهینه سینی به شرایط زیر وابسته است:

- تراز بودن سینی ها؛
- تراز بودن بندهای خارجی؛
- توزیع رسوب بین سینی های بالایی و پایینی؛
- مجاری ریزش آب بندی خود را از دست بدهند؛
- پایایی کنترل فشار برج؛
- شروع طغیان به سمت بالا یا پایین برج؛
- کلاهک های دریچه ای شروع به بیرون دمیدن کنند؛
- کف کردن ترکیباتی که تقطیر می شوند؛
- تغییر در ترکیب خوراک برج.

مهندسی فرآیند در عمل

بنابراین روش صحیح برای اپراتور به منظور تنظیم برج خود با هدف بهینه سازی راندمان سینی چیست؟ پاسخ این پرسش به وسیله آزمون ها و مشاهدات میدانی مشخص می شود. اپراتور با توجه به نمونه های^۲ آزمایشگاهی، متوجه می شود که در نسبت ثابتی از «رفلاکس به خوراک»، کدام نرخ خوراک منجر به ایجاد بهترین نسبت بین فرآورده های

^۱ Incipient Flood Point: نقطه اولیه طغیان

^۲ Sample: نمونه

تقطیر و فرآورده های پایین برج^۱ می شود. پس از آن، لازم است مهندس واحد، افت فشار را در سینی ها اندازه گیری کند. این مقدار، DP بهینه است که با حداکثر راندمان سینی مطابقت دارد و من آن را «نقطه اولیه طغیان» نامیده ام.

اپراتور برای دستیابی به این راندمان بهینه، پنج راهکار برای حل مشکل در اختیار دارد:

۱. فشار برج را تنظیم کند. کاهش فشار موجب افزایش DP سینی می شود.

۲. افزایش نرخ خوراک.

۳. افزایش رفلاکس و بار حرارتی ریبویلر^۲. رفلاکس بیشتر مستلزم افزایش بار حرارتی ریبویلر است.

۴. افزایش پیش گرمایش خوراک در بار حرارتی ثابت ریبویلر.

۵. کاهش پیش گرمایش خوراک در نرخ رفلاکس ثابت.

در بندهای فوق فرض می شود که ترکیب خوراک تا حد معقولی ثابت است.

من به دستورالعمل قبلی با عنوان «مهندسی فرآیند در عمل» پرداختم؛ چراکه این رویکرد، مشاهدات میدانی را با آموزش مهندسی شیمی تلفیق می کند.

عملیات، فرآیندی پیچیده است. تقطیر یکی از پیچیده ترین عملیات های فرآیندی است. می توان راندمان سینی را با آزمون های میدانی و مشاهده رابطه بین راندمان تفکیک و فشار افتراقی^۳ برج مشخص کرد. این روابط نیز به شرایط متفاوتی بستگی دارند.

حادثه ای که در مورد برج عریان سازی آب ترش تعریف کردم، نشان می دهد که هیچ گاه نمی توانیم عکس العمل یک برج تقطیر در برابر افزایش نرخ ریبویلر و رفلاکس را بدون تجربه کار بر روی آن برج خاص پیش بینی کنیم. اثر تغییرات مربوط به نرخ بخار و مایع بر راندمان سینی به شدت غیرقابل پیش بینی و متغیر است. تنها پاسخ برای این مشکل فرآیندی در جهان این است که یک آزمایش میدانی را بر روی عریان ساز آب ترش انجام داده و تأثیرات آن را مشاهده کنیم.

^۱ Bottoms products: فرآورده های پایین برج

^۲ Reboiler: جوشاننده، منبع گرمای ورودی به یک برج تقطیر

^۳ Differential Pressure: فشار افتراقی - اختلاف فشار بین جریان بالا دستی و پایین دستی برج

سینی‌های کلاهکی

هنوز هم در موارد اندکی از سینی‌های کلاهکی قدیمی برای ارتقا برج استفاده می‌کنم. شایان توجه است که در دهه ۱۹۵۰ در واحدهای پالایشگاهی تقطیر نفت خام، از سینی‌های کلاهکی استفاده می‌شد. به همین دلیل این فصل را با نمایی از یک سینی کلاهکی قدیمی که نشت نمی‌کند، به اتمام رساندم (شکل ۲-۳). این سینی، راندمان تفکیک بهتری نسبت به یک سینی مشبک دارد (اما در مورد ظرفیتش این گونه نیست).



نقش رفلاکس در برج‌های تقطیر

چکیده:

جریان برگشتی (رفلاکس) در برج تقطیر از گرمای ریبویلر نشأت می‌گیرد. افزایش نرخ رفلاکس بالای برج، بدون افزایش حرارت ریبویلر، منجر به کاهش سطح مایع در درام رفلاکس می‌شود. افزایش رفلاکس باید راندمان تفکیک را در یک برج افزایش دهد. در غیر این صورت پدیده طغیان در صفحه سینی برج اتفاق می‌افتد.

بخارات نفت خام که از قبل تبخیر آنی شده‌اند، باید در مسیر بین نازل دریافت یا خروج نفتای سنگین و نازل دریافت یا خروج نفت سفید یا سوخت جت، مجدداً وارد تفکیک‌کننده اصلی شوند. این عمل باعث صرفه جویی در انرژی و افزایش ظرفیت سیستم می‌شود.

کلمات کلیدی:

رفلاکس؛ درام تبخیر آنی؛ ریبویلر؛ ناحیه تبخیر آنی؛ نفت سفید؛ گازوئیل؛ سوخت جت؛ پیش تبخیر آنی

«بابی^۱ چرا رفلاکس برج جداسازی پروپان^۲ را زیاد می‌کنی؟»

«صبح به‌خیر آقای لیبرمن. من رفلاکس را زیاد می‌کنم؛ چراکه مقدار C₄ موجود در LPG^۳ بیش از حد زیاد است.»

«بسیار خوب. فکر خوبی است بابی؛ اما در مورد بار حرارتی ریویلر^۴ چطور؟ جریان بخار آب به ریویلر به‌صورت دستی کنترل^۵ می‌شود. تو باید خودت بخار را زیاد کنی. یادت باشد.»

«نه آقای نورم. من فقط ۲ درصد پروپان در فرآورده پایین برج بوتان خود دارم. این مقدار دقیقاً طبق مشخصه‌های تعریف‌شده^۶ است. نیازی به افزایش بخار آب ریویلر نیست. نتیجه نمونه^۷ آزمایشگاهی ۷:۳۰ صبح را بررسی کنید. از این بابت مشکلی ندارم.»

«بابی، ما قبلاً در این مورد صحبت کردیم. نمی‌توانی بدون افزایش گرمای ریویلر، نرخ گردش رفلاکس را بیشتر کنی. یادت می‌آید؟ شب هفته گذشته در این مورد صحبت کردیم.»

«اوه، نه. می‌توانید در موردش توضیح دهید؟»

«بسیار خوب. اجازه بده این بار جور دیگری توضیح دهم. شاید بهتر است موضوع را با چند مثال توضیح دهم. این موضوع را همان‌گونه برایت بیان می‌کنم که برای جی هولکامپ^۸ توضیح دادم تا به او در واحد تقطیر نفت خام و برج تبخیر آبی نفت خام^۹ کمک کنم. برای کمک به جی، از نمونه‌ای قدیمی استفاده کردم که هنوز هم در پرو^{۱۰} بود.»

من داستان جی و داستان کشور پرو را برای شما بازگو می‌کنم.

^۱ بابی: Bobby

^۲ مخفف "De-propanizer tower"، پروپان‌زدا: De-prop tower

^۳ مخفف "Liquefied Petroleum Gas"، گاز نفتی مایع شده: LPG

^۴ ریویلر، جوشاننده، منبع گرمای ورودی به یک برج تقطیر: Reboiler

^۵ کنترل دستی: Manual

^۶ طبق مشخصه‌های تعریف شده: On spec

^۷ نمونه: Sample

^۸ جی هولکامپ: Jay Holcomb

^۹ واحد تقطیر نفت خام و برج تبخیر آبی نفت خام: Crude unit and preflash tower

^{۱۰} کشور پرو: Prue

جی هولکامب دو بار ازدواج کرده بود. چهار پسر بزرگ و دردسرساز داشت و مدیر عملیات پالایشگاهی با ظرفیت BSD^۱ ۳۰۰۰۰ بود. اطراف این پالایشگاه با مزارع سویا در جنوب ایالت ایلینوی^۲ احاطه شده بود.

جی گفت: «نورمن، طرحی که سال گذشته پیشنهاد کردی، مایوس کننده بود. من بخارهای ظرف تبخیر ناگهانی^۳ نفت خام را به کندانسورهایی که با هوا خنک می شوند^۴ که در هنگام انجام تعمیرات ماه اکتبر، نصبشان کرده بودیم، انتقال دادم (شکل ۳-۱). انتقال بخارهای سرد ۳۵۰ درجه فارنهایتی فلش درام به بیرون، طبق برنامه ریزی انجام شده دمای منطقه تبخیر ناگهانی را در واحد تقطیر نفت خام، ۳۰ درجه فارنهایت بیشتر کرد. به علاوه، ما سینی های برج تفکیک اولیه را تخلیه کردیم و موفق شدیم تا نرخ تقطیر را به BSD ۳۰۰۰ برسانیم.»

«جی، همه چیز خوب به نظر می رسد. پس مشکل کجاست؟»

«مشکل من اینجا است که نفتای سبک خنک کننده هوایی جدید بخارات فلش درام، زنجیره ای طولانی دارد که نقطه جوش نهایی اش^۵ ۴۲۰ درجه فارنهایت است. این زنجیره سنگین، باعث تشکیل کک در واحد تصفیه کاتالیستی نفتا می شود. علاوه بر آن، جوان ترین پسر دوباره مشغول طلاق و جدایی است.»

«ای کاش چند تا دختر داشتی. دردسر آنها خیلی کمتر است.»

«امیدوارم توصیه هایت در مورد مشکل نقطه جوش نهایی نفتای بالای برج مفیدتر باشد. باید نقطه جوش نهایی تقطیر را مطابق استاندارد ASTM D-86^۶ به کمتر از حداکثر ۳۸۰ درجه فارنهایت برسانم.»

گفتم: «جی، می خواهم داستانی را برایت تعریف کنم تا ایده ای را که در سر دارم، توضیح دهد.»

^۱ Barrels per stream day (BSD or BPSD): تعداد بشکه در طول یک روز.

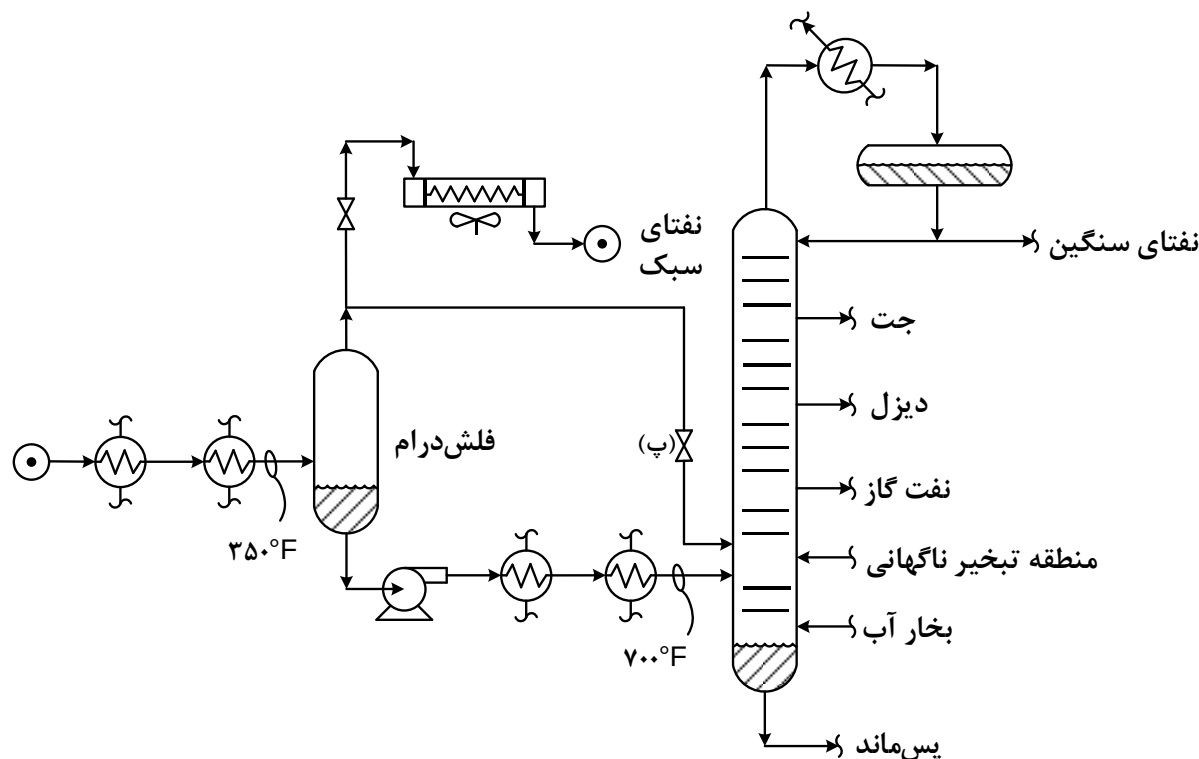
^۲ southern Illinois: جنوب ایالت ایلینوی

^۳ Flash drum: ظرف تبخیر ناگهانی، فلش درام

^۴ Air cooled condenser: کندانسورهایی که با هوا خنک می شوند.

^۵ End-point: نقطه جوش نهایی

^۶ ASTM-D86: "Distillation" American Society for Testing and Materials: استاندارد ملی تقطیر در اتمسفر



شکل ۳-۱ نفتای سبک، نقطه نهایی^۱ بسیار بالایی دارد.

چند سال قبل به پرو رفتم. در مسیر ماچو پیچو^۲ که مقصد گردشگری معروفی است، راننده ام پیشنهاد داد که برای گردش در یک کارخانه فرآوری مشروب توقف کنیم که پیسکو^۳ را تولید می کند. پیسکو جزء اصلی «پیسکوی ترش»، نوشیدنی ملی کشور پرو است.

«پیسکوی ترش» را در هتلمان در لیما^۴ نوشیده بودم. معمولاً انتخاب من ویسکی است؛ اما فکر کردم باید نوشیدنی - های محلی را هم امتحان کنم. مشاهده کارخانه تقطیر می توانست برایم کار جذابی باشد؛ چراکه این کارخانه بسیار قدیمی بوده و دور از شهر واقع شده بود. با اپراتور اصلی به نام خوان رامیرز^۵ آشنا شدم. او مرد میانسالی بود که به نظر می رسید هندی تبار باشد و در مورد کارخانه فرآوری مشروب که بسیار قدیمی بود، اطلاعات خوبی داشت. صدها کوزه و دیگ سفالی در گوشه ای انبار شده بودند. دودکش^۶ فوق العاده بزرگی از چوب های هیزمی هم در گوشه

^۱ End-point: نقطه نهایی، آخرین نقطه جوشش

^۲ Machu Piccu: ماچو پیچو

^۳ Pisco: پیسکو

^۴ Lima: لیما

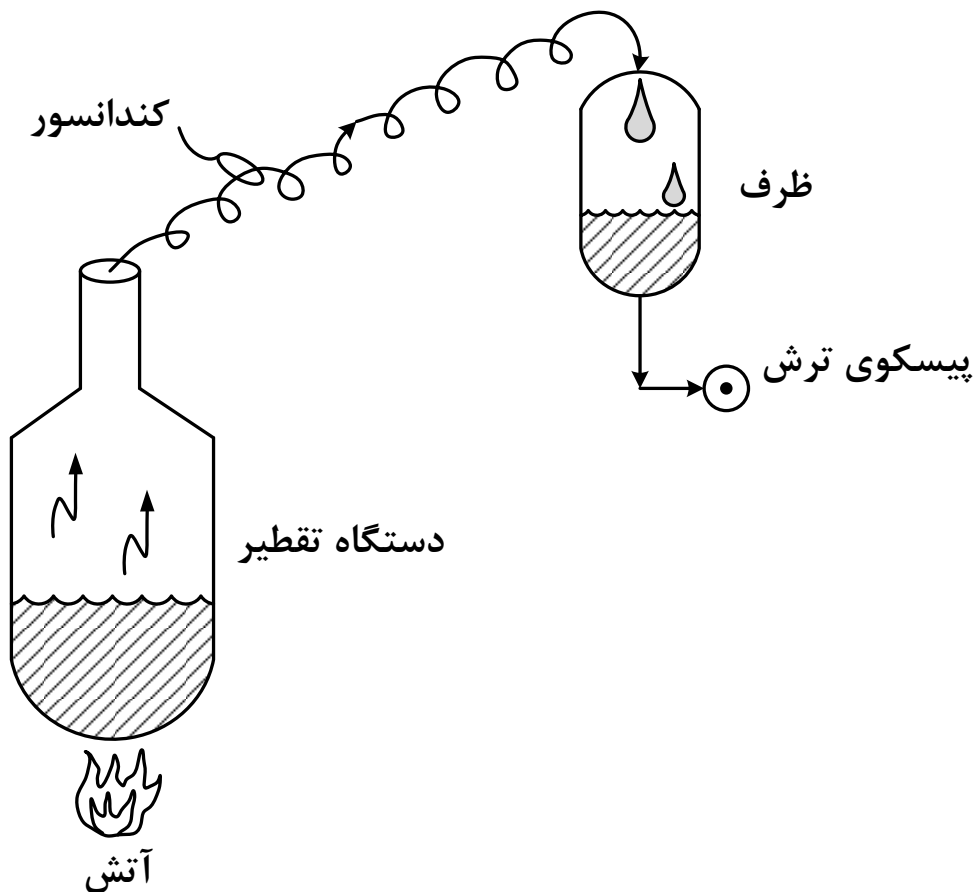
^۵ Juan Ramirez: خوان رامیرز

^۶ Stack: دودکش

دیگری تلنبار شده بودند. چندین کامیون قدیمی فوراً جلوی ورودی کارخانه کنار هم پارک شده بودند. و پس از آن، استیل^۱ قرار داشت.

دستگاه تقطیر یک دیگ مسی بزرگ با ۸ فوت عرض و ۵ فوت ارتفاع بود. این دیگ روی یک سازه آجری قرمز و بالای محفظه‌ای با لبه آجری قرار داشت که با هیزم تغذیه می‌شد. لوله مسی مارپیچ‌شده بخارهای دریافتی از دستگاه تقطیر را متراکم کرده و بخارات متراکم پیسکو به درون یک دیگ مسی عمودی با ابعادی به اندازه جثه انسان تخلیه می‌شد. دیگ دوم، ۱۶ فوت بالاتر از سطح بالای دستگاه تقطیر قرار داشت (شکل ۲-۳).

پیسکو ۲۵ تا ۳۰ درصد الکل دارد. ویسکی (با خلوص ۱۰۰٪) حاوی ۵۰٪ الکل است. در این کارخانه فرآوری مشروب واقع در مسیر ماچوپیتو، محتوای الکل پیسکو با شناور اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۲-۳ دستگاه تقطیر باستان. کاهش راندمان برای افزایش خلوص محصول.

^۱ استیل: Still

اگر پیسکو بیش از حد ضعیف بود، خط روی شناور، بالاتر از سطح مایع موجود در ظرف آزمایش آن‌ها قرار می‌گرفت و مقدار بسیار بالایی از آب را نشان می‌داد. بدین معنا که چگالی پیسکو بسیار بالا بود.

پرسیدم: «پس خوان، اگر پیسکو خیلی ضعیف باشد، چه کار می‌کنی تا فرآورده حاوی ۳۰٪ الکل باشد؟».

خوان توضیح داد: «شاید دفعه بعد آن را زیاد حرارت ندهیم. کافی است از چوب کمتری استفاده کنید تا نوشیدنی ملایم‌تر و سردتر بیزد. گرمای زیاد باعث ضعیف‌شدن پیسکو می‌شود. شاید هم پیسکوی ضعیف را به دستگاه تقطیر برگردانم و آن را دوباره گرم کنم. این کار باعث می‌شود که پیسکو قوی‌تر شود».

این کار او برای من کاملاً به مهندسی فرآیند شباهت داشت. این همان تعاملی است که من با اپراتور بهره‌برداری برقرار می‌کنم. اینجاست که درک‌مان را از یک مشکل با کمک فناوری کاربردی کامل می‌کنیم. آلبرت انیشتین در جایی گفته است که آنچه آمریکا را بزرگ کرده است آزادی، برابری یا دموکراسی نیست. به گفته وی آمریکا سرزمین بزرگ فناوری‌های کاربردی است.

محدودیت‌های فشار بخار^۱

پرسیدم: «خوان، چرا گاهی مشروب را با درجه حرارت بالا تقطیر می‌کنی که پیسکوی ضعیفی تولید شود؟ با این وجود که آب زیادی به همراه الکل تبخیر شده و در نتیجه درصد الکل کم می‌شود.»

«آقای نورم، برای این که باید با تولید پیسکوی بیشتر، سودآوری بیشتری داشته باشیم».

این همان مشکل اصلی در مهندسی شیمی و فرآیند است؛ یعنی ایجاد توازن بین بازیابی محصول و خلوص محصول. خوان مجبور بود برای حفظ مشخصه‌های تعریف‌شده محصول یعنی حداقل ۳۰٪ الکل، بازیابی محصولش را با سوزاندن هیزم کمتر در زیر کوره کمتر کند.

مسئله اینجاست که الکل فشار بخار بالایی داشته و آب فشار بخار کمتری دارد. وقتی دیگ دستگاه تقطیر گرمای بیشتری دریافت می‌کند، فشار بخار آب نسبت به افزایش نرخ تبخیر الکل از مشروب تخمیرشده، با سرعت بیشتری

^۱ Vapor pressure: فشار بخار

افزایش می‌یابد. بنابراین همچنان که مقدار مشروب تبخیر شده بیشتر می‌شود، مقدار آب تبخیر شده نیز سریع‌تر افزایش می‌یابد؛ چراکه فشار بخار آب در دمای بالاتر در دیگ دستگاه تقطیر افزایش می‌یابد.

کاهش دمای دیگ دستگاه تقطیر، تبخیر آب را کمتر می‌کند؛ اما تولید پیسکو نیز کمتر می‌شود. اما این هزینه‌ای است که خوان می‌پردازد تا پیسکو را قوی‌تر کرده و آن را به میزان بیشتری الکل‌دار کند. این کار نوعی ایجاد توازن بین راندمان محصول و خلوص آن است.

من مفهوم فشار بخار را برای خوان رامیرز توضیح دادم، اما شاید توضیح به اندازه کافی خوب نبود؛ چون خوان مفهوم را درک نکرد. تازه، خود را بی‌علاقه نشان داد و حتی نشانه‌های احتمالی از مخالفت را در چهره‌اش دیدم!

بنابراین به او گفتم: «آقای خوان، شاید بتوانیم مشکل را با کمک فناوری مهندسی فرآیند حل کنیم. می‌خواهید توضیح بدهم؟»

و خوان پاسخ داد: «نه!»

با این وجود، توضیح دادم.

فرآیند تقطیر دو مرحله‌ای

«آقای خوان، ما می‌خواهیم یک فرآیند تقطیر دو مرحله‌ای را با کمک یک کندانسور جزئی انجام دهیم تا به صورت پیوسته کار کند؛ پیسکو را همیشه بر طبق مشخصه‌های تعریف شده^۱ فرآوری کند و تقریباً هیچ هزینه نصبی ندارد. امروز می‌توانیم این کار را انجام دهیم.»

وقتی گفتم امروز می‌توانیم این کار را بدون هیچ هزینه‌ای انجام دهیم، خوان لبخندی زد و گفت: «خب! باشد! بله!، بله!»

مرحله اول - می‌خواهم طول لوله مسی مارپیچ شده را نصف کنم.

مرحله دوم - از نیمه اول آن برای اتصال دیگ دستگاه تقطیر به دیگ عمودی استفاده می‌کنم (شکل ۳-۳).

^۱ مشخصه‌های تعریف شده: On-Spec

مرحله سوم - نیمه دوم را به بالای دیگ عمودی وصل می‌کنم و با نیروی گرانش آن را به سمت یکی از آن دیگ‌های سفالی تخلیه می‌کنم.

مرحله چهارم - با استفاده از یک شلنگ لاستیکی با حلقه‌ای به طول ۲ فوت، مایع متراکم‌شده به نام جریان گداز^۱ را (که در دیگ عمودی جمع می‌شود) به طور پیوسته به دیگ دستگاه تقطیر برمی‌گردانم (شکل ۳-۳).

«آقای خوان، مایعی که به درون دستگاه تقطیر تخلیه می‌شود، دوباره در آن تبخیر شده و به آن رفلاکس یا «جریان برگشتی»^۲ می‌گویند. از حلقه استفاده می‌کنیم تا از تخلیه دوباره بخارهای دیگ دستگاه تقطیر به دیگ سفالی (که مانع تخلیه مایع از طریق شلنگ می‌شود)، جلوگیری کنیم. بدین معنا که بخار مایع را به داخل دیگ هل می‌دهد.»

«اما آقای نورم، فرض کنید پیسکو خیلی ضعیف شد. در آن صورت باید چکار کنم؟»

«خوان، کافی است کمی آب روی لوله مسی بین دستگاه تقطیر و دیگ عمودی اسپری کنی.» این لوله مسی مانند یک کندانسور مرحله اول است. ما آب را بر روی لوله اسپری می‌کنیم تا گرمای اضافی را که باعث افزایش جریان برگشتی و کاهش محصول می‌شود، از بین ببرد.

«می‌بینی خوان، وقتی گفتم لوله مسی مارپیچ‌شده را نصف می‌کنم، حدس می‌زدی که اندازه کندانسور مرحله اول کاهش یابد (شکل ۳-۲). شاید لازم بود برای این که جریان برگشتی بیشتری ایجاد شود، طول مارپیچ کمی بلندتر باشد. اما کاربرد یک منبع خارجی خنک‌کننده مانند اسپری آب به ما کمک می‌کند تا کمبود سرمایشی که به وسیله هوا ایجاد می‌شود را جبران کنیم»^۳.

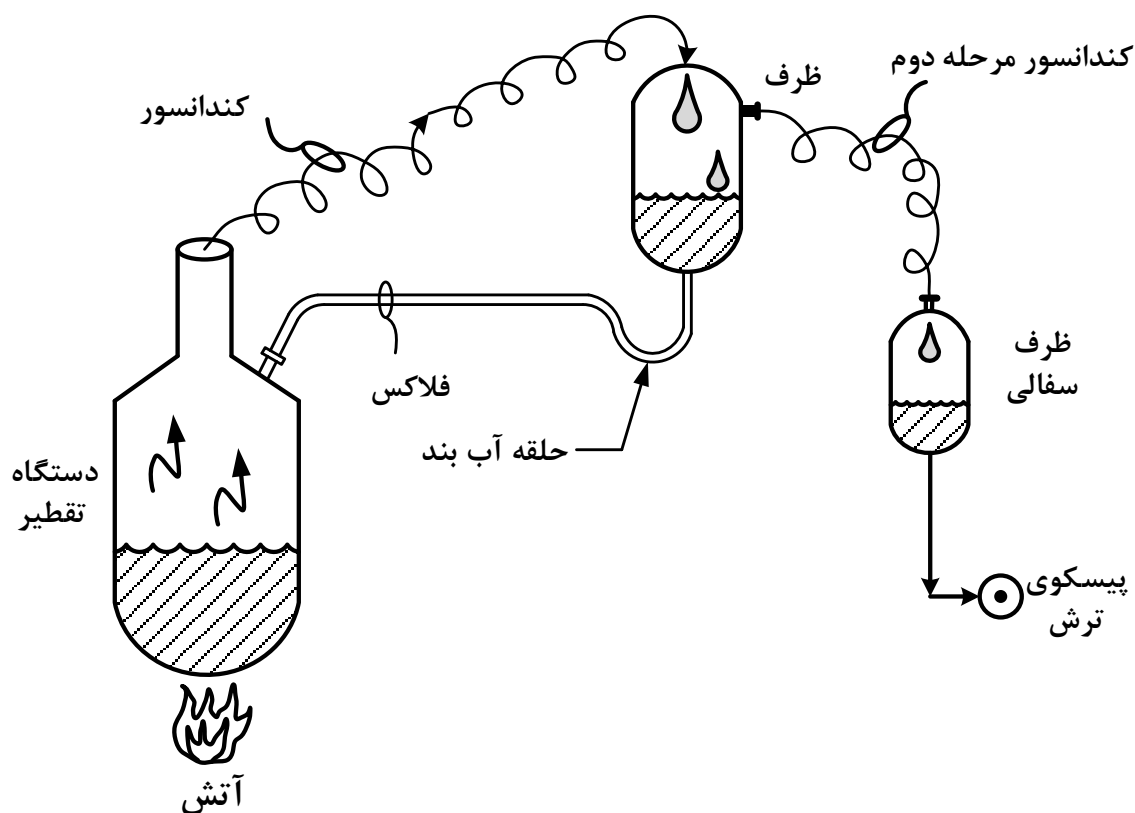
«اما آقای نورم، فرض کنید پیسکو بیش از حد قوی شود! آن وقت باید چکار کنم؟»

«خوان، کافی است هیزم بیشتری به دستگاه تقطیر اضافه کنی. این کار باعث می‌شود با تقطیر مقداری آب اضافی، تولید محصول پیسکو نیز افزایش یابد.»

^۱ Flux: جریان گداز، فلاکس

^۲ Reflux: رفلکس، جریان برگشتی

^۳ Compensating: جبران کردن



شکل ۳-۳ دستگاه تقطیر دو مرحله‌ای، خلوص را بدون کاهش راندمان محصول، افزایش می‌دهد.

منشأ برج تقطیر

فناوری کندانسور جزئی برای تولید نوشیدنی الکلی بسیار قوی به حدود ۱۰۰۰ سال بعد از میلاد مسیح و عربستان برمی‌گردد. منشأ برج تقطیر چند مرحله‌ای که در امروزه نیز کاربرد دارد، به اسکاتلند و قرن هجدهم میلادی بازمی‌گردد. به این اختراع دستگاه تقطیر^۱ می‌گویند. سیستم مذکور شامل یک ریپویلر، کندانسور، شش سینی کلاهی^۲ و یک پیش‌گرم‌کن خوراک است. چند سال قبل دیدم که از یکی از آن‌ها برای ساخت کنیاک سیب در مزرعه‌ای واقع در شهرستان سامرست در انگلستان استفاده می‌شد. این سیستم خیلی خوب کار می‌کرد.

^۱ Patent Still: اختراع دستگاه تقطیر مورد استفاده در نوشیدنی های الکلی

^۲ Bubble Cap Trays: سینی‌های کلاهی

تنها چیزی که نسبت به تقطیر قرن هجدهم تغییر کرده این است که در حال حاضر آن را فلاکس می‌نامیم. اکنون دستگاه تقطیر استیل یک ریویلر مجزا دارد و به جای سینی‌های کلاهی از سینی‌های دریچه‌ای استفاده می‌کنیم.

من ایده نابی برای به‌روزرسانی فناوری تولید پیسکو نداشتم. من آن دستگاه تقطیر کوچک دو مرحله‌ای خانگی را که چند سال قبل از این‌که به کشور پرو سفر کنم، در ویت‌ترین مغازه نوشیدنی‌فروشی در ویلنیوس (لیتوانی) دیده بودم، برای خودم بازسازی کردم.

حذف دنباله نفتا

«جی، می‌توانیم همین کار را در واحد شما انجام دهیم. سه فن از چهار فن موجود خنک‌کننده هوا را از سرویس خارج می‌کنیم. پس از آن، مایعی که تا حدی در خنک‌کننده هوای باکس مجرای اصلی (هدر)^۱ خروجی متراکم شده است را دوباره به فلش درام بازگشت می‌دهیم؛ به نوعی مانند رفلاکس. در مورد باقی‌مانده بخار نفتا می‌توانیم آن را به بخش بالاسری برج تقطیر اولیه هدایت کرده (شکل ۳-۴) و آن را با نفتای بالاسری برج مخلوط کنیم. خنک‌کننده هوا^۲ مانند کندانسور مرحله اول در پرو است و شبیه مرحله تئوریک و تفکیک جزء به جزء عمل می‌کند.»

جی گفت: «اما نورمن؛ من با استفاده از خنک‌کننده هوایی به عنوان کندانسور جزئی به نفتای کمتری از برج تبخیر آبی نفت خام^۳ می‌رسم. نمی‌دانم که این روش را دوست دارم یا نه.»

«موضوع، ایجاد توازن بین راندمان محصول و خلوص آن است. جی تو نمی‌توانی هر دوی آنها را داشته باشی. این شرایط به نوعی مانند ازدواج است. باید بخشی از آزادی خود را با همدلی و همراهی معاوضه کنی.»

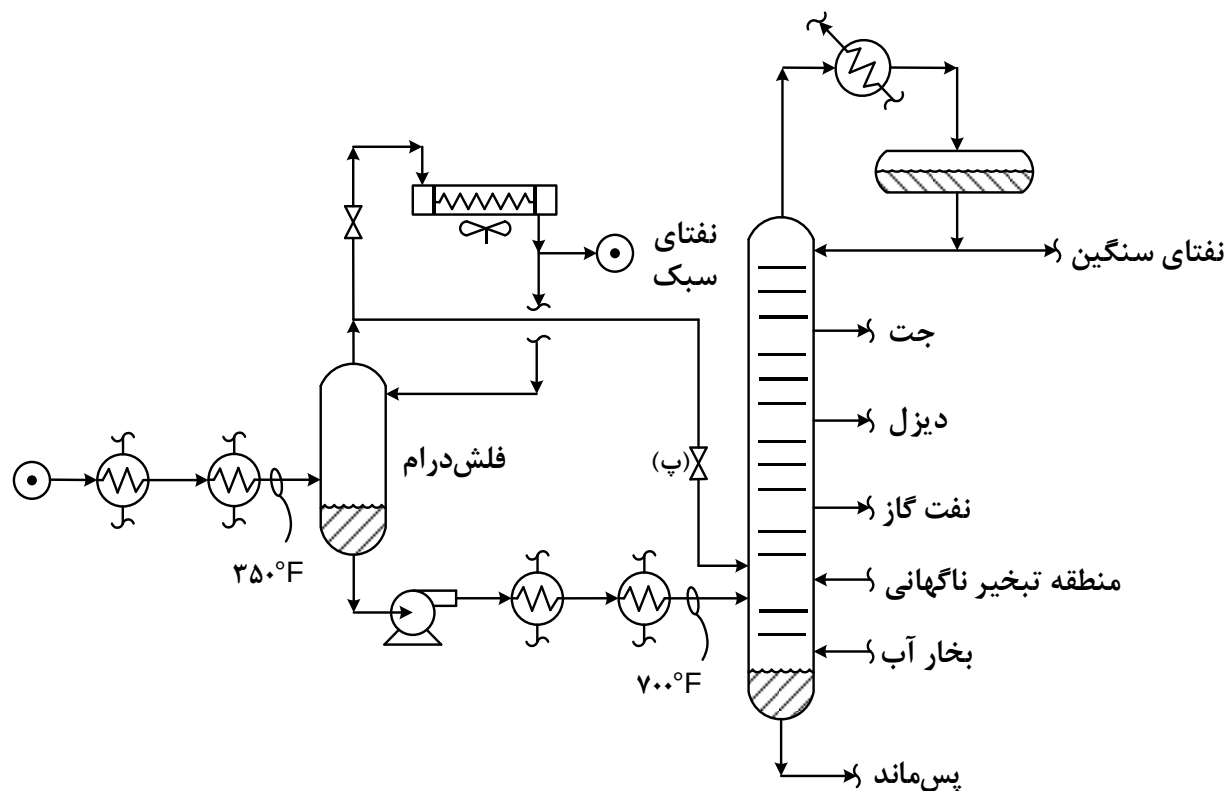
«بله؛ درست است آقای لیبرمن^۴. حالا متوجه شدم. هوشیاری با افزایش سن ایجاد می‌شود.» جی این جمله را گفت و سرش را به علامت موافقت تکان داد.

^۱ Header box: باکس هدر، جعبه‌ای که تعدادی لوله از آن خارج می‌شود.

^۲ Air cooler: خنک‌کننده هوا

^۳ Preflash tower: برج تبخیر آبی نفت خام

^۴ Lieberman: لیبرمن



شکل ۳-۴ خنک کننده هوا به عنوان یک مرحله تفکیک عمل می کند.

نتیجه

بابی پس از آنکه داستانم را گوش داد گفت: «حتما جهانگرد هستيد آقای نورم. تصور می کنم، در تمام طول سفرتان به کشور پرو کار می کنید.»

«بله بابی. درست مثل داستان جی، مسافرت نکات مثبت و منفی خودش را دارد. اما نکته این داستان این است که رفلاکس از ریویولر نشأت می گیرد.^۱ بابی اگر جریان رفلاکس بالای برج را برای کاهش C4 در LPG، بیشتر کنی،

^۱ مفهوم می که می گوید جریان رفلاکس از گرمای ریویولر نشأت می گیرد: Reflux comes from the reboiler.

رفلاکس درام خالی می‌شود؛ مگر این‌که آن را با بخارهای حاصل از ریپویلر دوباره پر کنی. پمپ رفلاکس دچار ساکشن لوز^۱ و کاویتاسیون^۲ می‌شود و آب‌بند^۳ پمپ به علت ارتعاش زیاد از بین می‌رود.»

«حتما داستانتان را در ذهنم نگه می‌دارم و دفعه بعدی که رفلاکس را به پروپان‌زدا^۴ اضافه می‌کنم، بخار را نیز به ریپویلر اضافه خواهم کرد. اما آقای لیبرمن، بهتر نیست که حلقه کنترل دما را بر روی ریپویلر بخار ثابت کنیم تا بخار به‌صورت اتوماتیک اضافه شود؟ ثابت‌نگه‌داشتن آن هزینه‌ای ندارد.»

«بابی، در این مورد در فرصت مناسبی صحبت می‌کنیم. ساعت ۹:۳۰ صبح یک جلسه مهم دارم. بهتر است بروم.»

^۱ Suction Loose: محدود شدن فشار و جریان بالادستی ورودی به پمپ

^۲ Cavitation: فرآیندی است که طی آن، در ناحیه‌ای از مایع با فشار پایین، حباب بخار شکل می‌گیرد و سپس این حباب دچار ترکیدگی شده و انرژی از خود آزاد می‌کند. کاویتاسیون با نام‌های دیگری همچون حباب‌زایی، خوردگی و حفره‌سازی نیز شناخته می‌شود.

^۳ Seal: آب بند

^۴ Depropanizer: پروپان‌زدا، جداساز پروپان، دیپروپانایزر



سینی‌های تقطیر چگونه کار می‌کنند؟

چکیده:

یک سینی تقطیر مشبک، بر خلاف سینی کلاهکی قدیمی، در معرض نشت صفحه سینی قرار دارد. ارتفاع سطح مایع روی سینی توسط ارتفاع بند خارجی مایع کنترل می‌شود. اگر افت فشار بخاری که در صفحه سینی جریان دارد از ارتفاع بند خارجی مایع کوچک‌تر باشد، صفحه سینی نشت یا چکه خواهد کرد. اگر کف سینی از ناتراز باشد، این اتفاق باعث کاهش راندمان تفکیک سینی می‌شود. تراز بودن بندهای خارجی نیز تأثیر مشابهی خواهد داشت.

کلمات کلیدی:

بند خارجی؛ صفحه سینی؛ نشت کردن؛ ارتفاع سرریز مایع؛ کلاهکی؛ افت فشار؛ مجاری ریزش مایع

تقطیر و عصاره‌گیری قبل از سینی‌ها اختراع شد. این فرآیند بر ظرف تبخیر ناگهانی^۱ متکی بود (شکل ۴-۱). این درام‌ها بدون هیچ‌گونه ماندگی^۲، مایع را از بخار جدا می‌کردند. هر درام، یک «مرحله تفکیک و جداسازی نظری» نامیده می‌شد. اگر جداسازی فازهای بخار و مایع به‌طور کامل انجام می‌گرفت، راندمان تفکیک درام ۱۰۰٪ بود. هرچه تعداد درام‌های مجموعه بیشتر باشد، میزان جداسازی محصولات نیز افزایش خواهد یافت. ستون تقطیر اختراع شد تا مشکل پیچیدگی مکانیکی بسیاری از درام‌ها برطرف شود.

سینی جایگزین درام می‌شود. اگر عملکرد سینی‌ها به خوبی درام‌ها باشند، راندمان تفکیک سینی ۱۰۰٪ است. اگر سینی فقط به اندازه نصف درام کار کند، راندمان تفکیک سینی ۵۰٪ است. راندمان پایین سینی‌ها معمولاً ناشی از ماندگی است که به خاطر سرعت بیش از حد بخار ایجاد می‌شود.

وقتی فاصله بین سطح مایع روی سینی زیرین و سینی فوقانی کمتر شود، سرعت لازم بخار، برای انتقال مایع از سینی زیرین به سینی فوقانی کاهش پیدا می‌کند.

برای مثال، هنگام جداسازی پروپان از بوتان، مشخصات^۳ محصول پروپان، شامل ۲٪ بوتان است. اگر نرخ بخاری که درون برج به سمت بالا جریان می‌یابد بیشتر شود، قطرات مایع توسط بخار جذب شده و با فشار به سینی بالایی دمیده می‌شوند. از آنجا که مایع موجود در سینی پایینی مملو از بوتان است، قطرات جذب‌شده موجب افزایش مقدار بوتان در سینی بالاتر می‌شوند. وقتی این قطرات به سینی بالایی می‌رسند، محصول پروپان بالاسری^۴ با بوتان آلوده شده و در نتیجه، راندمان تفکیک کاهش می‌یابد.

هدف یک سینی، اختلاط بخار و مایع با یکدیگر است. هرچه این دو بهتر مخلوط شوند، راندمان سینی بیشتر می‌شود. همچنین، راندمان سینی اساساً به دو عامل زیر بستگی دارد:

۱. قطرات مایع به جامانده تا چه حدی از جریان بخار بالارونده از کفه سینی، جدا می‌شوند.
۲. حباب‌های بخار تا چه حدی از جریان مایع پایین‌رونده از مجاری ریزش^۵ صفحه سینی، جدا می‌شوند.

^۱ ظرف تبخیر ناگهانی، فلاش‌درام: Flash Drum

^۲ Entrainment: ماندگی مایع

^۳ Specification: مشخصات

^۴ Overhead Propane Product: محصول پروپان بالاسری

^۵ Downcomer: مجاری ریزش مایع، ناودانی، پائین‌ریز

ماندگی و راندمان سینی

مهم‌ترین عواملی که ماندگی مایع را کنترل می‌کنند، عبارتند از:

۱. اندازه قطره - هرچه قطر قطره کوچک‌تر باشد، نرخ ماندگی مایع بیشتر می‌شود.
۲. ویسکوزیته فاز پیوسته - ویسکوزیته بالا موجب افزایش ماندگی مایع می‌شود.
۳. اختلاف چگالی بین فازهای بخار و مایع - کاهش اختلاف چگالی موجب افزایش ماندگی مایع می‌شود.
۴. سرعت - سرعت‌های بالاتر نیز موجب افزایش ماندگی مایع می‌شوند.

عوامل مذکور در «قانون استوکس^۱» خلاصه می‌شوند.

ماندگی مایع متناسب است با:

$$V \cdot (D_V \div D_L)^{0.5} \quad (1 - 4)$$

که در این معادله:

$$V = \text{سرعت فاز بخار}$$

$$D_V = \text{چگالی فاز بخار}$$

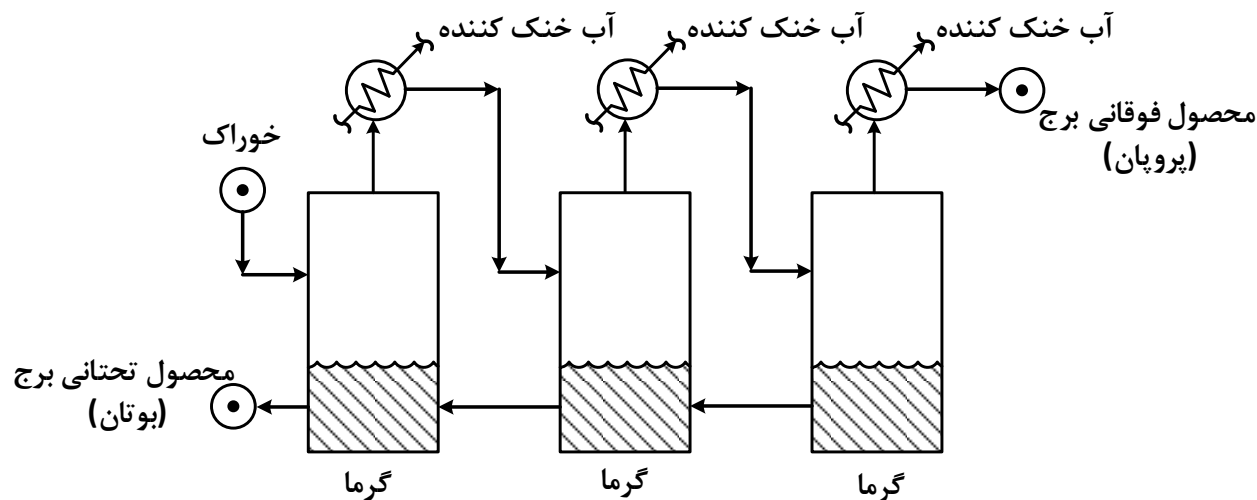
$$D_L = \text{چگالی فاز مایع}$$

معمولاً اندازه قطرات مشخص نیست. ویسکوزیته فاز بخار معمولاً ناچیز است و اغلب آن را نادیده می‌گیریم. منظورم از کوچک بودن، کمتر از 0.3 cSt است.

برای به حداقل رساندن ماندگی مایع، باید از سرعت‌های موضعی بالا برای فاز بخار اجتناب کرد. وقتی ارتفاع پاشش از سینی پایین‌تر به سینی فوقانی می‌رسد، راندمان تفکیک سینی به‌خاطر ماندگی مایع کاهش می‌یابد.

^۱ Stokes Law: قانون استوکس،

واحد ویسکوزیته سینماتیک، استوک بوده که به صورت سانتی متر مربع بر ثانیه بیان می‌شود. واحد موسوم تر سانتی استوک است (یک صدم cSt استوک).



شکل ۴-۱ واحد تقطیر اولیه، سه مرحله.

تأثیر کف

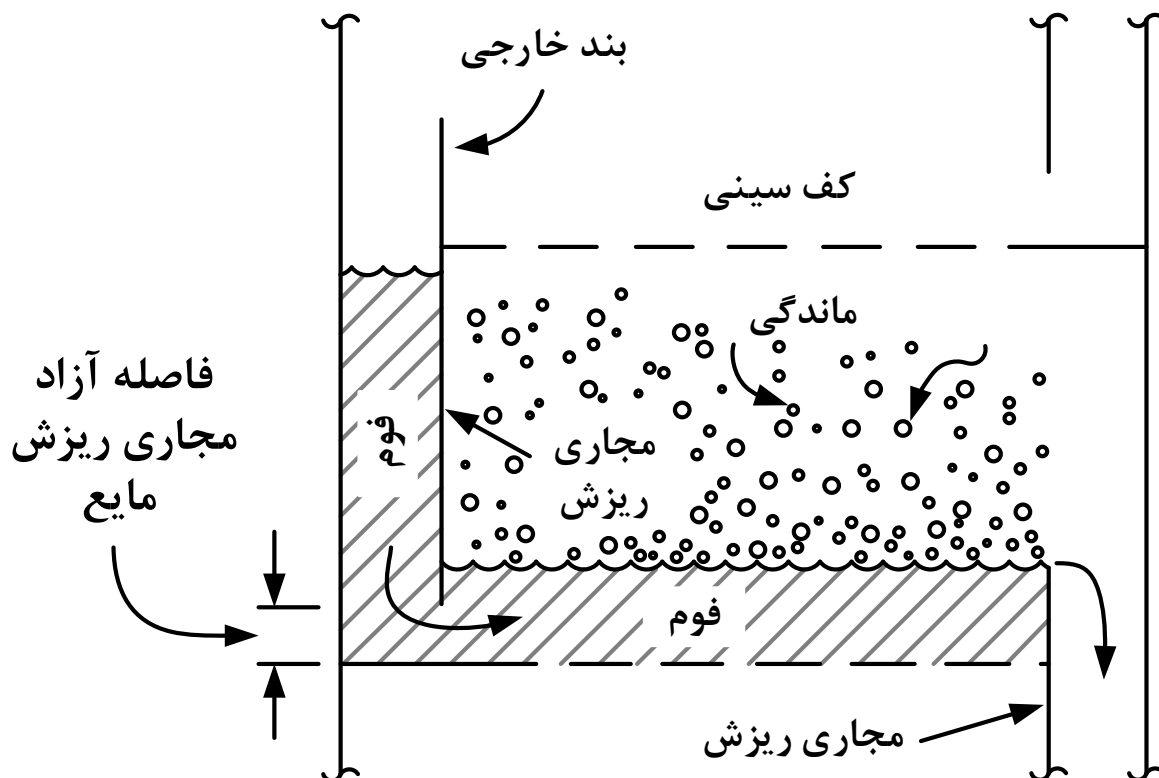
در واقع سیال موجود بر روی صفحه سینی تقطیر، مایع نیست؛ بلکه کف یا فوم است. جریان بخار از طریق سوراخ‌هایی که روی صفحه سینی هستند با مایع سینی بالایی مخلوط می‌شود و کف درست می‌کند. کف، از بند خارجی به سمت مجاری ریزش سرریز^۱ می‌شود (شکل ۴-۲). اما اگر مجاری ریزش خیلی کوچک باشد، کف مجاری ریزش را پر کرده و به سینی بالایی بازمی‌گردد. پس از آن، سطح کف بر روی سینی زیادتر می‌شود. با افزایش سطح کف یا فوم روی سینی، ماندگی مایع یا ارتفاع پاشش نیز بیشتر می‌شود.

مزایای رفلاکس

افزایش رفلاکس به‌خاطر افزایش عبور بخار و مایع در صفحه سینی، راندمان تفکیک سینی را بهبود می‌بخشد. مسئله اینجاست که رفلاکس از بخاری که در ریویلر^۲ تولید می‌شود، نشأت می‌گیرد. اگر بخار زیادی در صفحه‌های سینی در جریان باشد، احتمال دارد سرعت بخار زیاد شود. این موضوع، ارتفاع پاشش یا ماندگی را افزایش می‌دهد.

^۱ Overflow: سرریز

^۲ Reboiler: جوشاننده، منبع گرمای ورودی به یک برج تقطیر



شکل ۴-۲ سینی تقطیر. ماندگی، راندمان تفکیک سینی را کاهش می‌دهد.

رفلاکس و بار حرارتی بیش از حد ریبویلر به خاطر ماندگی مایع، راندمان تفکیک را کاهش می‌دهد. نمی‌توان نرخ رفلاکس را بدون افزایش بار حرارتی ریبویلر، افزایش داد. رفلاکس، بخار متراکمی است که از ریبویلر تولید می‌شود و به سمت سینی‌ها، کندانسور فوقانی و به درون درام رفلاکس جریان می‌یابد.

تجمع مایع پائین‌ریز

معمولاً مایعات پایین‌رونده از مجاری ریزش به سینی بالایی باز می‌گردد و موجب افزایش ارتفاع فوم در سینی می‌شود. در نتیجه، احتمال ماندگی قطرات مایع در سینی بالایی افزایش می‌یابد.

معمولاً مجاری ریزش فضای بسیار کوچکی ندارند؛ اما بسیار کوتاه هستند. با توجه به شکل ۴-۲ ارتفاع کف در مجاری ریزش عمدتاً از افت فشار جریان بخار در عبور از سینی فوقانی مجاری ریزش نشأت می‌گیرد. به محض این‌که بخار از منافذ کف این سینی و یا فنجانک‌های سینی عبور می‌کند، افت فشار اتفاق می‌افتد. دلایل این موضوع به شرح زیر هستند:

۱. محدودیت کلاhek های روی صفحه سینی؛

۲. وزن مایع روی صفحه سینی.

فشار بخار زیر سینی، ارتفاع کف را افزایش داده و آن را در مجاری ریزش هل می دهد. هنگامی که مجاری ریزش پر از کف شد، کف به سینی بالایی آن مجرای ریزش باز می گردد. وزن اضافی کف روی صفحه سینی، موجب افزایش افت فشار جریان بخار از منافذ و فنجانک سینی می شود. این موضوع سبب افزایش نیرویی می شود که ارتفاع مایع در مجاری ریزش را افزایش می دهد.

مشکل به خودی خود ادامه می یابد تا زمانی که سینی های بالایی برج نیز دچار طغیان شوند و «طغیان کامل»^۱ رخ دهد.

مجاری ریزش سینی همچنین می توانند با فوم پر شوند؛ چراکه به سرعت خالی نمی شوند. بیشتر اوقات این اتفاق به خاطر فاصله آزاد بسیار کم در مجاری ریزش مایع رخ می دهد (شکل ۴-۲ را مشاهده کنید). معمولاً فاصله آزاد مجاری ریزش مایع^۲ بین ۲-۳ اینچ است. احتمالاً فواصل کمتر از یک و نیم اینچ موجب طغیان مایع پائین رونده و بازگشت آن به سینی فوقانی شوند.

همچنین اگر فاصله آزاد مجاری ریزش مایع نسبت به ارتفاع بند خارجی^۳ سینی بیشتر باشد، مایع پائین رونده تجمع خواهد یافت. بخار از پائین وارد مجاری ریزش خواهد شد و جریان مایع را جابه جا کند. پس از آن، به خاطر آب بند نبودن مجاری ریزش، طغیان کامل رخ می دهد.

به خاطر داشته باشید که مجاری ریزش پر از کف است و فاز مایع متراکمی وجود ندارد. به این ترتیب، کف توسط بخار بالارونده در مجاری ریزش آب بندی نشده سینی، به آسانی جابه جا می شود.

راندمان سینی

قطعاً راندمان تفکیک سینی به دلیل ماندگی مایع که همچنین به آن «طغیان فواره ای»^۴ نیز می گویند، کاهش

^۱ Fully Developed Flood: طغیان کامل

^۲ Downcomer clearance: فاصله آزاد مجاری ریزش مایع

^۳ Outlet Weir: بند سرریز یا بند خارجی

^۴ Jet flood: طغیان فواره ای

می‌یابد. با این وجود، مشکلات راندمان سینی عمدتاً ناشی از ناترازی کفه‌های سینی هستند. ممکن است مایع موجود روی صفحه سینی، در پایین‌ترین نواحی خود و از میان منافذ سینی، نشستی پیدا کند. جریان بخار در بالاترین بخش‌های صفحه سینی متمرکز خواهد شد. تمامی این موارد منجر به آبراهه‌شدن^۱ فاز بخار- مایع می‌شود که راندمان تماس میان دو فاز را کاهش خواهد داد.

ناترازی یک سینی (که راندمان تفکیک آن را به‌شدت پایین می‌آورد) با افت فشار جریان بخار عبوری از منافذ کف سینی و یا کلاهک‌های دریچه‌ای^۲ عبور می‌کند، ارتباط دارد. اگر نقاط فرو رفته^۳ یک سینی (یعنی بخش‌هایی از صفحه سینی که زیر تکیه‌گاه حلقوی^۴ آن قرار دارد) کمتر از افت فشار جریان بخار در عبور از روزنه‌های کف سینی باشند، مایع از طریق روزنه‌های کف سینی چکه کرده و به خوبی با جریان بخار تماس برقرار نخواهد کرد.

برای محاسبه افت فشار عبور بخار از روزنه‌های سینی:

$$DP = K \cdot \frac{D_V}{D_L} \cdot (V)^2 = \text{بر حسب اینچ مایع} \quad (2 - 4)$$

که در این معادله:

D_V و D_L = چگالی بخار و مایع؛

V = سرعت در عبور از منافذ، بر حسب فوت بر ثانیه؛

(در سینی‌های غربالی) $K = 0.3$ ؛

(در سینی‌های دریچه‌ای از نوع کلاهکی) $K = 0.9$ ؛

(در سینی‌های دریچه‌ای از نوع ونتوری) $K = 0.5$ ؛

(در سینی‌های شبکه‌ای) $K = 0.6$.

^۱ Channeling: آبراهه‌سازی

^۲ Valve cap: کلاهک دریچه

^۳ Low points: نقاط فرو رفته

^۴ Support Ring: تکیه‌گاه حلقوی

کلاهک‌های دریچه‌ای، تمایل مایع به نشت از طریق پنل‌های کف سینی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش نمی‌دهند. سینی‌های کلاهکی^۱ نشت مایع از صفحه سینی را کاهش می‌دهند؛ اما در برج‌های تقطیر مدرن استفاده نمی‌شوند. هیچ مقدار استاندارد برای «K» در صفحه‌های سینی کلاهکی موجود نیست.

صفحات سینی کلاهکی

کلاهک‌های دریچه‌ای باید به صورت شیرهای یک‌طرفه^۲ عمل کنند تا نشت مایع از طریق صفحات سینی را کاهش دهند. اما ظاهراً این اتفاق نمی‌افتد و به نظر نمی‌رسد که دریچه‌ها، نشتی صفحه سینی را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. تنها کاری که آن‌ها در برج‌های کثیف پالایشگاهی انجام می‌دهند، چسبیدن به کف سینی است. این مشکل، جریان بخار را محدود کرده و ارتفاع کف را در مجاری ریزشی افزایش می‌دهد که سبب طغیان سینی می‌شود.

من تجربه استفاده از سینی شبکه‌ای را نیز دارم. این سینی مانند سینی دریچه‌ای است؛ اما کلاهک آن در موقعیت ثابتی قرار دارد. کم‌وبیش به سینی غربالی شباهت دارد اما ظرفیت آن حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد بیشتر است.

سینی‌های کلاهکی از مشکلات احتمالی نشت در صفحه سینی جلوگیری می‌کنند. هرچند گران‌قیمت هستند، تمیز کردن آن‌ها مشکل است و حدوداً ۱۰ تا ۲۰ درصد جابجایی بخار کمتری در مقایسه با انواع سینی شبکه‌ای مدرن دارند. ظرفیتشان نیز اندکی کمتر از صفحه سینی غربالی نیم اینچی است.

^۱ Bubble Cap Trays: سینی‌های کلاهکی

^۲ Check valves: شیرهای یک‌طرفه



ماندگی زدایی^۱ بخارها

چکیده:

از قانون استوکس ممکن است برای محاسبه سرعت ته‌نشینی استفاده شود. سرعت ته‌نشینی با تغییر اختلاف چگالی بین دو فاز و سرعت جریان فاز پیوسته متغیر است. تمایل ماندگی قطرات مایع در جریان فاز گاز، با فاکتور C متناسب است. در ابتدا، توزیع به جلوگیری از ماندگی، کشیده‌شدن مایع به درون جریان گاز و عدم ته‌نشینی آن در محفظه کمک می‌کند. از ادغام‌گرها برای جلوگیری از جداسازی فازها و سرکوب ماندگی، استفاده می‌کنند. تشکیل کف، زمان لازم برای ته‌نشینی را به شدت افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی:

ته‌نشینی؛ ادغام‌گرها؛ قانون استوکس؛ ماندگی؛ کلاهکی؛ فاکتور C؛ سرعت؛ فوم

^۱ De-entrainment: ماندگی زدایی

مشغول نوشتن این کتاب در انگلستان هستم. در اینجا هوا بارانی است و باد می‌وزد. ۴ مایل پیاده‌روی کردم. باد با سرعت ۱۵ مایل در ساعت می‌وزید و قطرات باران به صورتم می‌خورد. باد قطرات باران را با خود می‌کشید و بر نیروی گرانش یا سرعت ریزش باران غلبه می‌کرد.

موقع دویدن، محاسبات فرآیندی را انجام می‌دهم. تصمیم گرفتم فاکتور ماندگی^۱ قطرات باران را در حین پیاده‌روی‌ام محاسبه کنم. نخست، چگالی هوا را در دمای ۶۰ درجه فارنهایت و فشار اتمسفر محاسبه کردم. در چنین شرایطی، یک مول هوا ۳۷۹ فوت مکعب فضا اشغال می‌کند. وزن مولکولی هوا برابر با ۲۹ پوند است. بنابراین:

$$0.076 \text{ پوند بر فوت مکعب} = 29 \div 379$$

$$\text{چگالی آب در } 60 \text{ درجه فارنهایت} = 62.4 \text{ پوند بر فوت مکعب}$$

مطابق قانون ویسکوزیته جورج استوکس^۲، تمایل قطرات مایع به ماندگی در جریان بخار متناسب است با:

$$\frac{1}{2} (\text{بخار چگالی} / \text{مایع چگالی}) \times (\text{سرعت بخار})$$

$$\frac{15 \times 5280 \text{ ft}^3}{3600 \text{ Sec}} = 22 \text{ فوت بر ثانیه} = 15 \text{ MPH} \text{ در سرعت باد}$$

تمایل قطرات برای جذب (ماندگی) توسط جریان بخار را فاکتور (عامل) «C» می‌نامند. هرچه عامل «C» بزرگ‌تر باشد، ماندگی قطرات مایع در اثر نیروی گرانش بیشتر می‌شود. در این مورد:

$$"C" = 22 \times (0.076 \div 62.4)^{\frac{1}{2}} = 0.75 \text{ ft/sec}$$

عدد بالا، یک عامل «C» بزرگ است. بنابراین متعجب نشدم که چرا باران به صورتم می‌خورد.

هشدار! اگر در سیاره‌ای با نیروی گرانش متفاوت با زمین ساکن هستید، راهنماهای بخش بعدی به کارتان نمی‌آید. افزون‌براین، اگر قطرات متشکل از غبار باشند که با رسیدن به سرعت صوت و متعاقباً کاهش سرعت به زیر سرعت صوت در لوله‌های هیتر ایجاد شده باشند، روابطی که در زیر مورد بحث قرار گرفته‌اند، کاربردی نخواهند داشت. این

^۱ Entrainment factor: فاکتور ماندگی

^۲ سر جرج گابریل استوکس، بارونت اول (زاده ۱۳ اوت ۱۸۱۹ - درگذشته ۱ فوریه ۱۹۰۳)، ریاضیدان و فیزیکدان بریتانیایی بود که به علت مطالعات خود روی مایعات ویسکوز، به ویژه به خاطر قانون ویسکوزیته استوکس، که توصیف حرکت یک کره جامد در مایع می‌باشد، و قضیه استوکس، که یک قضیه اساسی تجزیه و تحلیل بردارها است، به شهرت رسید (منبع: ویکی‌پدیا).

مخفف «Mile Per Hour»، مایل بر ساعت: MPH^۳

یک مشکل بزرگ است که در تولید فرآورده‌های نفت گاز در برج های خلأ پالایشگاه، منجر به ماندگی متوقف‌نشدنی آسفالتن‌ها^۱ می‌شود.

جداسازی مایع - مایع

در سال ۱۹۶۵ به عنوان مهندس طراحی فرآیند در شرکت نفت آمریکا^۲ مشغول به کار شدم. در دستورالعمل^۳ طراحی شرکت نفت آمریکا که برایم صادر شده بود، نوشته بودند: «سرعت ته‌نشینی^۴ آب در مایعات هیدروکربنی ۲۵ فوت در ساعت است». بنابراین آن روز بعد از این‌که به خانه رفتم، بطری‌ای به طول یک فوت را با نفت سفید پر کردم. پس از آن با یک قطره‌چکان چشمی^۵، مدت زمان لازم برای افتادن یک قطره آب به کف بطری را اندازه گرفتم؛ چیزی حدود ۳۰ ثانیه شد که تقریباً ۱۲۰ فوت در ساعت است، نه ۲۵ فوت که در دستورالعمل طراحی نفت آمریکا نوشته شده بود.

پس از آن، چند اونس نفت سفید را در بطری‌ام مخلوط کردم و آن را به شدت تکان دادم. حدود ۵ دقیقه زمان لازم بود تا این دو فاز مایع کاملاً از یکدیگر جدا شوند.

من تصور می‌کنم این حالت نسبتاً شبیه تمایل باد برای کشیدن قطرات باران به دنبال خود است. اگر قطرات باران بزرگ باشند، در باد ملایم به صورت عمودی فرو می‌افتند. اما اگر باران به صورت نم‌بارد، نسیم ملایم و ناچیزی باعث می‌شود که قطرات ریز آن به صورتم بخورد.

سال گذشته، نمونه‌ای^۶ از آب را از درام رفلاکس جداساز پالایشگاه جمع‌آوری کردم. نمونه با بخار هیدروکربن نفتا به حالت ابری درآمد. ۲ ساعت زمان لازم بود تا نفتا در بالای استوانهٔ مدرج من شناور شود. هرچند، هنگامی که چند قطره اسید به نمونه‌ام افزودم تا pH از ۸ به ۶ برسد، زمان جداسازی فازی از حدود ۲ ساعت به ۳۰ دقیقه کاهش یافت.

آسفالتین، ترکیبات سنگینی از جنس ساختارهای هیدروکربن آروماتیکی می‌باشند که در نفت خام به‌صورت معلق یافت می‌شوند و به‌وسیلهٔ Asphaltene^۱ رزین‌ها، به‌عنوان عامل نگهدارنده، احاطه شده‌اند. عوامل تشکیل رسوب آسفالتین در مخازن نفتی به تغییرات فشار، دما یا ترکیب نفت بستگی دارد که این عوامل سبب به‌هم خوردن تعادل شیمیایی موجود در مخزن و چاه شده، که در نتیجه باعث تشکیل رسوب می‌شود.

^۲ شرکت نفت آمریکا: American Oil

^۳ دستورالعمل: Manual

^۴ سرعت ته‌نشینی: Settling rate

^۵ Eye dropper: قطره‌چکان چشمی

^۶ Sample: نمونه

من قبلاً، جریانی شامل ۱۰ درصد نفتای سنگین و ۹۰ درصد آب داشتم. وقتی مشغول پمپاژ این مخلوط فازی با یک پمپ رفت و برگشتی^۱ بودم، ۲ دقیقه طول کشید تا سیال خروجی آن تفکیک شود. وقتی مشغول پمپاژ جریان با یک پمپ گریز از مرکز بودم، ۲ ساعت طول کشید تا امولسیون غلیظ حاصله ته‌نشین شود.

همانطور که در این فصل مشاهده می‌کنیم، جداسازی فازی مایع-مایع کار پیچیده‌ای است.

جداسازهای بخار-مایع

هنگامی که مشغول محاسبهٔ سرعت ته‌نشینی قطرات مایع از یک فاز بخار معمولی بودم، سه فرض را در نظر گرفتم:

۱. قطرات، ذرات ریز تشکیل‌دهنده مه نیستند.
۲. فاز بخار ویسکوزیتهٔ بسیار پایینی دارد (کمتر از C.S^۱).
۳. چگالی فاز بخار نسبت به فاز مایع بسیار کم است.

بر این اساس، از رابطه زیر استفاده می‌کنم:

$$C = V \cdot (D_V \div D_L)^{\frac{1}{2}}$$

که در این معادله:

C = فاکتور ماندگی مایع

V = سرعت عمودی فاز بخار، ft/s

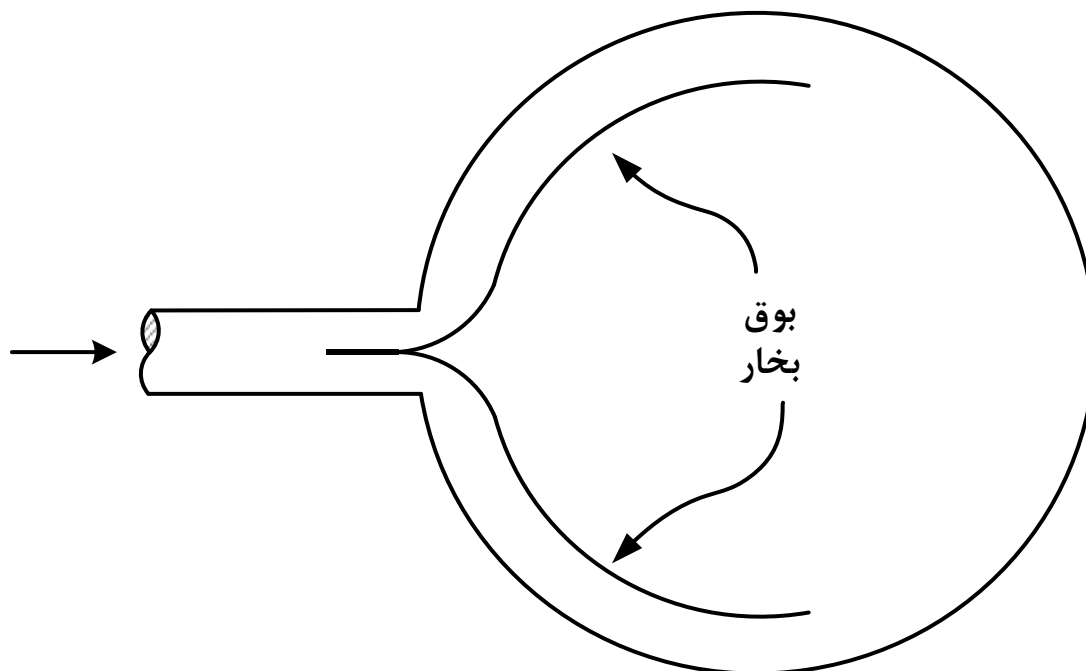
D_V = چگالی فاز بخار

D_L = چگالی فاز مایع

این رابطه، در سطح جهانی در صنعت فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود، مقادیر فاکتور «C» که در بخش زیر مشخص شده، بیانگر تجربهٔ عملیاتی من است:

^۱ Reciprocating pump: پمپ رفت و برگشتی

۱. "C" کمتر از ۰/۱ = قطرات به راحتی به وسیله گرانش ته نشین می شوند.
۲. "C" بین ۰/۱ و ۰/۱۵ = اگر سرعت ورودی کم باشد (۲۰ تا ۳۰ فوت بر ثانیه) و ارتفاع عمودی بخار خروجی ۴ تا ۶ فوت باشد، مایع تقریباً به خوبی ته نشین می شود.
۳. "C" بین ۰/۱۵ و ۰/۲۰ = افزون بر موارد بند ۲، لازم است یک تیغه جداکننده مماسی^۱ یا بوق بخار^۲ اضافه شود (شکل ۵-۱).
۴. "C" بین ۰/۲۰ و ۰/۲۵ = اغلب توصیه می شود که از یک رطوبت گیر^۳ ۶ اینچی استفاده کنید. بر اساس تجربیاتم، چنین کاری در اغلب سرویس های پالایش نفت درست نیست. مشکل اینجاست که نمک ها یا محصولات خوردگی سولفید آهن، در رطوبت گیر رسوب می کنند. افت فشار سیال در عبور از رطوبت گیر تا زمانی افزایش می یابد که از دیواره محفظه جدا شود. سرعت موضعی زیاد بخار، منجر به افزایش ماندگی مایع می شود. بهتر است در سیستم هایی که احتمال رسوب یا خوردگی وجود دارد، از رطوبت گیر استفاده نکنید؛ اما برای طراحی فاکتور «C» کمتر از ۰/۲ فوت بر ثانیه می توان از آن استفاده نمود.



شکل ۵-۱ بوق بخار (Vapor Horn)، جداسازی بهتر فاز را، افزایش می دهد.

^۱ Tangential baffle: تیغه جداکننده مماسی که به صورت سطح صاف است.

^۲ Vapor horn: نوعی از بافل های مماسی است. زمانی که جریان سیال سرعت زیادی دارد و احتمال دوفازی شدن آن زیاد است، ممکن است در زمان ورود به مخزن یا وصل ضربه ای را به وجود آورد. برای جلوگیری از ایجاد ضربه و جدا شدن بهتر دو فاز بخار و مایع از این بافل استفاده می شود که می تواند سطح صاف یا منحنی باشد.

^۳ Demister: مه گیر، رطوبت گیر

دسته لوله‌های گردابی

در طول سال‌های گذشته در بسیاری از جداکننده‌های بزرگ مایع-بخار، دیگر از بابت فاکتور ماندگی مایع یا «C» نگرانی ندارم. اکنون از تجهیز «دسته لوله گردابی» استفاده می‌کنم. در این تجهیز، مانند جداکننده سیکلون^۱ یا سانتریفیوژ، قطرات مایع با نیروی گریز از مرکز از فاز بخار جدا می‌شوند. از این تجهیز در برج‌های تبخیر آبی نفت خام^۲ استفاده می‌کنم و واقعاً عملکرد خوبی دارد. این دستگاه به صورت یک مجموعه که در محفظه‌های موجود قرار گرفته، خریداری می‌شود. (ای. جی. سیستمز، هوستون، تگزاس).^۳

اسپری‌های روغن شست‌شو^۴

یکی از روش‌های متداولی که برای مهار ماندگی مایعات و یا ذرات در جریان بخار با فاکتورهای «C» بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از یک محفظه پاشش است. اسپری کردن روغن شست‌شو، ماندگی قطرات آلاینده را از بین خواهد برد. شست‌شو

نازل‌های اسپری، زاویه پاشش ۱۲۰ درجه دارند و به صورت مخروطی بوده و حاوی مایع پاک‌کننده هستند. این اسپری‌ها تا فاکتور $C = 0/35$ فوت بر ثانیه کاملاً موثر هستند. زاویه پاشش ۱۲۰ درجه، در افت فشار کمتر از ۶-۷ تمایل به فروپاشی دارد. اگر افت فشار زیاد باشد، اسپری به غبار تبدیل شده و ماندگی را تشدید خواهد کرد. برای یک نازل پاشش کوچک (کمتر از ۱ اینچ)، این اتفاق در صورت افزایش افت فشار نازل به بیش از ۵۰ یا ۶۰ psi رخ می‌دهد.

توزیع بخار

من در مورد جداساز بخار-مایع عمودی کوچک به قطر ۳ یا ۴ فوت، نگرانی چندانی بابت توزیع جریان بخار

^۱ Cyclone separator: جداکننده سیکلونی یا به اختصار سیکلون، دستگاهیست برای غبارگیری و جمع‌آوری ذرات معلق در گازها.

^۲ Preflash tower: برج تبخیر آبی نفت خام

^۳ (E.G. Systems, Houston, Texas): ای. جی. سیستمز، هوستون، تگزاس

^۴ Wash oil: روغن شست‌شو، از این روغن در کارخانجات کک‌سازی به منظور جداسازی ترکیبات آروماتیک گاز کوره، تولید حلال‌های رنگ، تولید مواد ضدغفونی کننده و سوخت موتور دیزل استفاده می‌شود. آسفتن نوعی روغن شست‌شو به شمار می‌رود

ورودی ندارم. اما یک بار، محفظه‌ای با قطر ۲۶ فوت با نازل ورودی ۳۰ اینچی را برای شرکت شورون^۱ طراحی کردم. من در این مورد برای توزیع بخارها در تمام قطر محفظه، از یک سینی دودکشی^۲ با افت فشاری کوچک (یعنی ۱ اینچ آب) از جریان بخار در هنگام عبور، ازدودکشی به قطر ۶ اینچ استفاده کردم.

سرعت بخار ورودی ۲۰ تا ۳۰ فوت در ثانیه و قابل اغماض بود. از طرف دیگر، بخاری با سرعت ورودی ۱۰۰-۱۲۰ فوت در ثانیه، نیاز به بعضی از تجهیزات توزیع دارد تا اندازه حرکت^۳ بخار را پراکنده کرده و از سرعت های موضعی زیاد بخار که موجب پدیده ماندگی مایعات می شود، جلوگیری کند.

ته نشینی آب از فاز مایع هیدروکربنی

بخش زیادی از زمانم را صرف اندیشیدن در مورد این مشکل کردم؛ چرا که رفلاکس (برگشت) آب به برج تقطیر موجب موارد زیر می شود:

- خوردگی؛
- گرفتگی؛
- طغیان به خاطر کف کردن؛
- فرآورده‌هایی با کیفیت پایین تر از حد مورد نیاز^۴.

خروج آب از خوراک برج های تقطیر هیدروکربنی نیز موجب بروز مشکلاتی مشابه می شود. امروز که قرار است تعطیلات را در کنار همسر سپری کنم، در مورد راه‌حلی برای این مشکل خاص فکر می کنم.

من درام‌های ته نشینی آبی را طراحی می کنم که در حالت افقی قرار دارند (شکل ۵-۲). زمان ماند مایع هیدروکربنی بین ۳-۵ دقیقه است. در طراحی ام سرعت ته‌نشینی آب را ۳۰ فوت بر ساعت در نظر می گیرم. معمولاً این سرعت می تواند تا دو برابر سرعت فوق باشد و در این صورت نیز می توانیم به میزان قابل قبولی از حذف آب دست یابیم. بدین ترتیب، فاز مایع هیدروکربنی بیشتر از ۲۰۰۰ یا ۳۰۰۰ ppm آب نخواهد داشت.

^۱ Chevron: شورون

^۲ Chimney tray: سینی دودکشی

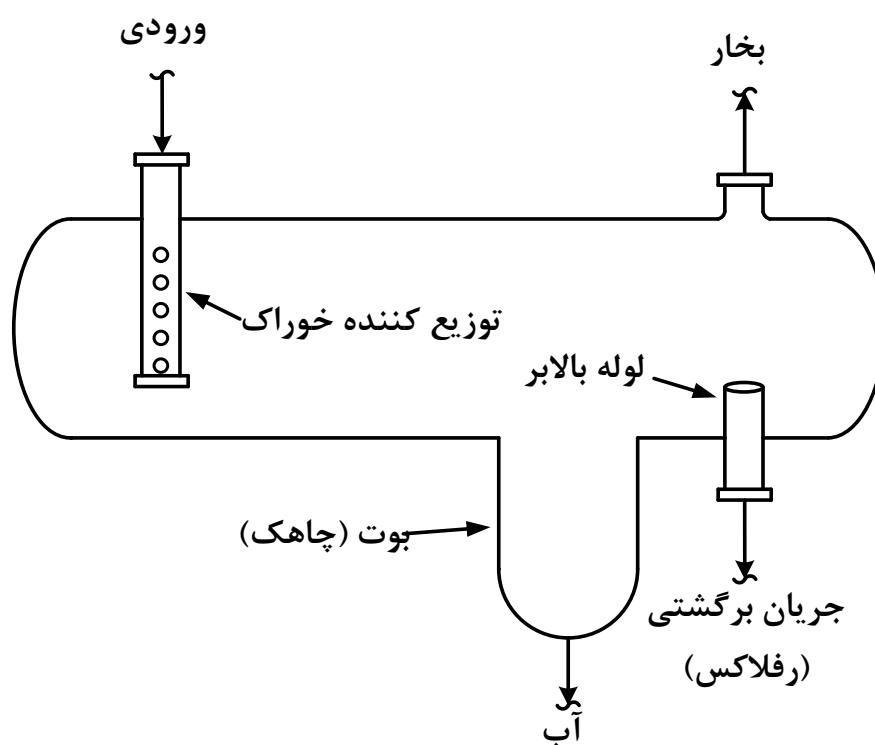
^۳ Momentum: اندازه حرکت

^۴ Off-spec products: محصولات بی کیفیت، فرآورده‌هایی با کیفیت پایین تر از حد مورد نیاز

ادغام‌گرها^۱

اگر ویسکوزیته هیدروکربن بالاتر از ۱۰ یا ۲۰ cSt باشد، مانع ته‌نشینی آب می‌شود. احتمالاً آب در هیدروکربن‌ها به حالت امولوسیون در می‌آید؛ چراکه فازها با همدیگر از یک پمپ گریز از مرکز یا از یک شیر کنترلی با یک ΔP بزرگ (یعنی بیش از ۲۰ یا ۳۰ psi) عبور می‌کنند. شاید سرعت ته‌نشینی واقعا پایین باشد. گاهی باید اجازه داد تا آب یک مخزن در مدت یک یا دو روز ته‌نشین شود. یکی دیگر از روش‌های متداول، استفاده از یک فیلتر ادغام‌گر^۲ است.

معمولاً مش^۳ به لوله‌هایی با شکل و اندازه لامپ‌های فلورسنت بسته می‌شود. این توری‌ها معمولاً به سرعت مسدود شوند^۴ و من ابدأ استفاده از آن‌ها را دوست ندارم؛ مگر در سرویس‌های پاکیزه، عاری از نمک، ذرات ریز و فرآورده‌های خوردنده سولفید آهن.



شکل ۵-۲ درام رفلاکس.

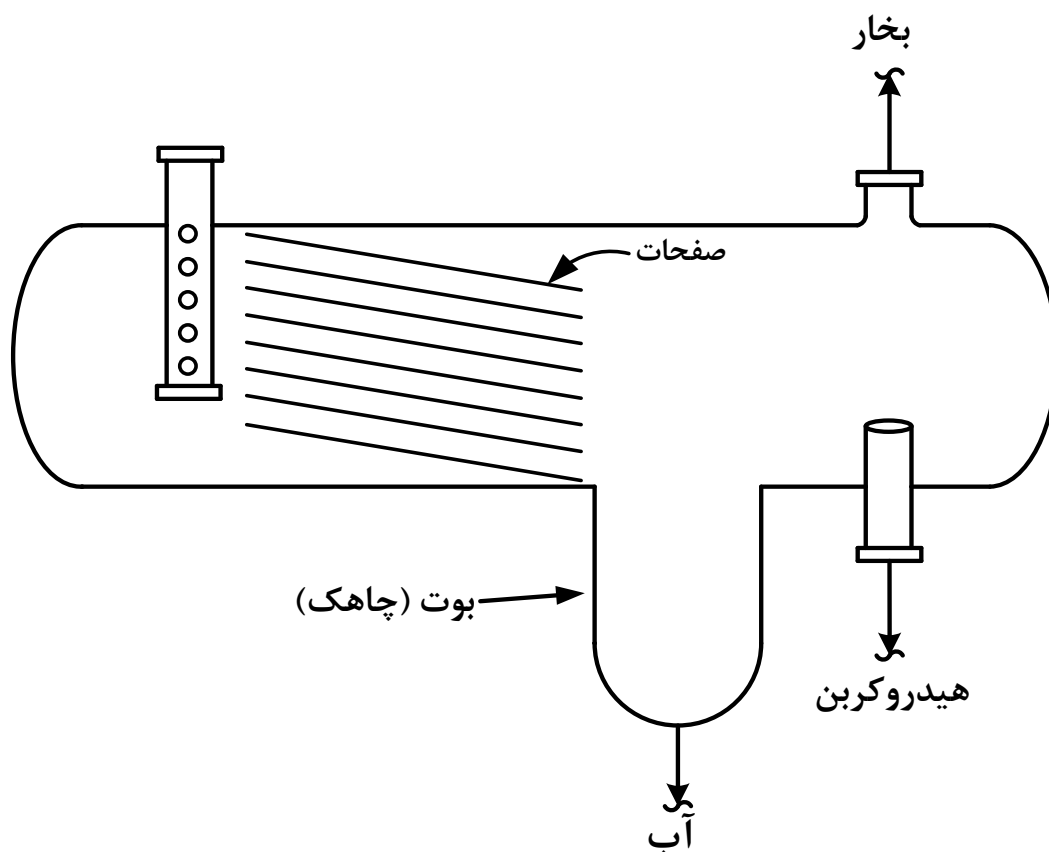
^۱ ادغام‌گر: Coalescer

^۲ فیلتر ادغام‌گر: Mesh type

^۳ مش، به تعداد سیم‌های داخل صفحه یک فیلتر گفته می‌شود، مش بزرگ‌تر یعنی فیلتر ریزتر

^۴ مسدود شدن: Plug

در شکل ۵-۳، یک انتخاب بهتر نشان داده شده است. این شکل، یک ادغام گر صفحه‌ای است. آخرین طراحی‌ام را از اینترنت کپی کردم. صفحات با زاویه ۱۰-۱۵ درجه‌ای و در فاصله ۱ اینچی از یکدیگر و در امتداد قطر وسل قرار گرفته‌اند. وظیفه صفحات، کوتاه کردن فاصله ته‌نشینی قطرات آب است (یعنی ۱ اینچ به جای چند فوت). هنگامی که قطرات آب به صفحات فلزی شیب‌دار می‌رسند، با هم ادغام می‌شوند (تا قطراتی با قطر بزرگ‌تر تشکیل دهند). سپس به سرعت از آن‌ها عبور کرده و به داخل بوت (چاهک) آبگیر^۱ تخلیه می‌شوند.



شکل ۵-۳ صفحات، ته‌نشین‌سازی آب را افزایش می‌دهند.

^۱ Boot: چاهک

فوم (کف)

معمولاً تشکیل فوم یا کف ناشی از حضور ذرات ریز موجود در مخلوط مایع- بخار صورت است. شکل ۵-۴ سطح سیال را در شیشه مایع‌نما^۱ و به صورت سه‌تکه نشان می‌دهد. این موضوع به صورت قطعی نشان‌دهنده حضور کفی با چگالی پایین در محفظه است. مایعی که در شیشه مایع‌نما مشاهده می‌شود، معیاری از سطح سیال در ظرف فرآیندی (وسل) نیست. آن‌ها مقدار چگالی کف در وسل را نسبت به چگالی مایع شفاف^۲ در شیشه مایع‌نما، اندازه‌گیری می‌کنند.

هنگامی که ارتفاع کف تا سطح نازل ورودی افزایش می‌یابد، مایع به بیرون از محفظه دمیده می‌شود. یک راه برای ممانعت از پدیده کف‌زایی، استفاده از مواد ضدکف سیلیکونی است. اما کاربرد این مواد غالباً سبب ایجاد مشکلاتی برای کاتالیست راکتور در پایین‌دست می‌شود. راه بهتر، حذف منبع خوردگی است که ذراتی را ایجاد کرده و موجب تشکیل کف می‌شود. بهتر است ریشه مشکل را درمان کنید، نه این‌که فقط علائم را برطرف کنید.

خلاصه

شاید به نظر برسد که این فصل، ترکیب درهم‌وبرهمی از موارد زیر است:

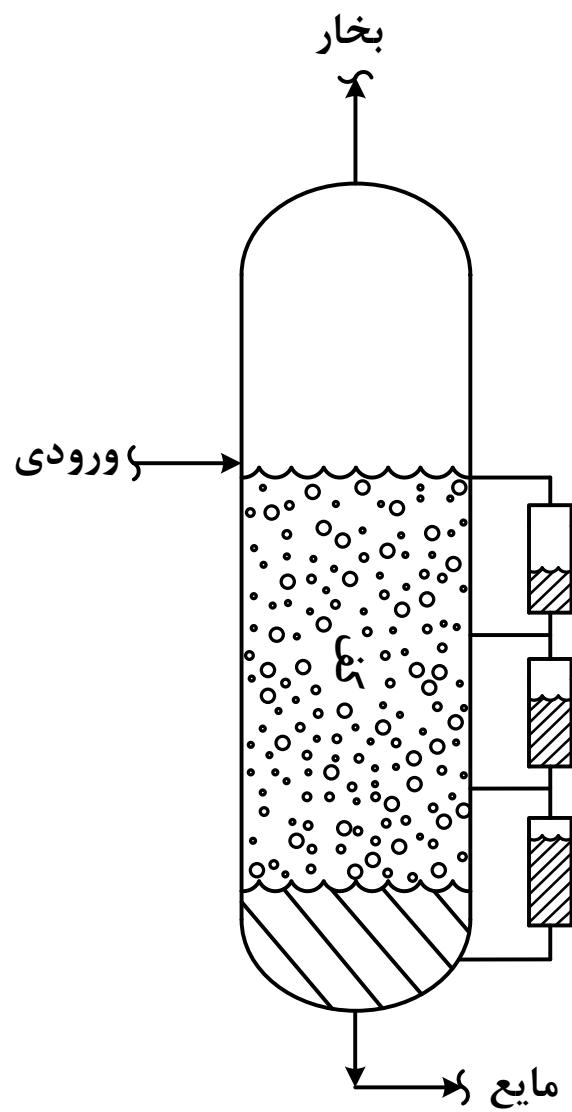
- مشاهدات کارخانه فرآیندی؛
- تجربیات کودکان؛
- محاسبات سرانگشتی؛
- اصول مهندسی شیمی.

در واقع همین‌طور است. من هنوز هم مجذوب فوت کردن سوپ می‌شوم؛ زیرا این پدیده تجربه‌ای از کشش سطحی است. عاشق تماشای این صحنه هستم که رشته‌های پاستا در دیگ آب جوش در حال جوشیدن هستند و ذرات ریزی از رشته‌ها خارج می‌شوند. همیشه از مشاهده کولرهای تبخیر سلولزی^۳ (کولرهای آبی) که گرمای محسوس هوا را به گرمای نهان تبخیر آب تبدیل می‌کنند، ذوق‌زده می‌شوم. در مهندسی فرآیند پالایشگاه، همه چیز جذاب و مهیج است؛ منتها در مقیاسی بزرگ‌تر و خطرناک‌تر!

^۱ Gauge glass: لوله شیشه‌ای نشان دهنده سطح مایع.

^۲ Clear Liquid: مایع شفاف

^۳ Swamp coolers: کولر تبخیر سلولزی، کولرهای آبی رایج در مصارف خانگی



شکل ۴-۵ لول‌های دو تکه، نشان‌دهنده وجود کف یا فوم هستند.

شبکه‌های روغن شست‌شوی برج تفکیک‌کننده^۱

چکیده:

از این شبکه در برج های خلأ پالایشگاه، ناحیه تبخیرآنی برج تقطیر نفت خام، برج تفکیک‌کننده کک‌ساز تأخیری و برج تفکیک‌کننده کاهش گرانروی برای جداسازی پسماند تقطیر از بخارات ناحیه تبخیرآنی استفاده می‌شود.

برای سرعت‌های بخار بالاتر، شبکه مذکور، قطرات به دام افتاده کربن کنرادسون را به‌طور موثری حذف می‌کند. شبکه اسپری روغن شست‌شو (روغن شست‌شو)، تنها برای رفع ماندگی به کار نمی‌رود؛ بلکه برای جلوگیری از تشکیل کک و رسوب نیز موردنیاز است. عدم توزیع مناسب روغن شست‌شو یکی از مشکلات عمده در صنعت پالایشگاهی است.

کلمات کلیدی:

شبکه؛ روغن شست‌شو؛ برج خلأ؛ ککینگ تأخیری؛ غلظت‌شکن؛ ناحیه تبخیرآنی

^۱ Fractionator: برج تفکیک‌کننده

جلسه سالانه پرسش و پاسخ NPRA^۱ در نیواورلئان^۲ در حال برگزاری بود. در برنامه عصر جلسه شرکت کرده بودم. من در نیواورلئان زندگی می‌کنم و محل زندگی‌ام، نزدیک مرکز همایش‌ها است. به تازگی نیز با پیر تاردو^۳، یکی از دانشجویان سابق سمینار عیب‌یابی‌ام در عربستان سعودی ملاقات کردم. پیر در مورد طراحی شبکه روغن شست‌شو از من سوال پرسید. وظیفه شبکه، ممانعت از ماندگی آسفالتین حاصل از ناحیه تبخیر ناگهانی^۴ و کاهش آلودگی فرآورده نفت گاز سنگین است.

پیر پرسید: «نورم، عمق بهینه برای شبکه روغن شست‌شو در برج خلأ چقدر است؟ آیا برای طراحی یک تفکیک‌کننده در واحد کک‌سازی تأخیری^۵ نیز از معیار یکسانی استفاده می‌شود؟»

پاسخ دادم: «پیر، عمق بهینه پکینگ^۶ برای شبکه روغن شست‌شو صفر است و این معیار در موارد زیر کاربرد دارد:

- برج‌های خلأ؛
- منطقه تبخیر ناگهانی نفت خام؛
- تفکیک‌کننده‌های واحد کک‌سازی؛
- تفکیک‌کننده‌های غلظت‌شکن^۷.

پیر متعجب شد و پاسخ داد: «صفر! اما چگونه ممکن است؟ شبکه‌های روغن شست‌شو در برج‌های خلأ پالایشگاه و تفکیک‌کننده‌های واحدهای کک‌سازی تأخیری در سراسر جهان استفاده می‌شوند. نه نورم؛ با نظرت موافق نیستم.»

مخفف "National Petroleum Refiners Association" انجمن ملی پالایشگران نفت. NPRA^۱

نیواورلئان: New Orleans^۲

پیر تاردو: Pierre Tardo^۳

منطقه تبخیر ناگهانی: Flash Zone^۴

واحد ککینگ تأخیری، این واحد مشابه واحد کراکینگ حرارتی بوده و شامل کوره، تفکیک‌کننده و چند مخزن برای Delayed Coker Fractionator^۵ جمع‌آوری کک می‌باشد. خوراک مایع گرم ابتدا وارد ستون تفکیک شده، پس از جداسازی بخش‌های سبک خوراک از پایین ستون تفکیک جریان می‌یابد.

پکینگ ذرات و قطعاتی است که در برج‌های انباشته مورد استفاده قرار می‌گیرد و این پکینگ‌ها که از جنس‌های مختلف فلزی، سرامیکی و Packing^۶ پلاستیکی و ... ساخته می‌شوند، از طریق افزایش سطح تماس بین گاز بالارونده و مایع بند شونده، راندمانی برج تقطیر را بالا می‌برند.

تفکیک‌گرهای غلظت شکن: Visbreaker fractionators^۷

«بسیار خب پیر. بهتر است توضیح دهم. بیا یک نوشیدنی و یک بشقاب میگو بخوریم. دو داستان برای تعریف می‌کنم؛ یک داستان در مورد کارخانه فرآیندی قدیمی هورون^۱ در ال‌سگندو^۲ واقع در کالیفرنیا و داستان دوم در مورد پالایشگاه جدید ساسول^۳ واقع در عربستان سعودی است.»

بخش روغن شست‌شوی واحد کک‌ساز تأخیری

این تفکیک‌کننده در واحد کک‌سازی BSD^۴ ۶۵۰۰۰ تاریخچه‌ای طولانی در زمینه شبکه روغن شست‌شو دارد (شکل ۶-۱). حاصل کار، تولید نفت گاز سیاه سنگین در واحد کک‌سازی بود. نفت گاز، فیلترهای خوراک را در واحد تصفیه کننده هیدروژنی^۵ نفت گاز مسدود می‌کرد.^۶ شست‌شوی معکوس^۷ این فیلترها به قدری تکرار شد که کک‌ساز به ناچار برای تعویض شبکه روغن شست‌شو تعطیل شد.

«نورم، فکر می‌کنم آنها می‌توانستند برای پاک‌سازی نفت گاز، به جای تعطیل کردن واحد کک‌ساز، از روغن شست‌شو بیشتری استفاده کنند. تعطیلی یک واحد ککینگ با ظرفیت BSD ۶۵۰۰۰ مثل این است که روزانه یک میلیون دلار را از دست بدهیم.»

«بسیار خب پیر، هنگامی که افت فشار در هر اینچ آب بر حسب هر فوت پکینگ، از دو یا سه بار بیشتر شود، روغن شست‌شو نمی‌تواند به پکینگ نفوذ کند؛ بلکه دوباره توسط جریان بخار از پکینگ خارج می‌شود. وقتی هیچ روغن پاک‌کننده‌ای از شبکه درین نشود، بخش کمتری از شبکه عاری از کک می‌شود. پس از افزایش کک، افت فشار شبکه به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد.»

«این موضوع واقعا بد به نظر می‌رسد. حدس می‌زنم باقیمانده کربن کنرادسون^۸ در نفت گاز سنگین واحد کک‌سازی نیز به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد. درست است؟»

^۱ Hevron: هورون

^۲ El Segundo: ال‌سگندو

^۳ Sosal: ساسول

^۴ Barrels Per Stream Day (BSD or BPSD): تعداد بشکه در طول یک روز

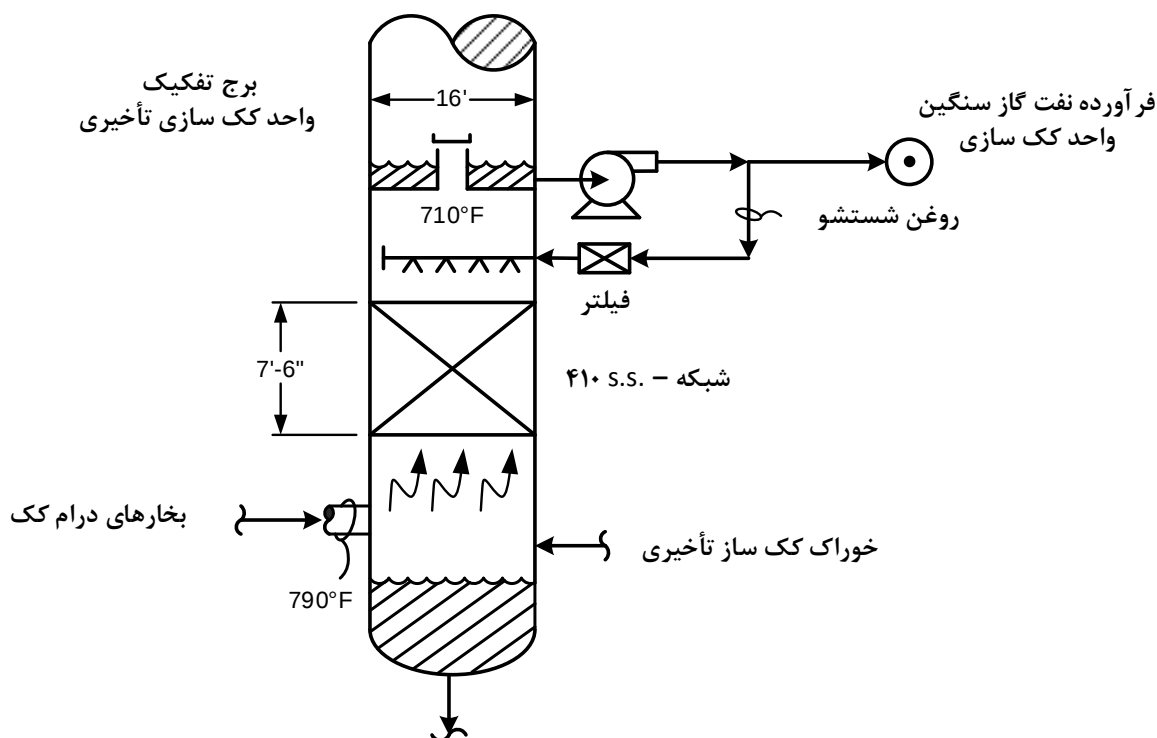
^۵ Hydrotreater: واحد تصفیه کننده هیدروژنی

^۶ Plug: مسدود کردن

^۷ Back-flush: شست‌شوی معکوس

^۸ Conradson carbon residue: باقیمانده کربن کنرادسون

موافقت کردم: «دقیقاً همینطور است پیر.»



شکل ۱-۶ عمق شبکه بیش از حد است. عمق بهینه صفر است.

ارتفاع زیاد شبکه در واحد کک سازی

ویژگی‌های شبکه روغن پاک کننده واحد کک ساز هورون بدین شرح بود:

- ارتفاع ۷ فوت و ۸ اینچ
- شبکه کار سنگین^۱ از آلیاژ گروه ۴۱۰ S.S -

در این شبکه می‌توان دو مرحله تفکیک نظری را ایجاد کرد. بخار درام کک در دمای ۷۹۰ درجه فارنهایت وارد تفکیک کننده شده (شکل ۱-۶) و در دمای ۷۱۰ تا ۷۵۰ درجه فارنهایت از آن خارج می‌شود. هرچقدر سرعت روغن شستشو بیشتر باشد، دمای بخار نیز به میزان بیشتری کاهش می‌یابد. افزون‌براین، یک شبکه بلندتر به کاهش بیشتر دمای بخار کمک می‌کند؛ زیرا سبب بهبود موارد زیر می‌شود:

^۱ Heavy duty: کار سنگین

- افزایش تماس فاز بخار- مایع؛
 - افزایش نرخ تبخیر روغن شست‌شو.
 - گرمای نهان تبخیر روغن شست‌شو، از دما یا گرمای محسوس بخارهای منطقه تبخیر ناگهانی^۱ تأمین می‌شود.
- برای مثال، خنک‌سازی یک بشکه بخار با دمای ۸۰۰ درجه فارنهایت به ۷۰۰ درجه فارنهایت، باعث می‌شود که حدود ۰/۶ حجم بشکه روغن شست‌شو تبخیر شود. بدین ترتیب، در صورتی که از ۱۵۰۰۰ BSD روغن شست‌شو استفاده کرده باشید و مجموع فرآورده‌ها، ۲۰۰۰۰ BSD باشد، ۸۰٪ از روغن شست‌شو موجود در شبکه روغن شست‌شو تبخیر می‌شود:

$$(20000) \times (0.60) \div 15000 = 80\%$$

در صورتی که فقط از ۱۳۰۰۰ BSD روغن شست‌شو استفاده کرده باشید، تقریباً ۹۳٪ از روغن پاک‌کننده موجود در شبکه روغن شست‌شو تبخیر می‌شود.

مشکلات مربوط به توزیع روغن شست‌شو

پیر داستان مرا قطع کرد. «بسیار خوب نورم، متوجه منظورت شدم که استفاده از یک بستر روغن پاک‌کننده بلندتر باعث تبخیر بیشتر آن می‌شود. همچنین، احتمال خشک‌شدن بستر بیشتر می‌شود. اما می‌توان این مشکل را با استفاده از جریان اضافی روغن شست‌شو برطرف کرد. در هر صورت، روغن پاک‌کننده اضافی از بین نمی‌رود. فقط باید دوباره تبخیر شود و در سیرکولاسیون پمپی^۲ نفت گاز بازیابی شود.»

«پیر، تو یک نکته را فراموش کردی. تو فرض کردی که روغن شست‌شو به‌طور یکنواخت توزیع می‌شود. به‌خاطر مشکلاتی که نازل‌های توزیع‌کننده روغن شست‌شو دارند، اگر به‌طور میانگین ۹۰٪ روغن شست‌شو تبخیر شود، در برخی بخش‌های شبکه، ۸۰٪ تبخیر و در بخش‌های دیگر نیز تقریباً ۱۰۰ درصد تبخیر خواهد شد.»

^۱ Flash Zone: منطقه تبخیر ناگهانی

^۲ Pumparounds: سیرکولاسیون پمپی

«چه نوع مشکلاتی را در مورد نازل‌های روغن شست‌شو تجربه کرده‌ای که می‌توانند توزیع مایع را دچار مشکل می‌کنند؟»

۱. «نازل‌ها به خاطر سوراخ و یا مونتاژ نادرست بسکت‌های فیلتر^۱ (فیلترهای سبیدی) روغن شست‌شو مسدود شده‌اند.

۲. محصولات خورنده در لوله‌کشی بین فیلترها و نازل‌ها تشکیل شوند.

۳. ککینگ (ایجاد کک) به خاطر قطع جریان در حین قطع برق نازل‌ها رخ دهد.

۴. روغن شست‌شو تماس زیادی با دیوارهٔ وسل داشته باشد.

۵. الگوی اسپری در بخش بالای شبکه همپوشانی نداشته باشد.

۶. نازل‌های اسپری دچار عیوب داخلی شده باشند.

۷. فلنج‌های لوله در مجرای اصلی (هدر)^۲ اسپری جدا شده باشند.

۸. فشار ایجادشده در پدیدهٔ سرج^۳ باعث کشیده‌شدن شبکه روغن شست‌شو شده و مجرای اصلی (هدر) اسپری از کار بیفتد.

۹. تکه‌های شکستهٔ شیشهٔ آبجو در نازل‌های اسپری گیر کنند.»

«هی نورم، صبر کن! شیشهٔ شکستهٔ بطری آبجو ... واقعاً؟»

«با چشم خودم آن‌ها را در کارخانه‌ای ساحلی واقع در شهر کرپوس کریستی^۴ در ایالت تگزاس دیدم.»

موضوعی که برای پیر توضیح دادم این بود که هرچقدر فاز بخار- مایع در شبکهٔ روغن شست‌شو تماس موثرتری با بکدیگر داشته باشند، اثر توزیع نامناسب مایع رویی در انتهای شبکه بیشتر خواهد بود.

«پیر بهتر است با نداشتن شبکه روغن پاک کننده، از این مشکلات دوری کنی. بهترین کار، ته نشین‌سازی با استفاده از نیروی گرانشی^۵ است.»

^۱ Filter baskets: فیلتر سبیدی

^۲ Header: هدر، مجرای اصلی، لوله اصلی، لوله مادر

^۳ Surge: پدیده سرج

^۴ corpus Christi: کرپوس کریستی

^۵ Gravity settling: ته‌نشین‌سازی با استفاده از نیروی گرانشی

انتخاب فاکتور "C" جهت ماندگی زدایی^۱ با تکیه بر تهنشین سازی با استفاده از نیروی گرانشی

اگر سرعت بخار به قدر کافی کم باشد، ماندگی قطرات تنها بر اثر نیروی گرانش از بین می رود و قطرات تهنشین می شوند. تمایل به ماندگی قطرات مایع با فاکتور "C" متناسب است.

$$C = \frac{1}{2} (\text{بخار چگالی} \div \text{مایع چگالی}) \times (\text{ثانیه/فوت، سرعت عمودی بخار}) = "C"$$

تجربه من نشان می دهد که برای موثر بودن تهنشین سازی با استفاده از نیروی گرانشی، لازم است فاکتور "C" کمتر از ۰/۱۵ فوت بر ثانیه باشد. فاکتور "C" در تفکیک کننده کک ساز کارخانه هورون واقع در آل سگوندو ۰/۳۵ فوت بر ثانیه بود. بدین ترتیب، قطعاً لازم بود از یک شبکه روغن شست شو استفاده شود. اما من فکر می کردم که «ارتفاع ۶ فوت و ۷ اینچی شبکه، بیش از حد است». بنابراین در هنگام انجام تعمیرات سال ۱۹۹۵، هورون را متقاعد کردم تا ارتفاع را به ۶ فوت و ۰ اینچ کاهش دهد تا به افزایش عملکرد کمک کند. در سال ۱۹۹۹ ارتفاع شبکه به ۴ فوت و ۶ اینچ کاهش یافت و در نهایت، در سال ۲۰۰۳ به ۳۶ اینچ رسید که به مقدار بهینه نزدیک است.

پس از آن هورون تصمیم گرفت ظرفیت کک ساز را از ۶۵۰۰۰ به ۸۵۰۰۰ BSD افزایش دهد. به من قرارداد طرح جدید داده شد تا برج موجود را با قطر داخلی ۱۶ فوت و ۰ اینچ را جایگزین کنم. می توانستم یک برج ۱۹ فوتی همراه با شبکه روغن شست شو طراحی کنم. در مقابل، تصمیم گرفتم برجی با قطر داخلی ۲۶ فوت و بدون شبکه روغن شست شو طراحی کنم و صرفاً بر تهنشین سازی با استفاده از نیروی گرانشی متکی باشم.»

پیر از قطر زیاد تفکیک کننده کک ساز جدید مبهوت شد. «نورم، چه برج گران قیمتی!»

«چه فرقی می کند؟ از کیسه خلیفه می بخشم. مهم این است که مشتری ام راضی و خوشحال باشد. آن ها دیگر ناچار نیستند به خاطر کک سازی شبکه روغن شست شو، واحد را از سرویس خارج کنند.»

«نورم، آیا این داستان، واقعی است؟»

«مطمئن باش. فقط برای مسائل امنیتی، اسامی تغییر کرده است.»

^۱ De-entrainment: ماندگی زدایی

شبکه روغن شستشوی برج خلأ

«نورم؛ برج جدید خلأ در عربستان چطور بود؟ آن کارخانه ساسول که نامش را بردی، زیاد از کارخانه ما دور نیست.»

«داستانی که چند ماه قبل رخ داد را برایت تعریف می‌کنم. پیمان کار مهندسی برج در طراحی بستر روغن شستشو اشتباه کرد. آن‌ها یک برش روغن شستشو می‌خواستند که سه مرحله تماس نظری داشته باشد. بنابراین، یک برش روغن شستشو با مشخصات زیر طراحی کردند (شکل ۶-۲):

۱. یک پکینگ ساختاریافته^۱ فوتی با موج‌های^۲ کوچک (یعنی ۱/۲ اینچ).

۲. یک شبکه کار سنگین ۸ فوتی.

«آن‌ها یک تکیه‌گاه شبکه^۳ ۴ اینچی داشتند؛ اما هیچ نگه‌دارنده شبکه‌ای^۴ نداشتند.»

«آیا آن‌ها از میله‌های فولادی ضد زنگ ۱/۲ اینچی پیچ و مهره‌دار استفاده کردند تا همانطور که در کتابت به نام «طراحی فرآیند برای عملیات قابل اعتماد» گفته‌ای، بستر را به تکیه‌گاه شبکه محکم کنند؟»

«نه!»

«پس فکر می‌کردند در صورت وقوع نوسانات فشار^۵ به خاطر بخار عریان‌کننده مرطوب یا سطح بالای مایع، چه عاملی می‌تواند پکینگ را در محل خود نگه دارد؟»

پاسخ دادم: «وزن خود پکینگ».

«نورم؛ این که خوب به نظر نمی‌رسد. چرا فکر کردند به سه مرحله تفکیک نیاز دارند؟ آیا تلاش کردند تا ماندگی آسفالتین را به تفکیک‌کننده‌های واحد کک‌ساز برگردانند و نیکل و وانادیوم را از HVGO^۶ دور نگه دارند تا بدین ترتیب از کاتالیست پایین‌دست در رآکتور تصفیه محافظت شود؟»

^۱ Structured packing: پکینگ ساختاریافته

^۲ Crimp: موج

^۳ support grid: تکیه‌گاه شبکه

^۴ hold-down grid: نگه‌دارنده شبکه

^۵ Surge: نوسانات فشار

^۶ Hvgo: "Heavy Vacuum Gas Oil" محصولی سنگین و چسبناک است و فقط به عنوان واسطه استفاده می‌شود که توسط واحد تقطیر خلأ از Hvgo:

جداسازی سنگین‌ترین برش تفکیک‌شده در ستون تقطیر اتمسفری تولید می‌شود. نفت خام در محدوده تقریباً ۳۵۰ درجه سانتیگراد تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد می‌جوشد. تعداد کربن آنها عمدتاً در محدوده ۲۰ تا ۵۰ کربن است.

به پیر گفتم: «از پیمانکار داخلی برج پرسیدم که چرا چنین طول زیادی را برای پکینگ در نظر گرفتند؟ آن‌ها در جواب گفتند که می‌دانند این کار اشتباه است؛ اما این طرح مربوط به پیمانکار مهندسی است. این همان چیزی بود که آن‌ها به من گفتند.»

«عمق زیاد بستر واش‌اوایل باعث شد درصد بسیار زیادی از روغن شست‌شو تبخیر شود. بستر به سمت پایین خشک شد. افت فشار بستر طی مدت زمان کمتر از یک سال، از یک میلی‌متر جیوه به ده میلی‌متر جیوه افزایش می‌یابد.»

«حدس می‌زنم ناچار شدند واحد را تعطیل کنند.»

«درست است پیر؛ آن‌ها واحد را تعطیل کرده و بستر مشابهی را جایگزین کردند. هیچ تغییری هم ایجاد نکردند.»

«نورم؛ باورم نمی‌شود!»

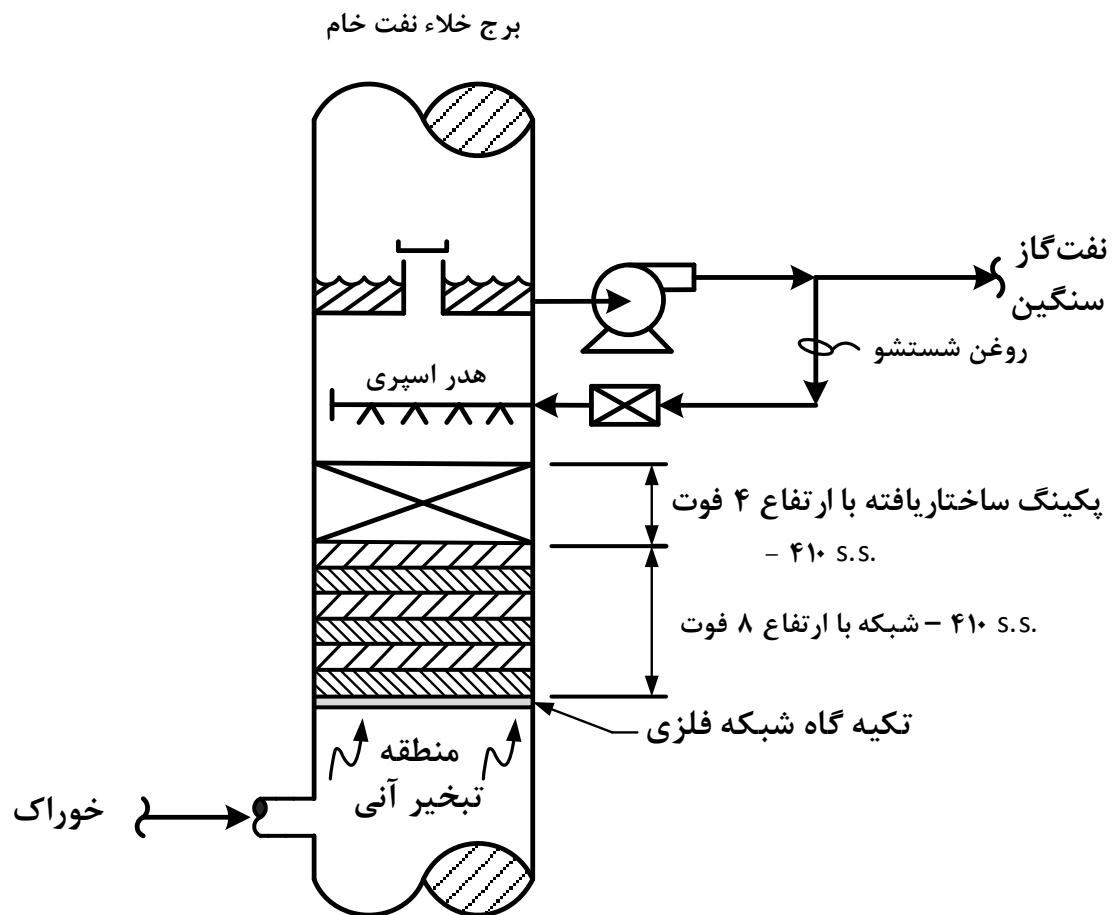
«بله؛ با همان ۱۲ فوت ارتفاع پکینگ و با همان موج‌های کوچک. آن‌ها شروع به تجمع کرده و صافی^۱ ورودی پمپ پسماند پایین برج را به وسیله کک مسدود کردند. سطح پسماند را بالای ورودی خوراک قرار بده و بستر جدید روغن شست‌شو را از هم جدا کن (این کاری است که آن‌ها انجام دادند). شبکه، نگهدارنده نداشت. مجرای اصلی (هدر) اسپری روغن شست‌شو خراب شد. آسفالتین‌ها و فلزات در HVGO سر به آسمان کشیدند و...»

«نورم! یک لحظه صبر کن - تمام این داستان ساختگی بود؛ نه؟ واقعاً چنین اتفاقاتی نمی‌تواند در یک پالایشگاه بزرگ بیفتد. آیا این داستان هم از همان نوع مهملاتی است که در سمینارهای برای مهندسان جوان به هم می‌بافی؟»

«پیر، صبر کن تا منطقه فرانسوی^۲ را نشانت دهم.»

^۱ Screen: صافی، توری

^۲ French Quarter: منطقه فرانسوی در قلب تاریخی شهر واقع است و به‌خاطر زندگی شبانه پر جنب‌وجوش و بناهای رنگارنگ دارای بالکن‌های چدنی مشهور است.



شکل ۶-۲ عمق خیلی زیاد بستر روغن شستشو و فقدان شبکه نگه‌دارنده پکینگ، اشتباهاتی جدی در طراحی به شمار می‌روند.



خطای نصب، باعث طغیان برج تفکیک کننده می شود

چکیده:

با بررسی میدانی افت فشار، متوجه شدیم که صفحه فداشونده خروجی ریپویلر از قلم افتاده است. فراموش شدن صفحه فداشونده (مشکل در نصب)، سبب تجمع مایع، طغیان و عدم تفکیک موثر می شود. از آنجا که فشار برج در مقابل نازل برگشتی ریپویلر ۵ psi بیشتر بود، این موضوع به نویسنده اجازه داد که مشکل را کشف کند. این مشکل در زمان خارج بودن واحد از سرویس، برطرف شد و راندمان تفکیک مجدداً بالا رفت.

کلمات کلیدی:

راندمان تفکیک؛ صفحه فداشونده؛ بررسی فشار؛ نازل برگشتی ریپویلر؛ اندازه حرکت؛ مشاهدات

میدانی؛ بوتان زدا

اسکار وایت^۱ مالک شرکت کاستال کورپوریشن^۲ بود. قبل از این که آقای وایت به خاطر خرید نفت خام از عراق پس از جنگ خلیج در زندان فدرال زندانی شود، چند ملاقات با او داشتم. دولت خریدهای این چینی را ممنوع کرده بود؛ اما این موضوع مانع از آن نشد که اسکار وایت قراردادش را با صدام حسین، رئیس جمهور وقت عراق عقد کند.

آقای وایت متخصص پالایشگاه بود. به همین دلیل، در سطح فنی با همدیگر تعامل داشتیم. «لیبرمن^۳! برج جدید جداسازی بوتان دارد طغیان می کند! این طرح تو نیست؟» منظور آقای وایت واحد تقطیر نفت خام^۴ در آروبا بود.

پرسیدم: «آقای وایت، از کجا می دانید که برج دارد طغیان می کند؟ برج فقط با ۷۰٪ از ظرفیتی که برایش طراحی شده، کار می کند.»

«برای این که ما در C₃-C₄ها مقدار زیادی پنتان و در نفتا مقدار زیادی بوتان دریافت کردیم، لیبرمن. وقتی اپراتور رفلکس را بالا می برد تا پنتان را جدا کند، ما پنتان بیشتری را در بوتان دریافت می کنیم. این مشکل ناشی از ماندگی مایع یا طغیان فواره‌ای^۵ است.»

«حق با شما است آقای وایت. این اتفاق به خاطر ماندگی یا طغیان فواره‌ای رخ می دهد. واقعیت این است که متوجه شدم با افزایش نرخ رفلکس دمای بالای برج به جای کاهش، افزایش می یابد و این موضوع اثبات می کند که مشکل ما ناشی از طغیان بخار یا طغیان جتی است. افزون بر این، دمای بالای برج با افزایش بیشتر نرخ رفلکس باز هم در حال افزایش بود که نشان دهنده طغیان و ماندگی بیش از حد بود.»

«خوب تا حدی طراحی را خراب کردی. باید به دنبال یک طراح خوب از تگزاس باشم تا برج جداسازی بوتان جدیدم را در آروبا طراحی کند؛ نه یک مهندس لعنتی یانکی^۶ اهل نیویورک.»

«بله، آقا! به آروبا می روم و تحقیق می کنم.»

«بله لیبرمن! برو ببین چه غلطی کردی. هیچ دلیلی ندارد که در دفتر من وقت گذرانی کنی.»

^۱ اسکار وایت: Oscar Wyatt

^۲ Coastal Corporation: کاستال کورپوریشن

^۳ Lieberman: لیبرمن

^۴ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

^۵ Jet flood: طغیان فواره‌ای

^۶ Yankee: به سربازان شمال آمریکا یانکی می گفتند، در اصطلاح معنی آمریکائی هم می دهد.

بررسی افت فشار یک برج

می‌توان از دو روش برای بررسی دلایل طغیان برج تقطیر استفاده کرد:

۱. اسکن تابشی برای اندازه‌گیری چگالی فاز مایع- بخار در مقایسه با ارتفاع در سطح مقطع برج تقطیر. به این روش، اسکن «اسکن Tru-Tec» می‌گویند.
۲. بررسی فشار برج از طریق فشارسنج ساده.

مورد اول، می‌بایست از خدمات یک پیمانکار خارجی استفاده کرد و دو هفته طول می‌کشد. هزینه آن نیز معادل ۱۰۰۰۰ دلار است. می‌توانم مورد دوم را در عرض چند ساعت و بدون هیچ هزینه اضافه‌ای انجام دهم. مراقب هستم تا:

۱. مطمئن شوم که بخشی از اتصال فشار مسدود^۱ نشده باشد.
۲. گیج را در موقعیتی صاف نصب کنم.
۳. گیج را با آچار محکم کنم و این کار را با دست انجام ندهم چرا که این کار سبب می‌شود تا گیج از کالیبره خارج شود.
۴. فشار را در فاز بخار بررسی کنم، نه زیر سطح مایع.
۵. هنگام اندازه‌گیری فشار، اطمینان حاصل کنم که فشار برج ثابت بوده و متغیر نیست.
۶. اندازه‌گیری را در یک خط جریان و با سرعتی محسوس انجام ندهم (یعنی سرعت بیشتر از ۶ فوت بر ثانیه).

اندازه‌گیری فشار مشاهده‌شده

تصمیم داشتم سه فشار را اندازه‌گیری کنم:

- روی سینی بالایی (شماره ۴۰) بر روی اتصال ونت (دریچه خروجی) بالای برج.
- در محل خوراک و بین سینی‌های شماره (۲۰) و (۲۱).
- در زیر سینی پایین (شماره ۱).

^۱ Plug: مسدود شدن

کارم را از پایین برج شروع کردم. برای این که مشخص کنم این اندازه‌گیری‌ها را کجا باید انجام دهم، دو انتخاب داشتم (شکل ۷-۱):

۱. در نقطه «PT» که برای اندازه‌گیری فشار پایین برج استفاده می‌شد؛

۲. در نقطه «LG»، شیر اتصال^۱ بالای سطح زیرین شیشه مایع‌نما.

از آنجا که هر دو نقطه دسترسی خوبی داشتند، تصمیم گرفتم هر دو را اندازه‌گیری کنم. به شکل ۷-۲ توجه کنید. مشاهده می‌کنید که هر دو نقطه در ارتفاع یکسانی قرار دارند. پیش‌بینی می‌کردم که هر دو فشار در نقاط «PT» و «LG» یکسان باشد.

اما با توجه به شکل ۷-۱:

• فشار در نقطه «PT»، ۱۶۰ psig بود.

• فشار در نقطه «LG»، ۱۶۵ psig بود.

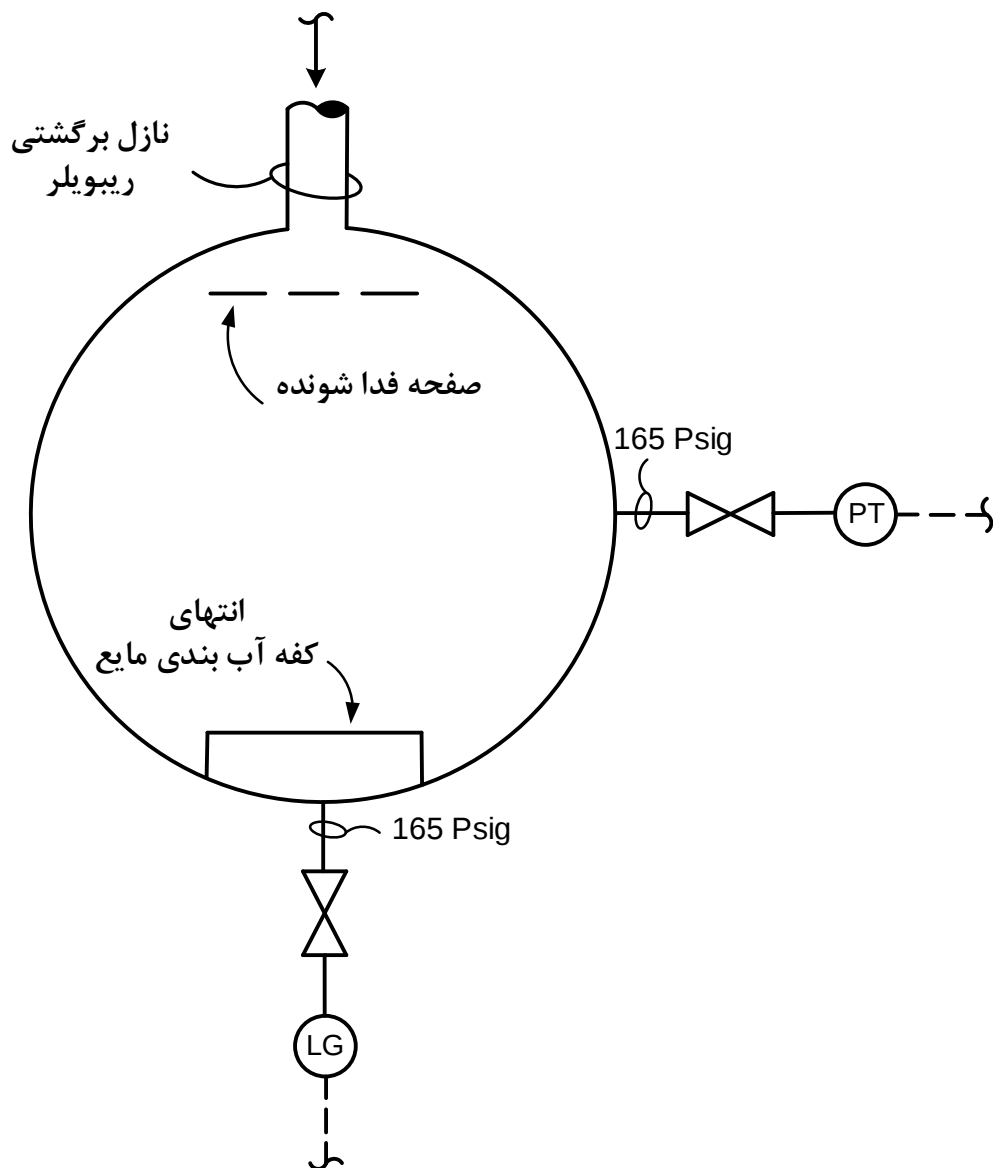
چرا این دو فشار متفاوت بودند؟ پاسخ اولیه‌ام این بود که بی‌دقتی کرده‌ام و به همین دلیل ناهمخوانی فشار ۵ psi، ایجاد شده است. بنابراین اندازه‌گیری‌های خود را چندین بار تکرار کردم. پس از گذشت یک ساعت که اندازه‌گیری‌ها را تکرار کردم، داده‌های ثابتی به دست آوردم و ناچار شدم بپذیرم که فشار نقطه «LG» واقعاً ۵ psi بیشتر از فشار نقطه «PT» است.

اما چرا؟

فقط یک احتمال وجود داشت. از «صفحه فداشونده (ضربه‌گیر)»^۲ استفاده نشده بود. صفحه فداشونده در طرح اولیه فروشنده و سل نشان داده شده بود؛ اما آیا واقعاً در برج نصب شده بود؟

^۱ Tap: شیر اتصال

^۲ Impingement plate: صفحه ضربه‌گیر، صفحه تصادم



شکل ۷-۱ فراموش کردن صفحه فدا شونده.

بازرسی از اجزاء داخلی برج

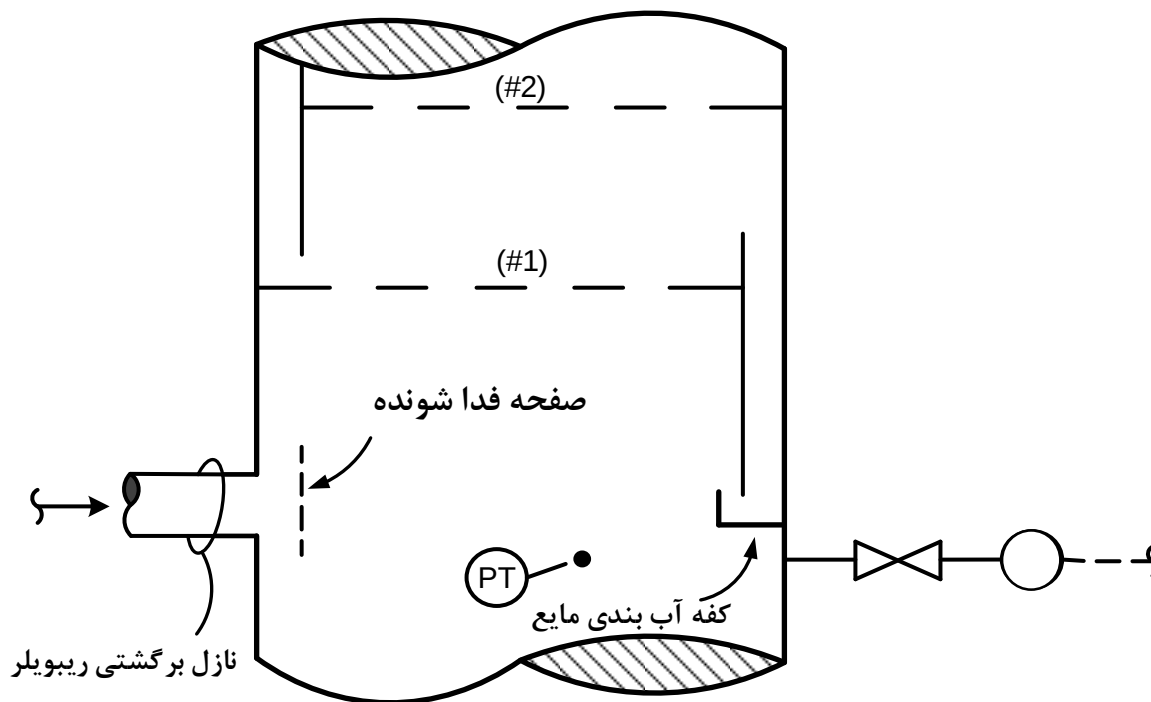
مشاهدات و نتیجه‌هایم را به نلسون انگلیش^۱، مدیر پالایشگاه آروبا، گزارش دادم. توضیح دادم که نازل ۶ اینچی برگشتی ریویلر، ۱۸۰ درجه با زیر قاب آب‌بندی فاصله دارد و کمی پایین‌تر از کفه آب‌بند^۲ قرار گرفته است. علت

^۱ Nelson English: نلسون انگلیش

^۲ Seal pan: کفه آب‌بند

۵ psi فشار اضافه که در نقطه «LG» مشاهده شد، تبدیل اندازه حرکت^۱ به فشار بود. بدین معنا که سرعت زیاد مخلوط مایع-بخار در نازل ۶ اینچی برگشتی ریبویلر، نیروی کافی را به دیوار مقابل وارد می‌کند تا فشار اضافی موضعی ۵ psi را درست در پایین کفه آب‌بند ایجاد نماید (شکل ۷-۲).

آقای انگلیش پرسید: «نورم، این موضوع چگونه بر سطح مایع در کفه آب‌بند و سطح مایع در مجرای ریزش سینی تخلیه (شماره ۱) تأثیر می‌گذارد؟»



شکل ۷-۲ هر دو شیر اتصال PT و LG در یک ارتفاع قرار دارند.

پاسخ دادم: «آقای انگلیش، چگالی نسبی نفتا ۰/۶۵ است. بنابراین:

$$(5 \text{ psi}) \cdot (2.31) \div (0.65) = 17 \text{ ft}$$

این فشار اضافی موضعی در ناحیه کفه آب‌بند کافی است تا ناودانی از سینی پایینی طغیان کند و با رسیدن طغیان به برج، تمام سینی‌های برج نیز طغیان می‌کنند».

«بسیار خب؛ اما چرا افزایش نرخ رفلاکس طغیان را تشدید می‌کند؟»

^۱ Momentum: اندازه حرکت

توضیح دادم: «چون برای رفلکس بیشتر، ریپویلر باید کار بیشتری انجام دهد. همین موضوع سبب می‌شود که جریان بخار بیشتری ایجاد شود که به نوبه خود باعث افزایش جریان بخار در خط برگشت ۶ اینچی ریپویلر می‌شود. این موضوع اندازه حرکت نازل خروجی ریپویلر را افزایش می‌دهد و پس از آن...»

«بسیار خب نورم؛ متوجه شدم چه می‌گویی. بیا موضوع را با اسکار وایت مطرح کنیم و تاییدش را بگیریم. اگر آقای وایت موافق باشد، دوشنبه هفته آینده دی‌بوتانایزر را تعطیل می‌کنیم.»

نتیجه

صبح روز دوشنبه برج تثبیت‌کننده نفتا را کنارگذر^۱ کرده و برج را برای پاک‌سازی شیمیایی آن از رسوبات سولفید آهن پیروفریک به وسیله بخار آب شست‌شو کردیم و آن را بستیم تا برای ورود ایمن شود.

من اولین شخصی بودم که وارد برج شدم. صفحه فدا شونده (ضربه‌گیر) ریپویلر در هیچ جایی از آن مشاهده نمی‌شد. من آن را نصب کردم. پس از راه‌اندازی، برج با نرخ طراحی شده شروع به کار کرد. الزامات RVP^۲ نفتا و حداکثر ۲ درصد پنتان در محصولات تولیدی بالای برج نیز برآورده شد.

هفته بعد آقای وایت مرا به دفترش فراخواند. فکر می‌کردم برای تقدیر از من یک ساعت طلا یا تقدیرنامه‌ای به من هدیه دهد.

او گفت: «لیبرمن؛ همه این‌ها تقصیر تو است. برایم یک میلیون دلار هزینه تراشیدی.»

«اما آقای وایت، من . . .»

«به احتمال زیاد حدود سه میلیون دلار! در مورد هزینه‌های تعطیلی واحد چطور؟»

«اما آقای وایت، من . . .»

^۱ Bypass: کنارگذر، بای پس

فشاری که در آن مولکول‌ها بتوانند در دمایی که هستند بر آن فشار غلبه کنند و از سطح مایع خارج شوند و به صورت گاز درآیند را فشار بخار رید: RVP^۲ می‌گویند. مخفف "Reid Vapor Pressure"

«و تمام آن LPG^۱ بی کیفیت^۲ خارج از رده.»

حرفش را قطع کردم: «اما آقای وایت، من همان کسی هستم که مشکل را فهمید و راه حل مناسب را کشف کرد ... صفحه فدا شونده (ضربه گیر) نصب نشده بود.»

«البته لیبرمن و چه چیزی مانع از این شد که پس از نصب قطعاً داخلی، برج را بازرسی نکنی؟ مگر من در یکی از کتاب‌های تو، «طراحی فرآیند برای عملیات قابل اعتماد»، خوانده‌ام که بخشی از هر طراحی فرآیند، بازرسی نهایی است تا مطمئن شویم که تمام قطعاً داخلی مطابق با مشخصات و الزامات طراح نصب شده‌اند؟ و مگر خودت نوشتی که واجد شرایط‌ترین فرد برای بازرسی نهایی، مهندسی است که برج را طراحی کرده است؟»

شرکت کاستال با شرکت ال پاسو نچرال گس^۳ ادغام شد و توسط یک شرکت خطوط لوله به نام کیندر مورگان^۴ جذب شد. آخرین باری که اسکار را در لیک چارلز^۵ دیدم، دستش شکسته بود و کمی پیر به نظر می‌رسید؛ اما هنوز از من باهوش‌تر بود.

همیشه این داستان را برای مهندسان جوانی که در سمینار عیب‌یابی من شرکت می‌کنند، تعریف می‌کنم. نکته کلیدی داستان این است که من فقط خودم می‌توانستم مشکل را با بررسی افت فشار حل کنم و از اندازه‌گیری دو فشار متفاوت در نقاط «LG» و «PT» متعجب شده بودم. از این اختلاف فشار متعجب بودم و اولین واکنشم این بود که از دو مقدار مختلف فشار میانگین بگیرم. اما پس از آن، اندازه‌گیری‌هایم را تکرار کردم و مطمئن شدم که تمام کارها را با دقت انجام داده‌ام و باید برای ناهمخوانی بین دو فشار اندازه‌گیری، دلیلی وجود داشته باشد. اگر از یک اپراتور می‌خواستم که اندازه‌گیری را برایم انجام دهد، به احتمال زیاد فقط میانگین این دو فشار را به من گزارش می‌کرد و فرصتی برای برطرف کردن مشکل نصیبم نمی‌شد.

^۱ مخفف "Liquefied Petroleum Gas" گاز نفتی مایع شده: LPG

^۲ بی کیفیت: Off-spec

^۳ ال پاسو نچرال گس: El Paso Natural Gas

^۴ کیندر مورگان: Kinder-Morgan

^۵ لیک چارلز، شهری در ایالت لوئیزیانا کشور ایالات متحده آمریکا که جمعیت آن در سرشماری سال ۲۰۱۰ میلادی، ۷۱'۹۹۳ نفر بود. Lake Charles



جداسازی روغن - آب

چکیده:

جداسازی مخلوط روغن و آب به روش ته‌نشینی، با استفاده از نیروی گرانش و تنظیم pH، نصب بافل‌های شیب‌دار و نزدیک به هم انجام می‌شود. برای جلوگیری از ایجاد امولسیون‌های سخت که ممکن است چندین ساعت برای شکسته شدن آن‌ها زمان لازم باشد، باید افت فشار شیر کنترل ارتفاع سطح مایع را از بین برد. آب در مایعات هیدروکربنی سبک، معمولاً با سرعت ۶۰ ft/hr ته‌نشین می‌شود. برای مشتقات هیدروکربنی چگال‌تر (مثل گازوئیل) نرخ ته‌نشینی تقریباً ۳۰ ft/hr خواهد بود.

کلمات کلیدی:

توزیع‌کننده؛ تیرگی؛ ته‌نشینی؛ امولسیون؛ فازها؛ زمان ماند؛ زمان ته‌نشینی

ماه قبل در تقاطع راه آهن در ریوررود^۱، پشت مجموعه بی پایانی از واگن های نفت کش UTX^۲ گیر افتاده بودم. بیشتر فرآورده های پالایشگاهی به صورت لوله کشی و یا با کامیون تحویل داده می شوند؛ اما بعضی از آن ها مانند گازوئیل، نفت سفید و بنزین، همچنان با قطارهای باری حمل می شوند.

اطلاعات زیادی درباره UTX دارم؛ چراکه سال گذشته یک تماس تلفنی از طرف پائول رایکتر^۳ داشتم. پائول مسئول یارد نظافت واگن های نفت کش UTX در شیکاگو^۴ بود.

«آقای لیبرمن؛ همانطور که در طرح هایی که برایتان ایمیل کردم می بینید، ما واگن های ریلی را با بخار آب شست شو^۵ می دهیم تا بقایای دیزل و سایر بقایای هیدروکربنی را حذف کنیم. پس از آن، چندین هزار BSD مخلوط روغن و آب داریم که باید آنها را در یک درام ته نشینی افقی جدا کنیم. مشکلمان این است که باز هم حدود ۳۰۰۰-ppm ۵۰۰۰ هیدروکربن در پساب باقی می ماند (شکل ۸-۱).»

«پاول، زمان ماند در وسل (درام) چقدر است؟»

«حداکثر بین چهار تا شش دقیقه. متوجه شده ایم که این مقدار بسیار کم است. این پساب به واحد هوادهی تصفیه خانه فاضلاب جریان می یابد که آن نیز کوچک^۶ است. در نتیجه، پساب خروجی از تصفیه خانه، BOD (اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی) بالایی دارد و استانداردهای EPA را نقض می کند. آقای لیبرمن، ما می خواهیم از خدمات شما به عنوان یک مهندس مشاور برای طراحی مجدد واحد ته نشین کننده آب- نفتمان بهره مند شویم. آیا فرصت دارید که این پروژه را انجام دهید؟»

«به قول دغل بازان نیو اورلئان، عزیزم اگر پول بدهی، وقت دارم. روزانه ۲۸۰۰ دلار به علاوه هزینه های طراحی.»

کنترل pH

یکی از روش هایی که برای تفکیک امولسیون روغن- آب موثر به نظر می رسد، کنترل pH در محدوده ۶/۵-۷/۰

^۱ River Road: ریور رود

^۲ Tank Car: نفت کش

^۳ Paul Reicter: پائول رایکتر

^۴ Chicago: شیکاگو

^۵ Steam out: شست شو با بخار آب

^۶ Undersize: کوچک

است. قطعاً pH بیشتر از ۱۰-۹ موجب افزایش زمان جداسازی دو فاز می‌شود. معمولاً به سادگی تزریق سولفوریک

اسید را به صورت دستی کنترل^۱ می‌کنم؛ اما از نتایج کنترل خودکار پیوسته pH نیز استفاده می‌کنم. مقدار pH کمتر از ۵/۵ برای وسل‌های فولاد کربن به شدت خورنده است. به علاوه، pH پایین در وسل‌های بدون تنش آزادشده، موجب شکست جوش و ایجاد نشتی، ظرف چند روز می‌شود. همان‌طور که من نتیجه شخصی‌ام را داشتم، تو نیز می‌توانی همین کار را انجام دهی:

مرحله ۱- دو سیلندر مدرج ۱۰۰۰ میلی‌لیتری را با نمونه^۲ روغن-آب خود پر کن.

مرحله ۲- صبر کن تا یک نمونه با نیروی ثقل و بدون تنظیم pH طی مدت‌زمان ۱۰ تا ۲۰ دقیقه ته‌نشین شود.

مرحله ۳- مرحله ۲ را پس از اسیدی‌کردن تا pH حدود ۶/۵ تکرار کن.

مرحله ۴- با توجه به توضیحات فوق، مقدار pH مشخصی را پیدا کن که لایه هیدروکربن موجود در سیلندر را در مدت‌زمان معینی به حداکثر می‌رساند.

افت فشار ولو کنترلی

وقتی در پالایشگاه نفت آمریکا در ایندیانا کار می‌کردم، مخلوط روغن-آب را با خاموش و روشن کردن یک پمپ رفت و برگشتی^۳ از یک چاهک خارج می‌کردیم. یعنی پمپ فقط زمانی کار می‌کرد که ارتفاع مایع، تا روی نقطه مشخصی از چاهک افزایش یابد. هیچ شیر کنترلی در خط خروجی پمپ تعبیه نشده بود. نمونه‌ای از پساب در یک بطری یک کوارتی^۴ ظرف مدت ۲ دقیقه به آب و نفت سفید تفکیک می‌شد.

یک سال، در هنگام انجام تعمیرات، پمپ رفت و برگشتی با یک پمپ گریز از مرکز جایگزین شد. افزون‌براین، یک شیر کنترل نیز به خط تخلیه اضافه شد (شکل ۸-۱). برای ته‌نشینی نمونه‌ای از مواد تخلیه‌شده پمپ، نیم ساعت زمان لازم بود؛ درحالی‌که برای ته‌نشینی نمونه خروجی از شیر کنترل سطح، حدود یک روز زمان لازم بود. پیشنهاد

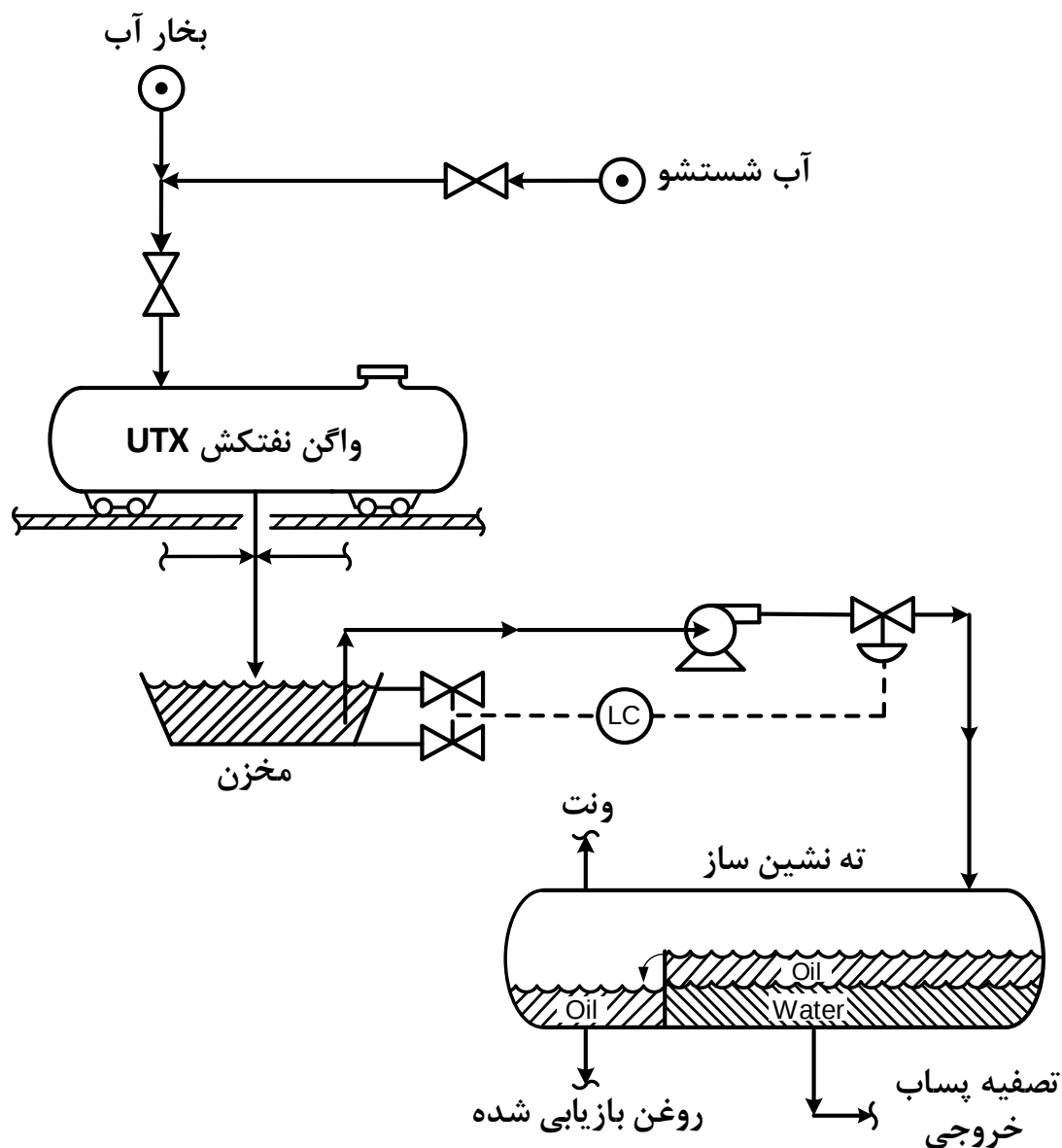
^۱ به صورت دستی کنترل کردن: Manually

^۲ نمونه: Sample

^۳ Reciprocating pump: در این پمپ‌ها حرکت رفت و برگشتی میل لنگ است که کار اصلی را انجام می‌دهد و پیستون را به حرکت وامی‌دارد و به همین دلیل نام رفت و برگشتی نیز به آن‌ها داده شده است.

^۴ Quart، واحد حجم در آمریکا و معادل یک چهارم گالن است.

کردم که برای به حداقل رساندن زمان ته‌نشینی در طول امولسیون‌شدن در درام ته‌نشینی واحد UTX، ولو کنترلی که در مسیر تخلیه پمپ چاهک قرار داشت، حذف شود (شکل ۸-۱). می‌توانستیم از یک کلید قطع و وصل برق برای کنترل سطح استفاده کنیم تا پمپ را در سطح معینی روشن کرده و وقتی سطح به زیر مقدار پیش‌فرض^۱ می‌رسد، آن را خاموش کند. من استفاده از پمپ رفت و برگشتی را پیشنهاد کردم؛ اما تصور نمی‌کردم که مشتری ام راضی به پرداخت این هزینه باشد.



شکل ۸-۱ سیستم بازیابی میعانات بخار آب واگن نفتکش.

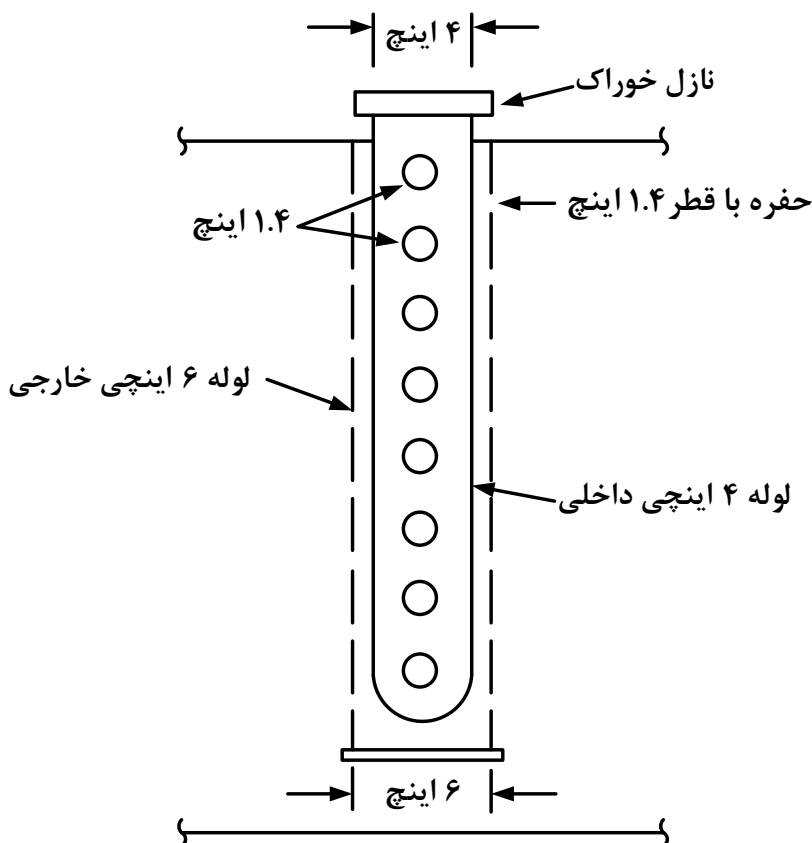
^۱ Set Point: پیش فرض

بهبود توزیع کننده خوراک

در شکل ۸-۲ طرحی مفهومی از توزیع کننده خوراکی را مشاهده می کنید که از آن در این بخش استفاده می کنیم:

- یک لوله عمودی داخلی با ابعادی مشابه نازل خوراک و طول قطر وسل اضافه می شود.
- حفراتی با فاصله حدود ۴ تا ۶ اینچ در راستای طول وسل با دریل حفر می شوند. مجموع مساحت حفرات تقریباً ۵۰ درصد بیشتر از مساحت نازل خوراک است.
- لوله ای با ابعاد یک درجه بزرگ تر از نازل خوراک و با همان آرایش حفرات، دور لوله فوق نصب می شود. با این وجود، حفرات لوله خارجی بزرگ تر، به اندازه ۹۰ درجه روی حفره های لوله داخلی کوچکتر جابه جا می شوند.

طرحواره فوق، خوراک را به روشی موثر و با حداقل تلاطم^۱ به طور عمودی در تمام قطر ته نشین کننده، توزیع می کند.



شکل ۸-۲ توزیع کننده خوراک برای وسل افقی.

^۱ Turbulence: تلاطم

ادغام‌گرها^۱

استفاده از یک میدان الکتریکی در تمام مخلوط، موثرترین روش برای جداسازی کارآمد امولسیون متشکل از هیدروکربن‌های مایع و یا فاز آبی است. کاربرد این میدان الکتریکی سبب می‌شود که قطرات قطبی آب با سرعتی بسیار بیشتر از سرعت ته‌نشین‌سازی با استفاده از نیروی گرانش^۲، منعقد شوند.

من پروژه تمیز کردن واگن‌های نفت‌کش با این روش، به دو دلیل نپذیرفتم:

۱. معمولاً وقتی فاز مایع هیدروکربنی، ۹۰٪ تا بیش از ۹۹٪ کل مخلوط را تشکیل می‌دهد، از یک ته‌نشین‌کننده الکتریکی استفاده می‌شود. در این مورد، فاز هیدروکربن کمتر از چند درصد بود.
۲. تبدیل ته‌نشین‌کننده فعلی به یک ته‌نشین‌کننده برقی، پروژه‌ای زمان‌بر، پیچیده و پرهزینه بود و مشتری‌ام با آن موافقت نمی‌کرد.

متداول‌ترین نوع ادغام‌گر این است که آب روغنی را از یک بستر پرشده عبور دهیم تا جداسازی فازها سریع‌تر انجام شود. به طور معمول، پکینگ‌هایی که من از آن‌ها استفاده می‌کنم، به شرح زیر هستند:

- حلقه راشینگ^۳
- حلقه پال^۴
- پشم شیشه
- مش‌های استنلس استیل (فولاد ضدزنگ)
- پوشال

متوجه شده‌ام که از بین پنج مورد فوق، پوشال بهترین گزینه است. با این وجود، تمام متریال پکینگ نامبرده شده ویژگی نامناسبی در سیستم‌های ته‌نشینی دارند: بخشی از آن‌ها مسدود^۵ می‌شود. بدین ترتیب، از منافذ کوچکی

^۱ Coalescer: ادغام‌گر

^۲ Gravity settling: ته‌نشین‌سازی با استفاده از نیروی گرانشی

قطعات کوچک لوله ای شکلی هستند که به عنوان پرکننده در بسترهای آکنده مانند برج‌های تقطیر و دیگر فرآیندهای شیمیایی به کار می‌روند. این پرکن‌ها به صورت استوانه‌های توخالی با قطر ۶ الی ۱۰۰ میلی‌متر (۰/۲۵ تا ۴ اینچ) و از جنس سرامیک، چینی یا سفال ساخته می‌شوند. این نوع از پرکن‌ها نخستین بار توسط شیمیدان آلمانی فردریک راشینگ اختراع شده و به نام خود وی شناخته شد.

نوع دیگر پرکن‌های استوانه ای حلقه پال (پال رینگ) است که به صورت استوانه توخالی از جنس فلز یا پلاستیک ساخته می‌شود که قسمت‌هایی ^۴ Pall Rings: از بدنه آن به سمت داخل استوانه متمایل شده است. این نوع پرکن‌ها به دلیل دارا بودن سطح تماس زیاد بین فاز مایع و فاز بخار راندمان بالایی دارند.

^۵ Plug: مسدود شدن

که همچنان برای عبور جریان باز هستند، کانال‌های سیال با سرعت موضعی بالا گذر می‌کنند. سرعت موضعی بالا جداسازی ثقلی دو فاز را به تأخیر می‌اندازد.

با توجه به شکل ۸-۱ از آن‌جا که سیال مخزن جمع‌آوری آب شست‌شوی واگن‌ها پر از ذرات سیاه‌رنگ بود، تصمیم گرفتیم امکان استفاده از مواد پکینگ را به‌عنوان یک گزینه مناسب، حذف کنیم.

بافل‌های تهنشینی شیب‌دار

با توجه به قانون استوکس^۱، نرخ تهنشینی تابعی از موارد زیر است:

- ویسکوزیته؛
- اندازه ذره؛
- اختلاف چگالی.

ویسکوزیته و اختلاف چگالی، جزو خواص سیال بوده و ثابت هستند. من با حذف شیر کنترل پمپ تخلیه چاهک، میانگین اندازه ذرات روغن را افزایش داده بودم. فاصله تهنشینی، پارامتر دیگری بود که باید تغییرش می‌دادم.

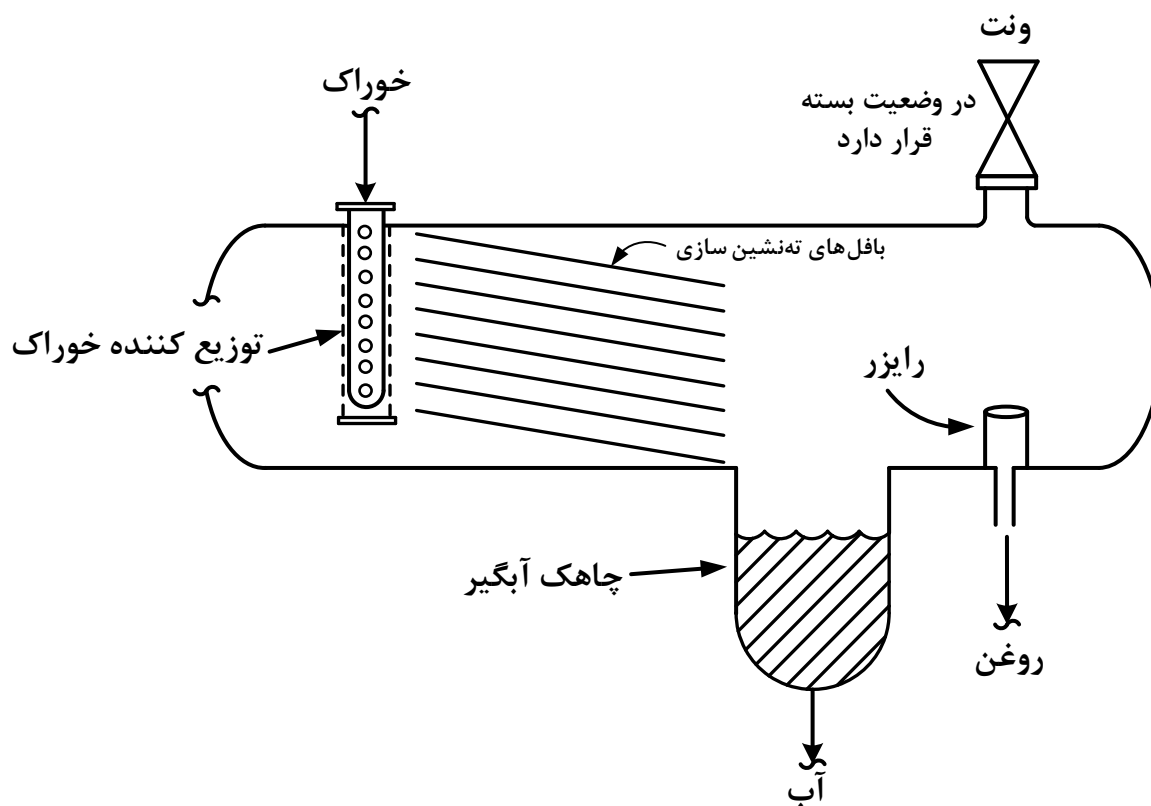
اگر بتوان فاصله تهنشینی (و در نتیجه زمان تهنشینی) را تا ۱۰ برابر کم کرد، قطعاً راندمان تهنشینی تا ۱۰ برابر افزایش می‌یابد. شکل ۸-۳ روش متداول صنعتی را برای استفاده از حلقه‌های تهنشین‌کننده نشان می‌دهد. چند بار از این طرح استفاده کرده‌ام و حتی در سیستم‌های رسوب‌گذار نیز نتایج خوبی گرفته‌ام. در پیکربندی متداولی از بافل تهنشین‌کننده، از موارد زیر استفاده می‌شود:

۱. بافل‌هایی که روی قطر وسل قرار می‌گیرند.
۲. بافل‌هایی که با شیب تقریباً ۱۰ درصدی (یعنی ۱/۲ اینچ به ازای هر فوت) در جهت جریان قرار می‌گیرند.
۳. بافل‌هایی که فاصله بینشان حدوداً دو اینچ است و جدا از هم قرار می‌گیرند.

فضای نسبتاً زیاد بین بافل‌ها (در مقایسه با دهانه‌های یک بستر پک‌شده)، نسبت به رسوب‌گذاری مقاوم است. فاز آبی به جای این‌که برای جداسدن از خوراک فاز مخلوط، به اندازه چندین فوت سرازیر شود، کافی است تنها چند اینچ حرکت کند. آب از روی بافل سرازیر می‌شود و روغن به سمت سطح زیرین بافل بالایی می‌لغزد. در شکل ۸-۳

^۱ Stokes Law: قانون استوکس

جریان آبی که به درون چاهک^۱ آبگیر و روغنی که به لوله بالابر^۲ (معمولاً ۶ اینچی) سرریز می شود^۳ را مشاهده می کنید.



شکل ۸-۳ ادغام گر روغن- آب با بافل های ته نشین سازی شیب دار.

این نوع ادغام گرها در سطحی گسترده در تصفیه خانه های پساب استفاده می شود و من این طرح را برای بهینه سازی یارد شستشوی واگن های نفت کش UTX در شیکاگو^۴ انتخاب کردم.

^۱ Boot: چاهک

^۲ Riser pipe: لوله دارای جریان رو به بالا

^۳ Overflow: سرریز می شود.

^۴ Chicago: شیکاگو

اندازه ذرات و سرعت ته‌نشینی

زمانی که در دهه ۱۹۷۰ در شرکت نفت آمریکا مشغول به کار بودم، ما از سرعت 0.4 فوت بر دقیقه برای ته‌نشین‌سازی قطره‌های آب از بنزین استفاده می‌کردیم. من به‌عنوان یک مهندس طراح فرآیند گفته بودم که پیمانکاران واحد مهندسی از سرعت 1.0 فوت بر دقیقه برای ته‌نشین‌سازی قطرات آب از پروپان استفاده می‌کنند. من به‌عنوان یک مشاور، حداکثر سرعت ته‌نشینی آب را در برج استخراج پروپیلن، 1.3 فوت بر دقیقه مشاهده کرده‌ام.

براساس قانون استوکس، این قوانین کلی برقرار هستند:

$$\text{جرم ویژه بنزین} = 0.75$$

$$\text{جرم ویژه پروپیلن} = 0.47$$

بنابراین، نرخ ته‌نشینی آب در بنزین، متناسب با موارد زیر است:

$$(1.0) - (0.75) = 0.25$$

برای پروپیلن:

$$(1.0) - (0.47) = 0.53$$

با توجه به موارد فوق، می‌توان انتظار داشت که آب در LPG^۱ نسبت به بنزین با سرعت دوبرابر ته‌نشین شود؛ اما معمولاً چنین اتفاقی نمی‌افتد.

مشاهده کرده‌ام که در یک استوانه ۱۰۰۰ میلی‌لیتری، نرخ جداسازی بنزین و آب حدوداً 0.4 فوت بر ساعت است و نه 0.4 فوت بر دقیقه. البته اینگونه نیست که این موضوع مطابق قانون استوکس نباشد. با توجه به قانون استوکس، نرخ ته‌نشینی متناسب با توزیع اندازه ذرات است.

مخفف "Liquefied Petroleum Gas" گاز نفتی مایع شده. LPG^۱

من مخلوطی از آب و گازوئیل داشتم که ظرف مدت چند دقیقه به راحتی در یک دریافت‌کننده^۱ با فشار ۱۰۰۰ psig تنه‌نشین شد. اگر مخلوط از یک شیر کنترل عبور می‌کرد که فشار را ۱۰۰۰-۸۰ psig کاهش می‌داد، زمان تنه‌نشینی چند ساعت بیشتر می‌شد.

برای این که بتوانیم زمان ماند موردنیاز برای مایع را جهت تنه‌نشینی کافی آن تعیین کنیم، قطعاً باید به این ویژگی‌ها در مخلوط‌ها توجه کنیم:

- ویسکوزیته فاز پیوسته؛
- چگالی فاز پیوسته نسبت به چگالی فاز پراکنده؛
- تاریخچه مخلوط (یعنی توزیع‌کننده اندازه ذرات آن).

اما فاکتور سوم همیشه نامعلوم است. بنابراین، هنگام طراحی مخازن تنه‌نشینی آب و روغن، همانند موارد دیگر در طراحی فرآیند، در نهایت لازم است مهندس به قضاوت و تجربه‌اش تکیه کند. داستانی که در مورد پروژه تمیزکردن واگن نفت کش UTX گفتم، یک مثال معمولی است. حذف شیر LRC که در شکل ۸-۱ نشان داده شده است، به احتمال زیاد موجب بهبود عملکرد سیستم می‌شود.

خلاصه

من طرحی دستی از ایده‌هایم را برای پاول ریکتر، ناظر UTX در عملیات شست‌شوی واگن نفت کش در شیکاگو^۲ ارائه دادم و ایده‌هایم را بدین صورت خلاصه کردم:

۱. کنترل pH، یعنی ۶/۵؛
۲. حذف امولسیون‌سازی روغن و آب از طریق شیر کنترل سطح تخلیه پمپ گریز از مرکز.
۳. بهینه‌سازی درام تنه‌نشین‌کننده (شکل ۸-۱) با بافل‌های تنه‌نشینی شیب‌دار (شکل ۸-۳).

«نظرت در مورد پیشنهاد من چیست پاول؟ آیا هزینه کارم را برآورد کنم؟ سه روز و روزی ۲۸۰۰ دلار؛ به علاوه حدود ۵۰۰ دلار برای طراحی. به محض دریافت شماره سفارش خرید از UTX می‌توانم بروی پروژه‌تان کار کنم.»

^۱ Receiver: دریافت‌کننده

^۲ Chicago: شیکاگو

«بسیار خوب نورم؛ برای طرح بافل‌های ته‌نشینی از تو متشکرم. ایده خوبی است! قبلاً آن را در تصفیه‌خانه آب در کالومی سیتی^۱ دیده بودم.»

«بله پاول. اگر از همان ابتدا از یک پمپ رفت و برگشتی استفاده می‌کردید، می‌توانست به شما کمک کند.»
«من جلسه دارم و باید با عجله به آنجا بروم. برمی‌گردم. خوشحال شدم با شما صحبت کردم نورم. روز خوبی داشته باشی.»

و همانطور که در محل تقاطع راه‌آهن ریور رود در نیواورلئان نشسته بودم و عبور واگن‌های نفت کش UTX را تماشا می‌کردم، این گفتگو را با پاول ریگتر به یاد آوردم؛ شخصی که دیگر هرگز چیزی از او نشنیدم.

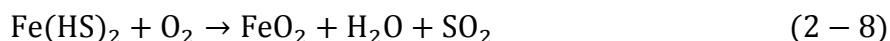
درس این داستان این است که همیشه قبل از ارائه راه‌حل فنی به مشتری خود، ابتدا شماره سفارش خرید را دریافت کنید. این درسی است که پس از ۳۵ سال که به‌عنوان مشاور طراحی فرآیند کار می‌کنم هم آن را به‌خوبی یاد نگرفته‌ام.

ملاحظات ایمنی

معمولاً برای جداسازی مایعات هیدروکربنی از آب ترش از ادغام‌گرها استفاده می‌شود. اصطلاح «ترش» به H_2S محلول در آب مربوط می‌شود. H_2S در فاز آبی واکنش داده و سولفید آهن پیروفریک را تولید می‌کند:



اصطلاح «پیروفریک» به خاصیت خوداشتعالی $Fe(HS)_2$ خشک (یک ماده جامد سیاه با دانه‌بندی ریز) مربوط می‌شود:



سولفید آهن با شعله آبی کم‌رنگ و آزادسازی حداقل حرارت می‌سوزد. حرارت، خطرناک نیست؛ بلکه SO_2 متصاعدشده در غلظت بالای ۱۰۰۰ ppm کشنده است. یک‌بار، مجوز ورود به یک وسل را برای دو فیتز(کمک مکانیک) صادر کردم تا ته‌نشین‌کننده‌ای را که با آب شسته بودم، قبل از اجازه دسترسی به پرسنل، تعمیر کنند. مشکل این بود که سولفید آهن در آب نامحلول است؛ اما تا زمانی که خشک نشود، مشتعل نمی‌شود. چند ساعت

^۱ کالومی سیتی، ایلینوی یک شهر در ایالات متحده آمریکا با جمعیت ۳۷۰۰۴۲ نفر است که در ایلینوی واقع شده‌است. Calumet City

پس از ورود فیترها، سولفید آهن در دمای ۷۵ درجه فارنهایت آتش گرفت و گازهای مرگبار SO_2 تولید شدند. به خوبی به یاد می‌آورم که آن دو نفر با عصبانیت و عجله از وسل خارج شدند. آن‌ها به دنبال من می‌گشتند و ادعا می‌کردند که من می‌خواستم آن‌ها را بکشم.

لازم بود به منظور ایمن‌سازی آن‌ها برای ورود، سولفید آهن با عملیات شیمیایی از وسل‌ها خارج شود. در شهر تگزاس از محلول «ZYME» استفاده کردیم. هیدروکلریک اسید قادر به حذف کامل سولفید آهن است؛ اما خاصیت خوردندگی دارد. شاید سیتریک اسید حلالی با خوردندگی کمتر برای حذف سولفید آهن باشد. معمولاً رسوبات سیاه‌رنگ موجود در وسل‌های پالایشگاهی کک نیستند؛ بلکه سولفید آهن خطرناک هستند که خودبه‌خود مشتعل شده و به دی‌اکسید گوگرد تبدیل می‌شوند.



هیدرولیک - هد؛ فشار؛ سرعت

چکیده:

تبدیل فشار به سرعت. تبدیل فشار هد به سرعت.

آب‌بند مکانیکی پمپ‌های گریز از مرکز. حلزونی، سرعت را به فوت هد تبدیل می‌کند. وظیفه پروانه پمپ افزایش فشار و هد سیال نیست؛ بلکه افزایش سرعت و انرژی جنبشی سیال پمپ شده است.

در جریان سنج‌ها، صفحه اریفیس باید قطر کمتری در قسمت بالادست فلنج اوریفیس داشته باشد تا به بازیابی فشار سیال کمک کند. نصب صفحه اریفیس در جهت معکوس یک خطای رایج در صنعت است که جریان سنج مقدار خوانده شده را ۱۰ درصد بیشتر نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی:

صفحه اریفیس؛ فشار هد؛ ته‌نشینی؛ هیدرولیک؛ پمپ؛ آب‌بند؛ پروانه؛ ادغام‌گر

دو اپراتور در کنار پمپ شارژ کوره نفت خام ایستاده بودند و به شدت بحث می کردند. برای این که میان شان داوری کنم، مرا صدا زدند.

صدای نشتی بخار آب می آمد. کارل فریاد زد: «لیبرمن اینجا را نگاه کن؛ ما باید فشار آب بند^۱ را روی این پمپ تنظیم کنیم. روغن آب بندی، گازوئیل سنگین است. فشار ورودی ۱۰ psi و فشار خروجی آن ۲۰۰ psi است.»

کلارا حرف کارل را قطع کرد: «آقای لیبرمن، فشار سیستم شست شوی آب بند باید کمی بیشتر از فشار داخل محفظه پمپ باشد که در آن شفت از میان یک آب بند مکانیکی^۲ وارد پمپ می شود. لازم است از طریق آب بند مکانیکی، فشار کافی اعمال شود تا ته مانده های داغ از محفظه پمپ و اطراف محور خارج نشوند. اگر آب بند بترکد، آتش می گیریم.»

«بله کلارا. به همین دلیل گفتم که باید فشار سیستم شست شوی آب بند را روی ۲۱۰ psi تنظیم کنیم. این کار درست نیست لیبرمن؟ نشت آب بند خطرناک است.»

کلارا پرسید: «نه! نه! کارل؛ در واقع فشار داخل محفظه پمپ کمی کمتر از فشار ورودی^۳ پمپ است. شاید ۸ یا ۹ پوند بر اینچ مربع باشد. درست نمی گویم آقای لیبرمن؟ اگر فشار ورودی ۱۰ psi باشد، فشار سیستم شست شوی آب بند نباید روی ۱۵ تا ۲۰ psi تنظیم شود؟»

«بسیار خب؛ بیایید به مرکز کنترل برویم؛ قهوه بخوریم و بعد، برایتان توضیح می دهم. بچه ها وقت دارید؟»

کارل پاسخ داد: «همه چیز را طوری توضیح بده که بتوانیم متوجه شویم؛ بدون مسائل ریاضی یا علوم. بدون واحدهای تخصصی مهندسی!»

رابطه فشار، هد و سرعت

یکبار شنیده بودم که خانم ها جذب آقایانی می شوند که خودروهای تمیز را می رانند. به همین دلیل، تصمیم گرفتم خوردوی خود را خیلی تمیز و با فشار آب بالا بشویم. در طول کار، دو نکته را آموختم. اول این که خانم ها جذب

^۱ Seal flush pressure: فشار روانکاری آب بند، فشار شست شوی آب بند

^۲ Mechanical seal: آب بند مکانیکی

^۳ Suction pressure: فشار مکش

آقایانی می‌شوند که سوار بر خودروهای گران‌قیمت و تمیز هستند. گران‌قیمت بودن اتومبیل، جذابیت بسیار بیشتری از تمیزی آن دارد.

دومین نکته‌ای که آموختم این بود که آبی از شلنگ با فشار بیرون می‌آید، اصلاً فشار زیادی ندارد. فشار آب برابر با فشار اتمسفر است. وقتی مشغول شست‌شوی اتومبیل در نیواورلئان بودم، فشار آب نسبت به سطح دریا پس از خروج از نازل شلنگ ۱۴/۷ psia بود.

فشار آب حمام من

من فشار آب خانه‌ام را اندازه‌گیری کرده‌ام. حدوداً ۳۰ psig است. این فشار را در هر هفت حمام خانه‌ام و در کل محله اندازه گرفته‌ام. فشار ۳۰ psig بر اثر ارتفاع منبع آب آشامیدنی^۱ ایجاد می‌شود. ارتفاع برج، ۷۰ فوت است (شکل ۱-۹).

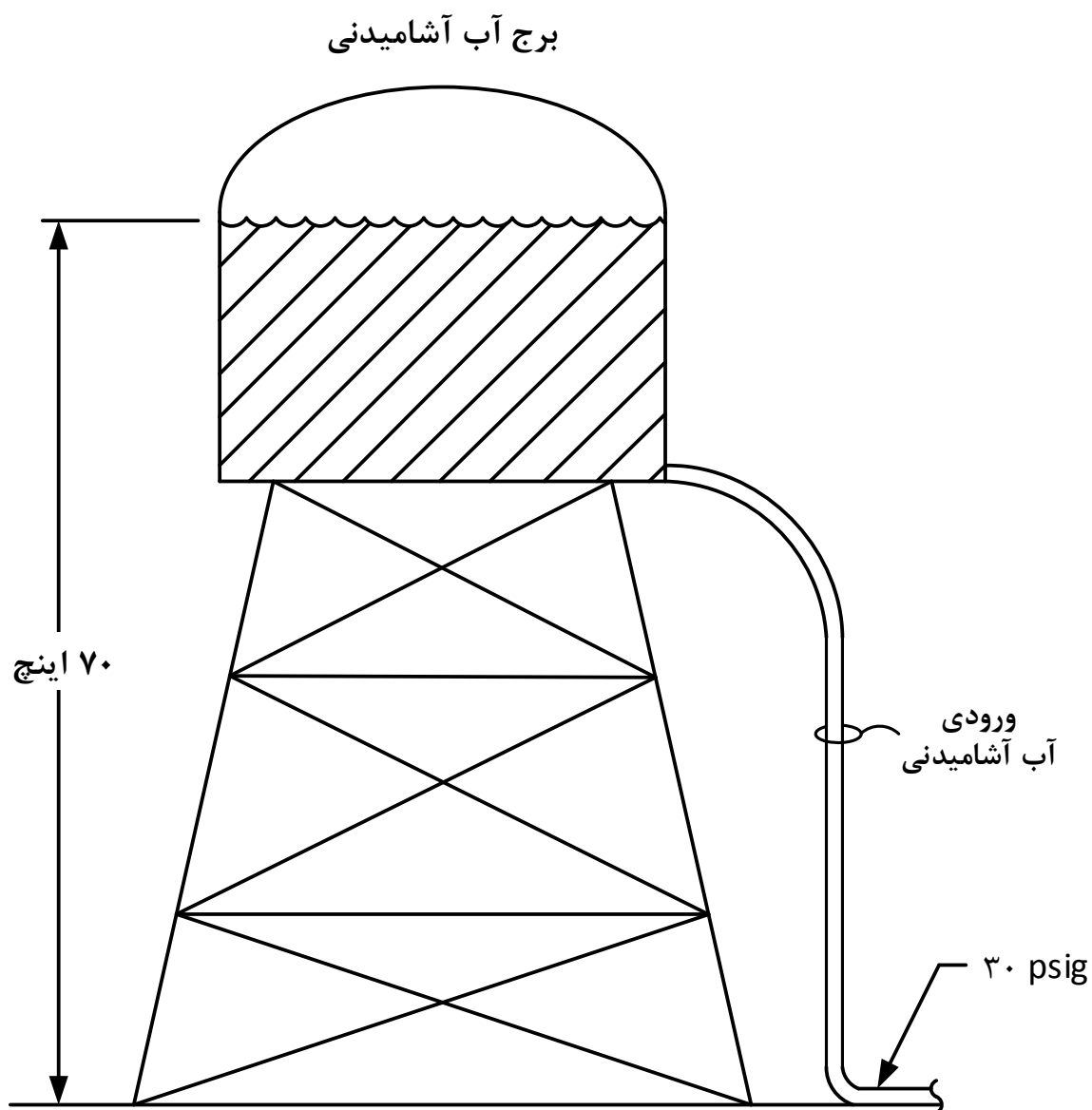
$$70 \text{ ft} \div 2.3 \frac{\text{ft}}{\text{psi}} = 30 \text{ psi}$$

یعنی حدود ۲/۳ فوت آب سرد برای ایجاد فشار هد به اندازه ۱ psi لازم است. اگر آب منزل از نازل شلنگ با فشار خارج شود، فشار آب هنگام خروج از نازل برابر با ۰/۰ psig (یا ۱۴/۷ psia) خواهد بود. در فشار ۳۰ psi چه اتفاقی می‌افتد؟ این فشار به سه شکل دیگر انرژی تبدیل می‌شود:

- سرعت، یا اندازه حرکت^۲ یا انرژی جنبشی؛
- گرما در اثر اصطکاک؛
- انرژی پتانسیل (اگر نازل را به سمت بالا بگیرم).

^۱ City Water: آب آشامیدنی

^۲ Momentum: اندازه حرکت



شکل ۹-۱ فشار هد در مقایسه با ارتفاع.

تبدیل فشار هد به سرعت

شرط زیر برای آب یا هر مایع دیگری که ویسکوز نیست، با این فرض که نازل بدون اصطکاک بوده و آب موازی با زمین از نازل بیرون می‌جهد، برقرار است:

$$(\text{اینچ فوت بر ثانیه})^2 (\text{سرعت})^2 = 2/1 (\text{اینچ فوت}) (\text{هد آب})$$

برای مثال، اگر ارتفاع آب در برج آب ۷۰ فوت باشد، سرعت جریان آب خارج شده از نازل بدون اصطکاک، برابر است با:

$$(70 \div 2.1)^{\frac{1}{2}} = (33)^{\frac{1}{2}} = 5.55 \text{ ft/s}$$

متأسفانه، این فرض که نازل بدون اصطکاک است، نمی‌تواند درست باشد. اگر نیمی از ارتفاع آب (یا انرژی پتانسیل آب) به خاطر اتلاف اجتناب‌ناپذیر اصطکاک در نازل تلف شود، سرعت تخلیه نازل تا حدودی کاهش می‌یابد:

$$(70 \times 1.2 \div 2.1)^{\frac{1}{2}} = (16.5)^{\frac{1}{2}} = 4.1 \text{ ft/s}$$

در واقع نباید می‌گفتم که فشار به خاطر اصطکاک از بین می‌رود. انرژی هیچ‌وقت از بین نمی‌رود. این بدان معنا است که نیمی از انرژی پتانسیل به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود؛ یعنی آب خروجی از نازل به خاطر اصطکاک کمی گرم می‌شود.

در واقع، بین ۲۰ تا ۶۰ درصد هد فشار به حرارت تبدیل می‌شود و این میزان، برای افزایش قابل توجه دمای آب جاری کافی نیست.

تبدیل فشار به فوت هد

در دوران کودکی، این طور به نظرم می‌رسید که اگر آب را از نازل شلنگ باغ، مستقیماً به سمت بالا پرتاب کنم و فشار آب آشامیدنی معادل ۷۰ فوت باشد، می‌توانم ارتفاع آب را تا بالای ساختمانی با ارتفاع ۷۰ فوت بالا ببرم. هرچند، من در یک آپارتمان اجاره‌ای واقع در شهر نیویورک زندگی می‌کردم و به همین دلیل، به هیچ شلنگ و یا حتی باغی دسترسی نداشتم.

اما وقتی خانه خودم را خریدم، این آزمایش را انجام دادم. با این حال، به شدت ناامید شدم. در بهترین حالت فقط می‌توانستم آب را تا بالای دودکش^۱ آجری و تا ارتفاع حدود ۳۰ فوتی خانه دو طبقه‌ام برسانم. ظاهراً ۴۰ فوت از ارتفاع، به خاطر وجود اصطکاک در موارد زیر از بین می‌رفت:

- نازل شلنگ باغ.
- ۱۰۰ فوت شلنگ لاستیکی.

^۱ Chimney: دودکش

- اتصالات شیر آب.
- لوله مسی داخل خانه‌ام.
- مقاومت هوا.
- همسر در طول مشاهدات تجربی من، بدون برنامه‌ریزی قبلی دوش بگیرد.

پمپ‌های گریز از مرکز

اگر آب با سرعت ۱۰ psi وارد چشمی پروانه^۱ یک پمپ گریز از مرکز شود، فشار آب خروجی از پروانه، همان ۱۰ psi خواهد بود. تمام کاری که پروانه انجام می‌دهد، این است که سرعت آب را بیشتر کند. در واقع، فشار درون تمام بخش‌های محفظه پمپ گریز از مرکز، همان ۱۰ psi است. پس چگونه فشار آب به فشار تخلیه پمپ، یعنی ۲۰۰ psi افزایش می‌یابد؟

بسیار خب، دهانه نازل تخلیه پمپ از ۱ اینچ به ۴ اینچ افزایش می‌یابد. پس از آن، سرعت آب تا ۱۶ برابر کاهش پیدا می‌کند (شکل ۹-۲):

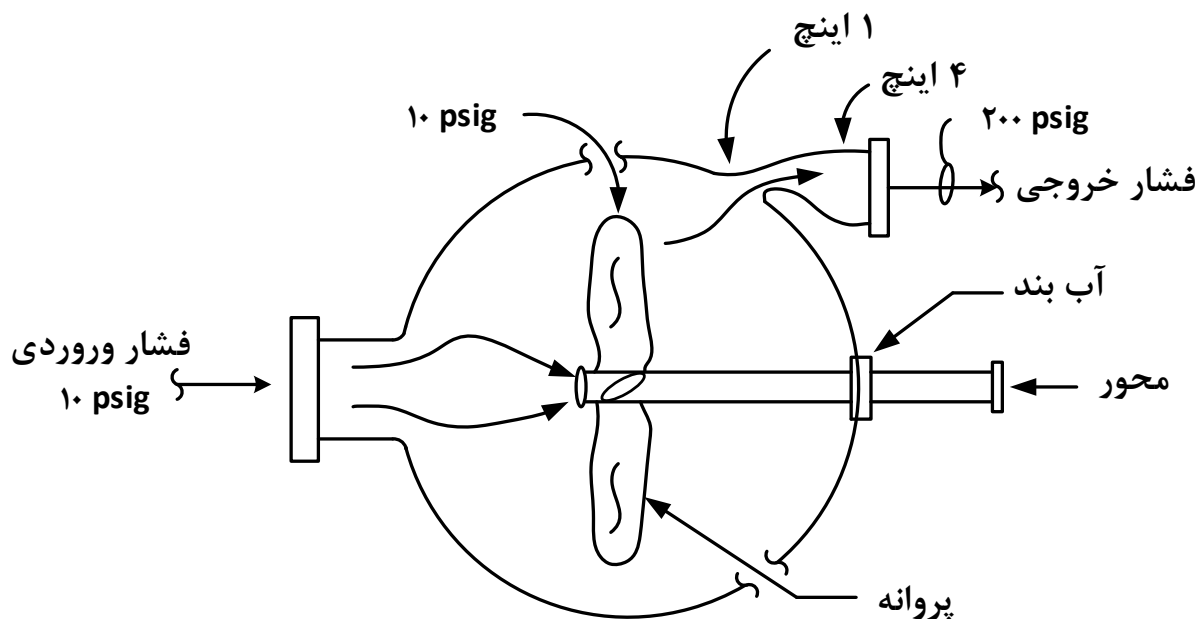
$$(4 \text{ in.} \div 1 \text{ in.})^2 = 16$$

کاهش سرعت به فشار تبدیل نمی‌شود؛ بلکه به ارتفاع (فوت) هد تبدیل می‌شود.

برای تبدیل ارتفاع هد به فشار باید:

$$\text{فشار} = \frac{\text{ارتفاع هد (فوت)}}{2.31} \cdot \text{S.G.} \quad (9-1)$$

^۱ Eye of the impeller: چشمی پروانه



شکل ۹-۲ فشار آب‌بندی باید کمی بیشتر از فشار ورودی پمپ باشد.

«S.G.» مخفف جرم ویژه مایع است و برای تصحیح دمای جریان به کار می‌رود.

S.G. برای بعضی از سیالاتی که با آن‌ها کار می‌کنم، عبارت است از (در دمای ۶۰ درجه فارنهایت):

- بوتان = 0.55
- نفتا = 0.68
- نفت سفید = 0.8
- گازوئیل = 0.85
- آسفالت (در دمای ۳۰۰ درجه فارنهایت) = 1

برای تبدیل هد به سرعت یا بلعکس، جرم ویژه را نادیده می‌گیریم. هرچند، وقتی فشار را به هد و یا سرعت تبدیل می‌کنیم، باید به جرم ویژه توجه کنیم.

ضرایب اریفیس^۱

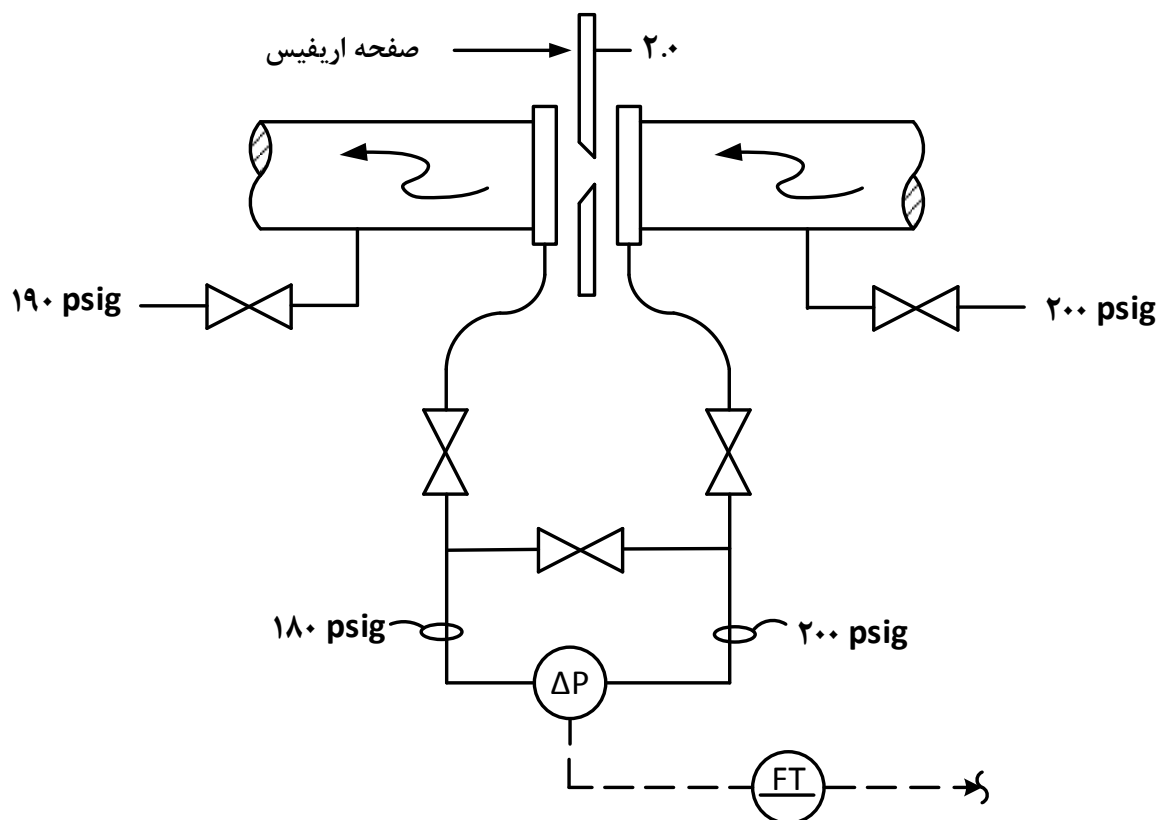
اگر هد را به جای «فوت» بر حسب «اینچ» بیان کنم، ضرایب اوریفیس (OC) برای انواع مختلف روزنه‌ها به این صورت خواهد بود:

^۱ Orifice Coefficients: ضرایب صفحه سوراخ دار، ضرایب اوریفیس

- نظری (بدون اصطکاک) = 0.178
- نازل خروجی صاف = 0.34
- روزنه‌هایی که از بالا به پایین با دریل حفر می‌شوند = 0.28
- صفحه اریفیس = 0.6
- صفحه نازک با روزنه پانچ‌شده = 0.9

از این مفهوم برای اندازه‌گیری جریان‌های فرآیندی استفاده می‌کنیم (شکل ۳-۹). این کار را با اندازه‌گیری افت فشار در صفحه اریفیس و روی فلنج‌های روزنه انجام می‌دهیم. سپس از فرمول زیر استفاده می‌کنیم:

$$DH = (OC) \cdot (V)^2 \quad (2 - 9)$$



شکل ۳-۹ اریفیس جریان با ۵۰ درصد بازیابی فشار.

برای صفحه اریفیس قرار گرفته در مسیر جریان یک پالایشگاه، $OC = 0.6$.

$$DH = 0.6 \cdot (V)^2 \quad (3 - 9)$$

برای محاسبه «DH»، افت فشار را در صفحه اریفیس بر حسب psi اندازه‌گیری می‌کنیم. سپس آن « ΔP » را بر حسب اینچ سیال بیان می‌کنیم.

$$DH = \frac{(P_{\text{دلتا}}) \cdot (27.7)}{(S \cdot G \cdot)} \quad (4 - 9)$$

یادتان باشد که دمای جریان را محاسبه کنید. برای هیدروکربن‌ها، S.G. به ازای هر ۱۰۰ درجه افزایش نسبت به ۶۰ درجه فارنهایت، ۵٪ کاهش می‌یابد.

با توجه به معادله (۳-۹)، V (ft/s) را محاسبه کنید. به بالادست بخش جابجایی توجه کنید که از فلنچ‌های صفحه بیرون‌زدگی دارد. اعداد نشان‌داده‌شده بر حسب اینچ، اندازه سوراخ‌ها در صفحه اریفیس هستند. حاصل ضرب V در مساحت حفره (بر حسب اینچ) برابر است با دبی جریان بر حسب فوت مکعب بر ثانیه. هر بشکه (۴۲ گالن)، معادل ۵/۵۶ فوت مکعب است.

تبدیل سرعت برگشتی به فشار

کلارا لیوان چای سبزش را خالی کرده بود. «آقای لیبرمن، پس از خروج جریان از صفحه اریفیس، سرعت آن، چه می‌شود؟ آیا تمام آن سرعت، اتلاف می‌شود؟»

پاسخ دادم: «نه، بخشی از سرعت به‌خاطر اصطکاک از بین می‌رود؛ اما مقدار زیادی از آن دوباره به فشار تبدیل شده و «بازیابی فشار» نامیده می‌شود. شاید نیمی از آن قابل‌بازیابی باشد.»

کارل گفت: «فکر می‌کنم این موضوع ثابت می‌کند که کلارا درست می‌گوید. فشار در سطوح آب‌بند تقریباً با فشار ورودی پمپ یکسان است. پروانه فقط سرعت خروج سیال از محفظه پمپ به داخل نازل تخلیه را افزایش می‌دهد.»

کلارا گفت: «باز هم نگران موضوعی هستم. نورم، در بیشتر پمپ‌های ما، خط سیستم شست‌شوی آب‌بند دقیقاً از بخش تخلیه پمپ خارج می‌شود. حدس می‌زنم فشار سیستم شست‌شوی آب‌بند در واقع همان فشار تخلیه پمپ است. اینطور نیست؟»

توضیح دادم: «ته. یک اریفیس محدودکننده^۱ با حفره‌ای هشت اینچی وجود دارد که به پمپ پرچ می‌شود و فشار تخلیه پمپ را برای پمپ‌های خود شست‌شو شونده، کمی بیشتر از فشار ورودی پمپ (بر حسب psi) کاهش می‌دهد. افزون‌براین، به یاد داشته باشید که آنچه گفتم در مورد سیالاتی با گرانش بالا و در مورد پمپ‌های جابجایی مثبت^۲ صادق نیست. منظورم از ویسکوزیته بالا، بیش از ۳۰ یا ۴۰ سانتی‌استوک است.»

کارل در پایان یادآور شد: «بسیار خب، آقای لیبرمن. اما نکته‌ای هست که باید به شما بگویم. خانم‌ها جذب آقایانی نمی‌شوند که سوار خودروهای گران‌قیمت و تمیز می‌شوند. خانم‌ها از آقایانی خوششان می‌آید که به آن‌ها خودروی گران‌قیمت هدیه می‌دهند.»

سوراخ‌های متعادل‌کننده فشار^۳

جهت حصول اطمینان از این موضوع که آب‌بندها تحت فشار مضاعف قرار نمی‌گیرند، سوراخ‌های متعادل‌کننده فشار در بخش پشتی پروانه با دریل حفر می‌شوند. وظیفه این حفرات این است که فشار بیش از حد در محفظه آب‌بندی را به ورودی پمپ برمی‌گردانند. اگر حفره‌ها با مواد جامد مسدود^۴ شوند، احتمال آسیب به آب‌بند وجود خواهد داشت. این مشکل در واحدهایی که زغال سنگ و کک را به هیدروکربن‌های مایع تبدیل می‌کنند، متداول است.

^۱ Restriction orifice: اریفیس محدودکننده

^۲ Positive displacement pumps: پمپ‌های جابجایی مثبت

^۳ Pressure balancing holes: سوراخ‌های متعادل‌کننده فشار

^۴ Plug: مسدود شدن



مشکلات متداول هیدرولیک

چکیده:

تبدیل ناگهانی سرعت به فشار در یک سیستم بسته و پر از مایع ممکن است باعث ایجاد پدیده مخرب ضربه قوچ آب یا ضربه قوچ هیدرولیک شود؛ مگر آنکه مکانیزم دمپر فراهم شده باشد.

تبخیر موضعی آب یا هیدروکربن های مایع و تولید بخار در یک سیستم پر از مایع ممکن است سبب انسداد بخار شود. انسداد بخار علیرغم آنکه به صورت بالقوه همانند ضربه قوچ آب مخرب نیست، اما ممکن است مانع برقراری جریان شده و یا حتی جریان سیستم را قطع نماید.

از بین رفتن آببندی میعانات در ریبویلر بخار آب، بار حرارتی ریبویلر را کاهش می دهد.

کلمات کلیدی:

میعانات؛ انسداد بخار؛ سرج؛ ضربه قوچ آب؛ هیدرولیک؛ بار حرارتی؛

«نورمن، ماشین لباسشویی دوباره موقع کارکردن تکان می خورد و به زمین ضربه می زند. کاری کن؛ ناسلامتی مهندس هستی!»

همسر عصبانی بود. آن صدای بلند در واقع به خاطر لباسشویی مان نبود. منشأ صدا، سقف اتاق نشیمن بود. این اتفاق بدون از کار افتادن ماشین لباسشویی و در حین شستشو رخ داده بود.

«آن ماشین لباسشویی لعنتی خراب است. با تعمیرکار تماس بگیر. می خواهم امروز این مشکل برطرف شود.»

توضیح دادم: «این صدای ضربه قوچ آب^۱ است. این اتفاق به خاطر پدیده سرج هیدرولیک در خط ورودی آب سرد^۲ به اتاق زیر شیروانی رخ می دهد. وقتی شیر برقی ورودی آب سرد به صورت ناگهانی بسته شود، افزایش ناگهانی در فشار جریان آب باعث افزایش سرج هیدرولیک می شود. من این مشکل را در درس دینامیک سیالات در دانشگاه مطالعه کرده ام.»

«فقط درستش کن؛ من به مرکز خرید می روم.»

تبدیل سرعت به فشار

علت سرج هیدرولیک که بیشتر افراد آن را به عنوان ضربه قوچ آب می شناسند، تبدیل سرعت یک جریان مایع به انرژی پتانسیل است و زمانی ایجاد می شود که جریان کند یا متوقف شود. منظورم از انرژی پتانسیل، افزایش ارتفاع جریان سیال کندشونده است. درک این موضوع آن چنان سخت نیست. کافی است شلنگ باغ را بردارید. آب با سرعت زیاد از نازل شلنگ خارج می شود. اگر سرعت نازل ۵۰ فوت بر ثانیه باشد و شلنگ را مستقیماً به سمت بالا بگیرید، احتمالاً آب تا ارتفاع ۳۰ فوت بالا می رود؛ یعنی سرعت یا انرژی جنبشی آب (۵۰ فوت بر ثانیه) به ارتفاع هد (بر حسب فوت) یا انرژی پتانسیل تبدیل می شود.

می توانم این تبدیل سرعت به ارتفاع را محاسبه کنم:

$$V^2 = 0.015 (\text{فوت}) \quad (1 - 10)$$

V سرعت بر حسب فوت بر ثانیه است.

^۱ ضربه قوچ آب، افزایش فشار یا موجی است که در شاره های در حال حرکت پس از توقف یا تغییر مسیر ناگهانی پیش می آید. این: water hammer

^۲ افزایش فشار معمولاً هنگامی رخ می دهد که شیری در مسیر حرکت شاره (آب یا گاز) ناگهان بسته می شود.

ورودی: Supply^۲

در این معادله فرض بر این است که:

- هیچ اتلاف اصطکاکی وجود ندارد.
- سیال تراکم‌ناپذیر است (مانند آب).
- هیچ تبخیری اتفاق نمی‌افتد.

اگر فضای عمودی باز برای افزایش ارتفاع سیال وجود نداشته باشد، تبدیل سرعت به انرژی پتانسیل یا ارتفاع گرفتن سیال امکان‌پذیر نخواهد بود. نکته بعدی این است که سرعت به ارتفاع یا به انرژی پتانسیل تبدیل نمی‌شود؛ بلکه به فشار تبدیل می‌شود. از معادله زیر برای تبدیل سرعت به فشار استفاده می‌شود:

$$\frac{\text{ارتفاع (فوت)}}{2.31} \cdot (SG) = \text{PSI} \quad (2 - 10)$$

در این معادله:

SG = جرم ویژه. یعنی چگالی سیال نسبت به آب در دمای ۶۰ درجه فارنهایت.

PSI = پوند نیرو بر اینچ مربع.

افزایش فشار سرچ^۱ در داخل یک لوله به هنگام توقف جریان آب، ضربه قوچ آب نامیده شده و صدای بلندی را در خط ورودی آب ماشین لباسشویی من ایجاد می‌کند.

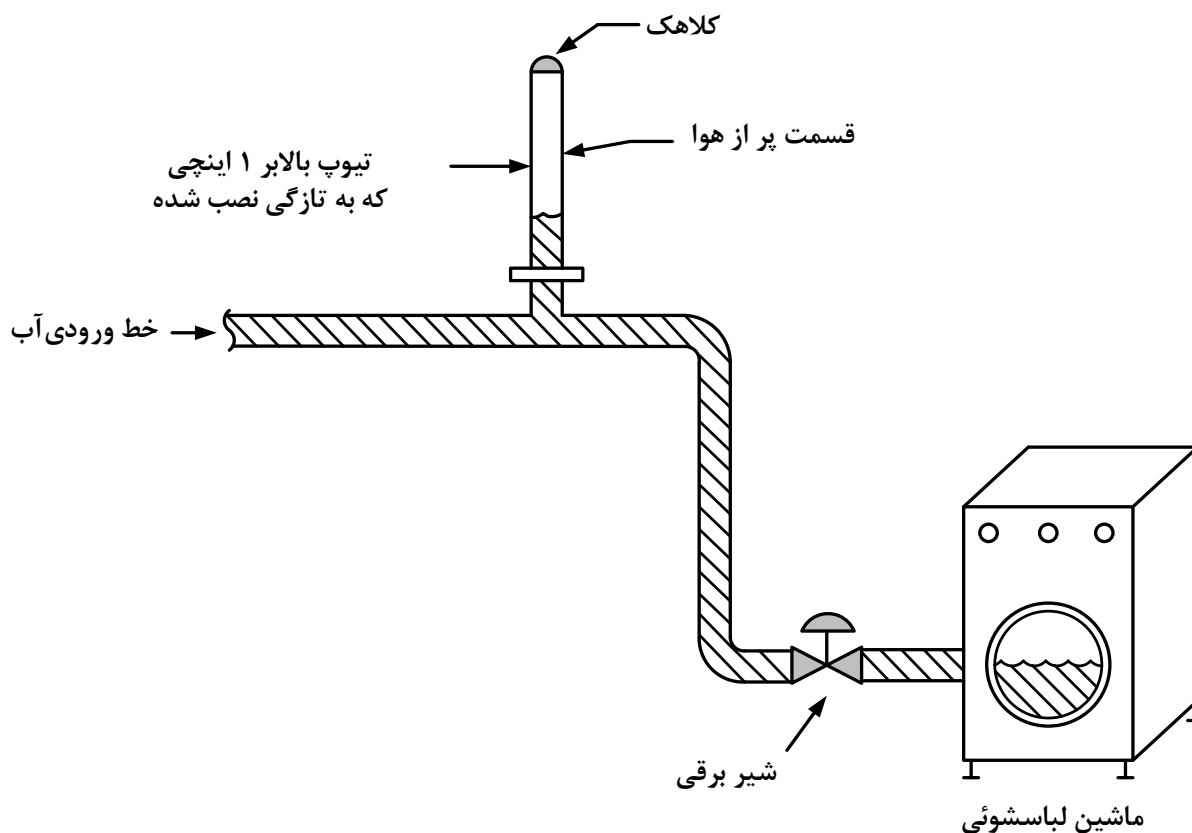
میرایی ضربه قوچ آب

پس از تکمیل بررسی، به همسر و مباشر همیشگی‌ام گزارش می‌دهم. طرح بهینه‌سازی پیشنهادی‌ام را به او نشان دادم (شکل ۱۰-۱). او طرحم را با دقت مطالعه کرد و سپس گفت: «نورمن، سه سوال برایم پیش آمده. اول این که: ارتفاع لوله بالابر^۲ چقدر خواهد بود؟ دوم این که: ارتفاع آب در لوله بالابر چه قدر است؟ تقریباً پر است، یا تقریباً خالی؟ سوم این که: کارت پرداخت الکترونیکی‌ات را به من می‌دهی؟ می‌خواهم بعد از ناهار به مرکز خرید برگردم.»

^۱ فشار سرچ، تغییرات ناگهانی در فشار جریان مایع خط لوله است که ناشی از تغییرات ناگهانی سرعت جریان است: Pressure Surge

^۲ Riser pipe: لوله دارای جریان رو به بالا

به‌عنوان یک مهندس طراحی فرآیند، آموخته‌ام که قاعده اصلی طراحی مهندسی این است: طرح‌های موفق را کپی‌برداری کنید. بر این اساس، یک بالابر عمودی سه فوتی را در وسط خط لوله ورودی آب در اتاق زیر شیروانی نصب کردم. بالابر را تا نیمه از آب پر کردم و سپس یک کلاهک پیچی را روی آن گذاشتم.



شکل ۱۰-۱ مشکل ضربه قوچ آب با کمک بالابر کلاهک‌دار و پر از هوا برطرف شد.

حالا زمانی که در حین شست‌شو، جریان آب ماشین لباسشویی ما به طور ناگهانی قطع شود، کاهش سرعت آب به افزایش فشار تبدیل می‌شود. اما بیشتر این کاهش انرژی جنبشی برای فشرده‌سازی هوای داخل رایزر مصرف می‌شود. انرژی لازم برای فشرده‌سازی یک گاز، بسیار بیشتر از انرژی لازم برای افزایش فشار یک سیال است.

با این وجود، پروژه موفقیت‌آمیز نبود. هم‌سرم در مرکز خرید یک توستر به قیمت ۵۸۰ دلار خرید که اکنون خراب شده است و قرار است آن را به حالت اولیه بازگردانم.

نمونه نسبتاً بزرگ‌تری از ضربه قوچ آب نزدیک به ۱۰ سال پیش در سبیری رخ داد. روس‌ها مشغول راه‌اندازی ششمین نیروگاه بزرگ برق‌آبی جهان بودند. در طول مراسم افتتاحیه، وقتی اشخاص صاحب‌منصب مشغول راه‌اندازی

موفقیت‌آمیز واحد بودند، یک کنده درخت روی پره‌های توربین یکی از تونل‌های بزرگ توربین افتاد. به ناگاه جریان آب متوقف شد. به دنبال آن سرج هیدرولیک، ۷۴ نفر کشته شدند. من عکس‌های متعددی را دانلود کردم. چنین به نظر می‌رسید که یک سلاح هسته‌ای کوچک منفجر شده باشد. گمان می‌کنم توری مشبک^۱ که مانع از ورود مواد اضافی به آبگیر می‌شود، به‌خوبی نصب نشده یا شاید حتی از طراحی روسی حذف شده بود.

انسداد بخار^۲

بیشتر خوانندگان با انفجار مهلک در برج تفکیک‌کننده بنزین (یعنی برج تفکیک رافینیت) در پالایشگاه نفت بریتانیا واقع در شهر تگزاس آشنا هستند. خلاصه آنچه که اتفاق افتاد، از این قرار بود:

۱. تفکیک‌کننده با بنزین مایع پر شد.
۲. شیر اطمینان تفکیک‌کننده باز شد؛ چراکه برج به‌خاطر پرشدن بیش از حد ظرفیت، تحت فشار زیادی قرار گرفت.
۳. شیر اطمینان، سیال را به دودکش^۳ تخلیه فشار که به جو تخلیه می‌شد، سرازیر کرد.
۴. مایع از مخزن تخلیه فشار^۴ به یک خط جمع‌آوری میعانات هیدروکربنی^۵ اینچی که در فشار ۳ psig کار می‌کرد، تخلیه شد.

من این تأسیسات را (که در دهه ۱۹۷۰ به طراحی آن‌ها کمک کردم)، در شکل ۱۰-۲ نشان داده‌ام. به «حلقه آب‌بند»^۵ در خط درین مخزن تخلیه فشار تا خط جمع‌آوری میعانات توجه کنید. نصب حلقه آب‌بند برای جلوگیری از اتلاف مداوم بخارات هیدروکربن در سیستم جمع‌آوری میعانات نامحدود پالایشگاهی به جو، لازم بود.

یک مهندس ارشد به نام آقای هاینز در طول مرحله طراحی این پروژه در دهه ۱۹۷۰ متوجه شد که آب‌بند در معرض «انسداد بخار» است. یعنی وقتی مایع از مخزن تخلیه فشار به سمت بالای حلقه آب‌بند جریان می‌یابد، فشار انشعاب اصلی از بین می‌رود. ممکن است مایع به‌خاطر حذف فشار هد شروع به تبخیر کند.

^۱ Bar screen: توری مشبک

^۲ Vapor Lock: انسداد بخار، محبوس شدن بخار

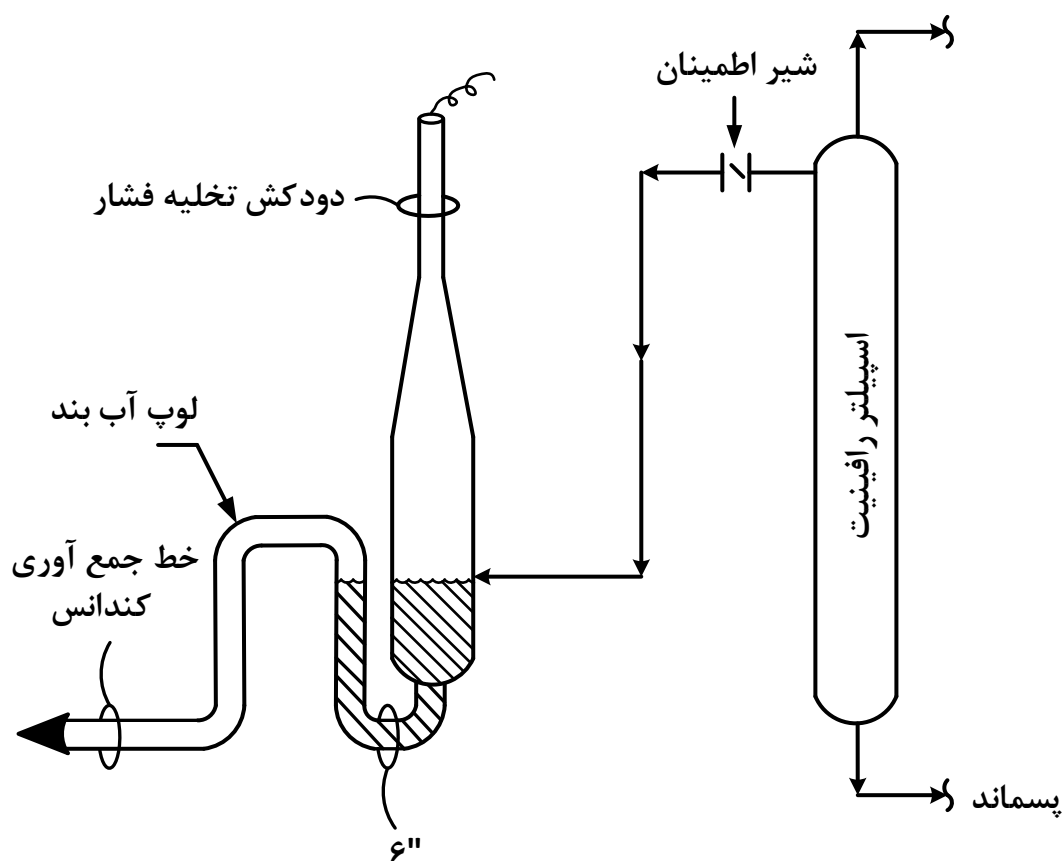
^۳ Stack: دودکش

^۴ Blowdown drum: مخزن تخلیه فشار

^۵ Loop Seal: حلقه آب‌بند، لوپ آب‌بند

بخار متصاعدشده موجب انسداد جریان مایع^۱ می‌شود. حجم مشخصی از مایع تبخیرشده، به بخاری با حجم ۲۰۰ برابر مایع منبسط می‌شود و بنابراین جریان مایع کند می‌شود. به این پدیده، «انسداد بخار» می‌گویند.

آقای هاینز پیشنهاد کرد که برای جلوگیری از انسداد بخار، دریچه‌ای در بخش بالای حلقه نصب شود؛ اما ایده او به این دلیل رد شد که مقدار کمی از بخار به‌طور پیوسته از طریق دودکش تخلیه به جو، تخلیه می‌شد.



شکل ۱۰-۲ تأثیر حلقه آب‌بند.

بدین ترتیب، این دریچه نصب نشد. در نتیجه، شرکت نفت بریتانیا ۴ میلیارد دلار (ایالات متحده) را در دعاوی قضایی به‌خاطر خرابی‌های حاصل از بنزین خارج‌شده از مخزن تخلیه فشار از دست داد. بنزین از بخش بالای دودکش تخلیه، خارج، مشتعل و منفجر شد. پانزده تن کشته شدند.

^۱ انسداد جریان مایع: Choke off the liquid flow

معمولاً انسداد بخار در سیستم‌های میعان‌ات بخار مشاهده می‌شود. میعان‌ات پرفشار، در نقطه جوش خود از یک لوله عبور کرده و به دلیل اصطکاک، فشار خود را از دست می‌دهند. آن‌ها با کاهش فشار آب داغ به زیر نقطه جوش، تبخیر می‌شوند. انبساط حجمی سریع، موجب خفگی جریان می‌شود.

من برای رفع این مشکل در پالایشگاه تنکو^۱ واقع در نیواورلئان، مجموعه‌ای از دیگ‌های تبخیر ناگهانی^۲ را نصب کردم که برای حذف بخار متصاعدشده، به مجرای اصلی (هدر)^۳ بخار کم‌فشار تخلیه می‌شدند. یادم هست که در هر چند صد فوت خط لوله، یک دیگ تبخیر ناگهانی داشتم.

آب‌بندی کندانس^۴

این داستان از تجارب گسترده من در حیطه تعمیرات کولر گازی خانگی اقتباس شده است. مشکل من این بود که خط تخلیه^۱ اینچی میعان‌ات از ظرف جمع‌آوری میعان‌ات در بخش زیرین مارپیچ‌های تبخیرکننده^۵، به‌طور پیوسته تخلیه نمی‌شد (شکل ۱۰-۳). تلاش کردم سفیدکننده کلر را در خط بریزم. این کار معمولاً موثر بود، اما این بار کمکی نکرد. پس از آن، متوجه مشکلی شدم. خط تخلیه میعان‌ات از بالای یک ستون نگه‌دارنده^۶ به ابعاد ۲ در ۴ در اتاق زیر شیروانی^۷ عبور می‌کرد. شیب رو به بالای کوچکی از خط تخلیه PVC وجود داشت که بر ستون نگه‌دارنده ۲ در ۴ عمود بود. ارتفاع ظرف جمع‌آوری میعان‌ات از بخش بالای لوله PVC بسیار بیشتر بود؛ چراکه بر تکیه‌گاه تیرچه‌ای ۲ در ۴ عمود بود. به نظر می‌رسید که نیروی محرکه هد مایع برای غلبه بر این ارتفاع کوچک، کافی بود. اما اگر کولر خاموش شود، چه اتفاقی می‌افتد؟

۱. تمام میعان‌ات از خط PVC یک اینچی تخلیه خواهند شد.
۲. حلقه روی ستون نگه‌دارنده ۲ در ۴، از هوایی پر خواهد شد که از خروجی درین به عقب برمی‌گردد.
۳. هوا، حلقه‌ای را که در آن لوله PVC عمود بر ستون نگه‌دارنده ۲ در ۴ است، پر می‌کند.
۴. این محفظه هوای محبوس، نمی‌گذارد ظرف تخلیه شود.

^۱ Tenneco: تنکو

^۲ Flash Pots: دیگ‌های تبخیر ناگهانی

^۳ Header: هدر، مجرای اصلی، لوله اصلی، لوله مادر

^۴ Condensate Seal: آب‌بندی کندانس (تله بخار)

^۵ Evaporator: تبخیر کننده

^۶ Beam support: ستون نگه‌دارنده تکیه‌گاه تیرچه‌ای

^۷ Attic: اتاق زیر شیروانی

۵. سپس ظرف، سرریز^۱ می‌کند. توجه کنید که ارتفاع حلقه بیشتر از قطر داخلی لوله بود.

پس از این که مشکل را بررسی کردم و گزینه برش بخشی از تکیه گاه تیرچه‌ای زیر شیروانی به ابعاد ۲ در ۴ را برای مستقیم نمودن خط تخلیه یک اینچی نپذیرفتم، طرح بهینه‌ای را طراحی کردم که در شکل ۱۰-۳ (بخش ب) نشان داده شده است. این طرح، دارای یک حلقه آب‌بند است که مانع از برگشت هوا به خط تخلیه در بخش بالادست حلقه جدید می‌شود.

قطعه حلقه آب‌بند PVC مورد نیازم را از یک فروشگاه یراق‌آلات محلی خریداری کردم. گمان می‌کنم این کار، باید راه‌حلی متداول برای مشکلی باشد که به همین اندازه متداول است. بیشتر از بیست سال است که قطعه‌ای که نصب کردم، به خوبی کار می‌کند. از این عیب‌یابی و حل مشکل درست مثل تمام کارهایی که تا به حال برای پالایشگاه‌ها انجام داده‌ام، راضی هستم.

همین اصل را در مورد خرابی آب‌بند میعان‌ات در یک واحد پالایشگاهی برای عریان‌ساز جریان‌ات جانبی^۲، در پالایشگاهی در کنونت واقع در ایالت لوئیزیانا^۳ رعایت کرده‌ام (شکل ۱۰-۴، الف). در این مورد، نفت سفید به دلیل نیروی ثقل، از برج اصلی در یک عریان‌ساز جانبی با فشار کمی بالاتر و با ارتفاعی پایین‌تر سرازیر شد. تا زمانی که جریان نفت سفید به سمت عریان‌ساز ثابت بود، همه چیز خوب پیش می‌رفت. با این وجود، اگر هر از گاهی، یکی از واحدها جریان ورودی به عریان‌ساز را مختل کند، بخار عریان‌ساز به سمت عقب و به طرف خط خوراک نفت سفید جریان می‌یابد. با وجود خط تغذیه مملو از بخار، هیچ نیروی رانش ناشی از هد مایع^۴ برای انتقال نفت سفید به عریان‌ساز وجود نداشت. پس از آن، اپراتورهای تکسیکو^۵ جریان بخار را برای چند لحظه به صورت دستی^۶ متوقف کردند تا جریان خوراک به عریان‌ساز برگردد.

^۱ Overflow: سر ریز می‌کند

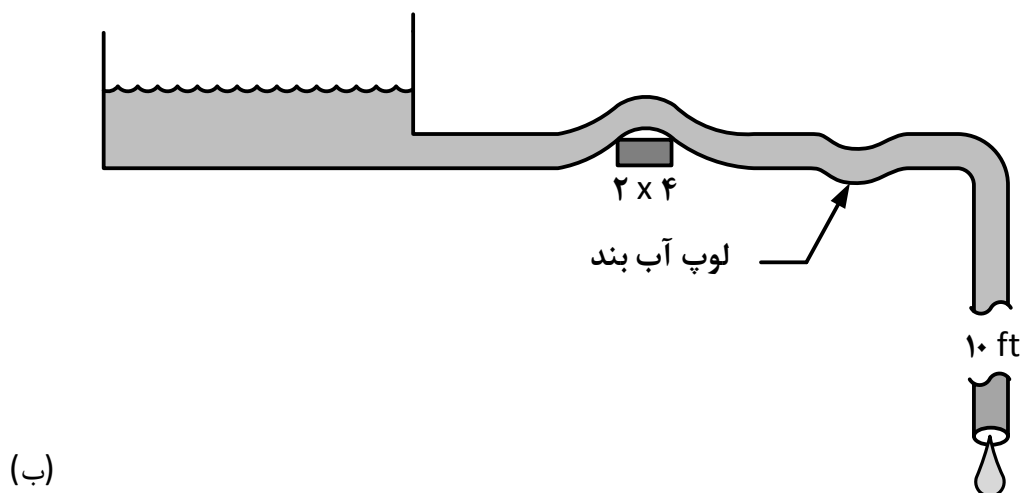
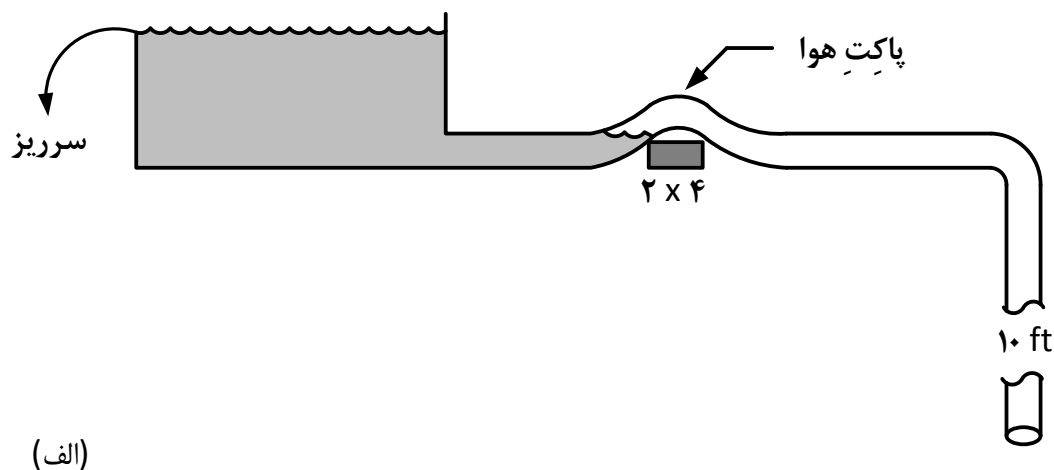
^۲ Side stream stripper: عریان‌ساز جریان‌ات جانبی

^۳ Louisiana: لوئیزیانا

^۴ liquid head driving force: نیروی رانش ناشی از هد مایع

^۵ Texaco: تکسیکو

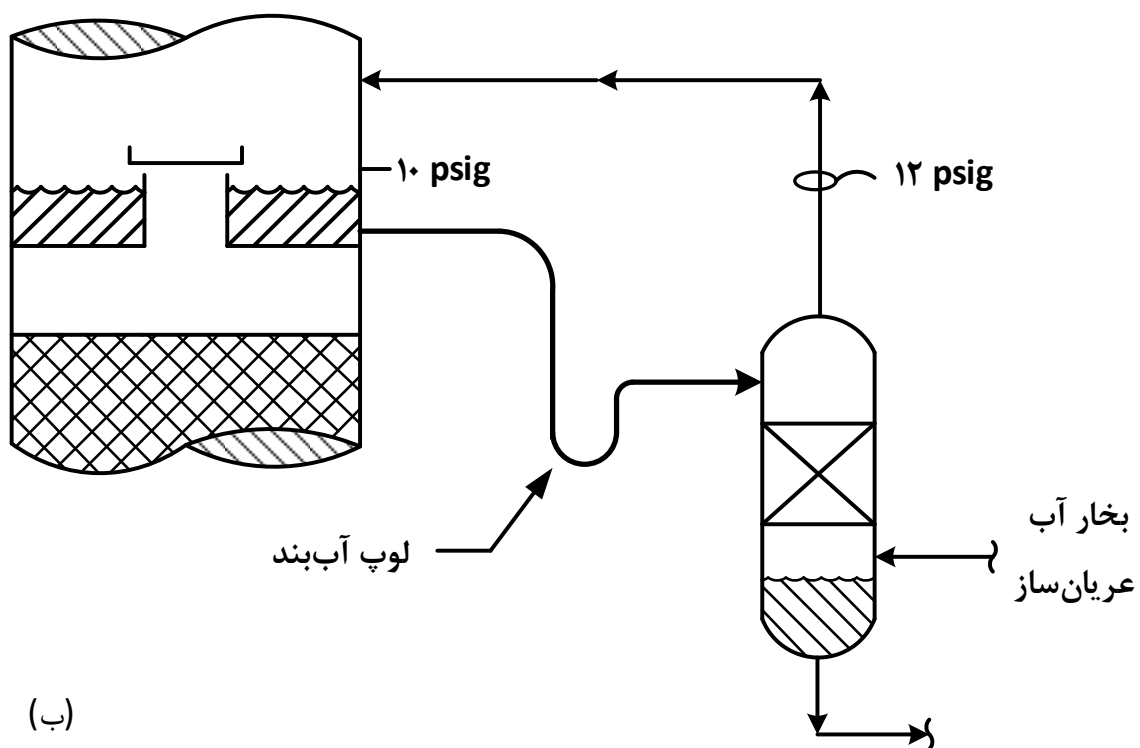
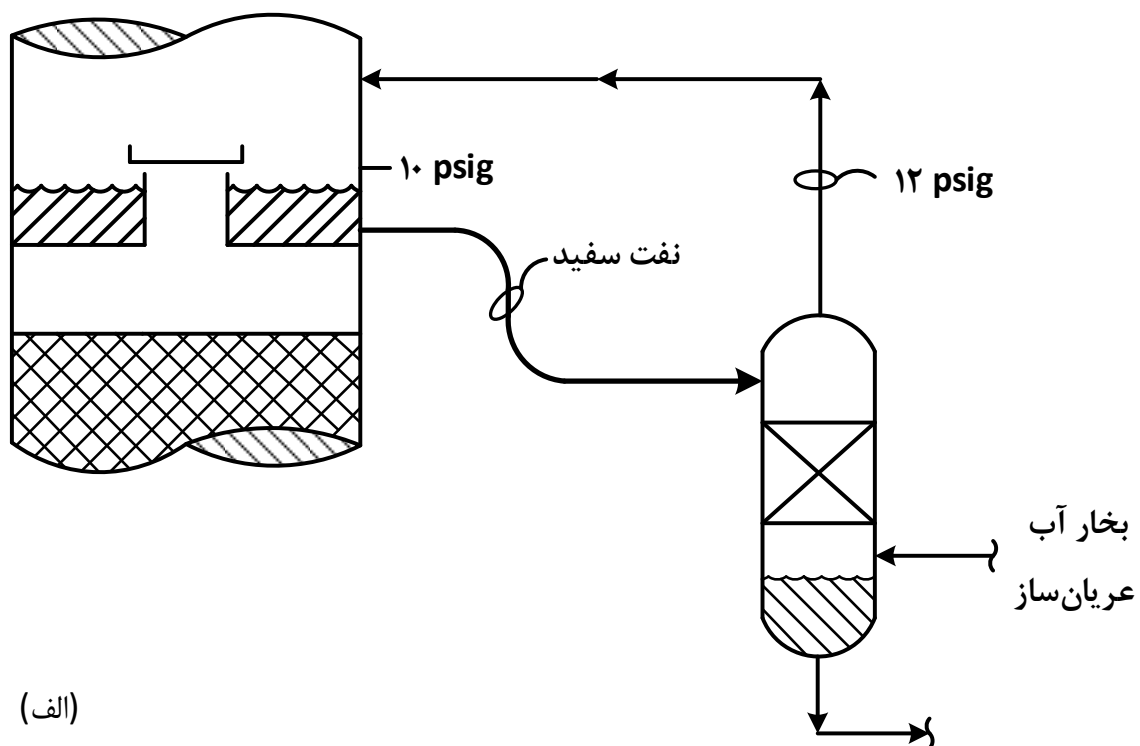
^۶ Manually: به صورت دستی کنترل کردن



شکل ۳-۱۰ (الف) پاکت هوا، تخلیه کننداس را متوقف می کند. (ب) لوپ آب بند از تشکیل پاکت هوا، جلوگیری می کند.

پروژه کولر گازی ام، به یادم آمد و یک حلقه آب بند ۴ فوتی را در خط خوراک نصب کردم (شکل ۳-۱۰، ب). این قطعه باعث می شد که نیرو محرکه هد سیال حفظ شده و عریان ساز عملکرد ثابت و پایداری داشته باشد. این مورد، مثال خوبی برای کاربرد یک اصل فنی از تجربه روزمره به منظور حل یک مشکل متداول در کارخانه است.

یکی از نتایجی که می توان از چنین مثال هایی گرفت، این است که یک سیستم هیدرولیک که در شرایط پایدار عملکرد خوبی دارد، ممکن است در طول کاربرد متناوب به خوبی کار نکند. همچنین، می توان نتیجه گرفت که چنین مشکلاتی فقط با مشاهدات میدانی مستقیم قابل حل هستند.



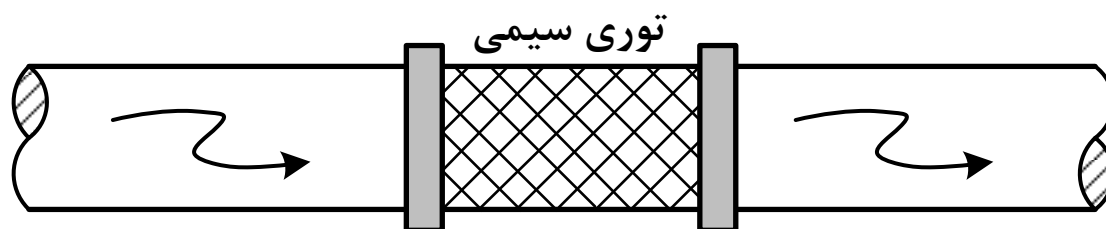
شکل ۱۰-۴ (الف) عریان ساز نفت سفید. (ب) لوپ آب بند، اضافه شده است.

ضربه قوچ بخار^۱

در ماه مه سال ۱۹۸۰، مشغول راه‌اندازی سیستم بخار ۴۰۰ psi در واحد بازیابی گوگرد در شهر تگزاس بودم. شبی گرم و شرجی بود. قبلاً این کار را نکرده بودم و دست تنها بودم. وقتی شیر زنجیری عملیاتی ۱۰ اینچی را بین مجرای اصلی (هدر) بخار شماره ۴۰۰ پالایشگاه و سیستم بخار کارخانه گوگرد باز کردم، صدای مهیب و وحشتناکی شروع شد. قوچ بخار!

دلیل ایجاد قوچ بخار، ربطی به قوچ آب ندارد. وقتی بخار وارد سیستم لوله‌کشی سرد می‌شود یا میعان‌ات سرد به داخل لوله جریان می‌یابند، بخار به سرعت متراکم می‌شود. حلقه‌های آبی که به‌خاطر این تراکم ایجاد می‌شوند، در بخش‌هایی از لوله‌کشی که سردتر است، با شتاب بیشتری تشکیل می‌شوند. در بخش‌هایی که سردتر هستند، فشار نیز پایین‌تر است. وقتی آب‌های حباب‌دار با سرعت زیاد به زانویی^۲ یا اتصال سه‌راهی برخورد می‌کنند، صدای بلندی ایجاد می‌شود. می‌توان از سه روش برای کنترل قوچ بخار استفاده کرد:

۱. به شکل ۵-۱۰ توجه کنید. این روش را از یکی از همکارانم در هند یاد گرفتم.
۲. لوله‌ها را به آرامی گرم کنید.
۳. به سر و صدا توجهی نکنید. امیدوارم لوله‌کشی از بین نرود. من این رویه را در تگزاس و در سال ۱۹۸۰ به کار بردم؛ اما این دستورالعمل، توصیه نمی‌شود.



شکل ۵-۱۰ تجهیز سرکوب ضربه قوچ آب.

خلاصه

شاید تصور کنید که من در این فصل، مشکلاتم را در محیط خانه را با مشکلات کاری‌ام در هم آمیخته‌ام. بیشتر اوقات، مشاهده‌ای که هنگام قدم‌زدن در طول کانال‌های زهکشی در نیواورلئان دارم یا مشاهده اتصالاتی که در فروشگاه‌های یراق‌آلات محلی فروخته می‌شوند، منبع الهام‌بخش من برای حل مشکلات فرآیندی پالایشگاه هستند.

^۱ ضربه قوچ بخار: Steam Hammer

^۲ Elbow: لوله خمیده، زانویی

مفهوم نصب یک دریچه در بخش بالای حلقه آب‌بند برای شکستن انسداد بخار در خط تخلیه را در خیابان بوربن، واقع در منطقه فرانسوی آموختم.

من در خانه، هفت حمام، چهار کولر و دو ماشین لباس‌شویی دارم و باید دائماً تمام آن‌ها را عیب‌یابی کنم. همین موضوع کمکم می‌کند تا مشکلات پالایشگاهی را برطرف کنم.

استفاده از هیدرولیک در مشکلات فرآیند

چکیده:

تاریخچه مشکلات هیدرولیکی که برای نویسندگان اتفاق افتاده به شرح زیر است:

۱. امولسیون‌ها در خطوط لوله گسترده
 ۲. سیستم‌های آب خنک‌کننده
 ۳. تأثیر ضخامت صفحه سینی بر عملکرد سینی تفکیک‌کننده
 ۴. تأثیر افزایش فشار ناشی از کاهش سرعت در مبدل‌های حرارتی
- مشکلات هیدرولیکی اغلب منجر به نتایجی می‌شود که بیشتر مهندسان فرآیند را به اشتباه می‌اندازد.

کلمات کلیدی:

فشار؛ امولسیون‌ها؛ آب خنک‌کننده؛ مبدل گرمایی؛ هیدرولیک؛ ضخامت سینی؛

در تاریخ ۲ دسامبر سال ۱۹۸۰، پس از ۱۶ سال کار در نفت آمریکا^۱، مدیر خدمات فناوری در پالایشگاه گود هوپ^۲ در نورکو^۳ واقع در ایالت لوئیزیانا^۴ شدم. این اولین موقعیت کاری من به عنوان سرپرست بود. این موقعیت، شغلی بود که بعداً به دلایل متعدد متوجه شدم که صلاحیت انجام آن را ندارم. برخی از این دلایل به شرح زیر هستند:

۱. نداشتن مهارت‌های فنی؛
۲. نداشتن مهارت‌های نظارتی؛
۳. نداشتن مهارت‌های ارتباطی.

با داشتن ۵۴ سال سن، فقط توانسته بودم مشکل اولم را برطرف کنم. به‌ویژه در مورد توانایی‌ام برای غلبه بر محدودیت‌های هیدرولیکی فرآیند، با کمک چند رابطه همبستگی ساده، کاملاً در این زمینه حرفه‌ای شده‌ام:

- افت فشار از طریق یک حفره:

$$DP = K \cdot \frac{(DEN)}{28} \cdot V^2 \quad (1 - 11)$$

در این معادله:

- DP = افت فشار بر حسب psi
- DEN = چگالی بر حسب lb/ft³
- V = سرعت بر حسب ft/s

ضرایب متداول روزنه (K) به شرح زیر هستند:

- نظری (بدون اصطکاک و تلاطم)^۵ $0.178 =$
- حفره صاف در یک صفحه ضخیم (یعنی نیم اینچ) $0.2 - 0.3 =$
- حفره در یک صفحه نازک (یعنی ۰/۰۸ اینچ، ۱۶ گیج، ۲ میلی‌متر) $0.4 - 0.6 =$
- نازل خروجی صاف $0.2 - 0.3 =$
- دودکش^۶ با یک کلاهک $0.2 - 0.3 =$

^۱ شرکت نفت آمریکا: American Oil

^۲ گود هوپ: Good Hope

^۳ نورکو: Norco

^۴ لوئیزیانا: Louisiana

^۵ تلاطم: Turbulence

^۶ دودکش: Chimney

• جریان صفحه اریفیس = 0.5 – 0.7

می توان افت فشار در یک لوله را به روشی مشابه و با توجه به موارد زیر محاسبه کرد:

$$DP = \frac{4}{ID} \cdot \frac{DEN}{28} \cdot V^2 \cdot L \quad (2-11)$$

در این معادله:

• ID = قطر داخلی لوله

• L = معادل ۱۰۰ فوت

اگر تعدادی زانویی^۱، شیر دروازه‌ای^۲ باز و سایر اتصالات روی خطوط لوله موجود باشند، طول لوله را برای محاسبه «L» دو برابر می‌کنم. برای جریان فازی مخلوط (یعنی بخار و مایع)، با سرعت‌های بالاتر از ۱۵-۲۵ فوت بر ثانیه، از چگالی میانگین فاز مخلوط استفاده می‌کنم. در سرعت‌های زیر ۱۵ فوت بر ثانیه، جداسازی فازها ممکن می‌شود. تمام این روش‌ها تقریبی هستند؛ اما نکته مهم دیگری که باید به آن توجه کنیم، این است که ما زبری واقعی داخل لوله را نمی‌دانیم. بنابراین، هرگونه محاسبه پیچیده‌تر نیز فقط یک تقریب خواهد بود.

بازیابی فشار

فشار در لوله خوراکی که به داخل وسیله^۳ جریان می‌یابد، معمولاً کمتر از فشار وسل خواهد بود. من این اثر را در پالایشگاهی واقع در آروبا^۴ اندازه‌گیری کرده‌ام. در این پالایشگاه، نازل ورودی ۱۸ اینچی وارد برج خلأ با قطر داخلی ۳۰ فوت می‌شد. فشار از ۶۸ میلی‌متر جیوه به ۷۲ میلی‌متر جیوه رسید. من از معادله (۱۱-۱)، برای تبدیل سرعت به فشار استفاده می‌کنم (با ضریب K = ۰/۱).

در مورد کولرها و کندانسورهای بخار متوجه شده‌ام که احتمال دارد فشار خروجی، نسبت به فشار ورودی بیشتر باشد (به دلیل اثرات کاهش ارتفاع). این موضوع به دلیل کاهش زیاد سرعت و به خاطر انقباض حجمی جریان رخ

^۱ Elbow: لوله خمیده، زانویی

^۲ Gate Valve: شیر دروازه‌ای، گونه ای از شیر صنعتی است که برای باز و بسته کردن جریان سیال در یک خط لوله مورد استفاده قرار می‌گیرد. شیر با حرکت Gate Valve عمودی دیسک روی سیت، باز و یا بسته می‌شود. این شیر یک دریچه دو طرفه می‌باشد، زیرا ممکن است ماده سیال از هر جهتی جریان پیدا کند.

^۳ Vessel: وسل، ظرف

^۴ Aruba: آروبا

می‌دهد. این موضوع را در آروبا و بر روی مبدل جریان رآکتور تصفیه هیدروژنی مشاهده کردم. حتی با وجود آن که نازل خروجی ۶ فوت بالاتر از نازل ورودی قرار داشت، فشار خروجی مبدل ۳ psig بیشتر از فشار ورودی آن بود.

انسداد بخار^۱ در یک خط امولسیون^۲

ماه قبل، از فورت مک‌موری^۳ واقع در آلبرتا^۴ برگشتم. در آنجا از کارخانه سانکور تار سندز^۵ بازدید کرده بودم. تقریباً یک درصد از انتشار گاز کربنیک جهانی به دلیل عملیات ماسه‌های قیری رخ می‌دهد. روغن استخراج‌شده از ماسه‌های قیری، امولسیونی متشکل از مواد زیر است:

- آب - شاید ۳۰٪
- نفت خام بسیار سنگین (API ۱۲°)
- مقادیر کمی هوا
- نفتای رقیق‌کننده - چندین درصد

به‌تازگی سانکور، یک خط جدید ۱۶ اینچی را در خط لوله نصب کرده است تا بتواند امولسیون ماسه‌های قیری را ۲۰ مایل منتقل کند. قرار بود امولسیون به یک مخزن دریافت‌کننده، پمپاژ شود (شکل ۱۱-۱). افت فشار محاسبه‌شده، تقریباً ۱۳۰ psi بود. این اتلاف اصطکاک محاسبه‌شده، به‌وسیله مقایسه با خط لوله موجود در سیستم مشابه تایید شد. یک هد پمپ ۵۰ psi ای به عنوان عامل ایمنی اضافه شد. تپه‌ای به ارتفاع ۱۰۰ فوت که در شکل ۱۱-۱ مشاهده می‌کنید، به‌صورت یک عامل مورد توجه قرار نگرفته شده است؛ چراکه ۱۰۰ فوت هد از دست رفته در بالای تپه مجدداً در سرازیری بازیابی خواهد شد.

با این وجود از نخستین روز عملیات پمپ با ظرفیت طراحی ۸۴۰۰۰ BSD، نرخ انتقال را به ۷۰۰۰۰ BSD^۶ محدود کرد. این زیان اقتصادی بسیار بزرگی بود.

با توجه به اینکه چنین مشکلی را قبلاً دیده بودم، اظهار داشتم که مسئله، «انسداد بخار» است. امولسیون در مخزن خوراک در شرایط تبخیر و تحت فشار اتمسفری قرار داشت. احتمالاً وقتی امولسیون به بالای تپه ۱۰۰ فوتی رسید،

^۱ Vapor Lock: انسداد بخار، محبوس شدن بخار

^۲ Emulsion Line: خط امولسیون

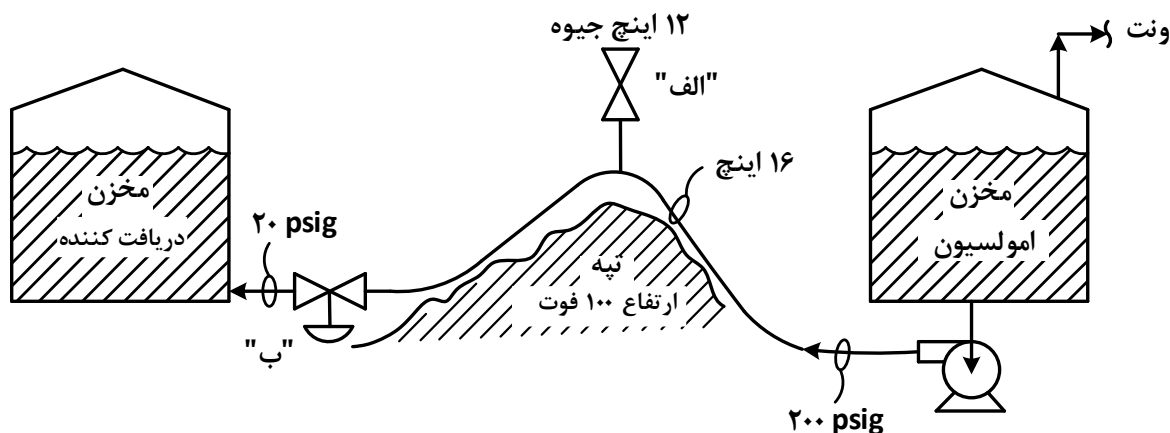
^۳ Fort McMurray: فورت مک‌موری

^۴ Alberta: آلبرتا

^۵ Suncor Tar Sands: سانکور تار سندز

^۶ BSD(BPSD): مخفف "Barell Per Stream Day"، تعدادبشکه در طول روز

زیر فشار اتمسفر بود. از کارولین^۱ مهندس پروژه، خواستم شیر ونت بالا را در نقطه «الف» بررسی کند (شکل ۱۱-۱).



شکل ۱۱-۱ انسداد بخار.

او فشار را ۱۲ اینچ جیوه گزارش داد (یعنی منفی ۶ psig یا ۷ psia — ارتفاع فورت مک‌موری^۲ بسیار بالاتر از سطح دریا بود).

«کارولین^۳، شما دارید انسداد بخار را تجربه می‌کنید. بخارات هوا و هیدروکربن، موجب خفگی جریان در بالای تپه می‌شوند.»

«اما آقای لیبرمن، باید چکار کنیم که جریان بیشتری داشته باشیم؟»

«بسیار خب. بیا ولو «ب» را چند دور ببندیم تا انسداد بخار سرکوب شود.»

کارولین گفت: «ما این کار را انجام دادیم و جریان تا ۳۰۰۰ BSD افزایش پیدا کرد. خب، این کار کمی کمک کرد. دیگر چکار می‌توانم بکنم؟»

«این بهترین کار است،» من پیشنهاد دادم: دختر عزیزم. تلاش کن هوشیارتر باشی و قبل از ۲۰ مایل لوله‌گذاری، در مورد هیدرولیک سیستم و نحوه ارتباط آن با موازنه بخار و مایع فکر کنی.»

«آقای لیبرمن، من «دختر عزیز» شما نیستم.»

^۱ Caroline: کارولین

^۲ Fort McMurray: فورت مک‌موری

^۳ Caroline: کارولین

همانطور که قبلاً هم توضیح دادم، مهارت‌های ارتباطی میان فردی من، هنوز هم کامل نشده است.

افت فشار لوله‌های آب خنک‌کننده

قرارداد افزایش ظرفیت یک پالایشگاه را در سالت لیک سیتی^۱ بسته بودم. مشکل واحد تقطیر نفت خام^۲، ظرفیت کندانسور بود. کندانسورهای بالاسری به‌خاطر سرعت جانبی پایین لوله آب و دمای خروجی بالای آب (یعنی ۱۳۵ درجه فارنهایت) به سرعت رسوب می‌کنند. فشار خروجی آب خنک‌کننده کندانسور بالاسری واحد تقطیر نفت خام را، ۴۲ psig اندازه‌گیری کردم. تصحیح فشار به علت ارتفاع بالای کندانسور (یعنی تقریباً ۱۰ فوت)، فشار ۴۶ psig را ایجاد کرد (شکل ۱۱-۲).

خط ۱۲ اینچی آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده^۳، پساب خروجی ده‌ها کولر دیگر را جابجا می‌کرد. طول آن ۸۰۰ فوت بود. با استفاده از فشار تخلیه پمپ آب ورودی^۴، واقع در برج خنک‌کننده و منحنی هد-ظرفیت پمپ، مجموع جریان آب را محاسبه کردم.

افت فشار محاسبه‌شده در خط برگشت، ۱۰ psi بود (معادله ۱۱-۲). فشار خط برگشت در پایه برج خنک‌کننده را اندازه‌گیری کردم و ۱۲ psig بود. آب باید به بالای برج خنک‌کننده و ۳۰ فوت بالاتر از گیج من جریان می‌یافت. مقدار DP مشاهده‌شده از خط برگشت آب، برابر بود با:

$$46 - 12 = 34 \text{ psi}$$

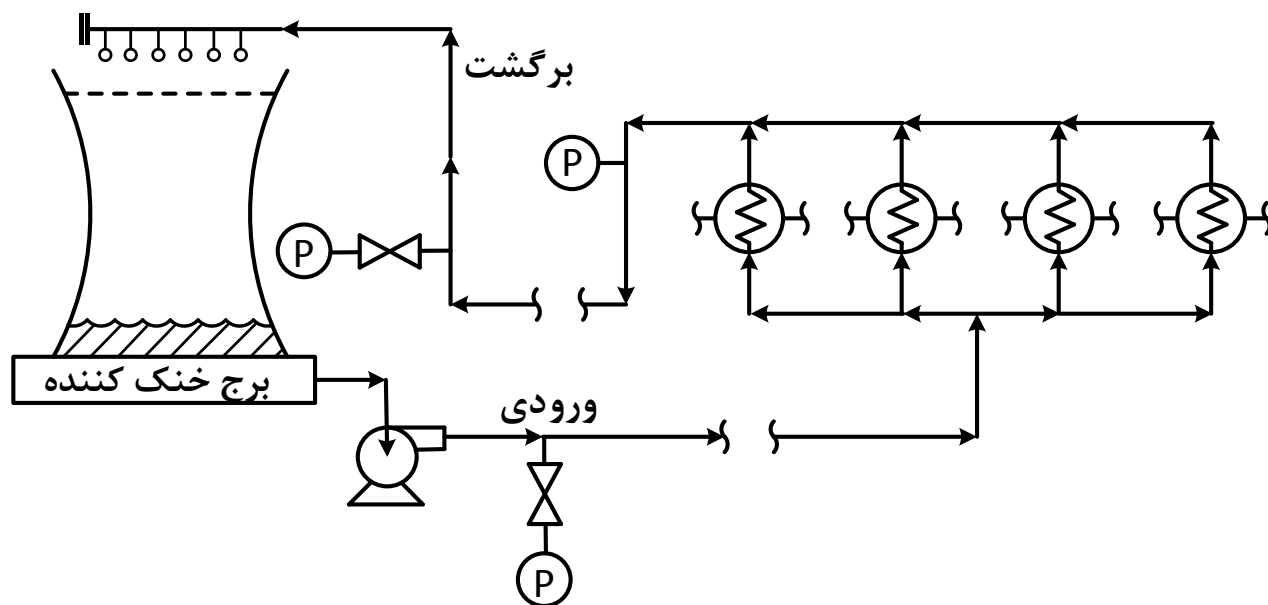
در مقایسه با افت فشار محاسبه‌شده ۱۰ psi. یک جای کار اشتباه بود.

^۱ Salt Lake City: سالت لیک سیتی

^۲ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

^۳ Cooling water return: آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده

^۴ Supply: ورودی



شکل ۱۱-۲ نشت LPG^۱، نرخ گردش آب را محدود می‌کند.

بنابراین، محاسبات و اندازه‌گیری‌هایم را برای خط ورودی آب با جریان یکسان و مسافت یکسان تکرار کردم. اما نتیجه، مطابق با افت فشار خط لوله ورودی آب با افت فشار ۱۰ psi بود که اندازه‌گیری کردم.

خطوط آب جاری در دمای بالا در معرض رسوب‌گذاری هستند؛ مگر اینکه pH در حدود ۶/۵ حفظ شود. به مشتری‌ام، آقای کلسون^۲ اطلاع دادم که کاهش فشار خط آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده ۳۴ psi اندازه‌گیری شده که با DP برابر ۱۰ psi ای که محاسبه‌شده، قابل‌مقایسه است. این موضوع نشان می‌دهد که خط، با رسوبات سختی مسدود شده و باید به روش شیمیایی تمیز شود.

آقای کلسون، مدیرعامل کارخانه گفت: «آقای لیبرمن^۳؛ ما این کار را ماه قبل انجام دادیم و چندان کمکی نکرد. به علاوه، از لحن صحبت کردنتان با من خوشم نیامد.»

به جای اینکه دلخور شوم، به کارخانه برگشتم تا بررسی کنم. دوباره محاسبات مربوط به فشار را مرور کردم. همه چیز یکسان بود. اما وقتی فشارسنج را از خط برگشت در پایه برج خنک‌کننده برداشتم (شکل ۱۱-۲)، متوجه شدم که مقداری گاز از منفذ تخلیه گیج^۴ خارج می‌شود. بنابراین، بالای برج خنک‌کننده رفتم تا لوله‌های توزیع آب را بررسی کنم. آنجا متوجه شدم بخارات هیدروکربنی از لوله توزیع خارج می‌شدند.

^۱ مخفف "Liquefied Petroleum Gas" گاز نفتی مایع شده: LPG

^۲ کلسون: Colson

^۳ لیبرمن: Lieberman

^۴ Bleeder: منفذ تخلیه گیج که جهت هواگیری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همانطور که آنالیز کروماتوگرافی گازی^۱ نمونه‌ای از این بخارها نشان داد، کندانسور بالاسری برج جداسازی بوتان واحد تقطیر نفت خام، به داخل خط آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده، نشستی LPG داشت. با توجه به اینکه چگالی بخار LPG برابر 0.13 lb/ft^3 بوده و نیز چگالی آب 500 برابر بیشتر بود (62 lb/ft^3)، نشستی کوچکی از LPG می‌توانست افت فشار آب برگشتی را به شدت زیاد کند.

کندانسوری که نشستی داشت، تعمیر شد. جریان خنک‌کننده با توجه به موارد زیر، 30% افزایش یافت:

۱. منحنی پمپ آب خنک‌کننده.

۲. افت فشار خط ورودی.

۳. افت فشار مبدل‌ها.

۴. افت فشار خط برگشتی.

۵. ارتفاع رایزر.

توجه کنید که موارد ۱ و ۵ تا حدودی مورد ۴ را خنثی می‌کنند؛^۲ اما 30% جریان آب بیشتر، پیشرفت بزرگی برای کندانسور بالاسری برج تقطیر محسوب می‌شد.

انتظار داشتم آقای کلسون^۳ به من یک نامه تقدیر و قدردانی یا گواهی‌نامه شایستگی، یا یک ستاره طلا، یا چیز مشابهی اهدا کند! اما تنها چیزی که دریافت کردم، هزینه مشاوره سه روزه بود و یادداشتی حاکی از این که باید تلاش کنم تا مهارت‌های ارتباطی‌ام را تقویت نمایم.

راندمان تفکیک سینی

این داستان به دهه ۱۹۷۰ برمی‌گردد. در آن زمان، به‌عنوان یک مهندس در کارخانه آموکو اوایل^۴ مشغول کار بودم. این اتفاق در پالایشگاه نفت آموکو واقع در الدورادو^۵ آرکانزاس^۶ افتاد هر چند مدت هاست که این پالایشگاه از بین رفته است. برج جداساز بوتان^۷ FCU این پالایشگاه، مجهز به سینی‌های غربالی با منافذی به اندازه یک دوم اینچ

^۱ آنالیز کروماتوگرافی گازی: Gas chromatographic analysis

^۲ Offset: خطای ماندگار، اختلاف موقعیت جدید سطح نسبت به سطح مطلوب برای خنثی کردن متغیرهای عملیاتی را خطای ماندگار می‌گویند.

^۳ Colson: کلسون

^۴ Amoco Oil: آموکو اوایل

^۵ El Dorado: ال‌دورادو، یک شهر در ایالات متحده آمریکا با جمعیت ۱۸۰۸۸۴ نفر است که در آرکانزاس واقع شده است.

^۶ Arkansas: آرکانزاس، ایالتی است که در منطقه جنوبی ایالت متحده آمریکا قرار دارد.

^۷ FCU: مخفف «Fluid Catalytic Cracking Unit»، معنی واحد شکست کاتالیستی بستر سیال، واحد شکستن مولکول‌ها در کاتالیست سیال.

بود. ارتفاع بندهای سرریز^۱، ۳ اینچ بود (شکل ۱۱-۳). صفحه‌های سینی^۲ از فولاد ۱۶ گیج (به ضخامت حدود ۰/۰۸ اینچ) ساخته شده بودند. چند ماه قبل از انجام تعمیرات واحد، برج را بازرسی کرده و گزارش دادم که تمام سینی‌ها سالم هستند؛ اما بعد از ۲۰ سال استفاده، نازک شده‌اند.

بخش تعمیرات تصمیم گرفت که سینی‌هایی با ضخامت بیشتر (یعنی سینی‌هایی با ضخامت یک چهارم اینچ) را در هنگام انجام تعمیرات، جایگزین کند. در نهایت، سینی‌های جدید جایگزین سینی‌های قدیمی شدند.

زمانی که برج جداکننده بوتان مجدداً راه‌اندازی شد، راندمان تفکیک سینی از ۸۰ به ۳۰٪ کاهش یافت. با استفاده از داده‌های قبل و بعد از انجام تعمیرات، یک شبیه‌سازی کامپیوتری را، انجام دادم. قبل از اینکه سینی‌ها جایگزین شوند، برجی که ۳۰ سینی داشت، مراحل تفکیک نظری ۲۴ سینی را انجام می‌داد. اما اکنون فقط مراحل تفکیک نظری ۹ سینی را انجام می‌داد. چه اتفاقی افتاده بود؟

در معادله (۱۱-۱)، ضریب K برای صفحه‌های ۱۶ گیجی (با ضخامت ۰/۰۸ اینچ)، دو برابر سینی‌های ضخیم‌تر (یا ضخامت ۰/۲۵ اینچ) است. سینی‌های ضخیم‌تر، افت فشار جریان بخار در عبور از منافذ کف سینی، به نصف کاهش می‌دهند. با در نظر گرفتن ارتفاع بند خارجی، وزن مایع روی سینی‌ها بدون تغییر بود (شکل ۱۱-۲). مقدار زیادی سیال به جای اینکه به نحوه موثری با جریان بخار بالا رونده روی سینی‌ها مخلوط شود، از طریق صفحه‌های سینی، تخلیه می‌شد. به ویژه، از آنجا که سینی‌ها چندان تراز نبودند، سیال روی سینی‌ها فقط از طریق نقاط فرو رفته، بر روی صفحه‌های سینی تخلیه می‌شد. این موضوع سبب کاهش تماس بخار و مایع شده و در نتیجه، راندمان تفکیک سینی پایین می‌آید.

به نظر من، این ایده که یک حفره ضخیم‌تر در مقایسه با حفره‌ای که در یک صفحه فولادی نازک‌تر تعبیه شده، DP کمتری دارد، قابل قبول نیست. اما در واقع همین‌طور است. این موضوع را برای لری دورلند^۳، مدیرعامل کارخانه ال‌دورادو توضیح دادم.

این یک مشکل جدی بود که کار ال‌دورادو را برای تولید بنزین با RVP^۴ موردنیاز (یعنی درجه آزادی) دشوار می‌کرد.

^۱ Outlet Weir: بند سرریز یا بند خارجی

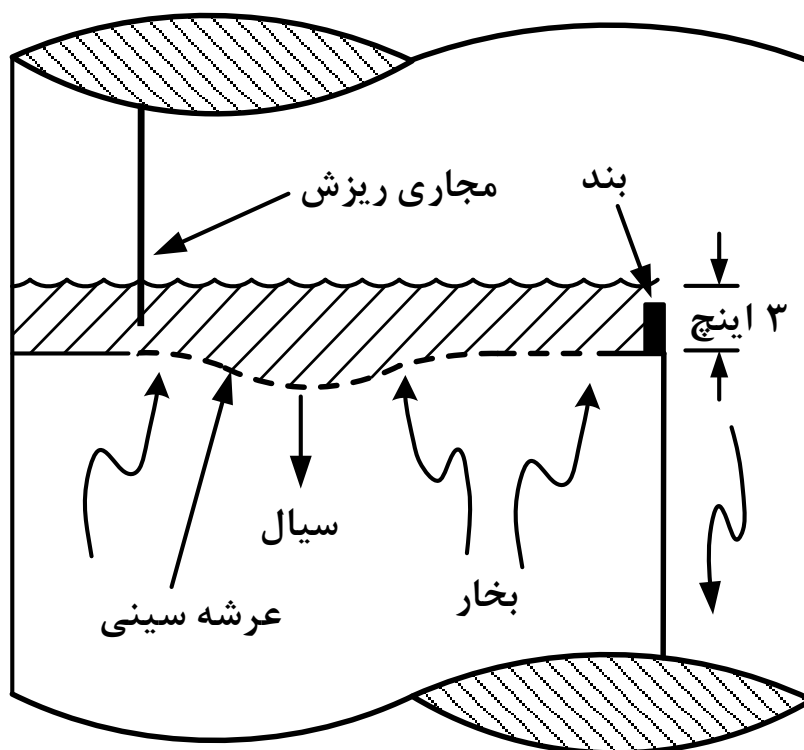
^۲ Tray Deck: صفحه یا کف سینی

^۳ Larry Durland: لری دورلند

^۴ RVP: Reid Vapour Pressure: فشاری که در آن مولکول‌ها بتوانند در دمایی که هستند بر آن فشار غلبه کنند و از سطح مایع خارج شوند و به صورت گاز درآیند را، فشار بخار گویند. به عنوان فشار مطلق بخار اعمال شده توسط بخار مایع و گاز محلول در آن در دمای ۳۷،۸ درجه سانتیگراد (۱۰۰ درجه فارنهایت) تعریف شده است.

آقای دورلند به من خیره شد. او گفت: «لیبرمن، نمی‌دانم در مورد چه چیزی صحبت می‌کنی. متأسفانه فاقد مهارت‌های ارتباطی هستی».

اما این موضوع مربوط به خیلی وقت پیش بود. من حالا خیلی بهتر شده‌ام.



شکل ۱۱-۳ صفحات سینی ضخیم‌تر در مقایسه با صفحات سینی نازک‌تر، بیشتر نشست می‌کنند.

افت فشار سینی‌های دودکشی

ضریب اریفیس برای سینی دودکشی، همانطور که در ابتدای این فصل ذکر شد، بین $0.9/1.2$ است. در برج خلأ پالایشگاه پوئرتویانو^۱ واقع در اسپانیا، افت فشاری برابر با ۴ میلی‌متر جیوه را در یک سینی دودکشی اندازه‌گیری کردم. به همین دلیل، فشار منطقه فلش^۲ برج خلأ، به‌اندازه ۴ میلی‌متر جیوه افزایش داد و بعد، از تبخیر محصول نفت گاز از ولو محصول پایین برج (قیر) جلوگیری کرد.

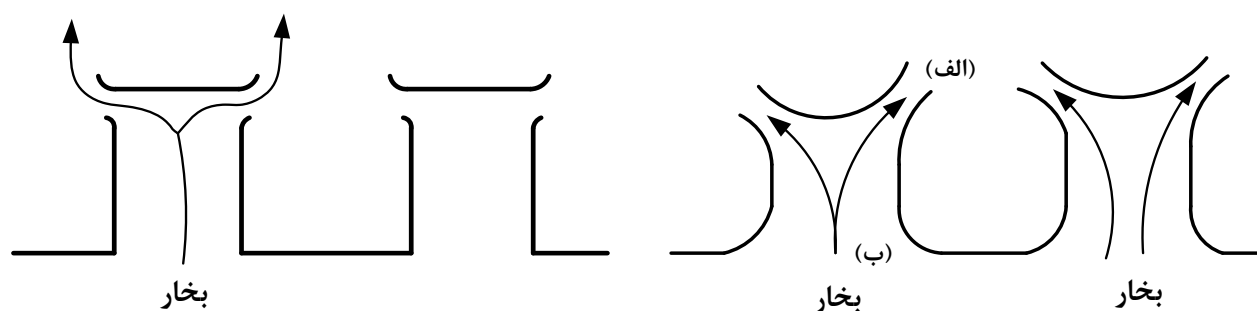
^۱ Puertollano: پوئرتویانو، یک دهستان در اسپانیا است که در استان سیوداد رئال واقع شده‌است.

^۲ Flash: تبخیر ناگهانی، تبخیر آبی

دلیل بالابودن DP در سینی دودکشی (و دلیل ضریب بالای اریفیس) در شکل ۴-۱۱ (الف) نشان داده شده است. این دلایل بدین شرح هستند:

۱. بخار باید وارد دودکش محدودکننده شود.
۲. بخار باید موقع خروج، به اندازه ۹۰ درجه زیر کلاهک بچرخد.
۳. زمانی که بخار بین کلاهک‌ها جریان می‌یابد، باید مجدداً به اندازه ۹۰ درجه بچرخد.

وقتی بخار از اریفیس‌هایی با لبه‌های تیز عبور می‌کند، باید از هر سه مسیر فوق بگذرد. معمولاً در یک دهانه صاف و گرد، میزان افت فشار نصف اریفیس‌ای با لبه تیز است. برای اینکه بتوانم اثر افت فشار سینی دودکشی را کم کنم، دودکش‌ها و کلاهک‌ها را تغییر دادم. این تغییرات را در شکل ۴-۱۱ (ب) و در دهانه‌های گرد مشاهده می‌کنید.



شکل ۴-۱۱، لبه‌های گرد، فشار سینی دودکشی را به نصف کاهش می‌دهند. برای هر دو نقطه (الف و ب) ورودی هر دودکش و ورودی هر کلاهک



عیب‌یابی مدارهای آب خنک‌کننده

چکیده:

برج‌های خنک‌کننده، هوا را مرطوب می‌کنند و با این کار دمای خروجی آب در گردش را کاهش می‌دهند. اگر درصد رطوبت هوا ۱۰۰٪ باشد، برج‌های خنک‌کننده نمی‌توانند کار کنند. هرچه هوا خشک‌تر باشد یا درصد رطوبت آن کمتر باشد، کار برج خنک‌کننده موثرتر است. در رسوبات مبدلی:

- افت فشار آب افزایش نمی‌یابد.
- دبی آب در داخل مبدل کاهش می‌یابد.
- همچنین دمای خروجی آب و نرخ رسوبگذاری باید افزایش یابند.

کلمات کلیدی:

نقطه شبنم؛ رطوبت؛ کربنات‌ها؛ رسوبات سخت؛ سیرکولاسیون؛ مکش طبیعی؛ افت فشار

معمولاً سیستم‌های آب خنک‌کننده کارخانه به صورت واحدهایی ثابت مورد توجه قرار می‌گیرند و جریان گردش آب را برای خنک‌سازی فرآیند، در فشاری ثابت و در دمایی که تنها تابع شرایط محیطی است، ایجاد می‌کنند. پس از گذشت مدت زمانی مشخص، کاهش کلی در عملکرد مدار آب خنک‌کننده، «اندکی مورد توجه قرار گرفته و دوباره فراموش می‌شود.» اما غالباً کاهش ظرفیت تبرید به خاطر کاهش جریان آب و افزایش دمای ورودی^۱، باعث می‌شود که ظرفیت کارخانه، بازیابی محصول و راندمان عملیاتی کاهش یابد.

برج‌های خنک‌کننده

برای بیشتر واحدها، آب خنک‌کننده از برج خنک‌کننده مرکزی تأمین می‌شود (شکل ۱۲-۱). آب بر روی تخته‌های چوبی یا پکینگ‌های پلاستیکی یا انواع دیگر ابزارهای تماسی، توزیع شده یا اسپری می‌شود. هوا از میان تخته یا پکینگ به وسیله فن یا به وسیله دودکش^۲ دمیده می‌شود. در صورت استفاده از فن، درافت القایی^۳ بوده و در صورت استفاده از دودکش، مکش، طبیعی است. آب در فرآیند تبخیر، سرد می‌شود. برای آن که این اتفاق بیفتد، لازم است رطوبت هوای محیط، کمتر از ۱۰۰٪ بوده یا دمای آن، زیر دمای نقطه شبنم^۴ باشد. برای اینکه دمای ۱۰۰۰۰ پوند آب (یا ۲۰ GPM)، از ۱۰۰ درجه فارنهایت به ۸۰ درجه فارنهایت برسد، لازم است:

$$\frac{(10000 \text{ LB}).(100-80 \text{ }^{\circ}\text{F}).(1.0 \text{ BUT }/^{\circ}\text{F})}{1000 \text{ BUT/LB}} = 200 \text{ پوند از آب تبخیر شده}$$

توجه کنید که ۱ BTU/°F/LB، گرمای ویژه^۵ آب بوده و مقدار ۱۰۰۰ BTU/LB، گرمای نهان تبخیر^۶ آب بر حسب هر پوند می‌باشد.

برای اینکه آب، تبخیر شده و به هوا وارد شود، دمای هوا باید پایین‌تر از «دمای حباب تر»^۷ باشد.

^۱ Supply: ورودی

^۲ Chimney: دودکش

^۳ Induced draft: مکش القایی، درافت القایی

^۴ Dew point: نقطه شبنم، دمایی است که هوا باید تا آن نقطه سرد شود تا با بخار آب، اشباع شود. در دمای پایین‌تر از این دما، بخشی از آب موجود در هوا تقطیر خواهد شد تا دوباره به حالت تعادل برسد.

^۵ Specific heat: گرمای ویژه، به صورت «انرژی مورد نیاز برای افزایش دمای یک کیلوگرم از یک ماده به اندازه یک درجه»، تعریف می‌شود.

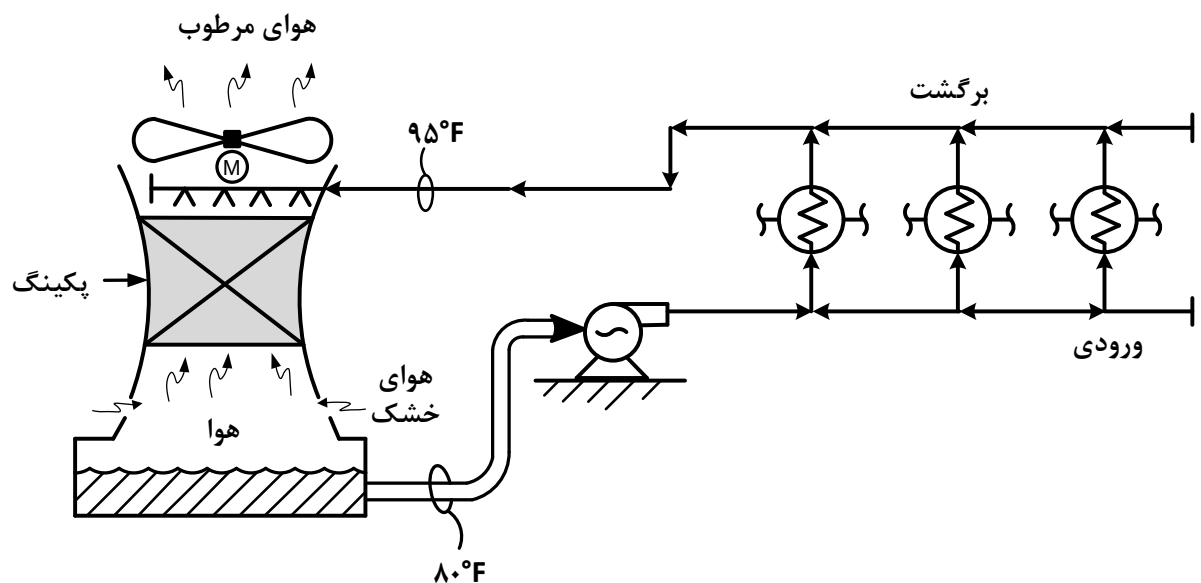
^۶ Latent heat of vaporization: گرمای نهان تبخیر، به مقدار گرمای لازم برای تبدیل مایع به گاز در نقطه جوش و در دمای ثابت، گرمای نهان تبخیر می‌گوییم.

^۷ Wet Bulb Temperature: دمای حباب تر یا دمای حباب مرطوب دمایی است که بخشی از هوا می‌تواند داشته باشد، اگر با تبخیر آب در آن تا حد اشباع سرد شود و گرمای نهان تبخیر توسط همان بخش از هوا تأمین گردد. به عبارت دیگر، دمای حباب مرطوب در اتاقی بسته و عایق، دمای نهایی هوای این اتاق پس از تبخیر آب تا حدی است که رطوبت هوا به اشباع برسد.

دمای حباب مرطوب^۱

پارچه مرطوبی را به انتهای یک دماسنج بپیچید. چند لحظه آن را به همین حالت نگه دارید. شما در شهر من، نیواورلئان هستید و در رطوبت نسبی ۱۰۰٪، هیچ اتفاقی رخ نمی دهد. اگر در اواسط تابستان در شهر لاریدو، واقع در تگزاس^۲ باشید و هوا کاملاً خشک باشد، احتمال می رود که دمای دماسنج، ۱۵ درجه فارنهایت کمتر شود. بهترین عملکرد یک برج خنک کننده این است که دمای آب گرم برگشتی به برج خنک کننده را تا دمای حباب تر خود کاهش دهد. برای مثال:

- اگر دمای آب گرم برگشتی به برج خنک کننده^۳، برابر با ۸۰ درجه فارنهایت و دمای حباب تر برابر با ۷۵ درجه فارنهایت باشد، ۵ درجه فارنهایت مانده تا به دمای حباب تر برسد. این عملکرد، واقعاً عملکرد مناسبی در یک برج خنک کننده است.



شکل ۱۲-۱ برج خنک کننده با درافت القایی^۴

^۱ Wet Bulb Temperature: دمای حباب مرطوب

^۲ Texas: تگزاس

^۳ Cooling water return: آب گرم برگشتی به برج خنک کننده

^۴ Induced draft: درافت القایی، مکش القایی

• از سوی دیگر، اگر دمای برگشت آب از برج خنک کننده به واحد شما ۸۰ درجه فارنهایت بوده و دمای حباب تر نیز ۶۵ درجه فارنهایت باشد، این بدان معنا است که ۱۵ درجه فارنهایت با دمای حباب تر اختلاف دارد. این موضوع، بیانگر عملکرد ضعیف برج خنک کننده می باشد.

چه عواملی موجب اختلاف زیاد دما با دمای حباب تر می شوند؟

- کاهش جریان هوا؛
- توزیع ضعیف آب؛
- اعوجاج پکینگ برج یا تخته های شیب دار.

فشار آب

فشار ورودی و فشار برگشتی آب خنک کننده که اپراتور واحد مشاهده می کند، فشارهایی ثابت هستند. فشار ورودی، فشار تخلیه پمپ برج خنک کننده است (معمولاً این فشار ۶۰ psig است). فشار برگشت، فشاری است که برای بالابردن^۱ آب به بالای برج خنک کننده لازم است (معمولاً این فشار ۱۵ psig یا ۳۵ فوت است). اختلاف بین ۶۰ و ۱۵ psig (یعنی ۴۵ psi)، افت فشار واقعی برای گردش آب خنک کننده در کولرهای واحد نیست. لازم است به افت فشار در خط ورودی و خط برگشتی آب نیز توجه کنیم

زمان، دما و pH

کاترین پرسید: «آقای لیبرمن، ما به یک مدل کامپیوتری، پینچ پوینت^۲، برای آنالیز واحد اصلاح کاتالیستی (ریفرمینگ) نفتای خودمان نیاز داریم. مایل هستید گزارشی در این خصوص تدوین کنید و هزینه ها نیز بیشتر از ۱۰۰ هزار دلار نشوند؟ کاهش ظرفیت تبرید در پساب رآکتور به خاطر وزن مولکولی زیاد هیدروژن بازیافتی، موجب بار بیش از حد^۳ موتور کمپرسور گریز از مرکز گاز بازیابی ما می شود.»

پاسخم این بود: «کتی، اگر پول دارید، من هم وقت دارم.»

کاترین مدیر خدمات فنی پالایشگاه گریت نورثرن^۴ در شهر کسپر^۵ واقع در وایومینگ بود.

^۱ Lift: نیروی بالا بر

^۲ Pinch Point: حداقل اختلاف بین منبع سرد و گرم در هر مبدل حرارتی پینچ پوینت نامیده می شود.

^۳ Overloading: لود بیش از حد، بار بیش از حد

^۴ Great Northern Refinery: گریت نورثرن

^۵ Casper: کسپر، شهری در ایالت وایومینگ کشور ایالات متحده آمریکا است که جمعیت آن در سرشماری سال ۲۰۱۰ میلادی، ۵۵'۳۱۶ نفر بوده است.

«می‌توانیم قرارداد را بر مبنای حداکثر ۱۰۰ هزار دلار تنظیم کنیم؟ اگر این کار، شدنی است، امیدواریم گزارش نهایی شما تا ۱۵ نوامبر ارائه شود. آقای لیبرمن، آیا می‌توانیم بر روی مفاد این قرارداد توافق کنیم؟»

پاسخ دادم: «بله، کتی. اما ارتباطات رایانه‌ای ما اختصاصی هستند و زمان ارائه نتایج در جدول، نمی‌توانیم ارتباطمان را با پالایشگاه گریت نورثرن به اشتراک بگذاریم. آیا این موضوع را قبول می‌کنید؟»

«قطعاً نورمن. کاملاً موافقم. نکته‌ای که باید به آن توجه کنید، این است که لازم است نتایج در صفحات گسترده گزارش شوند.»

بررسی افت فشار

در شکل ۱۲-۲ نتایج بررسی افت فشار در میدان مدار آب خنک‌کننده در نیروگاه ارائه شده است:

- ورودی^۱ پمپ = خلأ ۶ اینچ جیوه.
 - خروجی پمپ = ۶۷ psig
 - فشار آب خنک‌کننده در ورودی مبدل = ۵۸ psig (در سطح زمین).
 - فشار آب خنک‌کننده در خروجی مبدل = ۴۸ psig (۱۰ فوت بالاتر از سطح زمین).
 - فشار آب خنک‌کننده در پایه برج خنک‌کننده، در خط آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده = ۱۲ psig.
- ۶ اینچ جیوه از فشار ورودی^۲ پمپ، معادل خلأ منفی ۳ psig است؛ یعنی هر ۲ اینچ خلأ جیوه، برابر با ۱ psig فشار منفی است. بنابراین، پمپ تحت این شرایط کار می‌کرد:

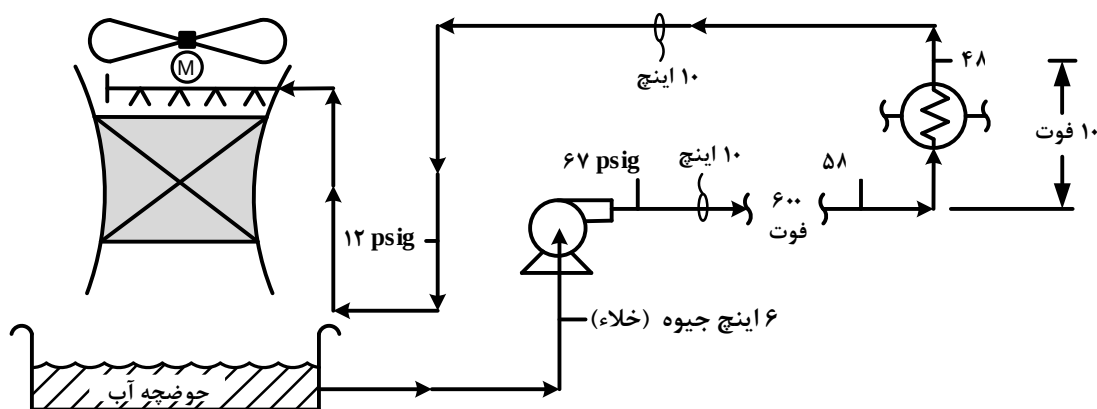
$$3 + 67 = 70 \text{ psi اختلاف فشار}$$

اتلاف فشار خط لوله از تخلیه پمپ به ورودی مبدل در واحد ریفرمر، به این قرار بود:

$$67 \text{ psig} - 58 \text{ psig} = 9 \text{ psig}$$

^۱ Suction: مکش

^۲ Suction Pressure: فشار دیشارژ، فشار تخلیه



شکل ۱۲-۲ بررسی افت فشار.

محاسبات افت فشار برای کولرهای فرآیندی، به این شرح بود:

$$58 \text{ psig} - 48 \text{ psig} = 10 \text{ psig}$$

تصحیح برای ۱۰ فوت ارتفاع (۲/۵ فوت آب = ۱ psi)، افت فشار ناشی از اصطکاک در کولرها به قرار زیر است:

$$10 \text{ psi} - (10 \text{ ft} / 2.5 \text{ ft}) = 6 \text{ psi}$$

و افت فشار در مجرای اصلی (هدر)^۱ صفحه برگشت، به این صورت محاسبه می‌شود:

$$48 \text{ psig} - 12 \text{ psig} = 36 \text{ psig}$$

اتلافات اصطکاکی در خط لوله آب

همسرم لیز به مناسب تولدم برایم یک جریان‌سنج دوپلری خرید که در اندازه‌گیری سرعت در خطوط آب خنک‌کننده کاربرد داشت. در قسمت تخلیه پمپ آب خنک‌کننده، سرعت ۸ فوت بر ثانیه را اندازه‌گیری کردم. اندازه خط، ۱۰ اینچ بود. از رابطه زیر برای محاسبه افت فشار در خطوط لوله تمیز استفاده می‌شود:

^۱ Header: هدر، مجرای اصلی، لوله اصلی، لوله مادر

$$DP = \frac{4}{ID} \cdot \frac{(DEN)}{62} \cdot \frac{V^2}{28}$$

در این معادله:

• DP = افت فشار در ۱۰۰ فوت معادل بر حسب psi.

• DEN = چگالی بر حسب lb/ft^3 .

• V = سرعت، فوت بر ثانیه.

• ID = قطر داخلی لوله بر حسب اینچ.

محاسباتم برای ۶۰۰ فوت خط لوله اصلی، به این صورت بود که افت فشار برای خط ورودی^۱ باید ۷ psi باشد. در صورتی که ۹ psi اندازه گیری شد. از آن جا که خط آب گرم برگشتی به برج خنک کننده، به موازات خط ورودی جریان داشت و جریان و ID یکسان بودند، فکر می کردم افت فشار آن برای خط برگشت آب نیز تقریباً ۹ psi باشد. اما افت فشار در شکل ۱۲-۲، ۳۶ psi مشاهده شد.

یک جای کار اشتباه بود!

رسوبات سخت

«آقای نورم، وقتی مبدل هایمان را برای تمیز کردن رسوبات خنک کننده های آبی^۲ باز کردیم، متوجه شدم که خط ورودی ما حاوی یک یا چند اینچ رسوبات سخت است». تراویس^۳، اپراتور خارجی، تأکید کرد: «رنگ این رسوبات متمایل به خاکستری بود.»

بسیار خب. افت فشار به عوامل زیر بستگی دارد:

DP با ID^5 متناسب است.

که در این معادله:

• DP = افت فشار بر حسب psi.

• ID = قطر لوله بر حسب اینچ.

^۱ ورودی: Supply

^۲ خنک کننده های آبی: Water coolers

^۳ تراویس: Travis

مقدار DP برای یک لوله ۱۰ اینچی با میانگین یک اینچ رسوب (میانگین قطر داخلی ۸ اینچ)، بدین صورت افزایش می‌یابد:

$$[10" \div 8"]^5 = 2$$

رسوبات باعث می‌شوند افت فشار در خط ورودی آب تمیز دو برابر شده و از حدود ۹ psi به تقریباً ۱۸ psi افزایش یابد. اما در مورد ۱۸ psi افت فشار باقی‌مانده در خط آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده^۱ چگونه؟ افزون‌براین، چه عاملی باعث می‌شود رسوباتی ایجاد شود که تراویس آن‌ها را مشاهده کرد؟

کنترل pH آب

مقدار pH آب در گردش را بررسی کردم. تقریباً برابر با ۶/۵ بود.

تراویس گفت: «آقای نورم، مدیر جدیدی را برای کارخانه انتخاب کردیم. مدیر قدیمی تلاش می‌کرد تا در مصرف مواد شیمیایی برج خنک‌کننده صرفه‌جویی کند. به همین دلیل، از ۷/۵ تا ۸ استفاده می‌کردیم. آقای جانسون^۲، مدیر جدید از ما خواسته است تا دستورالعمل‌های عملیات شیمیایی را با توجه به نظر فروشنده مواد شیمیایی تصفیه آب دنبال کنیم. بر این اساس، pH باید با افزودن سولفوریک اسید در مقدار ۶/۵ تنظیم شود. به نظر می‌رسد که مبدل ما از آن زمان به بعد، با سرعت قبلی رسوب نمی‌گیرد.»

لازم به ذکر است که معادله من برای اتلاف ناشی از اصطکاک در خطوط لوله، با توجه به زبری طبیعی لوله کاربرد دارد؛ نه سختی رسوبات یا مقدار سختی زیاد. بنابراین، این مسئله نیز بخشی از مشکل افت فشار بالا در خط آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده بود. لازم است pH هدف ۶/۵ با دقت رعایت شود. در سال ۱۹۷۴ در واحد آلکیلاسیون تگزاس^۳ نیز به سخت‌ترین روش ممکن متوجه شدم که کاربرد اسید اضافی برای تولید pH کمتر (یعنی کمتر از ۶/۵)، سرعت خوردگی را در لوله‌های آب خنک‌کننده با جنس فولاد کربنی شدیداً بیشتر می‌کند.

می‌توان خطوط آب خنک‌کننده را با یک «محلول شلاسیون»^۴ به صورت شیمیایی تمیز کرد. اما این دستورالعمل، گران‌قیمت است و برای پیاده‌سازی آن، باید واحد خارج از سرویس باشد.

^۱ Cooling water return: آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده

^۲ Johnson: جانسون

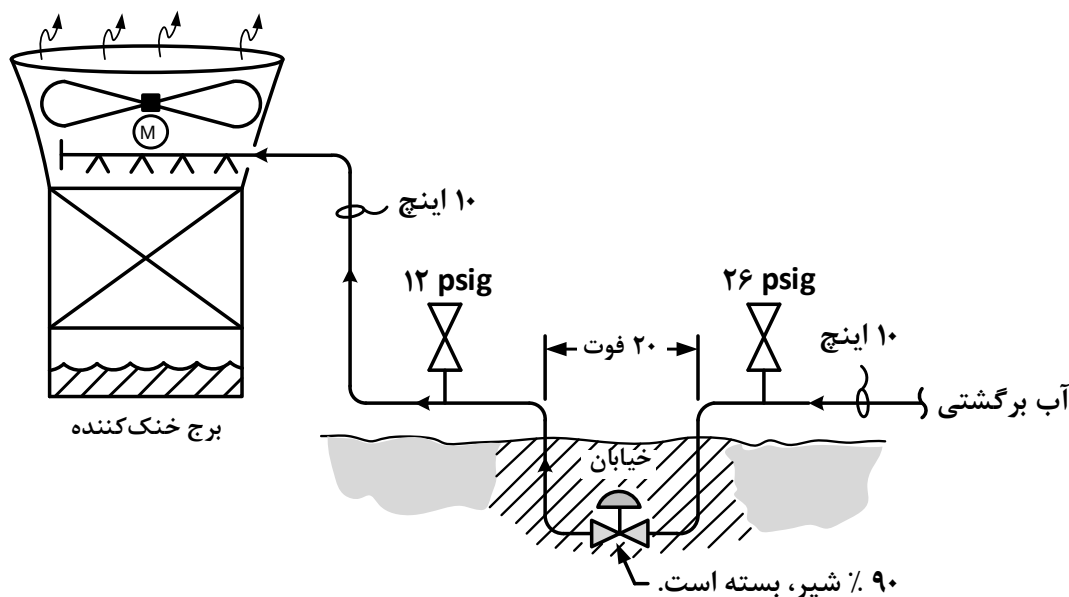
^۳ Texas: تگزاس

^۴ Chelating Solution: محلول چگالنده

یک محدودیت موضعی

شکل ۱۲-۳، سایر دلایل این مشکل را نشان می‌دهد. دومین بررسی فشار را با دقت بیشتری انجام دادم. خط ۱۰ اینچی، درست قبل از برگشت به برج خنک‌کننده، در بخش زیرین یک خیابان پر از سنگریزه فرو رفت. می‌توانستم فشار آب را در دو طرف مسیر اندازه‌گیری کنم. مقدار DP مشاهده‌شده برابر بود با: $14 \text{ psi} = (26 - 12)$ من مقدار DP را ۱ psi محاسبه کرده بودم! فردای آن روز، خیابان را حفاری کردم و یک شیر دروازه‌ای^۱ ۱۰ اینچی را که ۹۰٪ آن بسته شده بود، به‌صورت مدفون در زیر مسیر پیدا کردم. من و تراویس نمی‌توانستیم آن را جابجا کنیم (کمی بعد در همان سال، یک خط کنارگذر^۲ «انشعاب گرم»^۳ را نصب کردیم که جریان آب را ۱۵٪ افزایش داد).

این شیر چه زمان و به چه علت نصب شده بود؟ هیچ‌کس نمی‌دانست. چرا بیشتر آن بسته بود؟ این هم یک راز بود. هرچند، مشکل سومی هم وجود داشت. من با محاسبه نرخ گردش آب از سرعت مشاهده‌شده آب در تخلیه پمپ و خط ۱۰ اینچی، دریافتم که عملکرد پمپ نسبت به منحنی عملکرد هد در مقایسه با جریان تولیدکننده، بسیار ضعیف تر است.



شکل ۱۲-۳ یک شیر مدفون، تا حدی گردش آب خنک‌کننده را محدود می‌کرد.

^۱ Gate valve: ولو دروازه‌ای

^۲ Bypass: کنارگذر، بای‌پس

^۳ Hot Tap: عملیات هات تپ یا انشعاب گرم، از آن دسته خدمات در مورد خطوط لوله و مخازن می‌باشد که با توجه به منافع و راندمانی بالا در مقایسه با Hot Tap^۳ روش‌های گذشته انشعاب‌گیری، مورد توجه صنایع نفتی و گازی و پتروشیمی و نیروگاهی قرار گرفته است.

نشت هوا به ورودی

«کتی، چیزی را مشاهده کردم. می‌خواهم آن را به تو نشان بدهم.»

«نورمن چه شده؟ می‌خواهی فناوری شبیه‌سازی رایانه‌ای نقطهٔ پینچ را با ما به اشتراک بگذاری؟ خیلی مشتاقم.»

«نه کتی. این فناوری خیلی اختصاصی است. چیزی که می‌خواهم نشانت دهم این است که وقتی پمپ آب خنک‌کننده یدکی را برای یک دقیقه خاموش می‌کنم، چه اتفاقی می‌افتد.»

پمپ‌های «A&B» را روشن گذاشتم و دکمهٔ توقف روی پمپ «C» را فشردم. چند فوران کوچک آب از فلنج ورودی پمپ و چند سوراخ کوچک در خط ورودی به پمپ «C» نمایان شد.

کاترین گفت: «نورمن موضوع چیست؟ فقط آب است و چند نشتی کوچک. به نظرم هیچ مشکل ایمنی‌ای وجود ندارد.»

گفتم: «بسیار خب کتی. ورودی پمپ تحت یک خلأ جزئی قرار دارد؛ چراکه پمپ‌ها تقریباً ۶ فوت بالاتر از سطح قرار دارند (شکل‌های ۱-۱۲ و ۲-۱۲). هوا به درون این نشتی‌ها و به ورودی پمپ و درون پروانهٔ پمپ کشیده می‌شود. حباب‌های هوا باعث کم‌شدن جریان آب می‌شوند. به‌علاوه، فشار و جریان تخلیهٔ پمپ را نیز کاهش می‌دهند.»

تراویس گفت: «خانم کتی، فکر می‌کنم لیبرمن درست می‌گوید. متوجه شدم که وقتی باران شدیدی می‌بارد، فشار تخلیهٔ پمپ آب خنک‌کننده ما چند پوند بیشتر می‌شود. حدس می‌زنم دلیل این موضوع، این است که باران نشتی هوا را با آب پر می‌کند. خانم کتی، اجازه دهید تا نشانتان دهم.»

وقتی تراویس مقداری آب آتش‌نشانی را روی خط لوله ورودی پمپ‌های «A&B» ریخت، فشار خروجی آن‌ها ۳ psi افزایش یافت.

دستورالعمل برای حباب مرطوب

«آقای لیبرمن، آیا تا به حال، فاصلهٔ دمای برگشت آب برج‌های خنک‌کننده ما را با دمای حباب تر بررسی کرده‌اید؟ این برج در ۲۰۰۰۰ GPM و با فاصلهٔ دمایی ۸ درجهٔ فارنهایت طراحی شده است.»

پاسخ دادم: «بله. شما مشغول کار با سرعت ۱۰۰۰۰ GPM هستید و فاصله با دمای حباب تر، ۱۳ درجهٔ فارنهایت است.»

«پیشنهادی برای کاهش این فاصله نداری؟»

«شاید توزیع آب مناسب نباشد. شاید تخته‌های چوبی قدیمی موجود در برج خنک‌کننده شما کج و معوج شده باشند. بررسی کنید که تسمه‌های فن لغزنده شده‌اند یا خیر. زاویه تیغه فن را تا ۲۲ درجه بیشتر کنید. افزون‌براین، بررسی کنید که فاصله تیغه تا لفافه، با الزامات طراحی مطابقت داشته باشد. اگر آمپر موتور اجازه می‌دهد، پروانه کوچک‌تری روی محور (شف‌ت) فن بگذارید و سرعت فن را بیشتر کنید. با این کار، جریان هوا افزایش می‌یابد؛ اما آمپراژ موتور نیز به شدت بالا می‌رود.»

«کتی، سه ایده دیگر نیز دارم که شاید لازم باشد به آن‌ها هم توجه کنید:»

۱. «تلاش کنید افت فشار را به وسیله نازل اسپری یا شیرهای توزیع آب خنک‌کننده، در بخش بالای سلول های آب خنک‌کننده به حداقل برسانید. به احتمال زیاد، با هر psi کاهش فشار، جریان آب را تا ۱٪ افزایش می‌یابد.

کتی، در یک واحد پالایشگاهی واقع در کانزاس سیتی متوجه شدم که مشتری‌ام، فشار برگشتی^۱ را در جریان آب خنک‌کننده خود و در بالادست آب برگشتی مجرای اصلی (هدر) توزیع، ثابت نگه داشته بود. روی مجرای اصلی (هدر) توزیع یک ونت ۶ اینچی قرار داشت که آب را به‌طور متناوب خارج کرده و بر مرکز کنترل واحد سرازیر می‌کرد. تمام شیرهای توزیع را باز کردم. دریچه ۶ اینچی را مسدود کردم و شیر فشار برگشتی را که اکنون از رده خارج شده است، باز کردم. جریان آب تقریباً ۱۰ درصد افزایش یافت. درسی که باید از این موضوع بیاموزیم، این است: می‌توان با مشاهدات میدانی، راه حل‌های ساده‌ای پیدا کرد.

۲. اگر دمای آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده بالای ۱۳۵ درجه فارنهایت باشد، رسوب‌گذاری با ایجاد رسوبات کربنات در خنک‌کننده‌های آبی شما، افزایش می‌یابد. البته این موضوع به کیفیت آب نیز بستگی دارد. در مورد برخی سیستم‌ها، حتی دمای برگشت ۱۲۵ درجه فارنهایت نیز بیش از حد زیاد است. شرکتی که ناظر عملیات شیمیایی سیستم آب خنک‌کننده شما است، باید حداکثر دمای خروجی مجاز خنک‌کننده آبی را برای هر مبدل ارائه دهد تا از رسوب‌گذاری جانبی آب و مسدود شدن^۲ لوله‌های مبدل جلوگیری شود. به توصیه‌های شرکت تصفیه‌کننده با دقت عمل کنید.

۳. گاهی لازم است در برج‌های خنک‌کننده از مقادیر زیادی کلر استفاده شود تا باکتری‌هایی که رسوب‌گذاری را تشدید می‌کنند، از بین بروند. هر ماه یک ساعت زمان برای نماینده شرکتی اختصاص بدهید که برج

^۱ back-pressure: فشار برگشتی

^۲ Plug: مسدود شدن

خنک‌کننده شما را تصفیه می‌کند. نکته مهمی که باید به آن توجه کنید، این است که تصور نکنید او می‌داند که دارد چکار می‌کند. گاهی پیش می‌آید که این افراد فاقد صلاحیت‌های لازم هستند و فقط می‌خواهند مواد شیمیایی پالایشگاهی شرکتشان را بفروشند.»

ملاحظات ایمنی

نشت هیدروکربن در سیستم‌های خنک‌کننده آب می‌تواند مخلوط‌های قابل احتراقی را در زیر صفحه‌های توزیع در برج‌های خنک‌کننده ایجاد کند. نشت هیدروکربن به‌ویژه موقع خنک‌کردن جریان‌های بوتان، موجب مشتعل شدن برج‌های خنک‌کننده می‌شود (آموکو اویل^۱، شهر تگزاس^۲). شاید لازم باشد ماهی یکبار خروجی‌های آب خنک‌کننده‌تان را بررسی کنید تا ببینید بخارهای قابل احتراق وجود دارند یا خیر. می‌توانید برای این منظور، از ابزاری استفاده کنید که اپراتورها برای صدور مجوز ورودی وسل^۳ها از آن استفاده می‌کنند. بخارها زیر صفحه‌های توزیع جمع می‌شوند. یکی دیگر از نشانه‌های نشت هیدروکربن در لوله‌های آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده، تجمع لجن در این صفحه‌ها است.»

^۱ Amoco Oil: آموکو اویل

^۲ Texas City: شهر تگزاس

^۳ Vessel: وسل، ظرف



دراخت^۱ و گردش ترموسیفون

چکیده:

گردش آب در بویلر، گردش هوای احتراق در کوره و گردش هیدروکربن‌ها در ری‌بویلر ترموسیفون به اختلاف چگالی‌ای بستگی دارد که، ناشی از ورود حرارت به فرآیند است. این امر، مشابه پمپ‌های حبایی است که در بسیاری از آکواریوم‌ها یا سیستم‌های لایروبی شن و ماسه دیده می‌شود. در پمپ حبایی اختلاف چگالی با تزریق هوا به لوله رایزر ایجاد و باعث ایجاد امولسیون در رایزر می‌شود.

کلمات کلیدی:

ترموسیفون؛ بالابر هوا، درافت، اختلاف چگالی، گردش، تبخیر، اتلاف اصطکاکی

^۱ Draft: مکش

زمانی که جوان بودم، در طبقه پنجم یک خانه آپارتمانی قدیمی واقع در بروکلین زندگی می کردم. سیستم گرمایش آپارتمان ما، حرارت بخار آب بود (شکل ۱۳-۱). من و خواهرم تا زمانی که ازدواج کرد، یک اتاق داشتیم. آن اتاق مال من شد و هنوز هم دلم برایش تنگ می شود.

من یک کودک معمولی نبودم. تا همین امروز هیچ دوستی نداشته ام که اذیتم نکرده باشد. هیچ وقت نگران مردم نبودم. رادیاتور اتاق خوابم، بیشتر از هر چیز برایم جذاب بود. در زیرزمین ساختمان، یک دیگ بخار^۱ زغال سنگ سوز قرار داشت. مسئول ساختمان، توده های زغال سنگ را با بیل داخل محفظه احتراق می ریخت.

بخار کم فشار، مسافت ۵۰ فوت را طی می کرد تا به رادیاتور موجود در اتاق خواب من برسد. در آنجا، متراکم و به آب تبدیل می شد. آب، متراکم تر از بخار بود. به همین دلیل، دوباره به دیگ بخار برمی گشت. بخار با تراکم کمتر از آب نیز به رادیاتور برمی گشت.

گاهی رسوبات سخت موجب مسدود شدن خط برگشت میعانات بخار می شدند. می توانستم بخشی از این تجمعات رسوبی را در اطراف ساقه شیر بخار ببینم (شکل ۱۳-۱). پس از آن، مادرم با یک چکش سیاه به رادیاتور می کوبید تا بتواند رسوبات سخت را از خط برگشت میعانات جدا کند. مادرم می گفت که با این کار دوباره گرما را برمی گرداند. اما فکر می کنم او مشغول بازیابی زهکشی میعانات بود؛ یا به زبان امروزم، او مشغول بازگرداندن گردش ترموسیفون بخار و آب بود که به خاطر اختلاف چگالی ایجاد می شد.

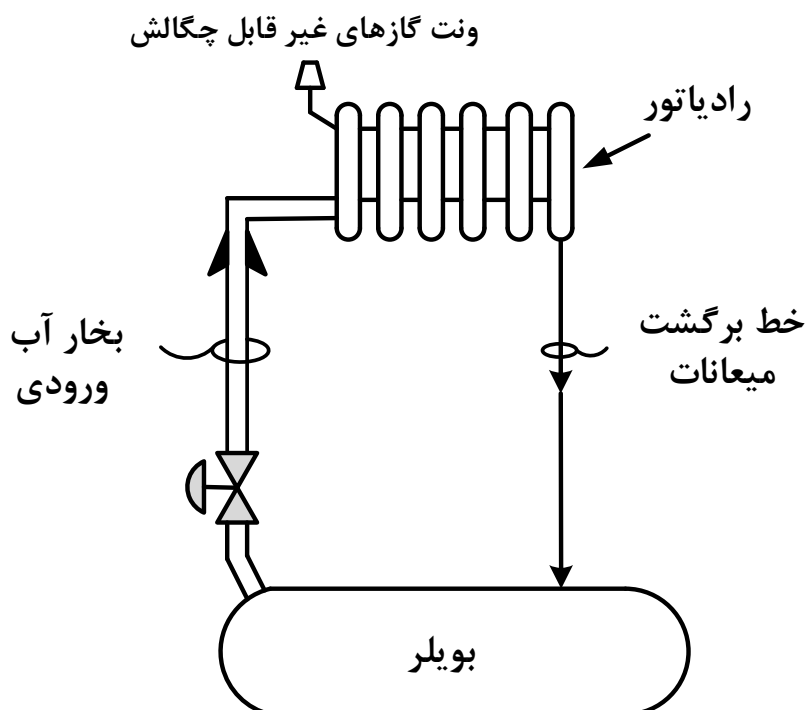
کشف و شهودم در این حد بود. اما نمی توانستم بفهمم که مخروط فلزی کوچک وارونه ای که بالای رادیاتور قرار داشت، چه نقشی دارد. چرا آن مخروط آنجا بود؟ به مدت ۳۸ سال در دبیرستان، دانشگاه و آموکو^۲ اوایل، محل کارم به عنوان یک مهندس طراحی فرآیند، در مورد این مسئله مطالعه کردم. هیچ وقت از پدر و مادرم، خواهرم یا پروفیسور آلبرایت^۳ یا بیل دووال^۴ مهندس ارشد فرآیند در آموکو اوایل شیکاگو در این باره سوالی نکردم. خلاصه ماجرا اینکه یک روز و در اعتصاب طولانی سال ۱۹۸۰ این اتفاق افتاد. لحظه آگاهی!

^۱ Steam boiler: بویلر، دیگ بخار، جوشاننده

^۲ Amoco: آموکو

^۳ Professor Albright: پروفیسور آلبرایت

^۴ Bill Duval: بیل دووال



شکل ۱۳-۱ گردش از درون رادیاتور بخار آب در نیویورک.

علی‌رغم اعتصاب اتحادیه پالایشگاه OCAW، به جای همکاری با اعتصاب‌کنندگان، در آموکو اوایل واقع در تگزاس سیتی^۱ مشغول کار بودم. در آن زمان، اپراتور کف سایت واحد بازیابی گوگرد بودم و شیفت‌های کاری‌ام ۱۲ ساعته بود.

جو پتروچلی^۲ پیر مرا صدا زد: «آهای، نورم، ونت دو اینچی گاز غیرقابل چگالش را در ری‌بویلر بخار آب برج احیای آمین باز کن (شکل ۱۳-۲). درست شبیه این است که پوسته مبدل را با گاز پر کرده‌ایم و در نتیجه بخار آب میعان نمی‌شود. در ادامه شیفت کاری، آن شیر ونت خروجی را دو دور بپیچان و باز بگذار.»

بله؛ من هم فکر می‌کردم همین‌طور است. مخروط کوچکی که دوران کودکی‌م بالای رادیاتور قرار داشت، دریچه‌ای برای زدودن^۳ گازهایی بود که با گذشت زمان در رادیاتور اتاقم مسدود می‌شدند. اگر رادیاتور اتاقم پر از گاز می‌شد، بخار آب به سختی به داخل آن جریان پیدا می‌کرد. به قول جوی پیر، رادیاتور «گازگیری»^۴ می‌کند.

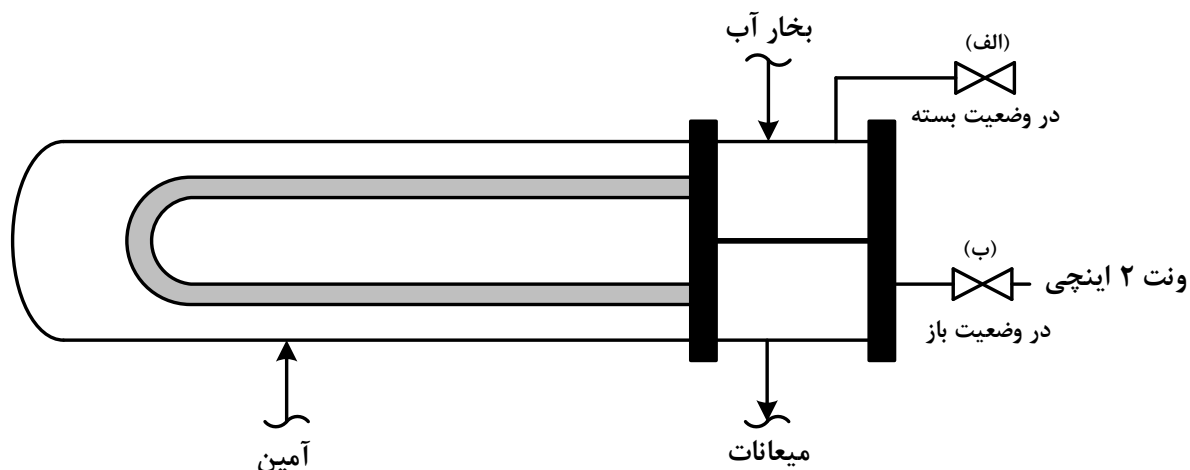
^۱ Texas City: شهر تگزاس

^۲ Joe Patrocelli: جو پاتروچلی

^۳ purge out: زدودن، پاک‌سازی، خارج کردن

^۴ Gas-up: گازگیری

تنها نکته این بود که ونتی را که جو گفته بود باز کنم، ونت بالای کلاhek مجاری^۱ ریپویلر نبود (شیر الف، شکل ۲-۱۳). آیا ونت دو اینچی کنار کلاhek مجاری قرار داشت (شیر ب)؟



شکل ۲-۱۳ ونت کردن گازهای غیر قابل چگالش در یک ریپویلر.

همیشه به این موضوع شک داشتم که آیا استادانم در دانشگاه پردو^۲، پدرم، بیل دووال^۳ مهندس ارشد و حتی خواهر بزرگم آرلین^۴ واقعاً این مسائل را می‌دانند یا خیر. اما اوضاع در مورد جو پاتروچلی^۵، افسر قدیمی موتورخانه در ناو هواپیمابر نیروی دریایی ایالات متحده آمریکا در طول نبرد خلیج لیت^۶ در سال ۱۹۴۵ فرق داشت. جو، نماینده محلی خالق جهان هستی بود.

جو^۷ توضیح داد: «ببین آقای مهندس. گازی که در بخار آب ریپویلر وجود دارد، درست از میان نیمه بالایی کلاhek مجاری و دسته لوله، همراه با بخار آب خارج می‌شود. فقط زمانی که بخار آب هنگام عبور، کاملاً در بخش پایینی گذر لوله‌ها متراکم شود، گاز جمع شده و می‌تواند تخلیه شود. اگر شیر «الف» را باز کنی، فقط بخار آب خارج می‌شود! متوجه شدی نورم؟»

^۱ Channel head: کلاhek مجاری

^۲ Purdue University: دانشگاه پردو

^۳ Bill Duval: بیل دووال

^۴ Arline: آرلین

^۵ Joe Patrocelli: جو پاتروچلی

^۶ Leyte Gulf: خلیج لیت

^۷ Joe: جو

ولی به هرحال شیر «الف» را باز کردم و بخار آب با فشار خارج شد. این کار کمکی به بهبود عملکرد ریبویلر نکرد. پس از آن، شیر «ب» را امتحان کردم و گاز با فشار خارج شد. عملکرد ریبویلر نیز دو برابر بهتر شد. این گونه بود که ایمن آوردن جو پاتریجلی قطعاً نماینده یک خالق برتر است.

اما ماهیت این گاز چه بود؟ احتمالاً گاز رادیاتور من در بروکلین، هوای حل شده حاصل از آب خوراک دیگ بخار^۱ بود. اما آب خوراک دیگ بخار در تگزاس سیتی^۲ ابتدا با بخار آب عریان سازی می شد تا تمام آثار هوا در هوازداي بویلر حذف شود. به همین دلیل، یک کیسه پلاستیکی را برای نمونه^۳ گیری با گاز خروجی پر کردم و آن را به آزمایشگاه فرستادم. آنالیز گاز نشان می داد که ترکیب غالب آن CO₂ بود! اما از کجا آمده بود؟ به همین دلیل به سراغ جوی پیر رفتم تا از او بپرسم.

جو توضیح داد: «خب نورم، تو این نمونه ها را از آب خوراک بویلر کربنات گرفته ای! این نمونه ها در آب گرم به CO₂ تجزیه می شوند. این نمونه ها، نه تنها دیگ بویلر را گازدار می کنند بلکه به شدت خورنده هستند. تو این ها را می دانی نورم. گاز CO₂ پس از متراکم شدن، کربنیک اسید (H₂CO₃) تولید می کند. کربنیک اسید، خاصیت خوردگی بالایی در لوله های فولادی کربنی دارد! در نیروی دریایی یاد گرفتم که بهتر است فقط گازهایی را که در آن ها جمع می شوند، تخلیه کنیم. نورم فکر می کنم تو در سال ۱۹۴۵ هنوز بچه بودی.»

«بله جو. اما قبلاً هم به مشکل ونت کندانسور بخار فکر می کردم. فکر می کنم برای اینکه بتوانم این دلایل را درک کنم، لازم بود ۳۵ سال زمان بگذرد.»

درافت، گردش ترموسیفون و پمپ حبابی^۴

این ایده که رفتن به دانشگاه وقت تلف کردن است، درست نیست. دانشگاه، جایی است که می توانید با دخترها آشنا شوید. دست کم به من این طور گفته شده است. در مدرسه مهندسی که من در آن درس می خواندم، یعنی اتحادیه کوپر در نیویورک، هیچ اثری از دختر نبود؛ اما برای اینکه به ویتنام نروم، به معافیت دانشجویی نیاز داشتم. بنابراین، تجربه دانشگاهی من باعث می شد بتوانم به هدفم برسم.

^۱ آب خوراک بویلر، آبی که نرم یا یون زدایی و سپس هوازدايي شده باشد. (BFW): Boiler feed water

^۲ شهر تگزاس: Texas City

^۳ نمونه: Sample

^۴ پمپ حبابی: Air Lift Pump

یکی از موضوعات مورد مطالعه ما، که من آن را نمی‌فهمیدم، درافت بود. نمی‌خواهم این نکته را تکرار کنم که موضوعاتی هم هستند که می‌توانم از آن‌ها سر در بیاورم. فقط خوب به خاطر دارم که مبحث درافت کوره را نمی‌فهمیدم. درافت، نوعی سیستم گرمایش دیگ بخار و رادیاتور در آپارتمان محل سکونت من، واقع در بروکلین جنوبی است. این سیستم با اختلاف چگالی کار می‌کند. در خانه آپارتمانی من، اختلاف چگالی به این صورت بود:

$$\text{بخار کم فشار} = 0.04 \text{ lbs/ft}^3$$

در مقایسه با

$$\text{میعانات بخار} = 60 \text{ lbs/ft}^3$$

می‌توانید این اختلاف چگالی را در ارتفاع اتاق خواب من در طبقه پنجم آپارتمان که بالای دیگ بخار در زیرزمین قرار داشت، ضرب کنید تا نیرو محرکه گردش را محاسبه کنید.

در یک هیتر احتراقی، نیرو محرکه درافت باعث می‌شود تا هوای احتراق در محفظه احتراق، مشعل‌ها و در نهایت به بالای دودکش گردش کند. اختلاف چگالی‌ای که درافت ایجاد می‌کند، بین گاز دودکش^۱ داغ و هوای سرد است. همیشه برای محاسبه درافت، به چند فرضیه ساده توجه می‌کنم:

- اختلاف بین وزن مولکولی هوا و گاز دودکش را نادیده بگیرید. مقدار آن کم و بیش یکسان است.
- به اتلاف اصطکاک گازی که در دودکش حرکت می‌کند، توجه نکنید.
- شکل دودکش که موجب سرعت خروجی بالا و القای مکش اضافی می‌شود را فراموش کنید.
- اثر بادی را که بالای دودکش می‌وزد، نادیده بگیرید.

نخست بیاید چگالی هوا را در شرایط استاندارد یعنی دمای ۶۰ درجه فارنهایت و فشار ۱۴/۷ psia محاسبه کنیم. توجه کنید که در هر پوند مول، ۳۷۹ فوت مکعب هوا موجود است. پس از آن:

$$29 \div 379 = 0.0765 \text{ lbs/ft}^3$$

وزن مولکولی هوا را ۲۹ در نظر می‌گیریم.

^۱ Flue gas: گاز دودکش

دمای دودکش برابر است با ۶۰۰ درجه فارنهایت. به یاد داشته باشید که باید این دما را به درجه رانکین (°R) تبدیل کنیم:

$$459 + 600 = 1059 \text{ } ^\circ\text{R}$$

چگالی، رابطه معکوسی با دمای مطلق (°R) دارد. دما در شرایط استاندارد، برابر است با ۶۰ درجه فارنهایت. بدین ترتیب:

$$459 + 60 = 519 \text{ } ^\circ\text{R}$$

چگالی گاز دودکش با دمای ۶۰۰ درجه فارنهایت برابر است با:

$$(0.0765) \cdot \frac{519 \text{ } ^\circ\text{R}}{1059 \text{ } ^\circ\text{R}} = 0.0375 \text{ lbs/ft}^3$$

مکش، به خاطر اختلاف چگالی ایجاد می شود. پس باید چگالی گاز دودکش را از چگالی هوای موجود در اتمسفر کم کنیم:

$$0.0765 - 0.0375 = 0.0390 \text{ lbs/ft}^3 = \text{نیرو محرکه ورودی}$$

اما ارتفاع دودکش نیز در مکش تأثیرگذار است. ارتفاع دودکش برابر است با ۱۰۰ فوت.

$$100 \text{ ft} \times 0.0390 \text{ lbs/ft}^3 = 3.90 \text{ lbs/ft}^2$$

یک فوت مربع برابر است با ۱۴۴ اینچ مربع؛ بنابراین:

$$3.90 \text{ lbs/ft}^2 \div 144 \text{ in}^2/\text{ft}^2 = 0.0271 \text{ lb/in}^2$$

۲۷/۷ اینچ آب در فشار ۱ psi (lb/in²) وجود دارد. بنابراین:

مکش برابر است با:

$$0.0271 \text{ psi} \times 27.7 \text{ in. H}_2\text{O} / \text{psi} = 0.75 \text{ in. of H}_2\text{O}$$

به من گفته اند که آخرین آدم روی زمین هستم که بلد است بدون کمک کامپیوتر، محاسبات مربوط به مکش را انجام دهد. این حرف درست نیست. مهندس های زیادی می توانند چنین محاسباتی را انجام دهند. متأسفانه تاریخ انقضا این مهندس ها رو به اتمام است و به زودی مانند نویسنده این کتاب، در آینده نه چندان دور از بین می روند.

ستونی از هوای سرد و متراکم با ارتفاع ۱۰۰ فوت را تصور کنید که به ستونی از گازهای گرم تر و با تراکم پایین تر دودکش فشار می آورند. این پدیده، مکش است.

پمپ حبابی

پدرم وقتی ۱۲ سالم بود، برایم یک آکواریوم ماهی خرید (شکل ۱۳-۳). ماهی مرد. من هم با یک آکواریوم خالی یکه و تنها رها شدم که البته از شرایط راضی بودم؛ چراکه از ماهی خوشم نمی آمد، اما بازی کردن با آکواریوم را دوست داشتم. آکواریوم دو ویژگی داشت که خوشم می آمد با آن بازی کنم:

۱. سطح آب.

۲. نرخ جریان هوا در لوله بالابر.

موارد فوق بر روی گردش آب بین فیلتر در ارتفاع و مخزن آکواریوم تأثیر می گذاشتند. وقتی جریان هوا زیاد می شد، نرخ گردش آب نیز تا نقطه مشخصی زیاد می شد و پس از آن شروع به کاهش می کرد. در نهایت، جریان آب کاملاً متوقف می شد.

چگونه می توانم این موضوع را توضیح دهم و نرخ گردش آب را محاسبه کنم؟

لازم است در گام نخست طراحی، بهره برداری یا عیب یابی تجهیزات فرآیندی بفهمیم که هر چیزی چگونه کار می کند؟ در این زمینه، قاعده کلی فرآیند مربوطه، مشابه با مکش کوره است. یعنی باز هم باید به اختلاف چگالی توجه شود. اختلاف چگالی به این صورت محاسبه می شود: چگالی آب آکواریوم منهای چگالی مخلوط هوا-آب در خط رایزر که به درون فیلتر جریان دارد.

فرض می کنیم که جریان هوا را در خط رایزر طوری تنظیم کرده ام که درصد هوا و آب در خط رایزر برابر است (یعنی نسبت ۵۰ به ۵۰ برقرار است). چگالی آب سرد نیز برابر است با 62 lb/ft^3 .

چگالی هوا، کم و برابر با 0.075 lb/ft^3 است. بنابراین، در محاسباتم از آن صرف نظر می کنم. چگالی امولسیون (مخلوط آب-هوا) در خط رایزر برابر است با:

$$62 \text{ lbs/ft}^3 \times 50 \% = 31 \text{ lbs/ft}^3$$

ارتفاع لوله بالابر^۱ برابر با ۳ فوت است. ارتفاع آب آکواریوم نیز ۲ فوت است. بنابراین، فشار در نقطه الف و در انتهای لوله بالابر (شکل ۱۳-۳) برابر است با:

$$31 \text{ lbs/ft}^3 \times 3 \text{ ft} = 93 \text{ lbs/ft}^2$$

همچنین، فشار در نقطه ب و در انتهای لوله آکواریوم برابر است با:

$$62 \text{ lbs/ft}^3 \times 2 \text{ ft} = 124 \text{ lbs/ft}^2$$

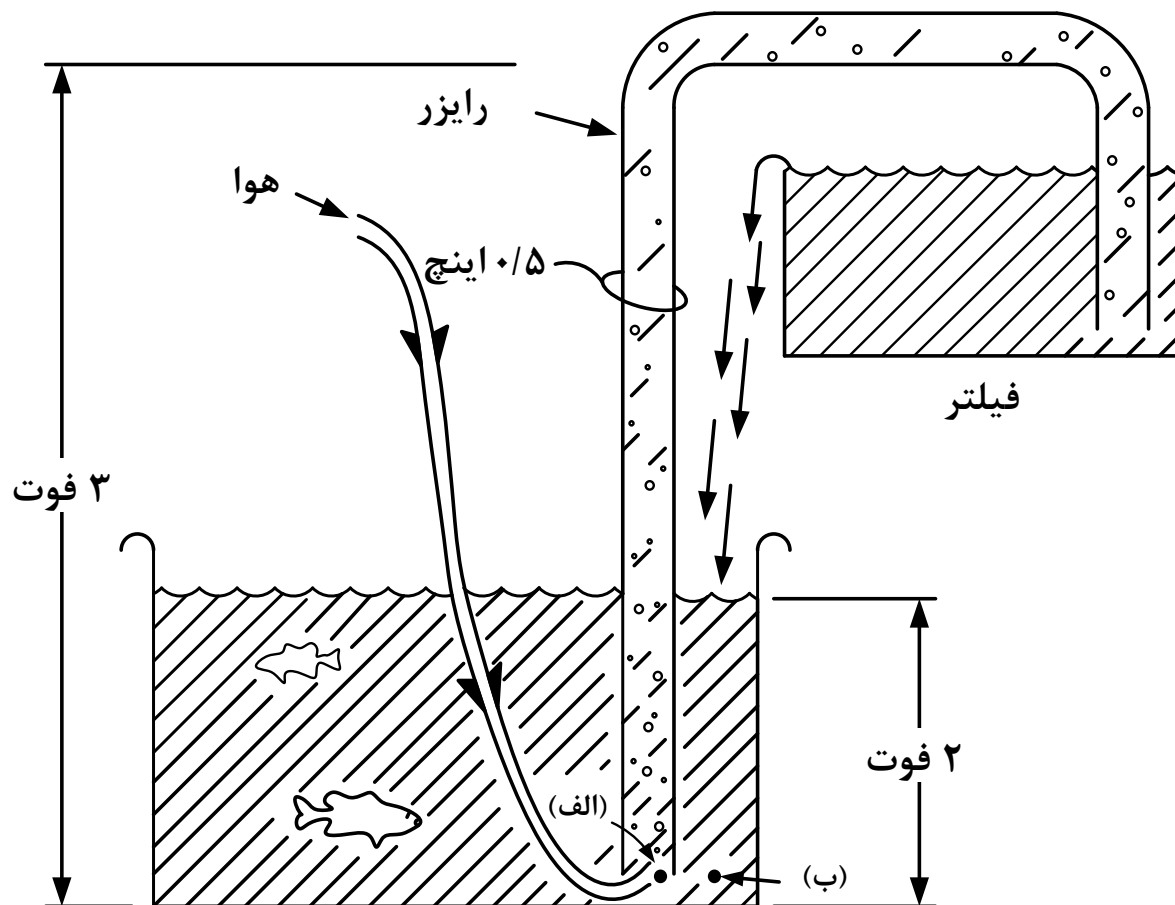
بدین ترتیب، نیرو محرکه گردش پمپ حبابی برابر است با:

$$124 \text{ lbs/ft}^2 - 92 \text{ lbs/ft}^2 = 31 \text{ lbs/ft}^2$$

یک فوت مربع برابر است با ۱۴۴ اینچ مربع؛ بنابراین:

$$\text{نیروی محرکه} = 31 \text{ lbs/ft}^2 \div 144 \frac{(\text{in} \cdot)^2}{\text{ft}^2} = 0.22 \text{ lb}/(\text{in} \cdot)^2 = 0.22 \text{ psi}$$

^۱ Riser tube: تیوب بالابر، لوله بالابر



شکل ۱۳-۳ پمپ حبابی.

گردش آب، چقدر سریع است؟

دلایلی که به مهندسی فرآیند علاقه دارم عبارتند از:

۱. محاسبه متغیرهایی مانند جریان.
۲. اندازه‌گیری آن متغیر.
۳. مقایسه متغیر اندازه‌گیری شده با مقداری که محاسبه کرده‌ام.

اما چگونه می‌توانم جریان را محاسبه کنم؟

نیروی محرکه برای گردش آبی که از جریان آب نشأت می‌گیرد، باید برابر با 0.22 psi باشد که من آن را محاسبه کردم.

چگونه اتلاف ناشی از اصطکاک در سیستم، محاسبه می‌شود؟ فرض می‌کنم که رایزر، تنها مقاومت در برابر جریان است. پس، از فرمول زیر استفاده می‌کنم:

$$DP = \frac{4}{ID} \times \frac{\text{چگالی}}{62} \times \frac{(V)^2}{28} \times \frac{1}{100}$$

• $DP =$ افت فشار بر حسب psi.

• $ID =$ قطر داخلی لوله بر حسب اینچ.

• چگالی جریان فاز مخلوط بر حسب پوند بر فوت مکعب.

• $V =$ سرعت در لوله بالابر بر حسب فوت بر ثانیه.

• $L =$ طول لوله بر حسب فوت.

قطر داخلی لوله بالابر^۱ یا لوله امولسیون در آکواریوم من برابر با ۰/۵ اینچ بود. طول آن نیز برابر با ۳ فوت بود. افت فشار ۰/۲۲ psi و چگالی، ۳۱ پوند بر فوت بود.

بنابراین:

$$V^2 = 0.22 \times \frac{0.5}{4} \times \frac{62}{31} \times 28 \times \frac{100}{3}$$

همچنین:

$$V = 7.16 \text{ ft/s}$$

افزون‌براین، برای رسیدن به جریان آب گذرنده از فیلتر، از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\text{چگالی} \times \text{سرعت} \times \text{مساحت} = \text{وزن آب (بر حسب پوند)}$$

$$\text{وزن جریان آب (پوند بر ثانیه)} = \frac{0.5 \text{ in}}{144} \times 7.16 \times \text{ft/s} \times 31 \text{ lbs/ft}^3 = 0.77 \text{ lbs/s}$$

$$0.77 \times 60 = 46.2 \text{ پوند بر دقیقه}$$

$$46.2 \div 8.34 \frac{\text{پوند}}{\text{گالن آب}} = 5.55 \text{ GPM}$$

^۱ Riser pipe: لوله دارای جریان رو به بالا

پس از آن، برای اندازه‌گیری مستقیم نرخ جریان آب، آن را از فیلتر به داخل بطری منحرف کردم. این همان مفهوم مهندسی فرآیند است؛ مهندسی فرآیند یعنی مقایسه متغیر اندازه‌گیری شده با متغیر محاسبه شده.

معادله بخش فوق برای محاسبه افت فشار در خط رایزر، معادله استاندارد برای اتلاف ناشی از اصطکاک در خطوط لوله است. هرچند، ضریب چهار را با توجه به تجربیاتم در اندازه‌گیری‌های میدانی در پالایشگاه‌ها و کارخانجات پتروشیمی انتخاب کردم. این ضریب برای بخارات، مایعات و جریان چند فازی کاربرد دارد. حرف «L» برای نشان دادن طول ۱۰۰ فوتی لوله به کار می‌رود. یعنی شما باید فوت معادل را برای زانویی^۱ها، شیرهای دروازه‌ای^۲ و چنین مواردی اضافه کنید. کمتر پیش می‌آید که خودم را به زحمت بیندازم و تنها کاری که انجام می‌دهم این است که طول واقعی خط فرآوری را برای اتصالات مختلف دو برابر می‌کنم. البته یک استثنا هم در این مورد وجود دارد و آن هم زمانی است که خطوط لوله طولانی و مستقیم باشد.

پس چه دلیلی داشت که وقتی جریان هوا را در آکواریومم زیادتر کردم، جریان آب کاهش یافت؟ دلیل این موضع این بود که با افزایش سرعت لوله بالابر، اتلاف ناشی از اصطکاک نیز افزایش می‌یابد. زمانی که اتلاف ناشی از اصطکاک نسبت به نیرو محرکه پمپ حبابی بیشتر شد، گردش آب در فیلتر آکواریوم کند و در نهایت، متوقف شد.

اتلاف درافت کوره

درافت موجود در هیتز احتراقی نیز به همین صورت و به‌خاطر وجود اصطکاک کاهش می‌یابد. اتلاف اصطکاک در کوره، به این صورت است:

۱. پوشش آجری دودکش. اگر سرعت دودکش کمتر از ۵۰ فوت بر ثانیه باشد، این اتلاف، اندک خواهد بود.
۲. دلتا P در دسته لوله جابجایی. معمولاً ۰/۱ تا ۰/۲ اینچ آب، مگر اینکه گدازه‌هایی در لوله‌های همرفت گیر کند. پس از آن، افت فشار گاز دودکش می‌تواند به مثبت ۰/۵ اینچ آب افزایش یابد.
۳. با وجودی که می‌توان ΔP را در مشعل‌ها تنظیم کرد، اما معمولاً مقدار آن هنگامی که کاملاً باز است به ۰/۲ اینچ آب می‌رسد.
۴. مقدار ΔP در دمپر دودکش نیز قابل تنظیم بوده و معمولاً در صورت باز شدن کامل، قابل چشم‌پوشی است.

^۱ Elbow: لوله خمیده، زانویی

^۲ Gate valve: ولو دروازه‌ای

در این فصل، یکی از فرضیاتم این بود که برای محاسبهٔ درافت کوره، اثر وزش باد در بالای دودکش را در محاسبات دخیل نمی‌کنم. اما اثر باد، زیاد است. متوجه شده‌ام که باد شدید، میزان درافت هیتر احتراقی را به‌طور ناگهانی بین ۰/۱ تا ۰/۲ اینچ آب و حتی گاهی تا ۰/۲۰٪ نیز افزایش می‌دهد. معمولاً این موضوع، اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی جریان هوای احتراق در مشعل‌ها دارد.

گردش ترموسیفون

بیشتر برج‌های تقطیر دارای ریویلر هستند. شمایی از یک ریویلر را در شکل ۱۳-۴ ملاحظه می‌کنید. با توجه به این‌که هیچ پمپی تعبیه نشده است، علت چرخش مایع در ریویلر چیست؟ پاسخ، همان نیرویی است که موجب گردش آب در آکواریوم من می‌شود؛ یعنی پمپ حبابی به‌خاطر ایجاد اختلاف چگالی، باعث گردش آب می‌شود. اختلاف چگالی به‌خاطر تبخیر جزئی خوراک ریویلر یا محصول پایین برج تقطیر ایجاد می‌شود.

تبخیر جزئی خوراک ورودی به ریویلر سبب می‌شود چگالی پساب ریویلر کاهش یابد. امولسیون بخار-مایع فاز مخلوط، از لولهٔ بالا، بالا می‌رود. این امولسیون، به‌وسیلهٔ هد مایع در بخش پایین برج، بالا رفته و به داخل برج برمی‌گردد. چگالی امولسیون در مقایسه با مایع روی ریویلر پایین‌تر است. لازم است برای محاسبهٔ نیرو محرکهٔ گردش ترموسیفون ریویلر، مراحل را انجام دهیم:

مرحلهٔ ۱ - چگالی امولسیون را با توجه به درصد تبخیر آن محاسبه کنیم.

مرحلهٔ ۲ - چگالی امولسیون را ضرب در ارتفاع رایزر می‌کنم.

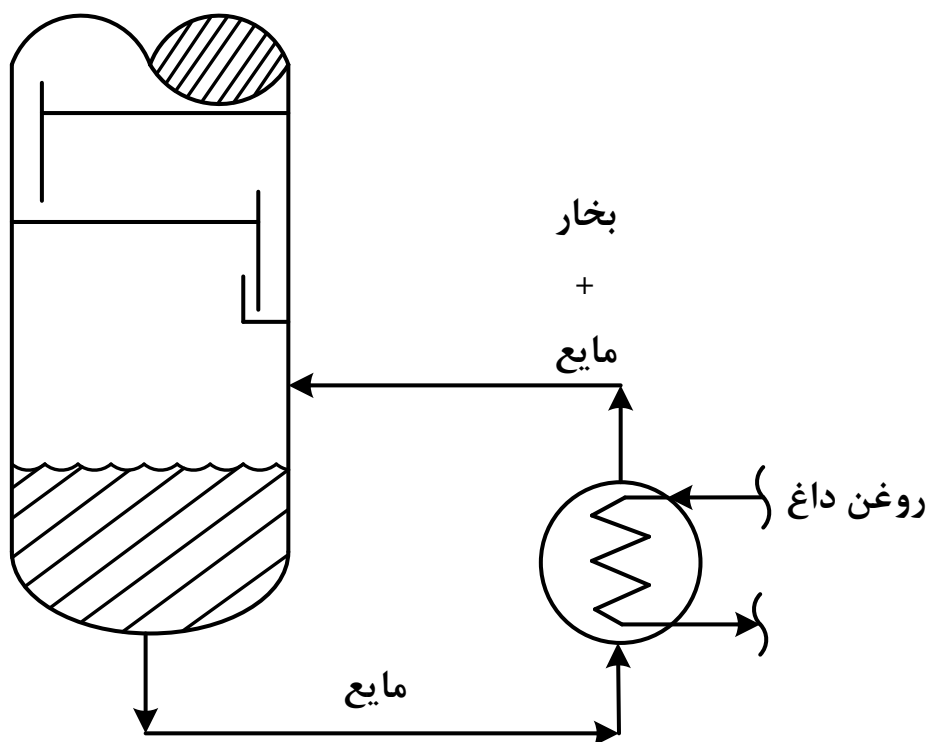
مرحلهٔ ۳ - چگالی مایع موجود در محصول پایین برج را محاسبه می‌کنم.

مرحلهٔ ۴ - چگالی مایع به‌دست آمده را در ارتفاع مایع روی نازل ورودی ریویلر ضرب می‌کنم.

مرحلهٔ ۵ - فشاری را که در مرحلهٔ ۲ محاسبه کرده‌ام از فشاری که در مرحلهٔ ۴ محاسبه کرده‌ام، کم می‌کنم. عدد حاصل، افت فشار مربوط به «گردش ترموسیفون» می‌باشد. بخشی از این فشار افتراقی، صرف غلبه بر موارد زیر می‌شود:

- اتلاف در ورودی و خروجی نازل.

- اتلاف خط اصطکاک.



شکل ۱۳-۴ ریبویلر گردش ترموسیفون.

هرچند، بیشترین میزان نیروی محرکه فشار افتراقی گردش ترموسیفون، صرف غلبه بر افت فشار در پوسته جانبی ریبویلر می‌شود. با افزایش گرمای ورودی^۱ به ریبویلر، دو موضوع رخ می‌دهد:

- نیروی محرکه ترموسیفون زیاد می‌شود.
- همچنین، افت فشار ریبویلر نیز زیاد می‌شود.

در بعضی از نقاط نیز اتلاف ناشی از اصطکاک در ریبویلر سبب می‌شود تا به جای اینکه سرعت گردش ترموسیفون بیشتر شود، کاهش یابد. وقتی افت گردش تا این حد زیاد می‌شود، اپراتورهای واحد فرآیندی باید آن را «انسداد بخار» در نظر بگیرند.

^۱ ورودی: Input

رفتن به خانه

به نظر می‌رسد که بیشتر دانسته‌ها و افکار من در مورد مهندسی فرآیند، از مشاهدات دوران کودکی‌ام نشأت می‌گیرد. وقتی پسر کوچکی بودم، مجذوب گردش بادی می‌شدم که چرخ پلاستیکی اسباب‌بازی‌ام را می‌چرخاند. عاشق بالون پر از هلیوم بودم. جریان آب باران در جوی‌ها برایم جذاب بود. از مشاهده آب در حال جوشیدن لذت می‌بردم و بیشتر از هر چیزی دیگری، عاشق آتش بودم.

مادرم به این موضوع پی برده بود که چیز متفاوتی در من هست. مادرم می‌گفت: «نورمن، چرا نمی‌توانی مثل خواهرت باشی؟ ببین چقدر دوست‌داشتنی است؟ چرا با کسی دوست نمی‌شوی؟».

پاسخ می‌دادم: «مامان، دوست دارم آن دماسنج شکسته مال من باشد. باید جیوه‌اش را جمع کنم».



مفاهیم انتقال گرمای نهان

چکیده:

انبساط هیدروژن به دلیل ضریب منفی انبساط ژول-تامسون، باعث افزایش دمای آن می‌شود. هوا در هنگام انبساط به دلیل ضریب انتقال حرارت ژول-تامسون مثبت، خنک می‌شود. مکانیزم انتقال حرارت با انتقال گرمای محسوس و انتقال گرمای نهان، متفاوت است. سطوح صاف برای انتقال گرمای محسوس مناسب‌اند اما برای انتقال گرمای نهان به‌ویژه جوشاندن یک ترکیب خالص، مناسب نیستند. گازهای غیرقابل چگالش باعث کاهش نرخ میعان اجزای خالص می‌شوند.

کلمات کلیدی:

چگالش؛ انسداد بخار؛ زبری سطح؛ سنگ‌های جوش؛ تبادل حرارت؛

در این فصل، خلاصه‌ای از چند داستان را بیان کرده و آن‌ها را با تجربیات روزمره و مفاهیم مرتبط، ادغام می‌کنم. چند مورد از این مفاهیم عبارتند از:

- انتقال گرمای نهان
- انتقال گرمای محسوس
- گرم کردن
- چگالش
- انسداد بخار
- محدودیت فلاکس (شار جریان)
- تشکیل هسته جوش^۱
- تأثیر گازهای غیرقابل چگالش
- گرمای ویژه در مقایسه با گرمای نهان
- نرخ انتقال حرارت

برای اینکه بتوانیم عملکرد ریویلر و کندانسور را درک کنیم، لازم است به موضوعات فوق در کنار یکدیگر توجه داشته باشیم. این کار، فرآیندی پیچیده و در عین حال ضروری است.

آقای روزنبلات^۲، معلم شیمی دبیرستانم بود و از من خوشش نمی‌آمد. مشکلم از آزمایشگاه شیمی شروع شد.

«آقای روزنبلات من هیچ دلیلی برای استفاده از سنگ جوش نمی‌بینم!»

«لیبرمن؛ اضافه کردن سنگ جوش به فلاسک یک روش آزمایشی استاندارد است و باید در این آزمایش نیز، همین کار را انجام دهیم.»

«ولی آقای روزنبلات، مادرم در خانه، آب را بدون هیچ مشکلی و بدون استفاده از سنگ جوش می‌جوشاند.»

«اینجا خانه نیست لیبرمن. اینجا آزمایشگاه شیمی کلاس نهم است. اینجا باید از سنگ جوش استفاده کنیم. به علاوه، تو باید با همگروهی خودت کار کنی، نه با لیندا^۳.»

^۱ Nucleate boiling: تشکیل هسته جوش

^۲ Rosenblat: روزنبلات

^۳ Linda: لیندا

چهل سال گذشت. یک روز صبح همسرم لیز^۱ از اتاق خوابمان با من تماس گرفت و گفت: «نورمن، برایم یک فنجان چای بیاور. با قوری چای درست کن؛ نه مایکروفر. می‌توانی برایم چای دم کنی و آن را در یک فنجان جدید استراباکس برایم بیاوری؟ می‌توانم تا چند دقیقه دیگر در اتاق بمانم.»

فنجان استراباکس جدید را با آب شیر پر کردم. مایکروفر را به مدت ۶ دقیقه و در درجه حرارت بالا تنظیم کردم و صبر کردم تا آب به جوش بیاید. ولی این اتفاق نیفتاد. این موضوع، مرا گیج کرد.

سپس لیوان آب داغ و ساکن را روی میز کابینت گذاشتم و از چای کیسه‌ای لیز استفاده کردم. آب با شدت خارق‌العاده‌ای فوران کرد و بیرون ریخت. لیز به آشپزخانه آمد؛ به لیوان جدید خالی‌اش نگاهی انداخت و پرسید: «چای من کجاست؟»

باید پیش‌بینی چنین مشکلی را برای فنجان چای می‌کردم. زمستان سال قبل هم، شاهد حادثه مشابهی در یک واحد تقطیر نفت خام بودم. یک نمونه از نفتای سبک از درام رفلاکس گرفته بودم. درام در فشار ۲۰ psig و دمای ۶۰ درجه فارنهایت کار می‌کرد. یک بطری شیشه‌ای را با نفتا پر کردم و به دفترم بردم. بطری را یک ساعت روی میز رها کردم. پس از آن، گرم شد و دمای آن، به دمای اتاق یعنی ۷۵ درجه فارنهایت رسید. اما هیچ‌گونه اتلافی ناشی از تبخیر در آن قابل‌مشاهده نبود.

با احتیاط، درپوش بطری را بدون تولید بخار باز کردم. پس از آن، یک تکه گچ را از کنار تخته سیاهم برداشته و در بطری انداختم. نمونه^۲ نفتا از بالای بطری فوران کرد. حالا هر بار که می‌خواهم در کارخانه از نفتا نمونه بگیرم، سنگریزه کوچکی را در بطری‌ام می‌اندازم. لابد آقای روزنبلات به من افتخار می‌کند!

محل‌های تشکیل هسته جوش

مادرم هیچ‌وقت از سنگ جوش استفاده نمی‌کرد. با این وجود مشکلی در جوشاندن آب برایش پیش نمی‌آمد. قابل‌مهم‌هایش قدیمی بودند و خط و خش فراوانی داشتند. به محض اینکه فهمیدم باید دنبال چه چیزی بگردم، می‌توانستم ببینم که جوشش از همین خراشیدگی‌ها آغاز می‌شود. لیز درست می‌گفت. نباید در مایکروفر چای

^۱ Liz: لیز

^۲ Sample: نمونه

درست می‌کردم؛ اما تنها دلیلش این بود که فنجان چای نو بود و خط و خشی نداشت. قبلاً در فنجان‌های قدیمی‌مان در مایکروفر آب جوشانده بودم و مشکلی هم نداشتم.

این مفهوم در کاربردهای پالایشگاهی چه معنایی دارد؟ با من همراه باشید تا این محدودیت «سنگ جوش» یا «تشکیل هسته جوش» را در شرایطی اعمال کنم که در آن تجربه دست اولی دارم. وظیفه من جوشاندن نرمال بوتان در سمت پوسته با استفاده از بخار آبی با فشار ۳۰ psig در سمت لوله برج تفکیک افقی پروپان-بوتان در پالایشگاه هیوستون^۱ است.

دسته لوله، قدیمی و جنس لوله‌ها از فولاد کربن بود. ۱۰٪ از لوله‌ها مسدود^۲ شده بودند؛ چراکه مشکل نشستی داشتند. در هنگام انجام تعمیرات، یک دسته لوله آلیاژی جدید، نصب شد. وقتی ریبویلر به سرویس برگشت، حتی با وجود افزایش تعداد لوله‌ها، حداکثر کاری که می‌توانست انجام دهد، تنها بخش کوچکی از ظرفیت قبلی‌اش بود.

می‌توان دریافت که برای مبدل‌هایی که در سیستم‌های انتقال حرارت محسوس قرار دارند (انتقال حرارت محسوس یعنی حرارت دادن مواد تا دمای بالاتر)، لوله‌های صاف بهترین انتخاب هستند؛ چراکه تمیزتر می‌مانند. اما برای انتقال گرمای نهان و به‌ویژه موقع جوشاندن جزء خالصی مثل نرمال بوتان، سطح ناهمواری که موجب تشکیل هسته جوش می‌شود، مناسب‌تر عمل می‌کند.

پالایشگاه هیوستون برای غلبه بر این محدودیت غیرقابل پیش‌بینی جریان، مقدار فشار بخار آب در سمت لوله را از ۳۰ به ۱۰۰ psig تغییر داد. این کار، اختلاف دمای (ΔT) میان میعان بخار آب پرفشار و جوشش نرمال بوتان را دو برابر کرد. افزون‌براین

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

در این معادله:

- Q = بار حرارتی ریبویلر؛
- U = ضریب انتقال حرارت؛
- ΔT = تفاوت دمای بین بوتان در حال جوش و بخار متراکم؛
- A = مساحت مبدل.

^۱ Houston: هیوستون

^۲ Plug: مسدود شدن

از نظر مهندسی، بار حرارتی ریپویلر باید دو برابر می‌شد؛ اما در عمل بار حرارتی ریپویلر کاهش بیشتری یافت. این داستان واقعی است. من به‌عنوان نویسنده این کتاب، همیشه قهرمان داستان‌هایم هستم؛ از این‌رو، راه حل فاتحانه‌ام را پیشنهاد دادم: از دسته لوله فولاد کربنی قدیمی با همان سطوح خشن و حفره‌دارش استفاده کنید. وقتی داشتم داستانم را در سمینار عیب‌یابی کارخانه تولید مواد شیمیایی اکسان^۱ واقع در بی‌تاون^۲ تعریف می‌کردم، صدای قهقهه بلند اپراتورها بلند شد: «آهای، نورم! ما هم همین داستان را برای برج تفکیک پروپان-پروپیلن داشتیم. حتی قسمتی از داستان را که مربوط به آزمایش بخار آب پرفشار بود، شخصاً تجربه کردیم.»

شرایط محدودیت شار حرارتی

احتمال دارد در تشخیص محدودیت تشکیل هسته جوش با «شرایط محدود شار» دچار اشتباه شده باشم. شاید هم هر دو مورد فوق، نشانه‌هایی از یک مشکل واحد باشند. یک روز وقتی ۱۶ سالم بود، آزمایشی انجام دادم. ماهی‌تابه فولاد ضد زنگ مادرم را برداشتم و آن را روی اجاق گاز داغ کردم. پس از آن، چند قطره آب را با احتیاط، روی سطح داغ آن ریختم. آب دقیقاً مانند یک قطره جیوه، به آرامی و نرمی در اطراف ماهی‌تابه جمع شده و سپس به کندی تبخیر شد.

قطره‌های آب داغ واقعاً تماسی با سطح نداشتند؛ بلکه روی لایه نازکی از بخار آب شناور بودند. این لایه، نوعی عایق نازک بود که انتقال حرارت بین ماهی‌تابه و قطرات کره‌ای شکل آب را به تأخیر می‌انداخت.

وقتی گاز را خاموش کردم، ظرف به تدریج خنک شد و پس از چند دقیقه، هیچ اتفاقی نیفتاد. اما ناگهان قطرات آب از هم باز شدند؛ روی سطح ظرف پخش شدند و ظرف چند ثانیه، ناگهان به بخار تبدیل شدند. به نظر می‌رسید به محض سردتر شدن سطح ماهی‌تابه، لایه بخاری که به عنوان تکیه‌گاه قطرات کره‌ای شکل آب عمل می‌کرد، به شدت نازک شد. واقعاً نمی‌دانم چرا این اتفاق افتاد. خودتان این کار را انجام دهید و نتیجه‌گیری کنید.

مادرم همیشه فکر می‌کرد این نوع آزمایش‌ها، نشانه‌ای از شخصیت ضد اجتماعی من هستند. اما وقتی به‌خاطر انجام همین آزمایش‌ها موفق شدم مشکلات پالایشگاهی را حل کنم و درآمد هنگفتی کسب کنم، او هم دست از گله و شکایت برداشت.

^۱ Exxon: اکسان

^۲ Baytown: بی‌تاون

در منابع علمی مهندسی¹، شرایط محدود شار در محدوده ۱۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ BTU/h/ft² را بیان کرده‌ام.

گاهی واقعاً با این محدودیت در مبدل‌های حرارتی یا بویلرهای^۱ جدید مواجه می‌شوم. اما این اتفاق کمتر در واحدهای قدیمی می‌افتد؛ چراکه سطح انتقال حرارت در قسمت تبخیر شدن، با گذشت زمان زیرتر می‌شود.

پوشش تیوب‌های فلزی سینتری^۲

در برج تفکیک ایزوپنتان در مقایسه با نرمال پنتان، که برای شرکت آموکو^۳ در تگزاس سیتی^۴ طراحی کردم، از یک پوشش تیوب‌های فلزی سینتری در جداره بیرونی لوله استفاده شده بود (بخار آب در لوله جریان داشت) تا بتوان مشکل شار حرارتی در شرایط محدود را برطرف کرد. این لوله توسط شرکت منحل‌شده یونین کاربید^۵، قربانی فاجعه بوپال در هند^۶، به بازار عرضه شد.

می‌توانید به جای پوشش تیوب‌های فلزی سینتری، از سندبلاست^۷ برای لوله‌ها استفاده کنید. در تاسیسات جدید، وقتی سیال قسمت پوسته، ترکیبی خالص مانند پروپان یا بوتان است، محدودیت شار که با محدودیت جوش هسته‌ای در ارتباط است، باید در اندازه‌گیری مساحت سطح ری‌بویلرها مورد توجه قرار بگیرد.

اثر نرخ گردش بر حداکثر فلاکس در ری‌بویلر

در پالایشگاه آموکو در تگزاس سیتی مشخص شد که بر خلاف تصور ما نرخ گردش بالاتر در ری‌بویلر، عملکرد ری‌بویلر را کاهش می‌دهد. من نمی‌دانم نرخ بهینه گردش چقدر است؛ اما این مشاهدات توسط منابع علمی نیز تایید می‌شوند¹]. توجه کنید که سیال در این مورد، زایلن خالص بود که در پوسته یک ری‌بویلر افقی می‌چرخید. بخش

^۱ Boiler: دیگ بخار، جوشاننده

^۲ Sintered: متخلخل، سینتری

^۳ Amoco: آموکو

^۴ Texas City: شهر تگزاس

^۵ Union Carbide Corporation: شرکت منحل شده یونین کاربید

^۶ Bhopal, India: بوپال هند

^۷ Sandblast: سندبلاست

تحقیق و توسعه شرکت آموکو، اندازه بهینه اریفیس محدودکننده^۱ را برای حداکثر رساندن عملکرد ریپویلر محاسبه کرد. ریپویلر نیز عملکرد خوبی داشت.

البته اگر رسوب، به عنوان یک عامل مورد توجه قرار می گرفت، یکی از نقطه ضعف های طراحی محسوب می شد. افزون بر این، ۹۹٪ انتقال حرارت به خاطر DP پایین و خالص بودن زایلن، گرمای نهان بود.

انسداد بخار^۲

همیشه تعجب می کنم که چطور نشتی کوچکی از پروپان یا بوتان در یک ریپویلر بخار آب سبب می شود که عملکرد ریپویلر به شدت کاهش یابد. وقتی در تگزاس سیتی^۳ مشغول کار بودم، چنین به نظر می رسید که آلودگی کوچکی در ورودی^۴ بخار آب با فشار ۳۰ psig در ریپویلر برج تفکیک بوتان سبب می شود که عملکرد ریپویلر به نصف کاهش یابد. با توجه به آموزه های تجربی ام می دانم که منشأ آلودگی CO₂ در بخار آب کربنات های موجود در آب خوراک بویلر (BFW)^۵ هستند؛ حتی در غلظت های پایین در حد چند ppm نیز اثرات منفی زیادی بر نرخ تراکم بخار آب در هیترهای بخار آب دارد. البته اگر کربن دی اکسید انباشته به طور متناوب ونت شود، چنین اتفاقی نمی افتد.

اگر در کندانسورهای سطحی تخلیه خلأ توربین بخار نشتی هوای کوچکی وجود داشته باشد و هوا به داخل کندانسور سطحی کشیده شود، راندمان انتقال حرارت کندانسور به طور قابل توجهی کاهش می یابد؛ حتی اگر نسبت هوا به بخار ورودی کندانسور ناچیز باشد.

به خوبی به یاد می آورم (شکل ۱۴-۱ را ببینید) که در واحد آلکیلاسیون واقع در تگزاس سیتی، باز کردن ونت نیم اینچی واقع در روی کلاhek مجاری^۶ یک ریپویلر با قطر داخلی ۶۰ اینچ، باعث افزایش عملکرد ریپویلر بخار می شود و نرخ جریان برگشتی برج را بیش از ۳۰٪ بیشتر می کند.

^۱ Restriction orifice: اریفیس محدودکننده

^۲ Vapor Binding: انسداد بخار

^۳ Texas City: شهر تگزاس

^۴ Supply: ورودی

^۵ Boiler feed water (BFW): آب خوراک بویلر، آبی که نرم یا یون زدایی و سپس هوازایی شده باشد.

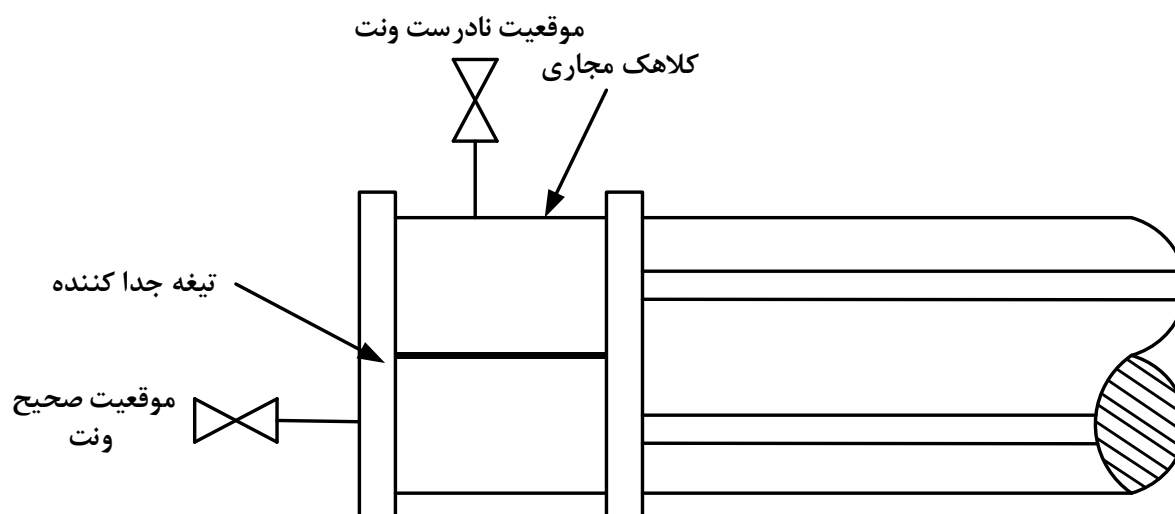
^۶ Channel head: کلاhek مجاری

فرقی نمی‌کند که گاز غیرقابل چگالش، هوا باشد یا نیتروژن، CO_2 یا هیدروکربن‌های سبک؛ در هر صورت، تأثیر یکسانی دارند. در مقالات و منابع علمی، به این مشکل نامطلوب، «انسداد بخار» می‌گویند.

مهم‌ترین مشکلی که در یک پالایشگاه موجب انسداد بخار می‌شود، نشت لوله‌های اتان، پروپان یا بوتان از پوسته به سمت لوله بخار آب است.

با توجه به مطالعه منابع موجود²، از روش زیر برای تجسم انسداد بخار استفاده می‌کنم:

۱. ده هزار مولکول بخار آب و ۱۰ مولکول پروپان همزمان وارد یک لوله می‌شوند.
۲. بخار آب متراکم شده به آب تبدیل شده و از لوله خارج می‌شود.
۳. مولکول‌های بخار پروپان در داخل لوله باقی می‌مانند؛ برای اینکه بخار حامل (یعنی سرعت) ناپدید شده است.
۴. مولکول‌های پروپان در داخل لوله تجمع می‌یابند و فشار نسبی بخار آب به صورت نامناسب کاهش می‌یابد.
۵. کاهش فشار جزئی بخار موجب کاهش دمای چگالش آن می‌شود.
۶. نیروی محرکه دما، یعنی « ΔT » کاهش می‌یابد.
۷. عملکرد ریبویلر افت می‌کند.



شکل ۱۴-۱ ونت کردن از زیر تیغه جداکننده^۱.

^۱ تیغه جداکننده: Pass Partition Baffle

تأثیر ونت کردن بخار

با توجه به اینکه بینایی اشعه ایکس ندارم، فقط می‌توانم حدسیاتی در مورد مکانیسم واقعی انسداد بخار در داخل لوله یک ریپویلر یا خارج از لوله یک کندانسور سطحی توربین بخار داشته باشم. اما تأثیر قابل توجه تخلیه گاز غیرقابل چگالش هیدروکربنی از کلاهک مجاری ریپویلر برج DIB (جداسازی ایزوبوتان) غول‌پیکر واحد آلکیلاسیون، حدس و گمان نیست (به شکل ۱۴-۱ مراجعه کنید). توجه کنید که ونت، در بخش زیرین تیغه جداکننده قرار دارد؛ نه ونتی که در بالای کلاهک مجاری قرار دارد).

در این مورد، ورودی بخار آب ریپویلر با نشت پروپیلن از مبدل حرارتی بالادستی آلوده شده است. این اتفاق در سال ۱۹۷۵ رخ داد. نمی‌توانستم درک کنم که تخلیه چند پوند گاز غیرقابل چگالش چگونه بر نرخ تراکم ۴۰۰۰۰ پوند در ساعت بخار آب با فشار ۳۰ psig اثر می‌گذارد. دست‌کم، اپراتورهای ساعتی من که تحصیلات دانشگاهی نداشتند، تعجب نکردند.

آن‌ها در توضیح گفتند: «بله آقای نورم، بخار آب با اضافه کردن گاز یا هوا به آن ضعیف شود. نمی‌شود توقع داشته باشید که ریپویلر به سختی کار کند و بخار ضعیفی داشته باشد.»

«محدودیت‌های جوش هسته‌ای»، «شرایط محدود فلاکس» و «انسداد بخار»، از جمله مشکلاتی هستند که انتقال گرمای نهان در ترکیبات خالص را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این مشکلات هیچ‌وقت در عیب‌یابی و طراحی تجهیزات مورد توجه قرار نمی‌گیرند. تأثیر این مشکلات از دیدگاه مهندسی دور در تناقض است. هرچند، این تأثیرات با دیدگاه جامع‌نگرتری که از تجربیات زندگی روزمره نشأت می‌گیرد، با بسیاری از مشاهدات موجود همخوانی دارند [3].

رابطه گرمای محسوس با گرمای نهان بخار آب

جری^۱ پرسید: «آقای نورم، مسئله‌ای را برایم توضیح می‌دهید؟ به دوست دختر جدیدم لیندا^۲ یک پلاک طلا در روز ولنتاین هدیه دادم ولی او خیلی ناراحت شد. آیا کار اشتباهی کردم؟»

«احتمالاً طلای ۱۲ عیار بود و الماس هم نداشت. سوال بعدی؟»

^۱ Jerry:

^۲ Linda:

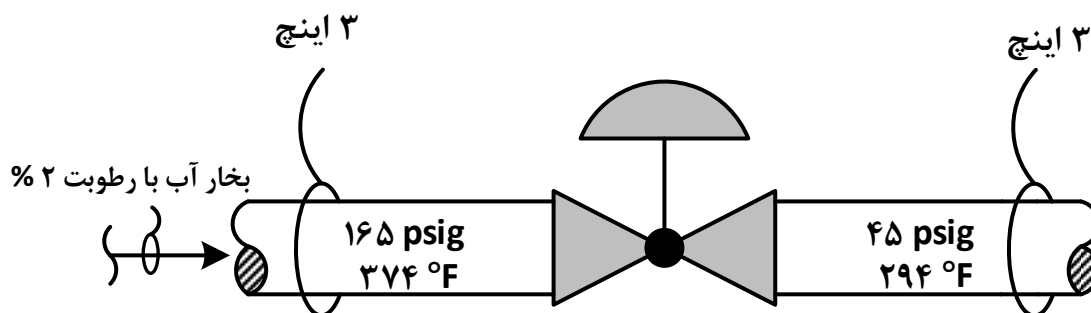
«بسیار خب. داشتم به شیر کنترل جریان که بر روی ورودی بخار آب ریپویلر جداساز بوتان قرار دارد، نگاه می‌کردم (شکل ۱۴-۲). با عبور از شیر، دمای بخار آب تا ۸۰ درجهٔ فارنهایت کم می‌شود. چرا؟»

«جری، این موضوع سه دلیل احتمالی دارد:

- سرعت؛
- گرمای نهان؛
- تبخیر.»

«نورم، من به اتلاف حرارتی محیط هم فکر می‌کردم. آیا این موضوع هم می‌تواند در سرد شدن بخار آب تأثیری داشته باشد؟»

«خب بله. اما بیا راجع به آخرین مشکل صحبت کنیم.»



شکل ۱۴-۲ انبساط آدیاباتیک^۱ بخار آب مرطوب.

تبدیل گرما به انرژی جنبشی

«جری، همان‌طور که اگر بخواهی، سرعت کامیون خود را از ۲۰ به ۶۰ MPH برسانی، باید انرژی مصرف کنی، برای سرعت‌بخشیدن به سیالی مانند بخار آب نیز، انرژی لازم است. این انرژی از موتور تأمین می‌شود.»

«نورم، یادم رفت به تو بگویم که اندازهٔ خط بخار آب در دو طرف شیر کنترل، ۳ اینچ است.»

^۱ در ترمودینامیک، آدیاباتیک یا بی‌دررو به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن انتقال حرارت و جرم بین سیستم ترمودینامیکی و محیط اطراف Adiabatic وجود نداشته باشد. در حقیقت در چنین فرآیندی تنها کار عامل انتقال انرژی بین سیستم و محیط محسوب می‌شود.

پرسیدم: «بسیار خب. اما فشار بخار آب چطور؟»

«فشار از ۱۶۵ به ۴۵ psig افت کرده است.»

«بسیار خب، جری. این یعنی فشار از ۱۸۰ به ۶۰ psia افت کرده است. حجم بخار آب به صورت معکوس با فشار، متناسب است که سه برابر شده:

$$\left(\frac{1}{\text{فشار}}\right) \sim \text{حجم}$$

و توضیح دادم که سرعت بخار آب هم سه برابر شده است.»

«قطعاً. ما فشار را به سرعت تبدیل کردیم؛ دقیقاً مانند کاری که صفحه اریفیس جریان سنج انجام می‌دهد.»

«جری، آنچه که می‌گویی برای مایعی که یک سیال تراکم‌ناپذیر درست است. در مورد بخاری مانند بخار آب که تراکم‌پذیر است، بخش عمده انرژی لازم برای شتاب‌دادن به بخار، از فشار نشأت نمی‌گیرد. بلکه از گرمای خود بخار آب حاصل می‌شود.»

جری پاسخ داد: «قبلاً در این مورد شنیده بودم. ترمودینامیک نیز در مورد همین موضوع است. اما نورم؛ در هر صورت کاهش فشار جریان بخار آب، باید انرژی زیادی را آزاد کند تا به بخار آب کمک کند تا در شیر کنترل، سرعت بیشتری پیدا کند. می‌دانی، منظورم تبدیل فشار به سرعت است.»

«جری، قطعاً گفته‌های تو برای مایعاتی از قبیل آب و نیز برای بخارهایی مانند بخار آب صدق می‌کند. برای اینکه سرعت جریان آب بیشتر شود، می‌توان از کاهش فشار آن بهره برد. می‌توانی بروی و آبشار نیاگارا^۱ را ببینی تا از قدرت این اثر مطلع شوی. در آنجا فشار هد آب به اندازه چرخش توربین‌هایی است که برق تولید می‌کنند.»

«تفاوت اینجاست که آب، یک سیال تراکم‌ناپذیر اما بخار یک سیال تراکم‌پذیر است.»

تأثیر جاذبه مولکولی

^۱ آبشار نیاگارا: Niagara Falls

«بین دوست من؛ اگر واقعاً لیندا را دوست داری، دو راه پیش رو داری:

- یک شاخه گل رز قرمز زیبا؛

یا

- یک ساعت طلای هشت هزار دلاریِ مرصع کاری شده با الماس.»

«نورم؛ جاذبهٔ مولکولی چه ربطی به لیندا دارد؟ موافق نظرات نیستم.»

«بسیار خب، با افت فشار مایع، حجم آن به میزان قابل توجهی زیاد نمی‌شود. اما با افت فشار بخار، حجم آن متناسب با کاهش فشار مطلق آن، منبسط می‌شود. این بخشی از قانون گاز آرمانی^۱ است.»

«هرچه مولکول‌های بخار آب به هم نزدیک‌تر شوند، گرم‌تر می‌شوند. یعنی هر موقع گازهایی از قبیل اتان، هوا، بوتان یا بخار آب، فشرده می‌شوند، دمای گاز افزایش می‌یابد.»

«اما با دور شدن مولکول‌های گاز از یکدیگر، آن گاز سردتر می‌شود. هرچه مولکول‌ها از همدیگر دورتر شوند، فاصلهٔ بین مولکول‌های بخار آب بیشتر می‌شود.»

«پس وقتی گازی مانند بخار آب، نیتروژن یا پروپان در یک شیر کنترل منبسط می‌شود و مولکول‌های بخار از هم فاصله می‌گیرند، آن گاز سردتر می‌شود. این پدیده، «انبساط ژول-تامسون»^۲ نامیده می‌شود.»

انبساط هیدروژن

«چه جالب؛ دلیل اینکه چرا دمای بخار آب تا ۸۰ درجهٔ فارنهایت کم می‌شود، مشخص شد. برای اینکه بخار آب از شیر کنترل ریبویلر عبور می‌کند. گفتم این موضوع برای تمام گازها صدق می‌کند؟»

^۱ Ideal gas law: قانون گاز آرمانی یک معادله حالت است، که بیانگر رفتار یک گاز فرضی به نام گاز ایده‌آل است. این قانون به‌طور تقریبی رفتار بسیاری از گازها را پیش‌بینی می‌کند.

^۲ Joule-Thompson Expansion: پدیده ژول-تامسون، به بررسی چگونگی افت دمای یک گاز طی پدیده انبساط آدیاباتیک و برگشت ذیر می‌پردازد. هدف از این انبساط بررسی قانون سوم ترمودینامیک می‌باشد. در پدیدهٔ انبساط ژول تامسون آنتالپی سیستم ثابت است و تحول یک تحول ایزوآنتالپیک نامیده می‌شود.

«جری، البته این موضوع در مورد هیدروژن صادق نیست. یادت هست که در کارخانه تولید هیدروژن در آروبا^۱ همیشه نشان می‌دادم که وقتی هیدروژن از ۱۰۰۰ psig به ۸۶۰ psig منبسط می‌شود، ۱۰۰ درجه فارنهایت گرم می‌شود. در مورد هلیوم نیز همین‌طور است. آن‌ها برعکس عمل می‌کنند. می‌توان گفت که هیدروژن ضریب انبساط ژول-تامسون منفی دارد.»

«بله؛ حالا متوجه قیاس بین لیندا و هدیه ولنتاین شدم. واکنش معکوس. نورم؛ می‌خواهی دلیل ضریب انبساط ژول-تامسون منفی برای هیدروژن را توضیح بدهی؟»

«نه رفیق. خودم هم متوجه نمی‌شوم.»

اثرات گرمای نهان

«پس نورم؛ وقتی مولکول‌های بخار آب به همدیگر می‌پیوندند، به شکل مایع در می‌آیند و آب را تشکیل می‌دهند، گرما آزاد می‌کنند. درست است؟»

«بله جری؛ دقیقاً همین‌طور است. این گرما، «گرمای نهان چگالش^۲» نام دارد.»

«بله؛ دقیقاً.»

جری گفت: «پس می‌توان چنین نتیجه گرفت که بخار کم فشار نسبت به بخار پرفشار، گرمای نهان چگالش بیشتری دارد. نورم، من فکر می‌کنم همین‌طور است؛ چراکه با کاهش فشار بخار آب، فاصله مولکول‌های آب از همدیگر بیشتر می‌شود. سپس وقتی مولکول‌های بخار آب با فشار پایین به همدیگر می‌پیوندند و آب به حالت مایع در می‌آید، باید گرمای نهان بیشتری را آزاد کنند. درست است نورم؟»

«کاملاً درست است جری! مقدار گرمای نهان چگالش بخار آبی با فشار ۱۶۵ psig (۱۱ bar)، تقریباً ۸۸۰ BTU بر پوند است. گرمای نهان چگالش بخار آب در فشار اتمسفر به ازای هر پوند، تقریباً برابر با ۹۹۰ BTU است.»

^۱ Aruba: آروبا

^۲ Latent heat of condensation: گرمای نهان چگالش

«بله؛ متوجه شدم! پس با انبساط بخار آب، بخشی از دما یا گرمای محسوس آن به گرمای نهان تبدیل می‌شود! وای پسرا! نمی‌توانم صبر کنم تا این موضوع را به لیندا بگویم. حالا او فکر می‌کند من چقدر باهوشم!»

تبخیر

«مطمئن نیستم ایده خوبی باشد جری. اما گوش کن. احتمالاً تبخیر رطوبت، دلیل اصلی افت دمای ۸۰ درجه فارنهایتی بخار آب منبسط باشد. بیا فرض کنیم بخار آبی با فشار ۱۶۵ psig حاوی دو درصد رطوبت یا آب به حالت مایع باشد. گرمای ویژه بخار آب نیز تقریباً ۰/۵۶ btu/lb/°F است. بدین ترتیب، این دو درصد آب، بخار می‌شود و بقیه بخار آب را خنک می‌کند:

$$880 \text{ btu/lb} \cdot 2\% \div 0.56 \text{ btu/lb/}^{\circ}\text{F} = 30^{\circ}\text{F}$$

اتلاف حرارت محیط

«جری، احتمالاً فکر می‌کنی اتلاف حرارت محیطی، واقعاً عامل کوچکی باشد. می‌توانی با کمک معادله زیر، آن را برآورد کنی:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

که در این معادله:

Q = اتلاف حرارتی محیط، بر حسب BTU/h؛

A = سطوح فلزی در معرض و بدون عایق، بر حسب ft^2 ؛

U = ضریب انتقال حرارت، بر حسب $\text{BTU/h/ft}^2/^{\circ}\text{F}$

ΔT = اختلاف دما بر حسب درجه فارنهایت، این اختلاف دما بین سطح داغ فلز و هوای محیط ایجاد می‌شود.

«درست است نورم! اما مقدار متداول U در این معادله چقدر است؟».

«در شرایطی که باد با سرعت متوسط و بین ۱۵-۱۰ مگاپاسکال بر ساعت می‌وزد، به جدول زیر مراجعه کن:

دمای سطح، °F	U; btu/h/ft ² /°F
۱۵۰	یک
۳۰۰	دو
۴۵۰	سه
۶۰۰	چهار

با یک نگاه ساده متوجه می‌شوی که شیر کنترل در این مورد بدون عایق بوده و لوله نزدیک به آن، عایقی ۴ اینچی دارد؛ «A» کوچک بوده و اتلاف حرارت محیط نیز، احتمالاً جزئی خواهد بود.»

اثر سورفکتانت‌ها^۱ بر تولید کف

لازم است وقتی مشغول انجام آزمایش‌های این فصل هستید، مشکل متداول تقطیر هیدروکربن‌های سبک را بررسی کنید. من به این مشکل «طغیان ناشی از کف» می‌گویم. یک دیگ را تا نیمه آب کنید و صبر کنید تا به جوش بیاید. پس از آن، مقداری پاستا داخل دیگ بریزید. به جوش می‌آید. مشکل اینجا است که ذرات نشاسته باعث می‌شوند کشش سطحی آب کاهش یابد و کف کند. در پالایشگاه‌ها نیز همین مشکل به‌خاطر وجود ذرات محصولات خوردگی سولفید آهن بروز می‌کند. مایع برگشتی ریویلر کف می‌کند، سطح کف بالا می‌آید و نازل برگشتی ریویلر

^۱ Surfactant: موادی هستند که هنگامی که به مقدار بسیار ناچیز استفاده می‌شوند؛ کشش سطحی آب را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند.

^۲ Foam Induced Flooding: طغیان ناشی از کف

را می پوشاند و کل برج دچار طغیان می شود. این مشکل، مخصوصاً در برج های تقطیر هیدروکربنی سبک به شدت متداول بوده و به خاطر طغیان صفحه سینی^۱، راندمان تفکیک را کاهش می دهد.

منابع

- [1] D.G. Kern, Process Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1950, pp. 459–461.
- [2] Henderson, Marchello, Film condensation in the presence of non-condensables, J. Heat Transf. 91 (1969) 447–450.
- [3] N.P. Lieberman, Troubleshooting Process Operations, fourth ed., PennWell Publications, 2013.

^۱ Tray Deck: صفحه یا کف سینی



جریان بخار آب عبوری از ریبویلرها

چکیده:

سمت بخار آب ریبویلرها ممکن است به دلیل تجمع میعانات و انسداد بخار، دچار مشکل شود؛ یا به علت تجمع میعانات، انتقال حرارت ضعیفی داشته باشد. معیوب بودن تله بخار در سمت بخار آب، موجب کاهش شدید بار حرارتی ریبویلر می‌شود. وجود گازهای غیرقابل چگالش، به ویژه CO_2 در بخار آب، نرخ انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. مگر اینکه گازهای غیرقابل چگالش، از طریق ونت، خارج شوند. برای ریبویلرهای افقی که بخار آب در سمت لوله جریان دارد، این کار با ونت کردن کلاhek مجاری از پائین‌ترین تیغه جداکننده مبدل، صورت می‌گیرد.

کلمات کلیدی:

بخار آب؛ میعانات؛ آب‌بندی؛ انسداد بخار؛ کلاhek مجاری؛ تجزیه CO_2 ؛ کربنات‌ها

«آقای لیبرمن، می‌توانم از شما سوالی بپرسم؟ فقط چند ماه است که در واحد بهره‌برداری مشغول به کار هستیم. کاملاً گیج شده‌ام.»

در پالایشگاه اتون^۱ واقع در انگلستان، مشغول تدریس در سمینار عیب‌یابی پالایشگاه بودم. تاد^۲ که به نظر می‌رسید ۱۶ ساله است، ولی احتمالاً ۲۳ سال داشت، باهوش‌ترین شاگرد من نبود.

«سوالت را بپرس تاد. فقط چند دقیقه فرصت داریم تا کلاس شروع شود.»

«بسیار خب؛ من یک عریان‌ساز پرشده^۳ دارم که ریپویلر آن با بخار آبی با فشار ۳ بار، کار می‌کند. قبلاً می‌توانستیم ۱۲۰ تن در ساعت عریان‌سازی کنیم. اما به تازگی این مقدار به ۹۰ یا ۱۰۰ تن در ساعت رسیده است. گرمای کافی از ریپویلر بخار آب خارج نمی‌شود.»

«ریپویلر چه ویژگی‌هایی دارد؟»

«بله آقا. من طرحی از آن را همراه آورده‌ام (شکل ۱۵-۱ را ببینید).»

«تاد؛ لطفاً همیشه آقا صدایم نکنی؟ احساس می‌کنم پیرمرد هستم. مرا نورم صدا بزن.»

«بله آقا. فکر می‌کنم مشکل اینجا است که هیچکدام از مهندسان ارشد نمی‌خواهند یا نمی‌توانند یا فرصت ندارند که به من کمک کنند. اینجا شرکت بزرگی است؛ اما حس می‌کنم با مشکلاتم تنها هستم.»

«ببین؛ الان باید کلاس را شروع کنیم. بیا ساعت ۵ بعد از ظهر به واحد بهره‌برداری برویم و مشکل را در سایت بررسی کنیم. تاد، من به همه شما برای حل مشکلات فرآیندی پالایشگاه چه آموزشی داده‌ام؟»

«بله آقا ... ببخشید، نورم. حل مشکل مثل این است که بخواهی مخ دختران را در بار بزنی. باید به مشکل نزدیک شوی.»

^۱ اتون: Etton

^۲ تاد: Tad

^۳ عریان‌ساز پرشده: Packed stripper

افت عملکرد ریبویلر

اغلب ریبویلرهای پالایشگاهی، حداقل در ایالات متحده آمریکا، مبدل‌های پوسته و لوله افقی هستند. سیال فرآیندی به وسیله گردش ترموسیفون یا با یک پمپ (کمتر متداول است)، در پوسته گردش می‌کند.

بخار آب در سمت لوله جریان دارد. در مورد بخار آب کم‌فشار، مانند این مورد، نرخ جریان بخار آب با تغییر نرخ جریان میعان‌ات حاصل از درام‌کندانس، کنترل می‌شود (شکل ۱۵-۱). وقتی شیر کنترل خروجی میعان‌ات بسته می‌شود، میعان‌ات بخار آب (آب) به سمت بالا برمی‌گردند و بعضی از لوله‌ها را پر می‌کنند. در لوله‌هایی که پر از آب هستند نیز هیچ بخار آبی متراکم نمی‌شود.

در یک ریبویلر بخار آب، بیش از ۹۰٪ حرارت از گرمای نهان چگالش بخار آب و کمتر از ۱۰٪ آن نیز از گرمای محسوس آب داغ تأمین می‌شود.

پالایشگاه اتون در انگلستان، یکی از پالایشگاه‌های تابع یک شرکت آمریکایی بود؛ به همین دلیل ریبویلر آن‌ها نیز افقی بود. پالایشگاه‌های اروپایی از ریبویلر عمودی استفاده می‌کردند و بخار آب در سمت پوسته و سیال فرآیندی در سمت لوله، گردش داشت.

تجمع میعان‌ات

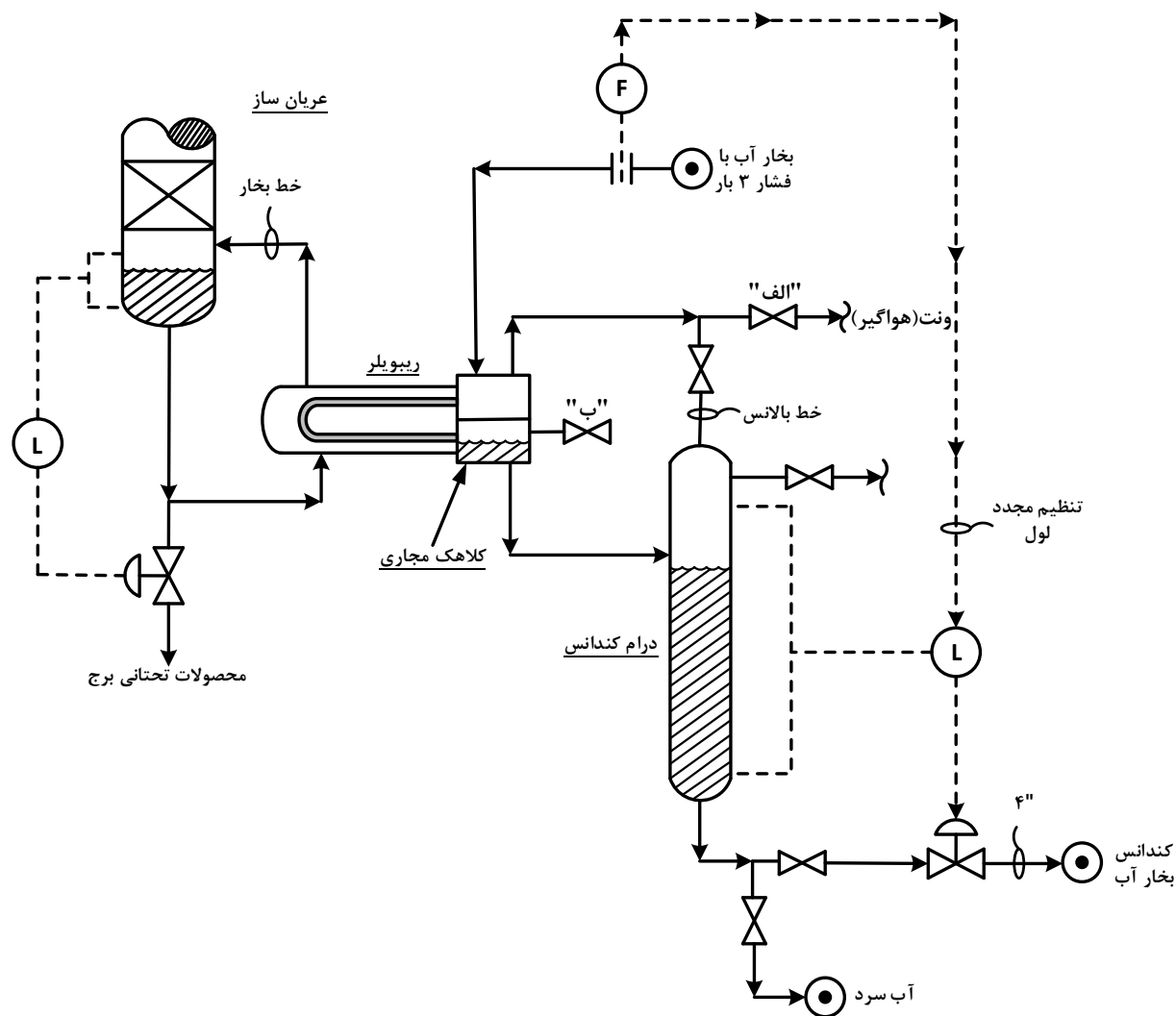
در ریبویلرهای بخار آب که از بخار آب کم‌فشار استفاده می‌کنند، تجمع میعان‌ات، از متداول‌ترین مشکلات پیش‌روست. احتمالاً یکی از مشکلات این است که شیر تخلیه میعان‌ات، خیلی کوچک است. این مشکل، متداول نیست. احتمالاً مشکل اصلی، «انسداد بخار» است.

وقتی میعان‌ات بخار آب داغ از کلاhek مجاری^۱ ریبویلر درین می‌شود (شکل ۱۵-۱ را ببینید)، دمای آن به نقطه جوش نزدیک می‌شود. وقتی آب گرم در خط درین میعان‌ات، جاری می‌شود، به دلایل زیر فشار آن کاهش می‌یابد:

۱. اتلاف ناشی از اصطکاک در خط درین.
۲. اتلاف ناشی از شتاب گرفتن، چراکه میعان‌ات در اتصالات یا لوله کوچک‌تری جریان می‌یابند.

^۱ Channel head: کلاhek مجاری

۳. افزایش ارتفاع خط.



شكل ١٥-١ ريبويلر ترموسيفون.

میعانات داغ تا حدی تمایل به تبخیر شدن، دارند. بخار متصاعدشده می‌تواند حجم جریان را تا ۱۰۰ برابر بیشتر کند. این حجم زیاد بخار آب متصاعدشده، موجب گرفتگی جریان و تجمع میعانات موجود در کلاهیک مجاری می‌شود. در نتیجه، پدیده «انسداد بخار» رخ می‌دهد و متعاقباً عملکرد ریپویلر افت می‌کند.

از بین رفتن آب‌بندی کندانس^۱

تمام اپراتورهای روی کره زمین می‌دانند که چگونه مشکل تجمع میعان‌ات را کنترل کنند. آن‌ها میعان‌ات را به صفحه‌ای هدایت می‌کنند که باعث ایجاد دو مشکل می‌شود:

۱. میعان‌ات ارزشمند که باید به هوازدا یا بویلر^۲ برگردانده شوند، در فاصلاب از بین می‌روند.
۲. در صورتی که شیر تخلیه بیش از میزان لازم باز شود، بخار آب به‌همراه میعان‌ات خارج می‌شود. به این پدیده «از بین رفتن آب‌بندی کندانس» می‌گویند که پدیده خوبی نیست.

بله، این پدیده بد است؛ چراکه بخار آب، اتلاف می‌شود. اما نکته مهم‌تر این است که راندمان انتقال حرارت (مقدار «U» به شدت افت می‌کند. با وجودی که سرعت‌های زیاد موجب انتقال حرارت محسوس می‌شوند، احتمال دارد سرعت زیاد بخار، انتقال گرمای نهان را کند، کند. از بین رفتن آب‌بندی کندانس، عملکرد ریویلر را فوراً بین ۲۰ تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. موارد فوق، برداشتی براساس تجارب شخصی خودم و اپراتورهای میدانی هستند.

گازهای غیرقابل چگالش در بخار آب

وجود مقدار بسیار کمی از گازهای غیرقابل چگالش، موجب آلوده‌شدن بخار آب شده و سبب می‌شود عملکرد ریویلر، به نصف کاهش یابد. گازهای غیرقابل چگالش، عبارتند از:

- CO₂ - کربنات‌های باقیمانده در آب خوراک بویلر^۳ که حاصل از واحد یون‌زدایی^۴ هستند، در بویلر به CO₂ تجزیه می‌شوند.
- N₂ - یک‌بار در تگزاس‌سیتی^۵ متوجه شدم مقداری نیتروژن در بخار کم‌فشار ورودی به ریویلر برج DIB آلکیلاسیون وجود دارد. یک نفر ناخواسته نیتروژن را به بخار آب واحد دیگری، متصل کرده بود.
- هیدروکربن‌های سبک - ممکن است اتان، پروپان یا بوتان غیرقابل چگالش به‌خاطر نشتی یک لوله کوچک، وارد لوله‌های بخار آب شوند.

^۱ از بین رفتن آب‌بندی کندانس: Blowing Condensate Seal

^۲ Boiler: دیگ بخار، جوشاننده

^۳ Boiler feed water (BFW): آب خوراک بویلر، آبی که نرم یا یون‌زدایی و سپس هوازدایی شده باشد.

^۴ Demineralization plant: واحد یون‌زدایی

^۵ Texas City: شهر تگزاس

نشت CO₂ حاصل از تجزیه کربنات، متداول‌ترین مشکلی است که در این زمینه بروز می‌کند. اگر گازهای غیرقابل چگالش، مرتباً تخلیه نشوند، در لوله‌ها انباشته می‌شوند و بدین ترتیب، سرعت تراکم بخار آب را کندتر می‌کنند. در یکی از واحدهای پالایشگاهی استرالیا^۱، تجمع CO₂ باعث کاهش عملکرد ریبویلر بوتان‌زدا به میزان ۲۰ تا ۳۰٪ شد. این اتفاق در طول چندین روز و قبل از تخلیه CO₂ از کلاhek مجاری رخ داد.

از این مشکل در مقالات و منابع علمی [1] به‌عنوان «انسداد بخار» یاد شده است. همیشه برایم جالب بود که چطور می‌شود اندکی ونت گازهای غیرقابل چگالش، چنین تأثیر ژرفی بر نرخ میعان بخار آب، داشته باشد. البته باید این نکته را اضافه کرد که شرط این کار، ونت کردن از زیر مسیر کلاhek مجاری است؛ نه از ونت بالای کلاhek مجاری [۲].

فقدان گردش ترموسیفون

ریبویلری که در شکل ۱۵-۱ مشاهده می‌کنید، «ریبویلر ترموسیفون گردشی»^۲ نام دارد. سیال به‌خاطر اختلاف چگالی بین بخش ورودی سرد و خروجی گرم، از میان پوسته ریبویلر گردش می‌کند.

بخش ورودی سرد، چگالی بیشتری دارد؛ چراکه فقط مایع وارد آن می‌شود.

بخش خروجی گرم، چگالی کمتری دارد؛ چراکه مخلوطی از فازهای بخار و مایع است.

نیروی محرکه برابر است با اختلاف چگالی ضرب در ارتفاع مایع در وسل در مقایسه با ارتفاع ریبویلر:

$$\frac{(S \cdot G) \cdot (\text{ارتفاع ریبویلر}) - (\text{ارتفاع مایع})}{2.31} = DP \quad (1 - 15)$$

که در این معادله:

- ارتفاع، بر حسب فوت است.
- S.G جرم ویژه مایع است (۱ برای آب).

^۱ Australia: استرالیا

^۲ Circulating Thermosiphon Reboiler: ریبویلر ترموسیفون گردشی

• DP بر حسب psi است.

DP، نیرو محرکه گردش ترموسیفون است. توجه کنید که از S.G مایع خروجی صرف نظر کردم؛ چرا که اغلب حجم آن، بخار با چگالی کم است.

اگر نرخ گردش ترموسیفون بیش از حد پایین باشد، کار انتقال حرارت ریپویلر دچار مشکل می شود. همچنین، اپراتورها به این پدیده، انسداد بخار می گویند.

اگر ارتفاع سطح سیال موجود در وسل از نازل برگشتی ریپویلر بالاتر باشد، مانع از گردش ترموسیفون می شود.

تعمیرات بزرگ

من و تاد تحقیقات میدانی مان را تا ساعت ۸ شب آغاز نکردیم. این کار به سه ساعت زمان جهت استقرار ایمنی خودم، نیاز داشت. توضیح دادم: «تاد، بیا اول از همه ونت گازهای غیرقابل چگالش را باز کنیم. CO₂ هیچ وقت در بالای تیغه جداکننده^۱ کلاhek مجاری جمع نمی شود؛ فقط در زیر مسیر کلاhek مجاری تجمع پیدا می کند.»

«بله نورم؛ می توانم ببینم. بخش بالای کلاhek مجاری مرتباً با بخار آب پاکسازی^۲ می شود. CO₂ فقط پس از چگالش بخار آب، جمع می شود. شیر باز (ب) را کنترل (شکل ۱۵-۱) و کلاhek مجاری را مرتباً پاکسازی می کنم.»

نشانگر جریان موضعی نشان می داد که جریان بخار آب ریپویلر تقریباً ۵ تا ۱۰ درصد افزایش یافته است.

مشغول بررسی بودم. گفتم: «تاد به نظر می رسد ما کارمان را خوب انجام داده ایم.»

«بله. آن ونت کردن موثر بود اما نه به اندازه ۵۰٪. در مرحله بعد باید چکار کنیم؟»

«باید بفهمیم که آیا مشکل، تجمع میعانات است یا از بین رفتن آب بندی کندانس؟»

«چطور می توانیم متوجه شویم؟»

^۱ Pass Partition Baffle: بافل جداکننده گذرها

^۲ Purge: پاکسازی

توضیح دادم: «ساده است. تو با کمک دماسنج مادون قرمز^۱ که داری، دمای خروجی پوستهٔ خط بخار ریبویلر را کنترل می‌کنی. من هم شیر دروازه‌ای^۲ خروجی میعانات بخار را کمی می‌بندم. دمای خروجی پوستهٔ ریبویلر یا بالا می‌رود و یا پایین می‌آید.»

«اگر دمای خروجی کاهش یابد، یعنی عملکرد ریبویلر به‌خاطر تجمع میعانات در لوله‌ها، افت کرده است. اگر دمای خروجی افزایش یابد، یعنی دچار مشکل از بین رفتن آب‌بندی کندانس شده‌ایم.»

«آهای نورم. دمای خروجی ریبویلر دارد پایین می‌آید. احتمالاً مشکل ما تجمع میعانات باشد، نه از بین رفتن آب‌بندی کندانس.»

دیدم تاد مشغول بررسی سطح آب در درام کندانس است. درام کندانس، خیلی پایین‌تر از بخش تحتانی کلاhek مجاری بود (شکل ۱۵-۱). «اما نورم؛ واقعاً گیج شده‌ام! وقتی سطح این ظرف لعنتی یک فوت پایین‌تر از بخش تحتانی کلاhek مجاری است، چرا می‌گویی عملکرد ریبویلر به‌خاطر تجمع میعانات ضعیف شده است؟»

«برایت توضیح می‌دهم؛ پیچیده است. این اتفاق به‌خاطر یکی از اشتباهات متداول در طراحی می‌افتد:

۱. یادت باشد که خط بالانس بین درام میعانات و کلاhek مجاری، از بالای تیغهٔ جداکنندهٔ^۳ کلاhek مجاری، به ونت بالا (شیر الف) متصل شده است.
۲. فرض کنیم افت فشار بخار بخار آب در گذر از لوله‌ها، 0.1 bar یا یک متر آب باشد.
۳. به‌این ترتیب، فشار در نیمهٔ پایینی کلاhek مجاری، 0.1 bar کمتر از درام کندانس است.
۴. پس سطح آب در کلاhek مجاری تقریباً ۳ فوت یا یک متر بالاتر از سطح آب در درام کندانس است.
۵. یعنی تقریباً نصف لوله‌ها پر از آب می‌شوند.»

تصحیح اشتباه طراحی

تاد گفت: «آن‌ها باید خط بالانس را به زیر تیغه جدا کننده کلاhek مجاری متصل می‌کردند.» او در حالی که مشغول بررسی بود، ادامه داد: «در شیر (ب). در این صورت، فشار در درام کندانس و نیمه پایینی کلاhek مجاری یکسان بود. دارم فکر می‌کنم که حتی شرکت‌های بزرگ هم گاهی اشتباه می‌کنند.»

^۱ گان دمایی، تفنگ دمایی مادون قرمز، دماسنج‌های فرو سرخ و غیر تماسی که شماتیک تفنگ را دارند. Temperature gun

^۲ Gate valve: ولو دروازه‌ای

^۳ Pass Partition Baffle: بافل جداکننده گذرها، تیغه جداکننده

«بله تاد. شیری که بالای کلاhek مجاری را به درام متصل می‌کند، ببند. بعد از آن، ونت روی درام را کمی باز می‌کنم تا فشار درام کندانس کمتر شود.»

«نورم؛ ببین، نگاه کن! جریان بخار آب ریویلر یک‌دفعه بالا رفت و دمای خروجی بخار ریویلر نیز به شدت زیاد شد! چه جالب! فکر دیگری به ذهنت می‌رسد تا بتوانیم گرمای بیشتری از ریویلر استخراج کنیم؟»

انسداد بخار

«مطمئن نیستم؛ اما شاید بازهم به‌خاطر انسداد بخار در خط تخلیه میعانات ۴ اینچی، دچار تجمع میعانات شویم. احتمال دارد وقتی فشار میعانات در خط افت می‌کند، میعانات تا حدی به‌خاطر تبخیر به حالت بخار برگردند. حتی چند درصد تبخیر، می‌تواند جریان میعانات را محدود کند. به همین دلیل میعانات به کلاhek مجاری ریویلر برمی‌گردند.»

«به این ترتیب، انسداد بخار اتفاق می‌افتد. اما چه کاری می‌توانیم در این مورد انجام دهیم؟ خط ۶ اینچی نصب کنیم؟ پمپ بخریم؟»

«نه، تاد. باید امشب مشکل را حل کنیم. ما باید آب سرد را به خط میعانات ۴ اینچی تزریق کنیم. این کار باعث می‌شود که میعانات داغ به‌طور ناگهانی تبخیر نشوند. فقط یادت باشد با بخش یوتیلیتی تماس بگیری و از آن‌ها بخواهی که میعانات را به واحد تصفیه آب خوراک بویلر^۱ هدایت کنند.»

افزایش گردش ترموسیفون

«نورم. تزریق آب سرد به خط ۴ اینچی خروجی درام کندانس سبب افزایش گرمای ریویلر می‌شود. اما شاید دیر شود. می‌شود این کار را یک شبه انجام داد؟»

«الان ساعت ۱۱:۳۰ است! بیا روش دیگری را امتحان کنیم.»

«باشد اما بیا به گیت برویم.»

^۱ آب خوراک بویلر، آبی که نرم یا یون زدایی و سپس هوازایی شده باشد. (Boiler feed water (BFW))

«تاد؛ افزایش نرخ جریان عبوری از سمت پوستهٔ ریویلر، معمولاً، اما نه همیشه، انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. اگر مقدار زیادی از راندمان ریویلر به صورت انتقال حرارت محسوس باشد، افزایش نرخ گردش موثر خواهد بود. اما اگر تمام آن به صورت انتقال گرمای نهان باشد، افزایش نرخ گردش هیچ کمکی نمی‌کند.»

«اما چطور باید اطمینان حاصل کنیم که افزایش نرخ گردش برایمان مناسب است یا خیر؟»

پاسخ دادم: «در صورت افزایش دمای پایین برج، می‌توانیم به این نتیجه برسیم که کارمان را درست انجام داده‌ایم.»

اپراتور ارشد به سمتمان آمد: «می‌خواهید ناهار سفارش دهید؟ آن‌ها ساعت ۱ شب غذا را تحویل می‌دهند.»

تاد گفت: «نه آقای هنری^۱. ما باید برویم.»

«هنری، لول پایین برج را از ۵۰ به ۸۰ درصد برسان. تاد، افزایش لول برج، موجب افزایش نیروی محرکهٔ هد مایع شده و همین موضوع به نوبهٔ خود سبب جریان در ریویلر می‌شود. یعنی، افزایش نیروی محرکه موجب افزایش گردش ترموسیفون می‌شود (رابطه ۱۵-۱).»

وقتی منتظر بودم حراست پالایشگاه پاسپورتم را به من برگرداند، تاد گفت: «آقای لیبرمن؛ یادم رفت به شما بگویم که پدربزرگم هری جنکینز^۲، در سمینار عیب‌یابی شما در سال ۱۹۸۳ شرکت کرد. فکر نمی‌کنم پدربزرگم را یادتان بیاید. به هر حال، ایشان به شما سلام رساندند.»

«نه، تاد. پدربزرگت را یادم نمی‌آید. اما یادم هست که از تو خواستم دیگر مرا آقا صدا نزنی.»

منابع

[1] C.L. Henderson, J.M. Marchello, Film condensation in the presence of a non-condensable gas, J. Heat Transf. 91 (1969) 447–450.

[2] R.E. Putman, Steam Surface Condensers, ASME Press, 2001.

^۱ Henry: هنری

^۲ Harry Jenkins: هری‌جینکس



تبادل حرارت در کندانسورها و ریپویلرها

چکیده:

گازهای غیرقابل چگالش، انسداد بخار و افت انتقال حرارت را افزایش می‌دهند. لوله‌های صاف در مبدل گرمای نهان، می‌توانند نرخ انتقال حرارت را کاهش دهند. اگر نرخ شار محدود شود، بخار آب پرفشار، ممکن است بار حرارتی ریپویلر را افزایش ندهد. گازهای غیرقابل چگالش باید از کلاhek مجاری و از زیر تیغه جداکننده، خارج گردند. CO_2 یکی از دلایل رایج انسداد بخار است که نمی‌توان آن را از ونت بالای مبدل خارج کرد؛ اما می‌توان با کنارگذر کردن سینی بخار آب، از پائین کلاhek مجاری، آن را خارج کرد.

کلمات کلیدی:

گازهای غیرقابل چگالش؛ انسداد بخار؛ محدودیت شار؛ کلاhek مجاری؛ آب‌بندی میعانات؛ ریپویلرها؛ کندانسورها

معمولاً سرعت‌های بالا و لوله‌های صاف موجب بهبود انتقال حرارت محسوس در مبدل‌های حرارتی می‌شوند. هرچند، وقتی به سیستم‌های انتقال حرارت نهان مانند کندانسورها و مخصوصاً ریپویلرها توجه می‌کنیم، متوجه می‌شویم که غالباً سرعت‌های بالا یکی از موانع مهم برای تبادل حرارت محسوب می‌شوند. این موضوع در مورد جریان در سمت پوسته و سمت لوله نیز صادق است. وقتی تله بخار قسمت بخار آب ریپویلر، معیوب می‌شود^۱، اپراتورها متوجه موضوع می‌شوند. اگر لوله‌ها بیش از حد صاف باشند، ریپویلرها در هنگام لوله‌گذاری دسته تیوب‌ها، با محدودیت نرخ شار^۲ مواجه می‌شوند.

هرچند، موضوع اصلی این فصل، مشکل مشترک بیشتر اپراتورها است. این همان چیزی است که من آن را «انسداد بخار»^۳ می‌نامم.

انسداد بخار

معمولاً بخش بخار آب ریپویلرها و کندانسورهای سطحی تمیز هستند. همچنین، ضریب رسوب‌گذاری ۰/۰۰۱ در سمت بخار آب، مقدار مجاز رسوب‌گذاری سمت بخار آب را با سیلیکات‌ها و کربنات‌ها نشان می‌دهد. هرچند، نوع دیگری از رسوب‌گذاری موقت وجود دارد که نرخ چگالش بخار آب را تا حد زیادی، مهار می‌کند. به این پدیده «انسداد بخار» می‌گویند. انسداد بخار به‌خاطر وجود گازهای غیرقابل چگالش در بخار ایجاد می‌شود. گازهای غیرقابل چگالش در بخار آب چهار منشأ دارند. این چهار منشأ عبارتند از:

- نشتی لوله در ریپویلرهایی از قبیل ریپویلر واحدهای جداسازی اتان، جداسازی پروپان^۴ و جداسازی بوتان.
- کربن دی‌اکسید به‌خاطر تجزیه حرارتی کربنات‌هایی که در آماده‌سازی آب خوراک بویلر^۵، به خوبی حذف نمی‌شوند.
- نیتروژنی که تصادفاً به ورودی^۶ بخار آب واحد، وارد می‌شود.

^۱ Blown condensate seals: معیوب شدن تله بخار

^۲ Flux rate: نرخ شار

^۳ Vapor Binding: انسداد بخار

^۴ Depropanizer: پروپان زدا، جداساز پروپان، دیپروپانایزر

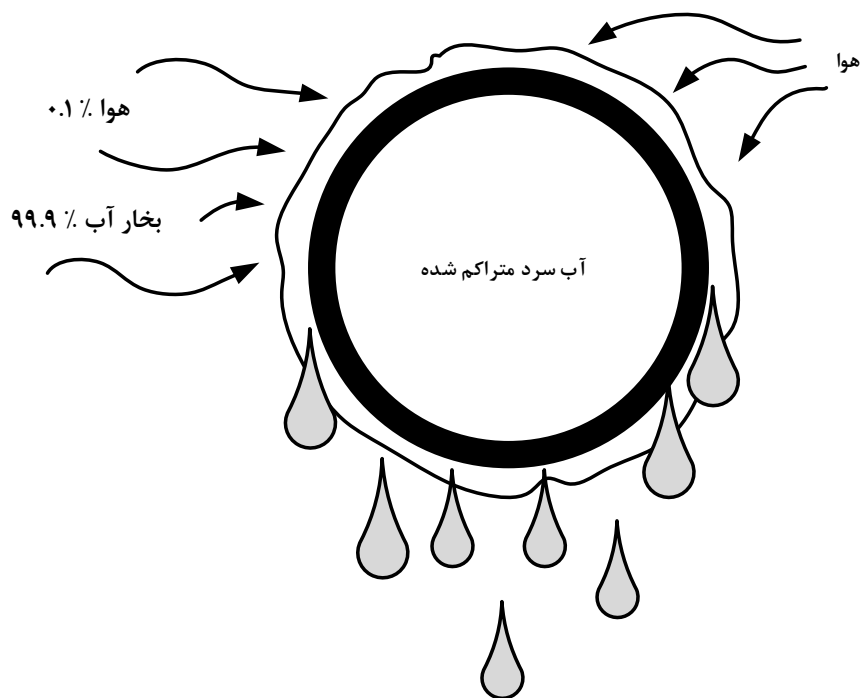
^۵ BFW: مخفف "Boiler Feed Water" آب خوراک بویلر، آبی که نرم یا یون‌زدایی شده و سپس هوازداپی شده است.

^۶ Supply: ورودی

• هوایی که وارد توربین‌های بخار می‌شود و به‌خاطر آب‌بند معیوب محور توربین و یا نشت خارجی کندانسور سطحی، در خلأ تخلیه می‌شود.

مشکل رایجی که انسداد بخار ایجاد می‌کند، در شکل ۱-۱۶ ترسیم شده است. بخار آب با سطح فلزی سرد لوله‌ها تماس برقرار می‌کند و چکه می‌کند.^۱ هوا، کربن‌دی‌اکسید یا مولکول‌های هیدروکربنی سبک غیرقابل چگالش، کندانس نمی‌شوند. از آنجا که سرعت بخار در کندانسور بخار آب، دست کم در بخش عقب مبدل، ماهیتاً کم است، مولکول‌های گازهای غیرقابل چگالش، در نزدیکی بخش بیرونی و سرد لوله باقی می‌مانند. به همین دلیل این مولکول‌ها مانع از این می‌شوند که تماس موثری بین لوله و بخار آب در حال میعان برقرار شود. به بیان دیگر، مقاومت لایه انتقال حرارت در سمت بخار آب مبدل، افزایش می‌یابد.

در یک مشاهده ساده، این‌گونه به نظر می‌رسد که مبدل رسوب کرده است و البته به دلیل پدیده انسداد بخار، همین اتفاق نیز افتاده است.

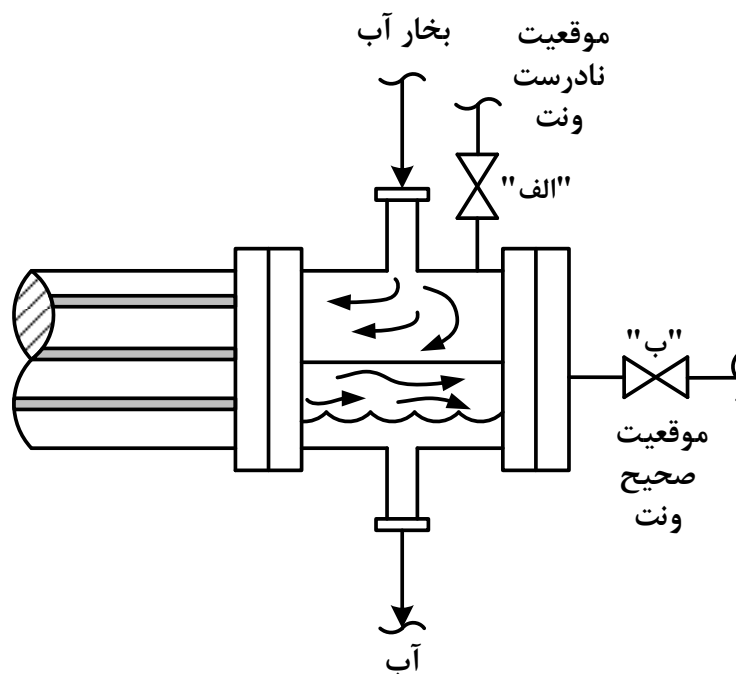


شکل ۱-۱۶ پدیده انسداد بخار، دبی چگالش بخار آب را کاهش می‌دهد.

^۱ Drips off: چکه کردن

نشتی لوله ریبویلر پروپان زدا

در گذشته یکبار مسئول عملیات برج تفکیک $C_3 - C_4$ واحد آلکیلاسیون با ظرفیت ۲۳۰۰۰ b/d بودم. ریبویلر بخار آب ۳۰ psig دچار نشتی لوله شده بود. نرخ انتقال حرارت که به وسیله کاهش جریان بخار آب ۳۰ psig اندازه گیری می شد، حدوداً ۵۰ درصد افت کرده بود. هرچند، اپراتورها می توانستند مجدداً نرخ انتقال حرارت را به سادگی با ونت کردن کلاهک مجاری^۱، تنظیم کنند. خروج از نقطه الف در بالای کلاهک مجاری، تأثیری در بازیابی میزان گرم کردن نداشت. فقط موقع بازشدن ونت در نقطه ب، نرخ چگالش بخار آب در ریبویلر افزایش یافت. موقعیت نقطه ب روی کلاهک مجاری، در زیر بافل جداکننده مسیر^۲ بود. ونت کردن در نقطه الف، صرفاً بخار آب تازه را خارج می کرد. ونت کردن در نقطه ب، درست پس از چالش بخار آب، گازهای غیرقابل چگالش بخار بوتان را از لوله ها پاکسازی^۳ کرده و سبب می شد که انسداد بخار گازهای غیرقابل چگالش چسبیده به بخش بیرونی لوله ها خارج شوند.



شکل ۱۶-۲ به حداقل رساندن انسداد بخار به وسیله ونت کردن در نقطه (ب) به جای (الف).

^۱ Channel head: کلاهک مجاری

^۲ Pass Partition Baffle: بافل جداکننده گذرها

^۳ Purge: پاک سازی

ونت کردن از یک ریپویلر ترموسیفون عمودی

چگونه می‌توان گازهای غیرقابل چگالش یک ریپویلر عمودی را که در آن بخار آب، در قسمت پوسته جریان دارد و ساختار آن نیز معمولی است، ونت کرد؟ در پاسخ باید گفت که میعان‌ات را متناوباً از ونت (ج) به فاضلاب^۱ تخلیه کنید (شکل ۱۶-۳). با توجه به تجارب گذشته، این پاسخ قابل قبول نیست. اما چاره دیگری نیست.

تجمع کربن دی‌اکسید

همیشه کربن دی‌اکسید، بخار آب را آلوده می‌کند. سابقاً وقتی BFW به وسیله نرم‌سازی با آهک داغ^۲ آماده می‌شد، تجمع کربن دی‌اکسید، یک مشکل جدی محسوب می‌شد. اما حتی با وجود یون‌زدایی^۳ مدرن BFW، آلودگی کربناتی برای BFW ایجاد خواهد شد و نهایتاً مقادیری کربن دی‌اکسید در بخار آب موجود خواهد بود. در یکی از پالایشگاه‌ها، ضرایب انتقال حرارت یک بوتان‌زدا، در یک دوره زمانی یک هفته‌ای، کاهش یافت. این اتفاق تا زمانی که کربن دی‌اکسید از کلاhek مجاری به بیرون رانده نشده بود، ادامه یافت. ریپویلر، یک مبدل افقی بود و بخار در سمت لوله جریان داشت. پالایش‌گر^۴، شیر را به نازل نقطه (ب) وصل نکرده بود (شکل ۱۶-۲) و به ناچار، کلاhek مجاری را با کنارگذر^۵ کردن تله بخار^۶ میعان‌ات، به‌صورت دوره‌ای از CO₂ تخلیه می‌کرد.

تجمع کربن دی‌اکسید به جز انسداد بخار و در نتیجه کاهش نرخ انتقال حرارت، سبب افزایش تشکیل اسید کربنیک (H₂CO₃) می‌شود. این اسید حتی در pH متوسط ۶ نیز، موجب خوردگی لوله‌های فولادی کربنی می‌شود[3].

^۱ Sewer: فاضلاب

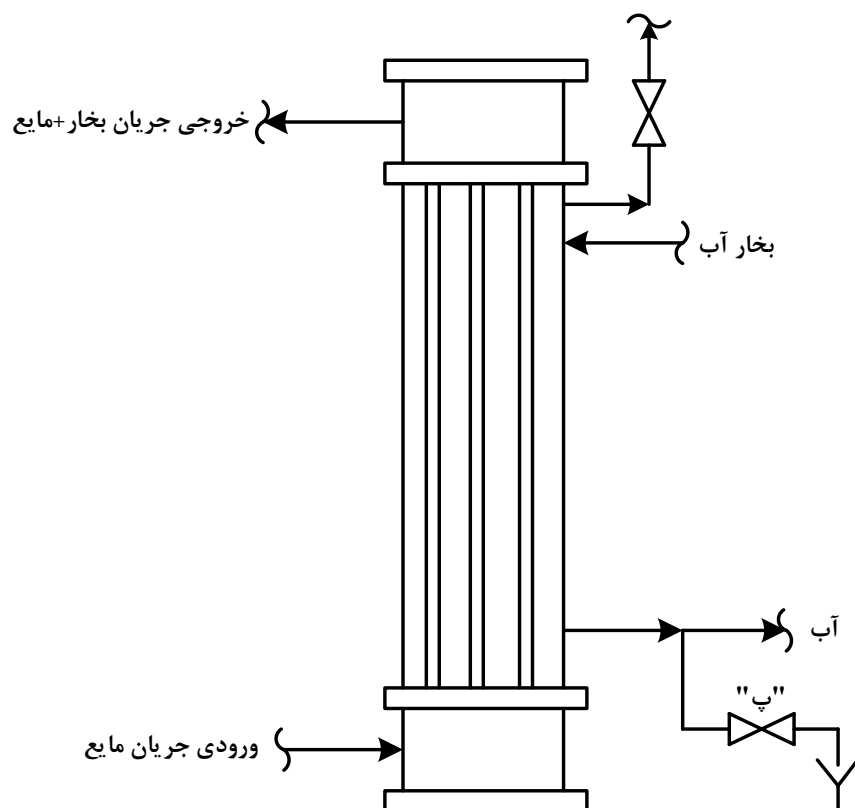
^۲ Hot lime softening: نرم‌سازی با آهک داغ

^۳ Demineralization: یون‌زدایی

^۴ Refiner: پالایش‌گر

^۵ Bypass: کنارگذر

^۶ Steam trap: تله بخار



شکل ۱۶-۳ ونت کردن از ریویلر عمودی با گردش ترموسیفون، به خوبی انجام نمی‌شود.

نشتی هوا در کندانسورهای سطحی

فشار برگشتی^۱ بیش از اندازه در تخلیهٔ اژکتور، مشکل متداولی است که در برج‌های خلأ، به دلیل ضرایب انتقال حرارت پایین در کندانسورهای سطحی پایین‌دست مشاهده می‌شود. مشکلاتی که کندانسورهای سطحی دارند، عبارتند از:

- تجمع میعان‌ات در سمت پوسته؛
- جرم‌گیری آب در سمت لوله؛
- انسداد بخار در سمت پوسته؛

در حالی که بیشترین انسداد بخار در برج‌های خلأ پالایشگاه به‌خاطر گاز کراکینگ^۲ ایجاد می‌شود (و نه نشت هوا)، اما در مقالات و منابع علمی مربوطه، برای توضیح این مشکل، تأکید بر نشت هوا در کندانسورهای سطحی خلأ

^۱ Back pressure: فشار برگشتی

^۲ Cracked gas: گاز کراکینگ

خروجی توربین بخار دارند⁴]. فرقی نمی‌کند که گاز موردنظر، هیدروژن، متان، اتان، H_2S یا هوا باشد، در هر صورت، مشکل و راه حل مشابه هم هستند.

بافل هوای کندانسور سطحی

مقدار «U» که معمولاً برای یک کندانسور سطحی برج خلأ پالایشگاه طراحی می‌شود، تقریباً $180 \text{ btu/h/}^\circ\text{F/ft}^2$ است. در عمل، مقادیر U واقعی حتی برای کندانسورهای سطحی تمیز نیز، حدود $40 - 80 \text{ btu/h/}^\circ\text{F/ft}^2$ است. ظاهراً مشکل اصلی، نشت بخار آب در اطراف آب‌بندهای برگی شکل یا نوارهای آب‌بند^۱ است (شکل ۱۶-۴). همین موضوع باعث می‌شود بخار آب ورودی کندانسور، بیشتر لوله‌ها را کنار گذر^۲ کرده و بار اژکتور پایین دست زیاد شود⁵. بهترین روش‌ها برای کندکردن این نوع نشتی عبارتند از:

- قبل از اینکه دسته لوله دوباره داخل پوسته قرار بگیرند، نوارهای آب‌بند باید بین $1/2$ تا $1/4$ اینچ از قطر داخلی پوسته^۳ پهن‌تر تنظیم شوند تا خرد نشوند.
- جنس مواد تشکیل‌دهنده نوار آب‌بند باید از فولاد ضد زنگ ۳۱۶ با درجه انعطاف‌پذیری خاصی باشد.
- باید حداقل از سه جفت نوار آب‌بند استفاده شود.

همچنین، طراحی بافل‌های نگهدارنده^۴ لوله باید به گونه‌ای باشد تا بخار محبوس در زیر بافل هوا بتواند بدون مانع از اژکتور خارج شود (شکل ۱۶-۴). با توجه به شکل ۱۶-۵، ارتقا پوسته کندانسور، به تحقق این هدف کمک می‌کند.

موقعیت ورودی آب خنک‌کننده

در یک واحد پالایشگاهی با برعکس کردن جریان آب خنک‌کننده، به بهبود عملکرد پیش‌کندانسورهای^۵ برج خلأ کمک کردم. در مورد کندانسورها یک قانون کلی وجود دارد که طبق آن، ورودی آب سرد در بخش پایین کلاhek مجاری و خروجی آب گرم در بخش بالای کلاhek مجاری باشد.

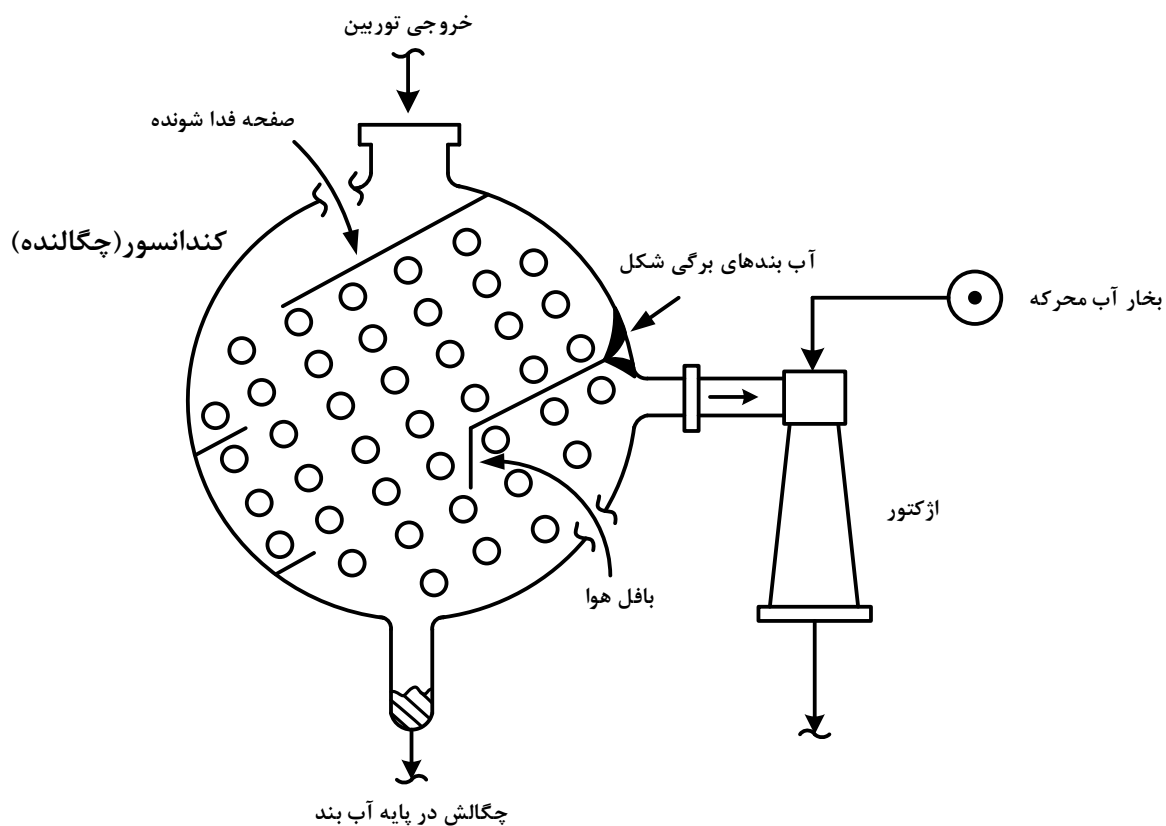
^۱ Seal strips: نوارهای آب‌بندی

^۲ Bypass: کنارگذر

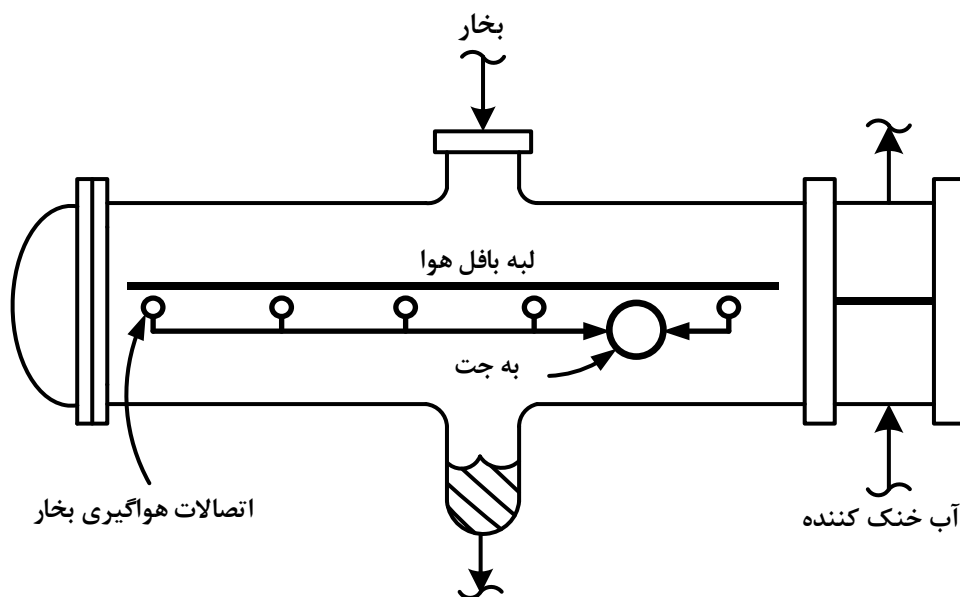
^۳ Shell ID: قطر درونی پوسته

^۴ support baffles: بافل‌های نگهدارنده

^۵ Precondensers: پیش‌کندانسورها



شکل ۴-۱۶ انسداد بخار، موجب افزایش فشار عملیاتی کندانسور سطحی و توان توربین (برحسب اسب بخار) می‌شود.



شکل ۵-۱۶ اتصالات هواگیری بخار، زیر لبه بالایی بافل هوا، انسداد بخار را کم می‌کنند.

شیوه مناسب برای کندانسورهای سیستم خلأ این است که ورودی آب خنک کننده تا جایی که امکان دارد، به نازل خروجی بخار که به اژکتور پایین دست جریان دارد، نزدیک شود. با این کار، دمای بخار خروجی به اژکتور به حداقل می‌رسد. اگر دمای خروجی بخار پایین تر باشد، محتوای بخار آب بخار ورودی به اژکتور، کاهش می‌یابد. این امر لود اژکتور را کاهش می‌دهد که در نتیجه، خلأ بزرگتری ایجاد می‌شود.

اگر دمای خروجی سیال بیشتر شود، جای نگرانی نیست. این دما، جریان خروجی بخار را کنترل نمی‌کند. در واقع، کاهش دمای کندانس خروجی، نشانه‌ای از تجمع و بازگشت کندانس است. یکی از روش‌های متداول برای کاهش عملکرد کندانسور، غوطه‌وری لوله‌های کندانسور در میعان‌ات است. برگشت میعان‌ات به دلایل زیر رخ می‌دهد:

- نشستی پایه‌های آب‌بند؛
- لجن در درام آب‌بند؛
- سطح بالای مایع در درام آب‌بند؛
- فشار بیش از حد در درام آب‌بند؛
- واکس در پایه‌های آب‌بند.

اگر سطح مایع تا حدی بالا رود که لبه زیرین بافل هوا را بپوشاند، شکاف تیزی در خلأ ایجاد می‌شود (شکل ۱۶-۴). دلیل این موضوع در یکی از موارد این بود که پمپ میعان‌ات درام آب‌بند، ظرفیت کافی نداشت. سطح بالای مایع در درام آب‌بند، میعان‌ات پایه‌های آب‌بند را به کندانسور برمی‌گرداند.

تأثیر لوله‌های صاف ریبویلر

در یکی از موقعیت‌های کاری‌ام، یک ریبویلر ترموسیفون گردشی^۱ افقی داشتم که بخار آب در لوله جریان داشت و لوله‌گذاری مجدد شده بود. ریبویلر، مربوط به سیستم برج تفکیک نرمال بوتان-ایزوبوتان بود. درصد بالایی از لوله‌های فولادکربنی قدیمی ریبویلر، به‌خاطر نشستی مسدود^۲ شده بودند. افزون‌براین، سطح خارجی لوله‌ها به‌خاطر خوردگی زیاد، ناهموار و متخلخل بود. وقتی دسته لوله جدید نصب شد، ظرفیت آن کمتر از نصف دسته قدیمی تر بود که دور انداخته بودند.

^۱ Circulating Thermosyphon Reboiler: ریبویلر ترموسیفون در گردش

^۲ Plug: مسدود شدن

مشکل این بود که محل‌های تشکیل جوش هسته‌ای^۱ از بین رفته بودند. تخلخل سطح خارجی لوله‌ها، سرعت تبخیر نرمال بوتان را، افزایش می‌دادند. لوله‌های صاف در دسته لوله جدید باعث شدند تا در شرایطی که شار محدود^۲ است قرار بگیرند^۳]. در لوله‌های صاف در این موقعیت ضریب انتقال حرارت 12000 btu/h/ft^2 است.

برای برطرف کردن شرایط محدودیت شار که ظاهراً به خاطر حذف ناهمواری سطح خارجی لوله ایجاد می‌شود، مسیر بخار آب ورودی به انشعاب اصلی^۳ بخار آب پرفشار پالایشگاه فشار با فشار 100 psig برقرار شد و مسیر جریان بخار آب با فشار 30 psig مسدود شد. این کار باعث شد ظرفیت ریبویلر بیشتر کاهش یابد. در نهایت، دسته‌لوله جدید ریبویلر از پوسته آن خارج شد و به منظور بازیابی سطوح زبر، به شدت شن‌شویی^۴ شد. پس از آن، عملکرد ریبویلر بهتر شد.

یکی از روش‌های جایگزین و احتمالاً رایج‌تر برای اجتناب از این مشکل، این است که با استفاده از یک پوشش فلزی سینتری در سطح خارجی لوله‌ها، یک سطح زبر و ناهموار را برای ریبویلر ایجاد کنید. این پوشش، «شار بالا»^۵ نامیده می‌شود.

مافوق گرم‌زدایی^۶ بخارها

جریان خروجی از کمپرسور پروپیلن، به‌خاطر گرمای ناشی از فشرده‌سازی، مافوق گرم شد. با وجود آن که احتمال دارد تقریباً ۸۰ تا ۹۰٪ از ظرفیت کندانسورهای کمپرسور در خط پایین‌دست آن، صرف دفع گرمای نهان شده و فقط حدود ۱۰ تا ۲۰٪ آن، صرف دفع گرمای محسوس می‌شود، نسبت بسیار بزرگ‌تری از ۱۰ الی ۲۰٪ از مساحت کندانسور، به جای اینکه به میعان اختصاص یابد، صرف مافوق گرم‌زدایی می‌شود. این پدیده، پیامد ضریب انتقال حرارت نسبتاً پایین برای دفع گرمای محسوس است.

اسپری کردن جریان پسر (جریان لغزشی) محصول پروپیلن مایع به خروجی کمپرسور، در عین حال که اختلاف دمای نیرو محرکه را کاهش می‌دهد، به دلیل عدم‌نیاز به مافوق گرم‌زدایی جریان خروجی کمپرسور و تبادل حرارت مستقیم با لوله‌های کندانسور، ظرفیت کلی کندانسور را افزایش می‌دهد.

^۱ Nucleate boiling sites: محل‌های تشکیل جوش هسته‌ای

^۲ Flux limited: وضعیت محدود شار

^۳ Header: هدر، مجرای اصلی، انشعاب اصلی، لوله مادر

^۴ Sand blast: شن‌شویی

^۵ High flux: شار بالا

^۶ De-superheating: گرمایش‌زدایی

در این روش، میعانات بخار آب به بخار آب مافوق گرم ورودی ریبویلر تزریق می‌شود تا کارایی ریبویلر افزایش دهد. این کار، با تغییر نرخ تزریق میعانات بخار آب به بخار آب مافوق گرم با فشار ۴۰۰ psig و دمای ۶۵۰ درجه فارنهایت و ثبت تأثیر آن بر روی ظرفیت ریبویلر ترموسیفون^۱ عمودی، انجام شد. این کار چندان فایده‌ای نداشت؛ اما باز هم قابل ملاحظه بود. احتمالاً این کار، برای یک ریبویلر جدید مناسب نیست؛ در عوض، روش موثری برای افزایش ظرفیت یک ریبویلر قدیمی که از بخار آب مافوق گرم بهره می‌برد، است. همچنین برای کندانسور موجود در خروجی یک کمپرسور هیدروکربن سبک، کاراست.

منابع

- [3] N.P. Lieberman, Troubleshooting Process Operations, fourth ed., PennWell Publications, 2013.
- [4] R.E. Putman, Steam Surface Condensers, ASME Press, 2001.
- [5] N.P. Lieberman, Troubleshooting Vacuum Systems, Wiley Publications, 2012.
- [6] Kern, Process Heat Transfer, McGraw Hill, 1950, pp. 459–460.

^۱ Thermosyphon: ترموسیفون

واحد تقطیر نفت خام - رسوب مبدل حرارتی

چکیده:

بالادست نفت خام نمک‌زدایی شده باید در سمت پوسته قرار گیرد. سرعت جریان متقاطع در سمت پوسته باید حداقل 3 m/s و ترجیحاً 5 m/s باشد. برای نفت خامی که در سمت لوله قرار می‌گیرد، سرعت باید بین 5 m/s تا 8 m/s باشد. اگر سرعت سیال در سمت لوله 10 m/s تا 12 m/s باشد، سبب فرسایش خواهد شد. برای ویسکوزیته بالا (پس‌ماند خلأ نفت خام) در سمت پوسته، فاصله بین لوله‌ها باید به صورت زیر باشد:

- آرایش مربعی دوران یافته؛
- نیم اینچ فاصله بین قطر بیرونی لوله‌ها؛
- استفاده از لوله‌های یک اینچی؛
- لوله‌های آلایژی صاف و تمیز.

کلمات کلیدی:

گام یا زاویه؛ فاصله بین لوله‌ها؛ سمت پوسته؛ رسوب؛ جریان متقاطع؛ سرعت؛ فرسایش؛

«فقط به آن دسته نگاه کن! نصف لوله‌ها مسدود^۱ شده‌اند و همه لوله‌های مسدود شده، خم شده‌اند. به آن تیغه جداکننده مسیر^۲ کلاhek مجاری نگاه کن! آن هم خم شده است. به سمت نازل خروجی کلاhek مجاری^۳ رانده شده است. آن بافل تقسیم‌بندی لعنتی نیز خودش را از واشر^۴ صفحه لوله کلاhek مجاری^۵ دور می‌کند (شکل ۱۷-۱)»

مایک گرینلی^۶، سرپرست خط لوله شماره ۱۲، همچنان فکر می‌کرد که من مقصر خرابی لوله‌ها هستم. این موضوع صحت داشت که من مقدار عملیاتی «U» (ضریب انتقال حرارت) را چنین محاسبه کرده بودم:

$$\bullet \quad 8 \text{ تا } 9 \text{ btu/h/ft}^2/\text{°F}$$

در مقایسه با مقدار ضریب طراحی که، $45 \text{ btu/h/ft}^2/\text{°F}$ بود.

افزون‌براین، توصیه کرده بودم که مبدل را از خط خارج کنند تا تمیز شود. مایک برای جداکردن مبدل خیلی زحمت کشید و این موضوع، او را عصبانی‌تر می‌کرد. «مایک، چرا از دست من عصبانی هستی؟ این پیامدی اجتناب‌ناپذیر برای رسوب‌گذاری در سمت لوله است. من مقصر این اتفاق نیستم. تقصیر شما است.»

«بین لیبرمن! تو به ما گفتی E-307 را از خط خارج کنیم تا تمیز شود. فکر تو بود. هیچ اشاره‌ای به لوله‌ها و خیمدگی تیغه جداکننده نکرده بودی. حالا ناچارم تمام دسته لوله‌ها را تعویض کنم. به‌علاوه، یک تیغه جداکننده کلاhek مجاری جدید هم لازم دارم. مرد مومن! فکر کردی که چطور می‌خواهم سیرکولاسیون پمپی^۷ دیزل را بدون E-307 خنک کنم؟ و قطعاً بیست درجه پیش‌گرمایش نفت خام را از دست می‌دهیم.»

«مایک، دوست داری توضیح بدهم که چطور این اتفاق می‌افتد و ما چه کار می‌توانیم بکنیم تا لوله‌های جدید دیگر خراب نشوند؟»

«شما مهندس‌ها، همیشه فقط حرف می‌زنید. بگو ببینم. توضیح بده. تو وراجی کن؛ من هم قهوه‌ام را می‌نوشم.»

^۱ Plug: مسدود شدن

^۲ Pass Partition Baffle: بافل جداکننده گذرها

^۳ Channel head: کلاhek مجاری

^۴ Gasket: واشر، درزبند، گسکت

^۵ Channel head tube sheet: صفحه لوله کلاhek مجاری

^۶ Mike Greenly: مایک گرینلی

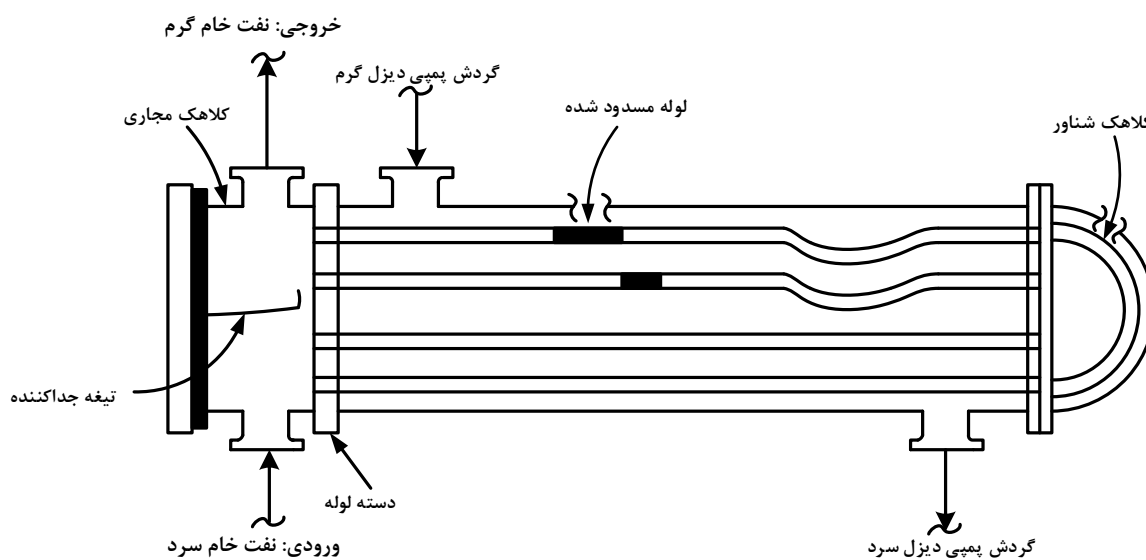
^۷ Pumparound: سیرکولاسیون پمپی

نفت خام باید در کدام سمت باشد؟

نود درصد پالایشگاه‌ها، نفت خام را در سمت اشتباه مبدل حرارتی پوسته و لوله قرار می‌دهند؛ یعنی در سمت لوله بالادست نمک‌زدا^۱. معمولاً سیال‌هایی با ویسکوزیته بالا مانند نفت خام، باید در سمت پوسته قرار گیرند. در سمت پوسته، به‌خاطر تلاطمی^۲ که من آن را جریان گردابی^۳ می‌نامم، جریان یکنواخت و هموار ایجاد نمی‌شود؛ چراکه مایع عمود بر لوله‌ها و بین بافل‌های نگهدارنده^۴ لوله جریان پیدا می‌کند.

اما وجود نفت خام کثیف در بخش پوسته باعث می‌شود که نتوانیم به‌راحتی پوسته را تمیز کنیم؛ مگر اینکه، شرایط زیر برقرار باشند:

- فاصله لوله = $1/5$ اینچ؛
- اندازه لوله = ۱ اینچ؛
- آرایش لوله = مربعی دوران‌یافته.



شکل ۱۷-۱ تیوب‌های مسدودشده موجب به وجود آمدن نقص در تیغه جداکننده کلاهیک مجاری می‌شوند.

این شیوه طراحی را در پالایشگاه نفت استاندارد آماده به کار واقع در آروبا^۵، آموختم. در این روش، کانال‌های $1/2$ اینچی برای تمیزکاری بین لوله‌ها تعبیه می‌شوند. متأسفانه بیشتر پالایشگاه‌ها، بدون توجه به ویسکوزیته نفت خام،

^۱ Desalter: نمک‌زدا

^۲ Turbulence: تلاطم

^۳ Vortex shedding: جریان گردابی

^۴ support baffles: بافل‌های نگهدارنده

^۵ Aruba: آروبا

جریان آن را در سمت لوله قرار می‌دهند. بهترین موقعیت قرارگیری برای موادی با ویسکوزیته بالا، در سمت پوسته است. بدین ترتیب، اتلاف انتقال حرارت در اثر جریان هموار و یکنواخت (که احتمالاً به دلیل Re ^۱ کم در سمت لوله ایجاد می‌شود)، رخ نمی‌دهد:

$$Re = \frac{(\text{قطر لوله}) \cdot (\text{سرعت}) \cdot (\text{چگالی})}{\text{ویسکوزیته}}$$

تنها روش واقع‌بینانه برای خطای ماندگار^۲ ویسکوزیته بالا، سرعت زیاد است؛ با این وجود، سرعت‌های بالاتر از ۱۲-۱۴ فوت در ثانیه، موجب ساییدگی می‌شود.

چرا لوله‌ها کثیف می‌شوند؟

در سیستم‌های نفت خام، لوله‌ها به چهار دلیل کثیف می‌شوند:

- سرعت پایین؛
- جرم و کثیفی؛
- گرما؛
- زبری سطح.

سرعت پایین، یک مشکل بزرگ است. اگر سرعت، کمتر از ۳ فوت بر ثانیه باشد، رسوب‌گرفتگی را تشدید می‌کند. سرعت‌های بالاتر از ۱۲-۱۴ فوت بر ثانیه نیز موجب ساییدگی می‌شوند. مشکل اینجاست که وقتی جرم گرفتن لوله‌ها به آرامی شروع می‌شود:

- جریان کمتری خواهند داشت؛
- از آنجا که جریان کمتر است، گرم‌تر می‌شوند.
- سرعت آن نیز به‌خاطر کاهش جریان، کاهش می‌یابد.
- کاهش جریان سبب می‌شود که رسوب‌گرفتگی بیشتری ایجاد شود.
- کاهش جریان موجب داغ‌تر شدن لوله‌ها می‌شود.

^۱ Re: Reynolds number عدد رینولدز،

خطای ماندگار، اختلاف موقعیت جدید سطح نسبت به سطح مطلوب برای خنثی کردن متغیرهای عملیاتی را خطای ماندگار می‌گویند. ^۲ Offset:

شرایط، مشابه زمانی است که حلقه بازخورد مثبتی ایجاد شده است تا ایجاد رسوب کند. در عین حال و به دلیلی مشابه، جریان نفت خام در تیوب‌هایی که در ابتدا با سرعت بیشتری آغاز به کار کردند، نسبت به جریان آهسته در لوله‌های جرم گرفته، بیشتر و بیشتر می‌شود (جریان نفت خام در تیوب‌هایی که سرعت جریان در آن‌ها کمتر است، توسط رسوب پس زده می‌شوند). این جریان اضافی، سرعت جریان در تیوب‌هایی که در ابتدا با سرعت بیشتری شروع به کار کردند را افزایش می‌دهد. این سرعت بالاتر تجمع ذرات جرم در این تیوب‌ها را کندتر کرده و همچنین آن‌ها را خنک تر نگه می‌دارد. نرخ غیریکنواخت رسوب‌گذاری در لوله‌های مجزا تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که:

- درصدی از لوله‌ها به‌طور کامل مسدود شده و دمای آن‌ها به دمای سیال درون پوسته می‌رسد.
 - درصدی از لوله‌ها، تمیز، آزاد و سردتر کار کرده و به‌قدری سریع کار کنند تا رسوب بیشتری ایجاد نشود.
- لوله‌های مسدود شده و داغ، دچار انبساط حرارتی می‌شوند. اما لوله‌های تمیز و سردتر، دمای کمتری داشته و کمتر دچار انبساط حرارتی می‌شوند. لوله‌های سردتر موجب محدود شدن انبساط افقی دسته لوله می‌شوند (شکل ۱۷-۱). لوله‌های سردتر و کوتاه‌تر، انبساط کلاهدک شناور^۱ را محدود می‌کنند.

اما لوله‌های داغ، منبسط می‌شوند. هیچ نیرویی در جهان نمی‌تواند مانع از انبساط آن‌ها شود. بدین ترتیب، از آنجا که آن‌ها نمی‌توانند در جهت افقی منبسط شوند، تنها کار ممکن را انجام می‌دهند. لوله‌های داغ، خم می‌شوند و تاب برمی‌دارند. وقتی ما یک دسته لوله را در مبدل پیش‌گرم شده نفت خام بیرون می‌کشیم، با چنین صحنه‌ای مواجه می‌شویم. این پدیده ناشی از تاثیر نرخ‌های انبساط حرارتی متفاوت بین لوله‌های گرم و لوله‌های سرد است.

تأثیر بر انتقال حرارت

لوله‌های کج و معوج، قسمت‌هایی از سمت پوسته را مسدود و محدود می‌کنند. جریان سمت پوسته در این بخش‌های مسدود شده، راکد می‌ماند. این موضوع موجب ایجاد رسوب در سمت پوسته و انحراف جریان می‌شود. این مشکل با بیرون کشیدن دسته لوله مشخص می‌شود.

اگر نصف لوله‌ها مسدود شوند، فشار در سمت لوله از ۱۰ به ۴۰ psi می‌رسد. همچنین، اختلاف فشار در تیغه جداکننده کلاهدک مجاری به خاطر افزایش افت فشار، چهار برابر می‌شود (شکل ۱۷-۱). سرانجام، تیغه جداکننده، خم شده و از صفحه لوله کلاهدک مجاری^۲ دور می‌شود و پس از آن، مقداری از جریان نفت خام، تمام دسته لوله را

^۱ Floating head: کلاهدک شناور

^۲ Channel head tube sheet: صفحه لوله کلاهدک مجاری

کنارگذر^۱ می‌کند. کاهش سرعت جریان نفت خام بر اثر این کنارگذر کردن، با افزایش نرخ رسوب‌گذاری، به دلیل داغ‌شدن و گندشدن جریان در لوله‌ها، مشکل را جدی‌تر می‌کند.

زبری سطح

یکی از راه‌های کاهش رسوب‌گذاری در لوله‌هایی که با سرعت‌های کمتری کار می‌کنند، استفاده از لوله‌های صاف‌تر است. به این معنا که از لوله‌های آلیاژی استفاده کنید. فولاد ضد زنگ در سیستم‌های نفت خام توصیه نمی‌شود؛ چرا که دچار ترک‌خوردگی ناشی از تنش کلرید می‌شود. با وجود تمام موارد فوق، معمولاً نیم درصد از نفت خام در بالادست نمک‌زدا را، آب دریا تشکیل می‌دهد. اما می‌توان از لوله‌های کرومی مقاوم به خوردگی استفاده کرد. این لوله‌ها مدت‌زمان بیشتری صاف می‌مانند و به همین دلیل، تمیزتر هستند.

وقتی از لوله‌های آلیاژی به جای فولاد کربنی استفاده می‌کنید، تمام دسته‌ها شامل:

- لوله‌ها،
- بافل‌های نگهدارنده^۲،
- صفحات لوله،
- صفحه‌های فدا شونده (ضربه‌گیر)^۳،
- نوارهای آب‌بندی^۴،

را از مواد مشابهی تهیه کنید. به این ترتیب، فلزات متفاوت در معرض فاز آبی (برای مثال، آب نمک در نفت خام بالادست نمک‌زدا)، دچار خوردگی گالوانیک^۵ نمی‌شوند.

حداقل سرعت طراحی‌شده منطقی برای سمت لوله در مورد لوله‌های فولادی کربنی معمولی با توجه به نوع نفت خام می‌تواند به این صورت باشد:

- نفت خام سبک لوئیزیانا^۶ - ۵ فوت بر ثانیه؛

^۱ کنارگذر: Bypass

^۲ support baffles: بافل‌های نگهدارنده

^۳ Impingment plate: صفحه ضربه‌گیر، صفحه تصادم

^۴ Seal strips: نوارهای آب‌بندی

^۵ Galvanic corrosion: خوردگی گالوانیک، به خوردگی در اثر وجود اختلاف پتانسیل الکتریکی بین فلزات در ارتباط با یکدیگر گفته می‌شود. اختلاف

پتانسیل باعث شارش الکترون‌ها بین این دو فلز می‌شود.

^۶ Louisiana: لوئیزیانا

• نفت خام سنگین ونزوئلایی - ۱۰ فوت بر ثانیه.

با توجه به تجربیات محدودی که دارم، این سرعت‌ها را توصیه می‌کنم. قطعاً و مطمئناً سرعت‌های کمتر از ۳ فوت بر ثانیه موجب بروز مشکل، نرخ بالای رسوب‌گذاری در سمت لوله و کج و معوج شدن لوله‌ها می‌شوند.

افزایش تعداد گذرهای بخش تیوب

مایک گرین با خصومت شدیدی، به من نگاه کرد و گفت: «لیبرمن، باید این دسته لوله‌های خارج شده را با سرعت تیوب بالاتری طراحی می‌کردی!»

«مایک، من این مبدل‌ها را طراحی نکردم. طراحی واحد تقطیر نفت خام^۱ بر عهده یک شرکت طراحی مهندسی نفت مرکزی آمریکایی بود. من بی‌تقصیرم»

«بله لیبرمن، این یکی دیگر از خرابکاری‌های مهندسی تو بود! حالا باید چه کار کنیم آقای مهندس؟»

«باشد مایک. ما می‌توانیم ساختار گذر مبدل را عوض کنیم. گذرهای سمت لوله را از دو به چهار می‌رسانیم. دو تیغه جداکننده در کلاhek مجاری و نیز یک بافل جدید در کلاhek شناور^۲ خواهیم داشت (شکل ۱۷-۲). با این کار، سرعت در سمت لوله از سه فوت به شش فوت بر ثانیه یعنی دو برابر افزایش می‌یابد.»

«باشد نورم. اما باید هر دو صفحه لوله را دوباره ماشین‌کاری کنم. اما اگر مشکل رسوب‌گذاری لوله‌ها حل می‌شود، اشکالی ندارد. اما در مورد DP چطور؟ آیا افت فشار سمت لوله هم دو برابر نمی‌شود؟»

«نه مایک. با ضریب هشت افزایش می‌یابد؛ یعنی از ۵ به ۴۰ psi.»

«هشت! چرا نورم؟»

«به این دلایل:

۱. سرعت، دو برابر می‌شود.

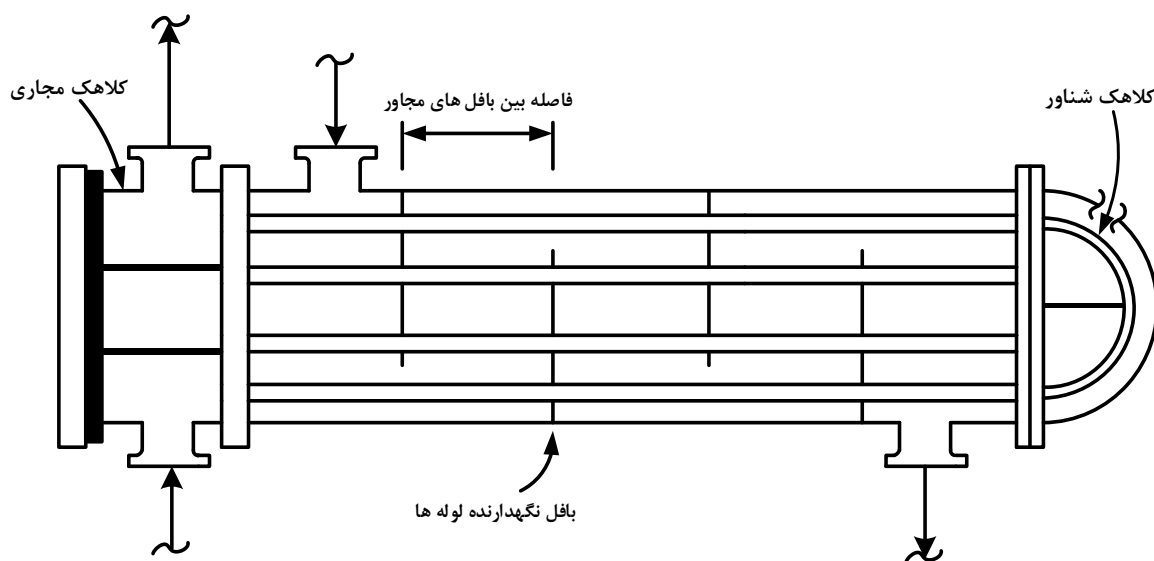
۲. افت فشار، با مربع سرعت و به صورت خطی تغییر می‌کند.

^۱ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

^۲ Floating head: کلاhek شناور

۳. طول گذر جریان نیز به دو برابر افزایش می‌یابد؛ چراکه نفت خام باید به جای عبور از دو گذر^۱ از چهار گذر عبور کند. یعنی ۸۰ فوت در مقایسه با ۴۰ فوت.»

«آهان؛ متوجه شدم. اما مطمئن نیستم که آیا با این افت فشار اضافی، هد اضافی کافی را برای پمپ شارژ نفت خام داریم یا خیر؟»



شکل ۱۷-۲ مبدل چهار گذر.

«مایک، زیاد هم بد نشد. سرعت بالاتر در سمت لوله سبب می‌شود که لوله رسوب نکند. رسوب گرفتن لوله‌ها موجب افت فشار در مبدل نفت خام می‌شود. به‌ویژه در صورتی که لوله‌ها را از فولاد کروم ۴۱۰ بسازیم که از لوله‌های فولادی کربنی صاف‌تر هستند، افت فشار نسبت به قبل نیز بیشتر خواهد شد؛ اما با در نظر گرفتن یک سال عملیات، شاید DP جدید نسبت به عملیات فعلی شما زیاد هم بد نباشد.»

«ببین نورم؛ فکر می‌کنم خیلی باهوش باشی. می‌توانی راهی پیدا کنی تا لوله‌های نفت خام تمیز باشند و در عین حال، دلتا P نفت خام نیز کم شود؟»

«نه مایک. مثل اینکه بخواهی در عین حال که به ازدواج^۲ با مارج^۲ پایدار بمانی، دوست دخترت را هم داشته باشی. این کار به نتیجه نمی‌رسد.»

«بله نورم! فهمیدم چه می‌گویی. نمی‌توان هر دو را با هم داشت.»

^۱ Two passes: دو گذر

^۲ Marge: مارج

رسوب‌زدایی آن-لاین^۱

«اما لیبرمن، اینجا را ببین. برای اینکه بتوانم یک مبدل پیش‌گرمایش نفت خام را بدون بیرون آوردن کامل آن، تمیز کنم، راهکاری داری؟»

پرسیدم: «مایک، چه چیزی در سر داری؟»

«مثلاً نوعی ماده شیمیایی جادویی را به نفت خام تزریق کنی تا بتوانی بدون اینکه دسته لوله‌ها را خارج کنی، مبدل را تمیز کنی. بدون این همه جداسازی، مسدود کردن^۲، زهکشی و هیدروبلاستینگ^۳؟ نورم؛ در مورد سمت پوسته سوالی ندارم. سیرکولاسیون پمپی^۴ دیزل و محصولات دیگر تمیز هستند. فقط سمت لوله‌های نفت خام رسوب گرفته‌اند.»

«بسیار خب مایک. اما فقط در مبدل‌های بالادست نمک‌زدا.»

«بله! آن‌ها از همه بدتر هستند.»

«شاید لازم باشد نکاتی را یادداشت کنی:

مرحله اول - شیر دروازه‌ای^۵ کنارگذر را در سمت نفت خام باز کن (شکل ۱۷-۳).

مرحله دوم - شیر ورودی بخش نفت خام را مسدود کن.

مرحله سوم - ۱۵ دقیقه صبر کن و سپس شیر ورودی نفت خام را باز کن و شیر کنارگذر را ببند.

لوله‌ها در مدت‌زمان ۱۰-۱۵ دقیقه تا دمای ۱۰۰-۲۰۰ درجه فارنهایت و نزدیک به دمای سمت پوسته گرم می‌شوند. رسوبات ناشی از گرد و غبار و کثیفی از داخل لوله‌ها به صورت تکه‌تکه جدا می‌شوند. ایجاد ناگهانی جریان نفت خام سبب می‌شود که رسوبات از لوله‌ها کنده شده و به نمک‌زدا برسند.»

«از کجا می‌دانی که این کار جواب می‌دهد لیبرمن؟»

^۱ On-Line Spalling: رسوب‌زدایی آن-لاین، رسوب‌زدایی در خط

^۲ Blinding: مسدود کردن

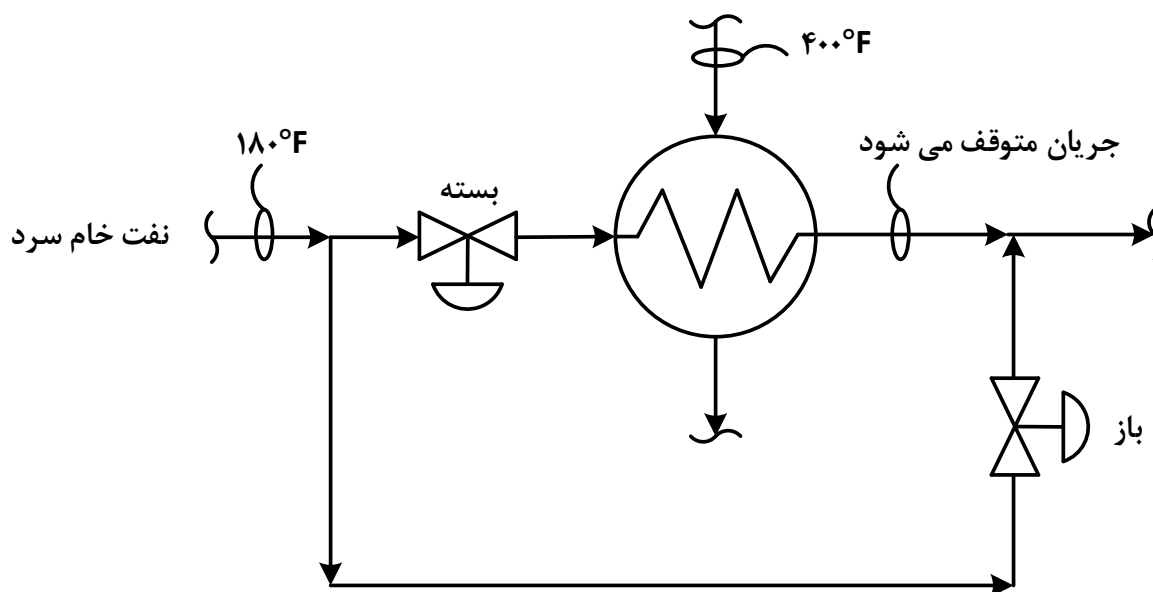
^۳ هیدرو بلاستینگ معمولاً به اسم واتر بلاست شناخته می‌شود و برای انجام آن تنها به یک اپراتور نیاز است در هیدرو بلاستینگ از یک جریان تحت فشار آب برای پاک کردن رنگ‌های قدیمی و مواد شیمیایی از روی سطح بدون آسیب‌زدن به ساختار اصلی قطعه استفاده می‌شود.

^۴ Pumparound: سیرکولاسیون پمپی

^۵ By-pass gate valve: شیر دروازه ای کنار گذر

«برای اینکه این روش را ماه قبل روی لوله شماره ۱۱ امتحان کردم آقای گرینلی. نرخ انتقال حرارت دو برابر و افت فشار نیز نصف شد.»

«نتیجه خوبی است نورمن. مثل جداسدن کک از تیوب هیتر احتراقی ست. ایده مشابهی است. امتحان کردنش بی ضرر است. اما چرا زودتر به من نگفتی؟ ای مهندس لعنتی. بلد نیستی چطور باید با ما مردم عادی برخورد کنی. شما مهندس‌ها در عالم هیپروت سیر می‌کنید.»



شکل ۱۷-۳ رفع گرفتگی مبدل پیش‌گرمایش نفت خام در سرویس.

سرعت جریان متقاطع^۱ در قسمت پوسته

اگر به یاد داشته باشید، قبلاً اشاره کردم که سیال‌هایی با ویسکوزیته بالاتر باید در پوسته مبدل جریان داشته باشند. بدین ترتیب، جریان یکنواخت و هموار و انتقال حرارت ضعیف در سمت لوله ایجاد نمی‌شود.

هرچند، در صورتی که سرعت جریان متقاطع به شدت پایین باشد، احتمال ایجاد جریان هموار و یکنواخت در سمت پوسته نیز، وجود دارد. منظور از سرعت جریان متقاطع، سرعت جریان بین لوله‌ها در لبه بافل‌های نگهدارنده^۲ تیوب

^۱ Cross-Flow Velocity: سرعت جریان متقاطع: سرعت سیال در زوایای عمود بر یک تیوب انتقال حرارت

^۲ Support baffles: بافل‌های نگهدارنده

است (شکل ۱۷-۲).

اگر این سرعت بالاتر از ۳ فوت بر ثانیه باشد، لوله‌ها دچار پدیده «جریان گردابی» می‌شوند. یعنی جریان مایع، عمود بر لوله‌ها خواهد بود. در نتیجه گردش و تلاطم ایجاد شده، لایه مرزی مقاومت فیلم انتقال حرارت، از بین می‌رود. بنابراین، «فاصله‌گذاری بافل» را مانند شکل ۱۷-۲ انتخاب می‌کنم تا سرعت جریان متقاطع بین ۳-۵ فوت بر ثانیه باشد. گاهی لازم است فاصله بین بافل‌ها کم و حدود ۴ اینچ باشد و در عین حال، بافل‌های زیادی برای هر پوسته تعبیه شوند. سابقاً تبدلی با ۵۰ بافل نگهدارنده لوله در یک پوسته مبدل داشتیم!

با فاصله‌گذاری بافل‌ها به صورت نصف فاصله قبل و افزایش تعداد آنها به دو برابر، افت فشار سمت پوسته با ضریب هشت (نه چهار) افزایش می‌یابد. سرعت هر دو پوسته به میزان دو برابر افزایش می‌یابد و از طرفی، افت فشار و طول مسیر جریان، با مربع سرعت تغییر می‌کند.

من هیچوقت فاصله‌گذاری بافل‌ها را برعهده فروشنده مبدل نمی‌گذارم. خودم این فاصله را تعیین می‌کنم. افزون‌براین، تعداد گذرهای سمت لوله، فاصله بین لوله‌ها، نوع آرایش لوله (سه گوش یا مربعی دوران یافته) و اندازه لوله‌ها را نیز مشخص می‌کنم.



راهنمای افزایش ظرفیت واحدهای فرآیندی

چکیده:

برای افزایش ظرفیت یک واحد فرآیندی در پالایشگاه یا پتروشیمی، باید عملکرد آن را به صورت میدانی بررسی کنیم. استفاده از شبیه‌سازهای کامپیوتری اغلب منجر به طراحی رضایت بخشی نمی‌شود. مشکلات عبارت‌اند از: تعیین راندمان واقعی تفکیک سینی، عوامل رسوب‌گیری مبدل‌های حرارتی، تلفات اصطکاکی در خطوط لوله و بهینه‌سازی اکسیژن اضافی در هیترهای احتراقی.

استنتاج از یک نمونه اولیه یا یک آزمایش عملی، بسیاری از عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای فرآیندی را حذف می‌کند. همچنین جنبه‌هایی از تسهیلات موجود که نیاز به تغییراتی برای بهبود عملکرد فرآیند دارند، می‌توانند برای اصلاح کردن، برجسته شوند.

کلمات کلیدی:

آزمایش عملکرد؛ نمونه کامپیوتری؛ عوامل رسوب‌گذاری؛ راندمان سینی؛ تلفات اصطکاکی؛ اکسیژن اضافی؛ افزایش ظرفیت فرآیند

در مجموع، دو رویکرد متفاوت، جهت بهینه‌سازی واحدهای فرآیندی و به‌منظور افزایش راندمان و یا ظرفیت، وجود دارد:

۱. مدل‌سازی کامپیوتری؛

۲. تعمیمی از شرایط عملیاتی فعلی واحد پالایشگاهی.

من در نمونه‌های زیر، سه داستان واقعی را بازگو می‌کنم که بیانگر این مشکل مهم هستند و لازم است مهندسان فرآیند، با آن آشنا شوند.

پس از تجربیاتی که طی سالیان متمادی در مورد افزایش ظرفیت واحدهای فرآیندی دارم، به این موضوع پی برده‌ام که، بهترین روش برای خلق طرحی که الزامات پالایشگاه را برآورده سازد، توجه به نمونه‌های اولیه^۱ و بررسی عملکرد واحد، به‌صورت شخصی‌ست.

در مجموع، می‌توان چنین نتیجه گرفت که هم‌اکنون، مدل‌سازی کامپیوتری برای ارتقا برج‌های تقطیر، مبدل‌های حرارتی، فلش‌درام‌ها، سیستم‌های لوله‌کشی و تجهیزات دوار، مورد قبول قرار گرفته‌اند. در صورتی که در دهه ۱۹۶۰ اوضاع این‌گونه نبود. پرسشی که در این فصل به آن پرداخته می‌شود، این است که آیا مدل‌سازی رایانه‌ای به بهبود طراحی فرآیند کمک می‌کند یا سبب می‌شود که حواسمان از مشکلات اصلی پرت شود و از آن‌ها غافل شویم؟ شیوه‌های قدیمی غالباً مبتنی بر تعمیمی از نمونه‌های اولیه، داده‌های میدانی و آزمون‌های عملکرد واحد بودند.

تاریخچه موردی برج تبخیر آبی نفت خام^۲

یک نمونه از مشکلاتی را که معمولاً با آن‌ها مواجه می‌شوم، در شکل ۱۸-۱ نشان داده‌ام. این یک فلش‌درام برج تقطیر است. ظرفیت جذب گرما، واحد تقطیر نفت خام^۳ را محدود کرده بود. زمانی که مشاهداتم را ثبت کردم، دمای محیط حدود ۳۰ درجه فارنهایت بود. شرایط عملیاتی مورد مشاهده نیز، به قرار زیر بود:

- فشار در بالای برج: ۲۶ psig؛
- دمای بخار خروجی: ۴۳۸ °F؛
- مقدار جریان بخار: ۱۶۲۰۰۰ lb/h؛

^۱ Prototypes: پروتوتایپ‌ها، نمونه‌های اولیه

^۲ Preflash Tower: برج تبخیر آبی نفت خام

^۳ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

- مقدار جریان مایع: ۳۹۰۸۰۰ lb/h.

من با استفاده از یک جریان سنج اریفیزی، جریان بخار را، ۱۶۲۶۰۰ lb/h محاسبه کردم. محاسباتم نیز براساس یک تحلیل آزمایشگاهی از گاز آلوده^۱ خروجی جمع‌آوری شده در یک خنک‌کننده نمونه^۲ بود. جریان مایع در دو نقطه اندازه‌گیری شد:

۱. در دهانه خروجی پمپ؛
 ۲. در جریان سنج‌های مجزای دو مسیره واقع در ورودی کوره پیش‌گرمایش نفت خام.
- هر دو جریان مایع مشاهده شده، پذیرفته شدند.

مقایسه شبیه‌سازی

یک شبیه‌سازی کامپیوتری، از تبخیر ناگهانی نفت خام API °۳۷ تحت شرایط زیر:

- °F ۴۳۸؛
- psig ۲۶؛
- BSD ۴۵۱۰۰؛

حاکی از این است که جریان‌های بخار و مایع به شرح زیر هستند:

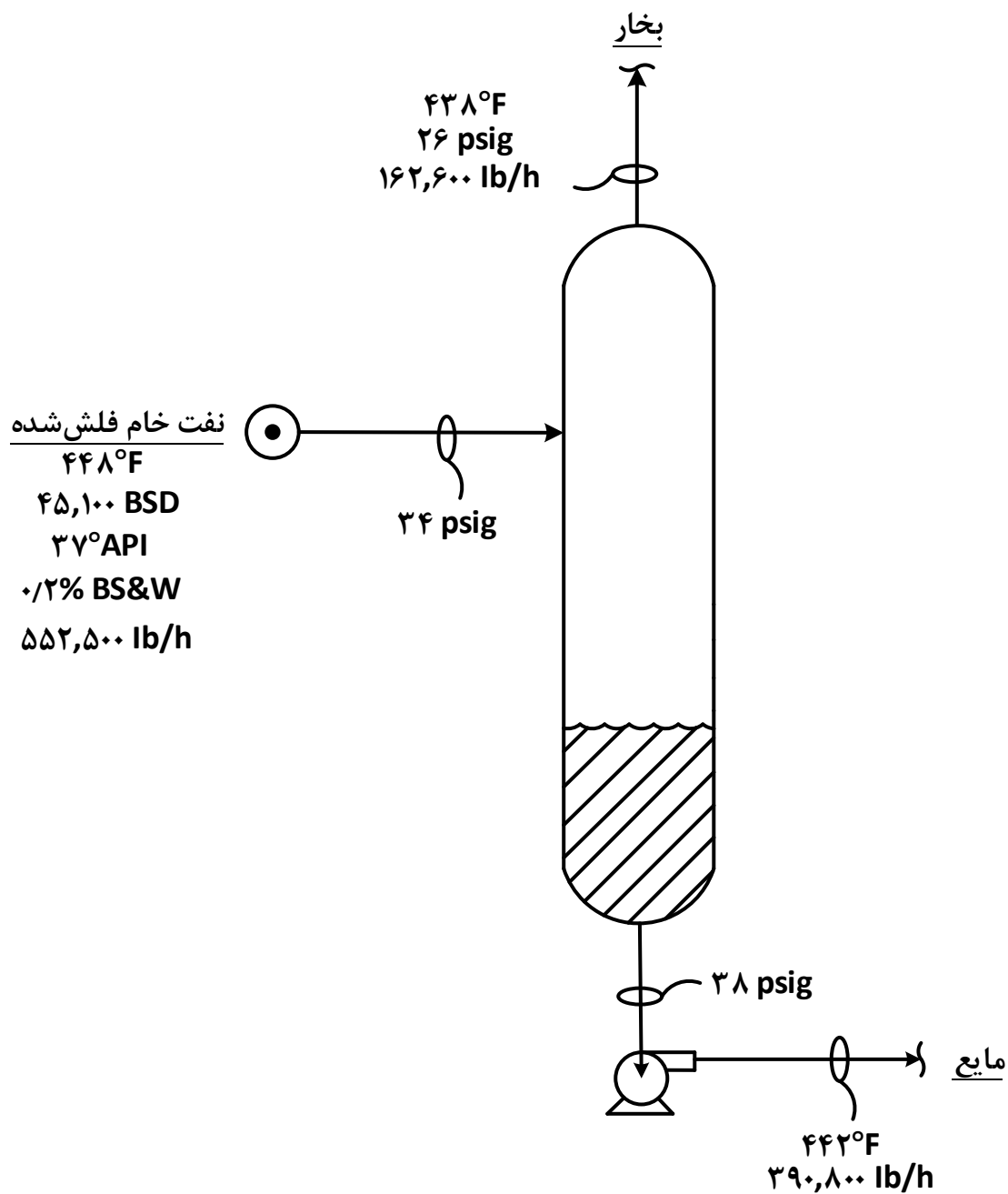
- جریان بخار ۱۸۴۶۰۰ lb/h؛
- جریان مایع ۳۶۷۹۰۰ lb/h؛

بدین معنا که جریان بخار محاسبه‌شده در دما و فشار مشاهده‌شده عملیاتی، ۱۳/۶٪ بزرگ‌تر از مقدار مشاهده‌شده میدانی در طول بررسی شرایط نرمال واحد پالایشگاهی‌ست.

^۱ Off-gas: گاز آلوده

^۲ Sample: نمونه

فلش درام نفت خام



شکل ۱۸-۱ شرایط عملیاتی مشاهده شده در فلش درام نفت خام.

هدف از انجام این طراحی ارتقا یافته واحد تقطیر نفت خام، افزایش میزان تبخیر در فلش درام نفت خام بوده است تا افت فشار در هیتر احتراقی واحد پایین دستی تقطیر نفت خام کاهش یافته و همچنین تبادل حرارت در بالادست

فلش‌درام، افزایش یابد. پس از آن، باید یکی از موارد زیر را انتخاب می‌کردم تا از آن به عنوان پارامتر اصلی در طراحی، استفاده کنم:

- تبخیر ۱۶۲۶۰۰ lb/h مطابق با مشاهدات میدانی؛
- یا تبخیر ۱۸۴۶۰۰ lb/h مطابق با محاسبات مدل شبیه‌سازی کامپیوتری.

هدف از انجام این پروژه، افزایش تبخیر تا میزان ۲۰۰۰۰۰ lb/h در فلش‌درام نفت خام بود. از این‌رو، تصمیم‌گیری در مورد انتخاب دو جریان بخار فوق‌یعنی جریان مشاهده‌شده میدانی یا محاسبه‌شده در شبیه‌سازی کامپیوتری، تأثیر به‌سزایی بر روی استراتژی طراحی من داشت؛ چراکه باید از این استراتژی جهت انتخاب تغییرات مبدل‌های بالادستی پیش‌گرمایش نفت خام استفاده می‌کردم.

اصول طراحی

تصمیم‌گرفتم، نرخ تبخیر مشاهده‌شده نفت خام را، مبنای محاسبات طراحی‌ام در نظر بگیرم تا، مطابقت بیشتری با عملیات مورد مشاهده، داشته باشد. سپس این مسئله مطرح شد که نحوه کاربرد مدل شبیه‌سازی واحد تقطیر نفت خام موجود برای محاسبات طراحی به چه صورتی است؛ چراکه نقطه شروع شبیه‌سازی با درصد تبخیری که مبنای ارتقای واحد فرض شده بود، متفاوت بوده و تطابقی نداشت.

این مثال، نمونه‌ای از مشکلات مورد بحث در این فصل است. بدین معنا که یکی از مشکلات، ناسازگاری ذاتی بین موارد مورد مشاهده و پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی مدل برای موارد زیر بود:

- دماهای دریافت محصولات واحد تقطیر نفت خام^۱؛
- استاندارد ASTM D-86 ۹۵٪ - ۵٪؛ شکاف‌ها و همپوشانی‌ها.
- افت فشارها؛
- تغییرات آنتالپی مبدل.

این مشکل را برای برج‌های تقطیر و نیز موارد زیر نیز حل کردم:

- واحدهای آلکیلاسیون؛
- تفکیک‌کننده‌های کک‌ساز؛

^۱ نازل خروجی محصول از برج: Draw-off

- تفکیک کننده های غلظت شکن^۱؛
- برج های روغن های روان کننده خلأ؛
- تفکیک کننده های FCU^۲.

یکی از نتایج قطعی که به آن رسیدیم؛ این است که، چشم پوشی از عدم تطابق بین داده های مورد مشاهده و نتایج شبیه سازی سبب می شود که طرح ایجاد شده، واقعیت را نشان ندهد.

مدل سازی برج تقطیر

طراح مدل سازی یک برج تقطیر، لازم است دو پارامتر را وارد کند:

- تعداد سینی های تئوری؛
- معادله حالت^۳.

لازم است از این پارامترها برای مشخص نمودن میزان جریان فازهای مایع و بخار در برج تقطیر استفاده شود تا به راندمان تفکیک مشخصی بین اجزای خوراک برسیم. میزان جریان فازهای مایع و بخار تابعی از نرخ رفلاکس، کار سیرکولاسیون پمپی^۴ و بار حرارتی ریبویلر است.

از چندین گام نظری استفاده می شود تا بتوان تعداد سینی های تفکیک واقعی، یا ارتفاع پکینگ و در نتیجه، ارتفاع برج تقطیر را با توجه به راندمانی سینی یا برای HETP^۵ پکینگ تعیین نمود (ارتفاع پکینگ برابر است با ارتفاع نظری صفحه جداسازی یا مرحله جداسازی). هرچه راندمان سینی کمتر بوده یا HETP بیشتر شود، ارتفاع برج تقطیر بلندتر می شود.

انتخاب راندمان سینی

با توجه به مشاهداتی که داشته ام، راندمان سینی بین ۱۰ تا ۱۰۰٪ متغیر است. معمولاً راندمان سینی در برج های

^۱ Visbreaker: غلظت شکن

^۲ FCU مخفف «Fluid Catalytic Cracking Unit»، معنی واحد شکست کاتالستی بستر سیال، واحد شکستن مولکول ها در کاتالیست سیال

^۳ Equation of State: معادله حالت، معادله ای در علم فیزیک و ترمودینامیک است به بررسی رابطه بین فشار، حجم و دما می پردازد.

^۴ Pumparound: سیرکولاسیون پمپی

^۵ HETP: Height of packing Equivalent to a Theoretical separation Plate or stage، ارتفاع پکینگ برابر است با ارتفاع نظری صفحه جداسازی یا مرحله جداسازی

تقطیر پالایشگاهی، برعکس تجهیزات آزمایشی واحدهای پایلوت، تابع شرایط مکانیکی سینی‌ها است. به‌ویژه:

• تراز بودن کف سینی^۱؛

• تراز بودن بند سرریز^۲.

با افزایش قطر برج، این عوامل مذکور، بر راندمان تفکیک سینی، اثرگذارتر خواهند بود. در مورد راندمان سینی، بندهای بلندتر با لود کم، روی بندهای خارجی^۳ (بین ۱ تا ۲ GPM در اینچ) نسبت به بندهای کوتاه‌تر، با لود زیاد، روی بندهای خارجی (بین ۱۲ تا ۱۴ GPM در اینچ)، اثر منفی تری در راندمان دارند. اما طراح هنگام تعیین راندمان سینی چگونه باید تراز بودن بند را محاسبه کند؟ طراح می‌تواند برای بند، یک ناترازی منطقی را فرض کند اما این ناترازی معادل با فرض پاسخ است.

همین مشکل برای مشخص نمودن اثر تراز بودن کف سینی بر روی راندمان سینی نیز، ایجاد می‌شود. در مورد کف سینی‌های مشبک، مانند سینی‌های دریچه‌ای، غربالی یا شبکه‌ای، احتمال نشستی وجود دارد. احتمالاً نشست موضعی در شرایطی ایجاد می‌شود که افت فشار جریان بخار در عبور از حفره‌های سینی (ΔP خشک) نسبت به وزن مایع روی سینی (ΔP مرطوب) بسیار کمتر باشد. نشست موضعی کف سینی، سبب افزایش آبراهه‌شدن^۴ فاز بخار-مایع و تماس ضعیف فاز بخار-مایع شده و کاهش راندمان سینی را به دنبال دارد.

با افزایش طول مسیر جریان بین ورودی مجاری ریزش^۵ مایع و خروجی بند سرریز، ناترازی بیشتر کف سینی موجب کاهش راندمان جداسازی سینی می‌شود. طراح می‌تواند درجه‌ای منطقی از تراز بودن سینی را در نظر گرفته و پس از آن، با توجه به فرض تراز بودن سینی، راندمان مناسبی را برای آن فرض کند. اگر درجه‌ای از تراز بودن سینی به صورت مبنا فرض شود، راندمان سینی و در نتیجه، تعداد سینی‌ها و نهایتاً ارتفاع تفکیک‌کننده نیز، فرضی خواهند بود.

استفاده از یک مدل کامپیوتری باعث می‌شود که طراح به اشتباه تصور کند که تعداد سینی‌ها در برج تقطیر با درجه‌ای از دقت محاسبه می‌شوند که تطابقی با واقعیت ندارند. طراح می‌تواند به‌جای اینکه زمانش را صرف مدل-سازی کامپیوتری کند، با برآورد تعداد سینی‌ها برای یک کاربرد ویژه و بر مبنای نمونه اولیه موجود در سیستم و اندازه‌ای مشابه، همان کار را با کیفیت مشابه و یا حتی بهتر انجام دهد. این رویکرد طراحی برج تقطیر، فرض می‌کند

^۱ Tray deck levelness: تراز بودن صفحه سینی

^۲ Outlet weir levelness: تراز بودن بند سرریز

^۳ Weir loading: لود روی بند خارجی، در یک سینی تقطیر، دبی حجمی جریان مایع، تقسیم بر اینچ طول بند خارجی

^۴ Channeling: آبراهه سازی

^۵ Downcomer: مجاری ریزش مایع، ناودانی، پائین‌ریز

که نمونه‌های اولیه‌ای وجود دارند که طرح‌های جدید با توجه به آن‌ها ایجاد می‌شوند. در مورد کار من نیز نمونه‌های اولیه زیادی برای سیستم‌های تقطیر موجود بود.

معادله حالت

اولین تصمیمی که مهندس برای شبیه‌سازی برج تقطیر می‌گیرد این است که از بین ۲۵ گزینه برای معادله حالت، یکی را انتخاب کند. برای اینکه بتوان فراریت نسبی هر جزء را برآورد کرد، از معادله حالت استفاده می‌شود. از فراریت نسبی برای محاسبه موارد زیر و با توجه به میزان موردنیاز برای تفکیک معین، استفاده می‌شود.

- نرخ رفلاکس
- بار حرارتی ریبویلر
- کار کندانسور
- جریان‌های بخار-مایع
- تعداد طبقات یا سینی‌های جداسازی نظری
- قطر برج

اما چگونه باید تشخیص دهیم که از کدام معادله حالت استفاده کنیم؟

من در این زمینه تجارب زیادی دارم. در یکی از کارخانه‌ها، یک برج تفکیک جدید پروپیلن-پروپان طراحی شده بود تا جایگزین برجی شود که نمی‌توانست الزامات استاندارد را با مشخصه‌های جدید خوراک، برآورده کند. این رویداد با یک مدل کامپیوتری برج تفکیک تکمیل شد. این مدل نشان می‌داد برج توسط عملکردی بالاتر از ۱۰۵٪ از طغیان فواره‌ای^۱ و در دبی‌های خوراک طراحی‌شده موردنیاز و نسبت رفلاکس، محدود می‌شد.

من متوجه شدم که محدودیت تاریخی برای برج، طغیان نبوده و در واقع، بار حرارتی ریبویلر، محدودیت اصلی است. ریبویلر به‌وسیله دبی تخلیه میعان‌ات بخار آب، محدود شده بود. انتقال میعان‌ات به فاضلاب^۲ باعث شد که نرخ‌های خوراک طراحی جدید به دست آیند. قبلاً نرخ رفلاکس به‌وسیله بار حرارتی ریبویلر محدود شده بود. بار حرارتی ریبویلر نیز به‌وسیله جریان بخار آب به ریبویلر محدود شده بود. جریان بخار آب به ریبویلر به‌وسیله تجمع میعان‌ات بخار آب محدود شده بود. آخرین محدودیت این بود که خط تخلیه میعان‌ات بخار آب^۳ اینچی، کوتاه و به

^۱ Jet flood: طغیان فواره‌ای

^۲ Sewer: فاضلاب

اندازه‌ای نبود که بخشی از میعان‌ات بخار آب در آن مجدداً به بخار تبدیل شوند. این خط تخلیه، فقط برای آب گرم طراحی شده بود. این کار، اشتباه رایجی در لوله‌کشی محسوب می‌شود.

مشکل مدل رایانه‌ای برج تفکیک چه بود؟ در پاسخ باید گفت که هیچ مشکلی نداشت. با توجه به معادله حالتی که انتخاب می‌شود، می‌توان تصمیم گرفت که برج تفکیک، کوچک است یا اندازه آن برای نرخ‌های طراحی جدید مناسب است. انتخاب مقادیر کم برای راندمان تفکیک سینی باعث شد که ظرفیت نظری برج تفکیک حتی بیشتر کاهش یابد.

برج جدید بر حسب تصادف و برخلاف مشاهدات مبتنی بر آزمون‌های میدانی من ساخته شد؛ چراکه با توجه به مدل‌سازی کامپیوتری، برج موجود بیش از حد کوچک بود.

افت فشار در خطوط فرآیند

مبحث زیر، فاز مختلط، ویسکوزیته پایین و جریان‌های سیال را فرض می‌کند. من مقدار ویسکوزیته پایین را کمتر از ۱۰ تا ۱۵ سانتی استوک، فرض می‌کنم. بیشتر جریان‌های فرآیندی، ویسکوزیته پایین‌تری نسبت به این مقدار دارند. سرعت جریان فاز مختلط بخار-مایع، بالاتر از ۲۰-۲۵ فوت بر ثانیه باقی می‌ماند.

برای اینکه بتوان با استفاده از همبستگی کامپیوتری در سیستم‌های لوله‌کشی فرآیندی پالایشگاه، افت فشار را محاسبه کرد، باید فاکتور اصطکاک خطوط لوله را وارد کرد. می‌توان با استفاده از فاکتور زبری، فاکتور اصطکاک را به دست آورد. فاکتور زبری، فرضی بوده و اندازه‌گیری نمی‌شود. بدین ترتیب، اتلافی که در لوله‌کشی محاسبه می‌شود، با کمک افت فشار محاسبه شده به وسیله کامپیوتر، مبتنی بر یک فرض بوده و مقادیری که به دقت محاسبه می‌شوند، واقعی نیستند.

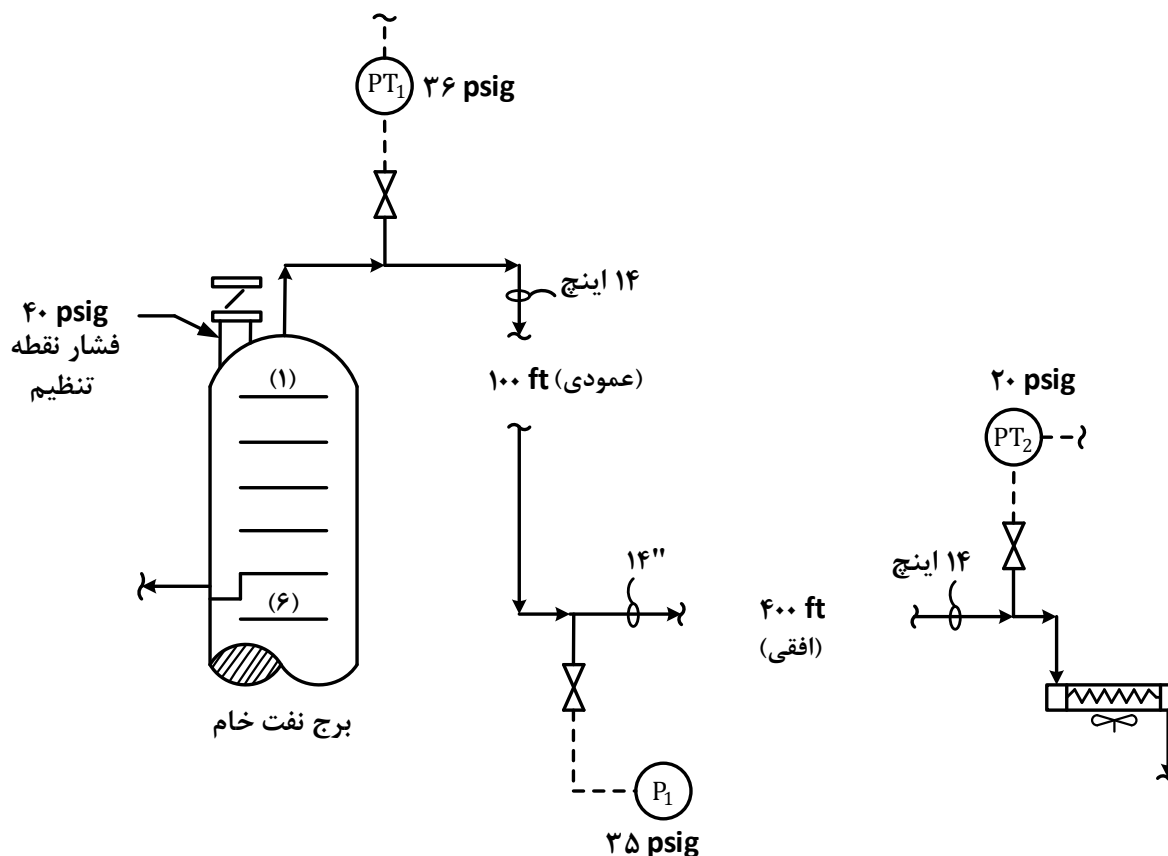
توجهتان را به نمونه‌ای از مشکلات مربوط به وابستگی بیش از حد به افت فشارهای لوله‌کشی مبتنی بر شبیه‌سازی‌های کامپیوتری جلب می‌کنم. اخیراً درگیر پروژه‌ای در پالایشگاه کانزاس^۱ شده‌ام تا یک واحد تقطیر نفت خام را افزایش ظرفیت^۲ دهیم. محدودیت ظرفیت، مربوط به شیر اطمینان برج تفکیک بود که در شکل ۱۸-۲ مشخص است. به محض افزایش نرخ تقطیر تا زمانی که فشار قسمت بالای تفکیک‌کننده به حدود ۵ psi از فشار نقطه تثبیت دریچه اطمینان نزدیک شد، افت فشار در خط بخار بالاسری نیز بیشتر شد.

^۱ Kansas: کانزاس

^۲ Debottleneck: گلوگاه‌زدایی

با توجه به شکل ۱۸-۲، ΔP مشاهده شده بین بخش بالای تفکیک کننده و ورودی کولرهای هوایی پایین دست که به وسیله تفاوت بین دو فشار خروجی فشارسنج نصب شده روی کنسول اتاق کنترل ثبت شده بود ($PT_1 - PT_2$) برابر با ۱۶ psi بود.

با توجه به شکل ۱۸-۲، محاسبات مدل رایانه ای برای سیستم لوله کشی بالاسری، ΔP را برای ۵۰۰ فوت از لوله با قطر ۱۴ اینچ، ۱۴/۵ psi نشان می دهد که تطابقی منطقی با افت فشار ۱۶ psi دارد.



شکل ۱۸-۲ اتلاف فشار مشاهده شده در خط لوله فوقانی برج نفت خام.

من با استفاده از معادله ساده سازی شده زیر، افت فشار را برای ۵۰۰ فوت از لوله ۱۴ اینچی، ۶ psi به دست آوردم:

$$DP = 4 \div ID \cdot (DIN) \div 62.3 \cdot V^2 \div 27.7 \quad (1 - 18)$$

در این معادله:

$$\bullet V = \text{سرعت بر حسب ft/s}$$

- ID = قطر داخلی لوله بر حسب اینچ؛
- DP = افت فشار در خط لوله در ۱۰۰ فوت معادل، بر حسب psi؛
- DIN = چگالی فاز مخلوط بر حسب پوند بر فوت مکعب.

فرض کردم که لوله‌کشی، تمیز است. مقدار افت فشاری که من محاسبه کردم یعنی ۶ psi، نسبت به افت فشار مشاهده‌شده، یعنی ۱۶ psi، بسیار کمتر بود. به نظر من، فرض تمیز در نظر گرفتن لوله‌های ۱۴ اینچی اشتباه بود. در طول سالیان متمادی که از این خط استفاده می‌شد، هرگز تمیز نشده بود؛ چراکه هیچ فلنج پاک‌کننده‌ای در زانویی^۱ موجود نبود. همچنین، خطوط بخار بالاسری برج نفت خام به دلایل زیر رسوب کرده بودند:

- تجمع محصولات خوردنده سولفید آهن؛
- تصعید نمک آمین کلراید؛
- ترکیبات تخریب‌شده پساب سبک اولفینی؛
- پراکندگی ضعیف تشکیل فیلم آمین؛

لازم بود مشتری‌ام در این خصوص تصمیمی بگیرد. پیشنهاد من این بود که در هنگام انجام تعمیرات واحد نفت خام، خط بخار تمیز شود؛ یعنی باید ۴ فلنج ۱۴ اینچی پاک‌کننده اضافه می‌شد که هزینه‌بر بود. پیشنهاد دیگر با توجه به افت فشار محاسبه‌شده به وسیله رایانه این بود که خط ۱۸ اینچی، جایگزین خط ۱۴ اینچی موجود شود. توجه کنید که افت فشار با توجه به قطر داخلی لوله تا توان پنجم آن تغییر می‌کند.

برای این که بتوانم بین DP محاسبه شده، یعنی ۶ psi و DP محاسبه‌شده به وسیله رایانه تمایز ایجاد کنم، یک اندازه‌گیری میدانی فشار در P_1 به میزان ۳۵ psig داشتم (شکل ۱۸-۲). افت فشار میدانی مشاهده‌شده در ۱۰۰ فوت از لوله‌کشی‌های عمودی برابر با ۱ psi بود. در مرحله بعد چنین نتیجه‌گیری کردم که به خاطر تشکیل رسوب افت فشار ۱۵ psi در ۴۰۰ فوت از ادامه لوله‌کشی افقی، نسبت به DP محاسبه‌شده توسط ما (۵ psi)، سه برابر بیشتر بود. معمولاً رسوبات جامد در طول لوله افقی بلند ۱۴ اینچی جمع می‌شوند، نه در ۱۰۰ فوت از لوله‌کشی عمودی.

افت فشار ۱۴/۵ psi که با مدل لوله‌کشی رایانه‌ای محاسبه شده بود، چه مشکلی داشت؟ هیچ مشکلی. مدل با توجه به فاکتور زبری معین برای محاسبه فاکتور اصطکاک، می‌توانست DP را به میزان ۶ psi یا ۱۴/۵ psi پیش‌بینی کند.

^۱ Elbow: لوله خمیده، زانویی

با توجه به اینکه هزینه جایگزینی خط ۱۴ اینچی موجود با خط ۱۸ اینچی جدید به شدت بالا بود، پالایش‌گر^۱ تصمیم گرفت از چهار فلنج پاک‌کننده جدید و ارزان‌قیمت‌تر برای خط ۱۴ اینچی استفاده کند. چندین سطل لجن سیاه^۲ از خط افقی خارج شده و سپس خط لوله به روش هیدروبلاستینگ تمیز شد. در ابتدا افت فشار کلی خط به حدود ۵ psig رسید و شیر تخلیه نیز دیگر نرخ شارژ را، که تقریباً ۱۵٪ بیشتر شده بود، محدود نمی‌کرد.

اندازه‌گیری سخت‌گیرانه فاکتورهای اصطکاک درون خط لوله فرآیند

ام‌اچ داری در سال ۱۸۵۷ در نشریه مالت باشلیه پاریس فرانسه^۳، روش مناسب برای محاسبه اتلاف فشار در خطوط لوله را در اثر خود یعنی «رابطه تجربی برای حرکت سیالات غیرقابل تراکم (آب) در لوله‌ها» توضیح داد. منبع دردسترس‌تر نیز بدین شرح است: «کتاب راهنمای هیدرولیک، کینگ و براتر، چاپ پنجم، انتشارات مک‌گروهِیل، ۱۹۶۳».

در واقع افت فشار بین دو نقطه، در تجهیز خاصی محاسبه شده و سپس به تجهیز دیگری تعمیم داده می‌شود. این همان روشی است که از آن با کاربرد معادله (۱-۱۸) که در بخش فوق به آن اشاره شد، استفاده کردم.

شبکه مبدل‌های پیش‌گرمایش نفت خام

یک مبدل پیش‌گرمایش نفت خام معمولی از گرمای زیر استفاده می‌کند:

- بخارهای فوقانی برج نفت خام،
- آب نمک نمک‌زدا،
- سیرکولاسیون پمپی فوقانی،
- محصول نفتای سنگین،
- محصول نفت سفید،
- سیرکولاسیون پمپی نفت‌گاز خلأ سبک^۴،
- سیرکولاسیون پمپی نفت سفید،

^۱ Refiner: پالایش‌گر

^۲ Buckets of a black sludge: سطل‌های لجن سیاه

^۳ Mallet-Bachelier, Paris, France: نشریه مالت باشلیه پاریس فرانسه

^۴ Lvgo: "Light Vacuum Gas Oil" سبک‌ترین برش تفکیک شده از واحد تقطیر خلأ که در نفت‌گاز قابلیت انحلال دارد.

- محصول دیزل،
- سیرکولاسیون پمپی دیزل،
- محصول اورفلاش^۱ برج خلأ،
- محصول نفت گاز اتمسفری،
- محصول نفت گاز خلأ سنگین^۲،
- سیرکولاسیون پمپی نفت گاز خلأ سنگین،
- پس ماند خلأ.

به‌ویژه در مواقعی که تلاش بر این است که مجموعه‌ای از مبدل‌های حرارتی موجود نمایش داده شوند، ترکیب این منابع گرما برای پیش‌گرمایش واحد تقطیر نفت خام، به کاری پیچیده و دشوار تبدیل می‌شود. می‌توان از چند مدل کامپیوتری اختصاصی استفاده کرد تا راه‌حلی را برای این مشکل کامپیوتری اجرا کرد. زمانی این پیچیدگی بیشتر می‌شود که بدانید مقادیر «U» (ضریب انتقال حرارت) با توجه به موارد زیر متغیر هستند:

- خواص سیال؛
- سرعت سیال؛
- ضریب رسوب‌گذاری.

در عین حال که احتمالاً خواص و سرعت جریان سیال با خطای اندکی محاسبه یا وارد^۳ شده است، ضرایب رسوب-گذاری مشکل دیگری هستند. مهندس فرآیند می‌بایست این ضرایب را فرض کند. متأسفانه تجارب من در پیش‌گرمایش نفت خام و در بخش انتقال حرارت نشان می‌دهند که مقاومت کنترل‌کننده انتقال حرارت، مقاومت فیلم نبوده و در مقابل، مقاومت کنترل‌کننده، مقاومت رسوب‌گذاری در سمت لوله مبدل‌های پیش‌گرمایش واحد تقطیر می‌باشد.

مقاومت رسوب‌گذاری منطقی در سمت نفت خام (سمت لوله) چیست؟ در واحد $\text{btu/h/ft}^2/^{\circ}\text{F}$ ، من با توجه به شرایط، از

- $0.2-1.0$ استفاده می‌کنم.

^۱ اور فلاش، به عنوان جریان مایع از پایین ترین سینی بالای ناحیه فلاش (تبخیر ناگهانی) به ناحیه فلاش (تبخیر ناگهانی) تعریف می‌شود: Overflash

^۲ Hvgo: "Heavy Vacuum Gas Oil" محصولی سنگین و چسبناک است و فقط به عنوان واسطه استفاده می‌شود که توسط واحد تقطیر خلأ از Hvgo: جداسازی سنگین‌ترین برش تفکیک‌شده در ستون تقطیر اتمسفری تولید می‌شود. نفت خام در محدوده تقریباً ۳۵۰ درجه سانتیگراد تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد می‌جوشد. تعداد کربن آنها عمدتاً در محدوده ۲۰ تا ۵۰ کربن است.

^۳ Inputted: وارد شده است

در صورتی که مهندس طراح، ضرایب رسوب گذاری سمت نفت خام را در محدوده $0/002-0/004$ تعیین کند، احتمالاً دمای پیش گرمایش نفت خام به میزان 520°F محاسبه می شود. در صورتی که ضرایب رسوب گذاری در محدوده $0/05-0/1$ فرض شوند، دمای پیش گرمایش نفت خام تا محدوده 360°F محاسبه می شود.

با وجود آن که مبدل پیش گرمایش نفت خام که توسط کامپیوتر شبیه سازی می شود، قابلیت محاسبه سریع دمای پیش گرمایش واحد تقطیر را دارد و نتیجه به شدت به ضرایب رسوب گذاری مفروض وابسته است. فرض بر این است که دمای نفت خام ورودی به هیتر با دقت محاسبه شده است. در حقیقت، این دما تابعی از فرضی دلخواه در مورد فاکتورهای رسوب گذاری در سمت لوله است.

با توجه به تجاربی که دارم، مشاهده مقادیر «U» در محدوده 10 تا $15 \text{ btu/h/ft}^2/^{\circ}\text{F}$ عجیب نیست. به این دلیل که پالایش گر، واحد تقطیر^۱ را از همان مخزنی که برای دریافت نفت خام و برای بازیافت آب های آلوده مورد استفاده بوده، شارژ می کند.

مشکل شبیه سازی های کامپیوتری مبدل حرارتی این است که نمی توان از آن ها برای پیش بینی دمای واقعی پیش گرمایش نفت خام با هر دقتی استفاده کرد. این برنامه ها بیشتر از اینکه کمک کننده باشند، موجب سردرگمی می شوند. در واقع، موجب حواس پرتی مهندس فرآیند از مشکل اصلی می شوند. مشکل اصلی، علت رسوب گذاری در سمت لوله نفت خام و روش جلوگیری از آن است. نکات مهم در مورد دمای بالای پیش گرمایش نفت خام، به شرح زیر هستند:

- هیچ وقت واحد تقطیر را با نفت خام مخزن دریافت نفت خام، شارژ نکنید.
- همیشه چند ماده شیمیایی نمک زدا را به مخزن شارژ نفت خام بیفزایید.
- میکسر ها را در مخزن شارژ نفت خام، در سرویس قرار ندهید.
- نازل جانبی برج تقطیر را در پایین مخزن شارژ آن قرار ندهید. از مکش های شناور^۲ استفاده کنید.
- لجن را از مخازن نفت خام حذف کنید. تلاش نکنید تا لجن مخزن را به وسیله مبدل های حرارتی واحد تمیز کنید.
- سرعت سمت لوله را در مجموعه مبدل های پیش گرمایش، بالای 6 فوت بر ثانیه حفظ کنید.

^۱ Refiner: پالایش گر

^۲ Floating suction: مکش های شناور

ترکیب محصولات تحتانی برج^۱ خلأ

حجم بالایی از کار، به ارتقا برج‌های خلأ پالایشگاه مربوط می‌شود تا پس‌مانده‌های خلأ به حداقل برسد و بازیابی نفت گاز سنگین با کاهش فشار منطقه تبخیر ناگهانی نیز به حداکثر میزان خود برسد. چنین متوجه شدم که مدل‌سازی کامپیوتری برج خلأ همیشه هم نشان‌دهنده تناقض عملیات بهره‌برداری نیست. مشکل در محاسبات تبخیر ناگهانی^۲ فاز بخار-مایع در منطقه تبخیر ناگهانی^۳ است. برای اینکه محاسبات تعادلی تبخیر ناگهانی توسط مدل کامپیوتری استخراج شود، نخست می‌بایست تعداد مول‌های مایع را محاسبه کنید. تعداد مول‌های مایع به وزن مولکولی مایع وابسته است. هرچند آسفالتن‌ها، مقادیر بالایی از فاز مایع را تشکیل می‌دهند اما مایع نیستند؛ بلکه حلقه‌های آروماتیک پیچیده‌ای هستند. آسفالتن‌های جامد در مایعات، روغن‌ها و رزین‌ها پخش می‌شوند.

روشی که من برای رسیدن به راندمان خلأ واقعی استفاده می‌کنم این است که ترکیب خوراک برج خلأ را تغییر می‌دهم تا نتیجه مورد انتظارم با توجه به عملکرد نمونه اولیه برج خلأ در شبیه‌سازی کامپیوتری تکثیر شود. بدون تکیه بر چنین نمونه اولیه عملیاتی، نمی‌توانم مطمئن شوم که طرحی مبتنی بر شبیه‌سازی را ایجاد می‌کنم.

چنین محدودیتی، در سطحی کمتر و به‌علت وجود مقادیر آسفالتن در نفت خام برای موارد زیر اعمال می‌شود:

- برج‌های اتمسفری نفت خام؛
- تفکیک‌کننده‌های FCU (مشکل از ترکیبات دوغابی است؛ نه از آسفالتن‌ها).
- تفکیک‌کننده‌های کک‌ساز.

داده‌های آزمون عملکرد

- بررسی دما با استفاده از دماسنج دستی مادون قرمز.
- فشارهای اندازه‌گیری‌شده با استفاده گیج فشار تنها.
- افت فشار در عبور از سینی‌های تقطیر با استفاده از گیج تنها.
- موقعیت شیرهای کنترل.
- کنارگذر کردن جزئی^۴ مبدل‌ها.
- آمپراژ الکتروموتور پمپ و کمپرسور.

^۱ Bottom products: محصولات پایین برج

^۲ Flash: تبخیر ناگهانی

^۳ Flash Zone: منطقه تبخیر ناگهانی

^۴ Bypass: کنار گذر

- دور الکتروموتور در کمپرسورها و پمپ‌های توربینی.
- افت فشار در عبور از جریان‌سنج‌ها.
- فشار و دمای آب سرد خروجی از برج خنک‌کننده^۱ و آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده^۲
- شرایط محیطی (شامل فشار بارومتري، اگر یک سیستم خلأ در ارزیابی وجود داشته باشد).
- کروماتوگرافی گازی سوخت گازی و جریان‌های فرآیندی.
- نمونه برای تقطیر استاندارد ASTM D-86.
- اکسیژن اضافی گاز دودکش هیتر و میزان مصرف آن.

^۱ Cooling water supply: آب سرد خروجی از برج خنک‌کننده

^۲ Cooling water return: آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده



مشکلات موجود در مدل سازی کامپیوتری واحدهای فرآیندی

چکیده:

نمونه های کامپیوتری باید بر پایه عملیات های واحد موجود باشند. در غیر این صورت متغیرهای کلیدی مانند:

- فراریت نسبی،
- راندمان سینی ها
- ضرایب رسوب گذاری در مبدل ها

باید بدون پایه و اساس محکمی، حدس زده شوند.

برای مثال، راندمان سینی، عمدتاً تابعی از تراز بودن کف سینی و سرریز از بند خارجی است؛ که برای طراح تا حد زیادی ناشناخته است. بنابراین یک نمونه کامپیوتری در بهترین حالت، فقط یک حدس تحصیلی یا تقریبی از واقعیت است.

کلمات کلیدی:

مدل؛ کامپیوتر؛ آزمایش عملکرد؛ فراریت نسبی؛ عامل رسوب گذاری؛ نرم افزار شبیه سازی ASPEN؛
نرم افزار شبیه سازی HEXTRAN؛ سینی؛ بند خارجی

اولین فردی که در طول تاریخ توانسته است یک برج تقطیر پیچیده را با کمک یک کامپیوتر دیجیتال طراحی کند، من هستم. البته این اولین برج تقطیری نیست که با کمک یک کامپیوتر طراحی شده است. طراحی کامپیوتری برج‌های تقطیر در اوایل دهه ۱۹۶۰ و با کاربرد یکی از برنامه‌های IBM کار رایجی بود. طراحی من در سال ۱۹۶۶ از برج تفکیک‌کننده واحد کک‌سازی تأخیری «B» واقع در تگزاس سیتی^۱، اولین طرحی بود که شامل موارد زیر بود:

- سیرکولاسیون پمپی^۲؛
- دریافت محصولات جانبی برج؛
- جریان‌سازهای بخار آب^۳ جریان‌های جانبی برج^۴.

من برنامه‌ای را با زبان «فورترن»^۵ نوشتم که در آن از لایه‌های انتزاعی «استریم-اد»^۶ و «اکویپ سپ»^۷ استفاده شده بود. تبدیل، به وسیله «دو-لوپ»^۸ و با استفاده از ۵۰ چرخه انجام شد. زمان پردازش ۳۰ دقیقه و هزینه هر پردازش نیز، ۳۰۰ دلار بود.

فرض من این بود که هر مرحله جداسازی تعادلی، معادل یک سینی با راندمان ۱۰۰٪ است. همچنین، فرض کردم که «فراریت نسبی» تمامی اجزاء، براساس فشاربخار^۹ جزء خالص است. یعنی از ضرایب غیرایده‌آل چشم‌پوشی کردم. لازم بود از «معادله حالت» مناسبی استفاده کنم تا بتوانم فراریت نسبی صحیح را برای هر جزء، مشخص نمایم. اما درجه دقت آن در سال ۱۹۶۶، بیشتر از من بود.

کک‌ساز «B» در سال ۱۹۶۸ در سرویس قرار گرفت و عملکردی خارق‌العاده داشت. همچنان، می‌توانید آن را از بزرگراه ایالتی FM ۱۷۶۴ واقع در تگزاس سیتی^{۱۰} مشاهده کنید. این واحد درست در بخش جنوبی پالایشگاه ماراتون گالوستون^{۱۱} قرار داشته و همچنان مشغول کار است.

^۱ Texas City: شهر تگزاس

^۲ Pumparound: سیرکولاسیون پمپی

^۳ Steam strippers: جریان‌سازهای بخار آب

^۴ Side stream: جریان‌ات جانبی

^۵ Fortran Four: فورترن ۴

^۶ Stream add: استریم-اد

^۷ Equip SEP: اکویپ سپ

^۸ Do-Loop: دوو لوپ

^۹ Vapor pressure: فشار بخار

^{۱۰} Texas City: تگزاس سیتی

^{۱۱} Marathon Galveston: ماراتون گالوستون

شبیه‌سازی کامپیوتری تفکیک‌کننده‌ها

هنگامی که یک مهندس فرآیند با استفاده از برنامه شبیه‌سازی که اسپن^۱، آن را ارائه می‌دهد، یک برج تقطیر را طراحی می‌کند، باید موارد زیر را مطابق شکل ۱۹-۱ مشخص نماید:

- باید بتواند معادله حالت را از بین ۳۰ - ۶۰ مورد، انتخاب کند.
- باید بتواند راندمان سینی را مشخص کند.

افزایش هزینه پردازش برنامه چندان زیاد نبوده و زمان پردازش نیز، تنها چند ثانیه طول می‌کشد. راندمان تفکیک سینی‌هایی که من مشاهده کرده‌ام، بین ۵ تا ۱۰۰ درصد بود. راندمان تفکیک سینی به موارد ذیل وابسته است:

- تراز بودن سینی (مهم‌ترین عامل)؛
- تراز بودن بند خارجی؛
- درصد طغیان فواره‌ای^۲؛
- منافذ یا بخش باز کلاhek دریچه^۳؛
- طول مسیر جریان سینی (کم‌اهمیت‌ترین عامل).

بنابراین راندمان سینی، فقط یک حدس است. اما چطور می‌توان فهمید که، باید از کدام معادله حالت برای مدل کامپیوتری استفاده کرد؟ برای اینکه بتوان فرارایت نسبی اجزا را مشخص نمود، از معادله حالت استفاده می‌شود. از این معادله برای محاسبه موارد زیر نیز استفاده می‌شود:

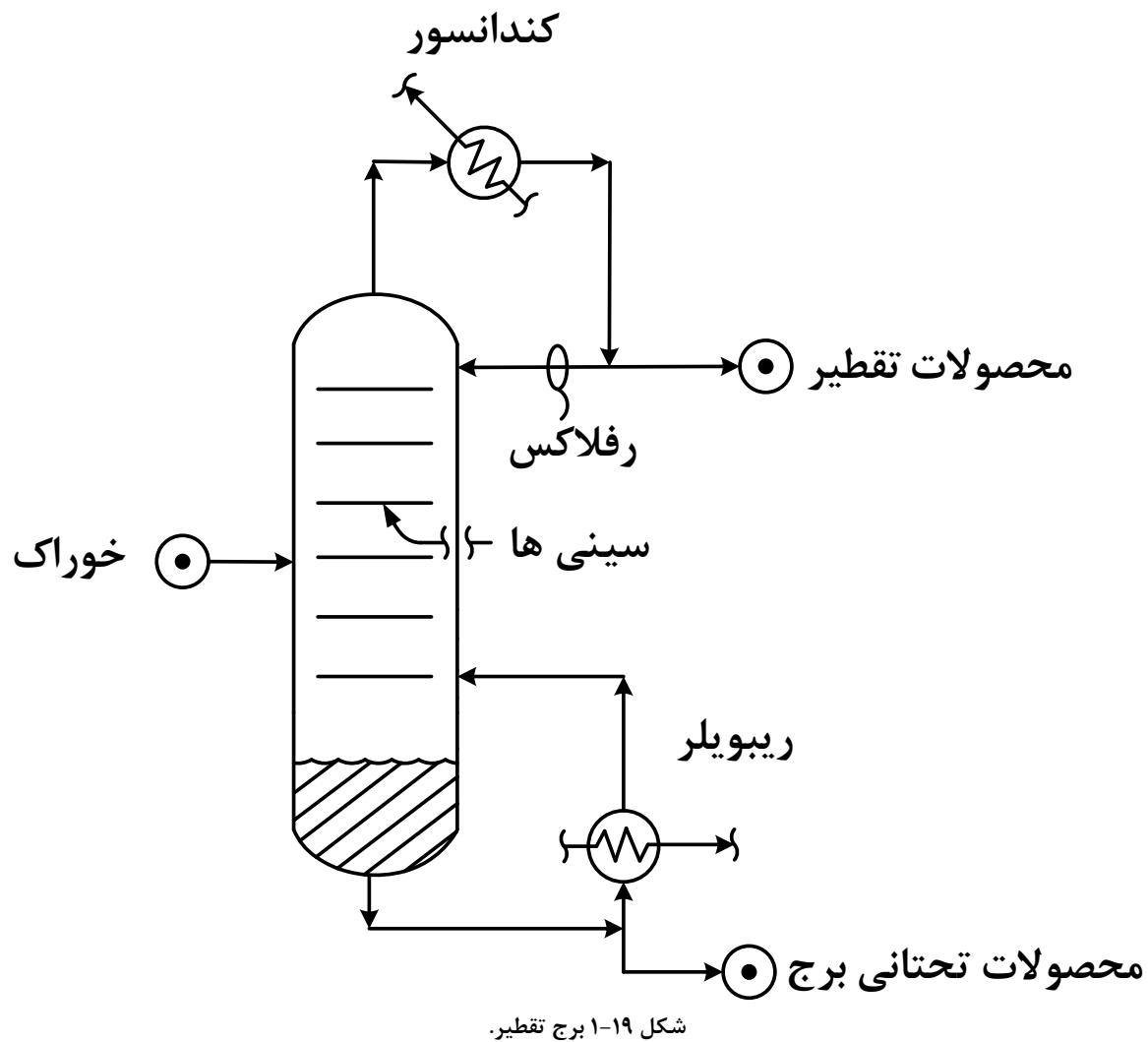
- نرخ رفلاکس؛
- بار حرارتی ریبولر؛
- کار کنندانسور؛
- قطر برج؛
- تعداد مراحل؛
- دبی محصول؛

^۱ اسپن: ASPEN

^۲ Jet Flood: طغیان فواره‌ای

^۳ Valve cap: کلاhek دریچه

• توازن محصول.



با توجه به اینکه معمولاً انتخاب معادله حالت، تنها بر اساس حدس و گمان بوده و با توجه به راندمان سینی انتخاب می‌شود، می‌توان چنین نتیجه گرفت که خروجی^۱ مدل کامپیتری نیز، تنها یک حدس بوده و غالباً نیز اشتباه است.

^۱ خروجی: Output

سرعت ته‌نشینی روغن – آب

سرعت جداسازی آب و هیدروکربن‌ها، به‌وسیله مدل‌های کامپیوتری موجود برای تعیین اندازه ته‌نشین‌سازها مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً نرخ‌های ته‌نشین‌سازی^۱ به شرح زیر هستند:

از نرخ ۰/۵ فوت بر دقیقه، برای ته‌نشین‌سازی و جداسازی آب از روغن دیزل استفاده می‌شود.

از نرخ ۰/۷ فوت بر دقیقه، برای ته‌نشین‌سازی و جداسازی آب از نفتای سبک استفاده می‌شود.

از نرخ ۱/۰ فوت بر دقیقه برای ته‌نشین‌سازی و جداسازی آب از LPG (پروپان) استفاده می‌شود.

موارد فوق برای ته‌نشین‌سازهای افقی گرانشی و برای سیالاتی با ویسکوزیته پایین (پایین‌تر از ۱۰ est) برای مدل کامپیوتری، مفروض هستند.

هرچند، اندازه این ته‌نشین‌سازها، در واقعیت معمولاً تابعی از سایر عوامل است:

- آیا مخلوط آب-هیدروکربن به‌وسیله یک پمپ گریز از مرکز پمپاژ شده است یا خیر؟
- آیا مخلوط از یک شیر کنترل با افت فشار بسیار بالا، عبور می‌کند؟
- آیا سرعت مخلوط، به شدت کاهش پیدا می‌کند؟

با وجود آن که غالباً مایعات با پمپ‌های رفت و برگشتی پمپاژ نمی‌شوند، ولی سرعت ته‌نشینی فازهای مخلوطی که با پمپ‌های رفت و برگشتی پمپاژ می‌شوند، نسبت به سیالاتی که با یک پمپ گریز از مرکز پمپاژ می‌شوند، ده برابر است. خودم شخصاً، این سرعت را در پالایشگاه نفت آمریکا^۲ واقع در ایالت ایندیانا^۳ اندازه‌گیری کردم.

اگر بخواهیم بدون توجه به عواملی که موجب پراکندگی فازها می‌شوند، اندازه ته‌نشین‌سازها را با استفاده از یک روش کامپیوتری دانلودشده اندازه بگیریم، کار بیهوده‌ای انجام می‌دهیم. افت فشار در عبور از شیرهای کنترل بالادست، بزرگ‌ترین متغیر متداول در این زمینه است. افزایش افت فشار در عبور از شیر کنترل از مقدار ۲۰ psi به ۲۰۰، زمان ته‌نشین‌سازی را با ضریبی بین ۱۰ تا ۱۰۰ برابر بالا می‌برد.

^۱ Settling rate: نرخ ته‌نشین‌سازی

^۲ نفت آمریکا: American Oil

^۳

راندمان مبدل حرارتی

معمولاً جهت محاسبه عملکرد پیچیده شبکه‌ای از مبدل‌های حرارتی، از نرم‌افزار «Hextran» استفاده می‌شود. این برنامه، ضریب انتقال حرارت (U) را بر مبنای موارد زیر در سیال محاسبه می‌کند (شکل ۱۹-۲):

- ویسکوزیته؛
- سرعت؛
- هدایت حرارتی؛
- چگالی.

و نیز شکل هندسی مبدل حرارتی. یعنی:

- سایز لوله؛
- آرایش لوله^۱؛
- فاصله‌بندی بافل‌ها؛
- برش تیغه یا بافل^۲؛
- ساختار گذرها^۳؛
- نوارهای آب‌بندی^۴ (موقعیت و تعداد)؛
- فاصله آزاد داخلی؛
- متالورژی لوله.

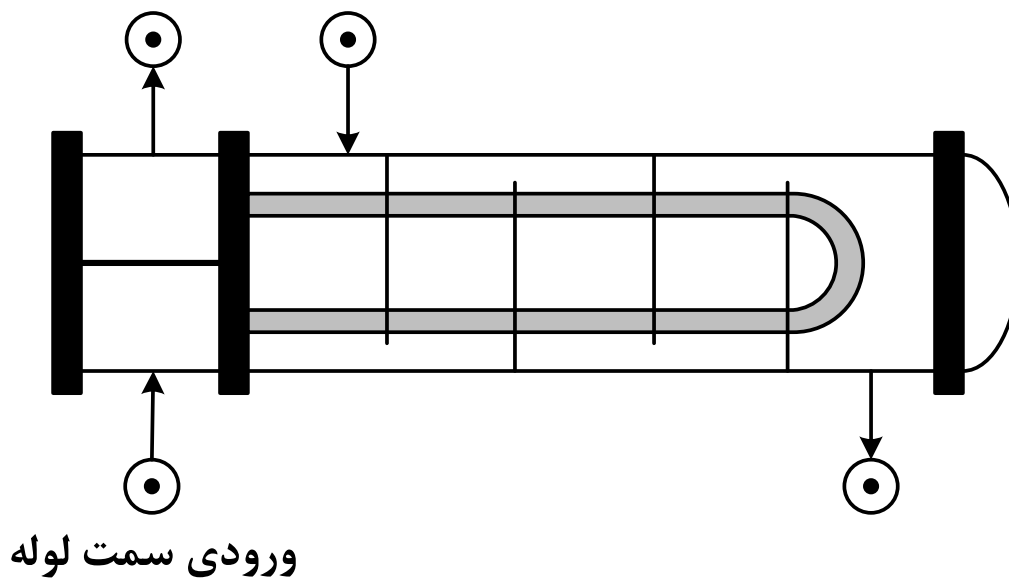
^۱ Tube pitch: آرایش لوله، گام لوله، فاصله بین مراکز تیوب‌های مجاور در یک مبدل حرارتی

^۲ Baffle cut: برش بافل، برش تیغه

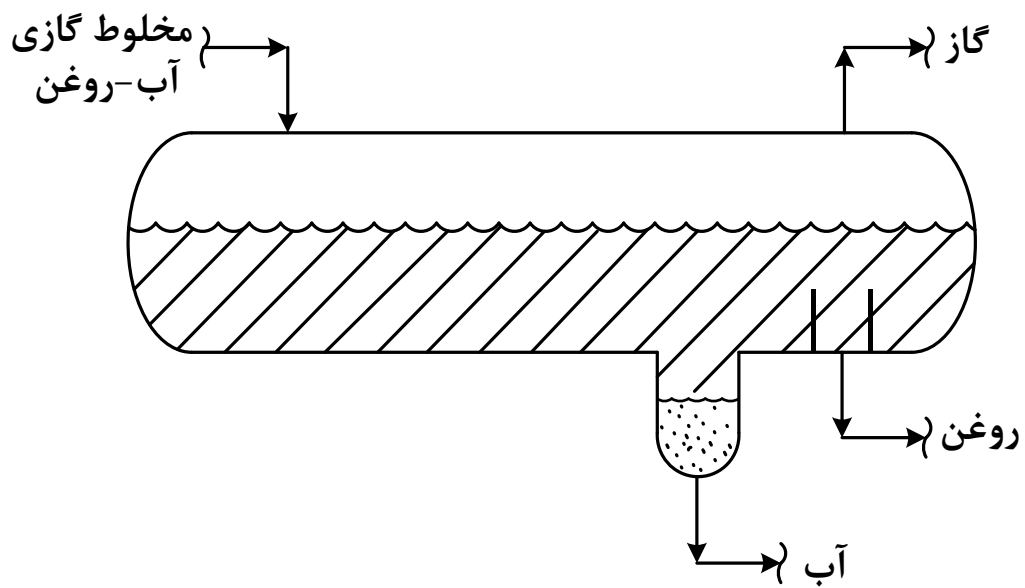
^۳ Pass configuration: ساختار گذر

^۴ Seal strips: نوارهای آب‌بندی

ورودی سمت پوسته



شکل ۱۹-۲ مبدل حرارتی.



شکل ۱۹-۳ ته‌نشین‌کننده.

متأسفانه، کاربر ناچار است ضرایب رسوب‌گذاری در سمت لوله و پوسته را که در محدوده $0.1 \text{ to } 0.001 \text{ } \text{btu/h/ft}^2/^{\circ}\text{F}$ متفاوت است، برای هر دو طرف ارائه کند.

با توجه به تجربه کاری که درمورد بیشتر مبدل‌های حرارتی پالایشگاهی دارم، معمولاً ضرایب انتقال حرارت، دست کم پس از یک یا دو سال کارکردن، تابعی از رسوب‌گذاری هستند. عمدتاً نرخ رسوب‌گذاری ناشناخته بوده و قابل تشخیص نیست. البته اگر به صورت میدانی اندازه‌گیری شود، این طور نیست.

من چنین نتیجه می‌گیرم که اگر آنالیز شبکه مبدل حرارتی بر مبنای اندازه‌گیری‌های میدانی باشد، عملکرد مبدل قابل محاسبه است. در غیر این صورت، عملکرد پیش‌بینی‌شده مبدل در مدل‌های کامپیوتری با توجه به موارد زیر قابل محاسبه نیست:

- افت فشار؛
- نرخ انتقال حرارت.

مهم‌ترین مشکل این است که نرخ رسوب‌گذاری به‌شدت تحت تأثیر موارد زیر قرار می‌گیرد:

- سرعت؛
- زبری سطح لوله؛
- ماهیت و غلظت رسوبات.

با وجود آن که شبیه‌سازی کامپیوتری شبکه مبدل حرارتی اطلاعات زیادی را در اختیارمان قرار می‌دهد، نهایتاً اساس و مبنای تمام این اطلاعات، فرضیه‌ای در مورد ضرایب رسوب‌گذاری بوده که مخصوصاً با توجه به تغییر سرعت سیال، به‌شدت متغیر هستند.

افت فشار در لوله‌ها

برای اینکه بتوانیم افت فشار را در لوله‌ها محاسبه نماییم، متغیرهای زیر را در برنامه هیدرولیک لوله‌کشی، وارد می‌کنیم:

- طول خط لوله؛
- اتصالات و شیرها؛
- قطر داخلی لوله؛
- نرخ جریان؛
- ویسکوزیته سیال؛
- چگالی سیال؛

• ضریب اصطکاک یا ضریب زبری.

برای محاسبه ضریب اصطکاک، از ضریب زبری استفاده می‌شود. ضریب‌های زبری متداول در قرن نوزدهم میلادی و در انگلستان با قالب‌گیری لوله‌هایی چدنی که در آن‌ها آب جریان داشت، محاسبه شدند. با این وجود:

- آیا این ضرایب از آن زمان تاکنون به‌روزرسانی شده‌اند؟
- آیا این ضرایب در سیستم شما کارایی دارند؟
- آیا این ضرایب نسبت به زمان و محیط اطراف لوله‌ها تغییر می‌کنند؟

چه کسی این‌ها را می‌داند؟ من که نمی‌دانم!

زمانی که ضریب اصطکاک فرضی باشد، افت فشاری که محاسبه می‌شود نیز، تنها در حد یک حدس باقی می‌ماند.

محدودیت‌های هیت‌های احتراقی

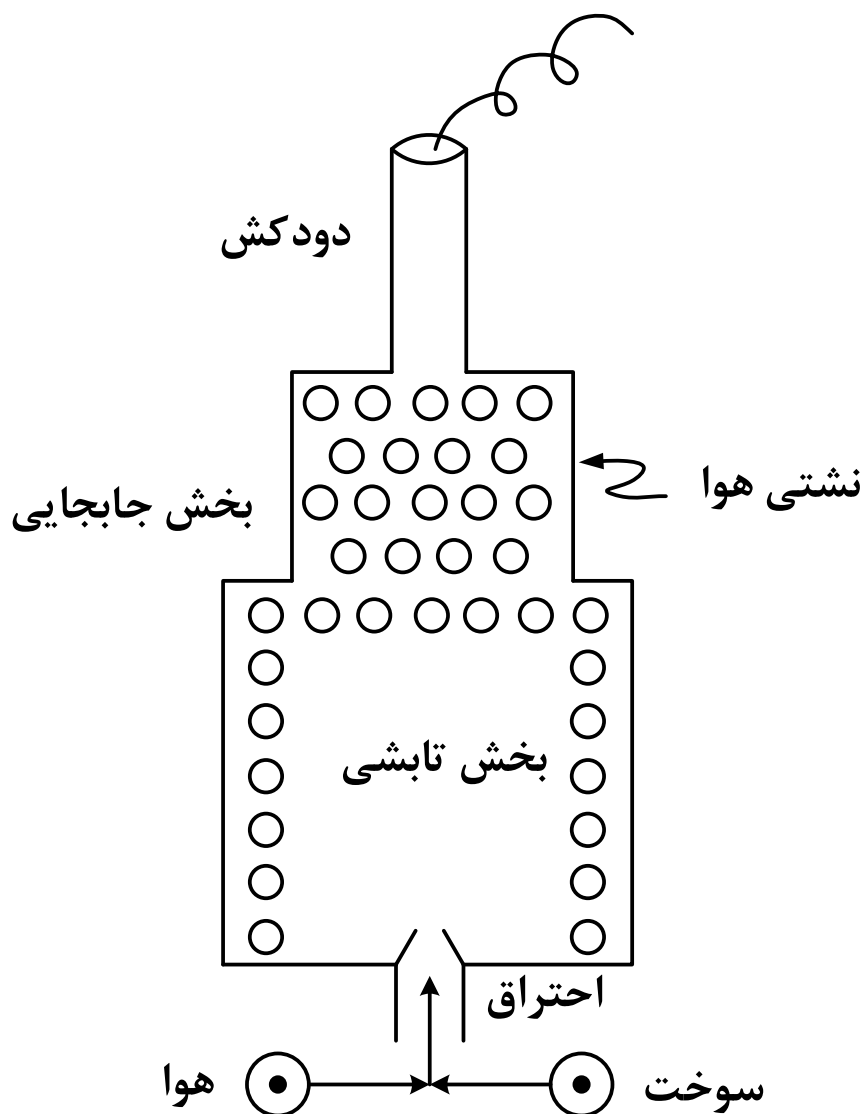
بیشتر گرمکن‌های مشتعل با مکش طبیعی^۱، معمولاً به‌وسیله هوای احتراق و درافت، محدود می‌شوند. هم هوا و هم درافت، تابعی از موارد زیر هستند (شکل ۱۹-۴):

۱. ارتفاع دودکش؛
۲. دمای گاز دودکش؛
۳. ارتفاع و درجه حرارت محفظه احتراق؛
۴. افت فشار گاز دودکش، در بخش جابجایی لوله؛
۵. باد؛
۶. دمای محیطی؛
۷. نشت هوای سرگردان به بخش جابجایی لوله.

با توجه به مشاهداتم، باد، درافت را به میزان ۰/۱ تا ۰/۲ اینچ آب تغییر می‌دهد و این میزان، بین ۲۰ تا ۴۰ درصد از کل درافت در دسترس است. یکی دیگر از متغیرهای ناشناخته، نشت هوای سرگردان و سردی است که با خنک کردن گاز دودکش، درافت ایجادشده به‌وسیله دودکش را، سرکوب می‌کند. به‌علاوه، سومین متغیر مهم که

^۱ Natural draft: مکش طبیعی

قابل پیش‌بینی نیست، رسوب‌گذاری بر روی پره‌ها در دسته‌لوله‌های بخش جابجایی است. بدین ترتیب، مدل‌های کامپیوتری موجود، برای محاسبه ظرفیت هیتر احتراقی، گویای واقعیت نیستند.



شکل ۱۹-۴ هیتر احتراقی درافت طبیعی.

روش‌های موثر طراحی

در این فصل، نخست در مورد طراحی کک‌ساز «B» در تگزاس‌سیتی^۱، در سال ۱۹۶۶ با استفاده از یک مدل کامپیوتری، توضیح دادم. چگونه مشکلات طراحی فوق‌الذکر را برطرف کردم؟

^۱ Texas City: شهر تگزاس

«یک کک‌ساز قدیمی (حالا خراب شده است) به نام «A» نزدیک کک‌ساز «B» قرار داشت. من یک هفته را در کارخانه، صرف جمع‌آوری داده‌های مربوط به عملکرد کک‌ساز «A» کردم و مدل رایانه‌ای کک‌سازم را طوری تنظیم کردم تا قادر به شبیه‌سازی عملکرد کک‌ساز «A» باشد. پس از آن، برای طراحی کک‌ساز جدید «B»، تغییرات کوچکی را در مدل کک‌ساز «A»، اعمال کردم.

من این روش طراحی را در طول نیم قرن گذشته مورد استفاده قرار داده‌ام. استفاده از مدل‌سازی کامپیوتری کار خوبی است؛ اما لازم است مدلی را که ارائه می‌دهیم، مبنا و اساس معتبری داشته باشد. این آزمون برای ارزیابی عملکرد در سطح کارخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد و در آن از پارامترهای به‌دست‌آمده به‌منظور تنظیم مدل‌ها و با توجه به موارد زیر استفاده می‌شود:

- راندمان تفکیک سینی؛
- فرارایت نسبی اجزا؛
- افت فشار سیستم لوله‌کشی؛
- ضرایب انتقال حرارت؛
- ظرفیت حرارتی هیتر؛
- اندازه ته‌نشین‌ساز روغن-آب.

یکی از ترانه‌های قدیمی هری‌بلافونته^۱ به ما می‌آموزد که: «خانه‌ای که فونداسیون محکمی نداشته باشد، دوامی نخواهد داشت». طراحی فرآیند برای واحدهای دوگانه جدید نفت خام با ظرفیت ۱۵۰۰۰۰ BSD^۲ که برای پالایشگاه جدیدی در عربستان سعودی انجام شد، مطابق یک مدل رایانه‌ای در یکی از دفاتر پیمانکاری مهندسی در اروپا بود و موجب ناامیدی مشتریانش شد. طرح پیمانکار بر اساس عملیات واحد تقطیر نفت خام^۳ موجود موفق نبود. همیشه به مهندسان جوانی که با من در پروژه‌های طراحی کار می‌کنند، می‌گویم: «تا جایی که می‌توانید، کپی کنید؛ تنها به‌عنوان آخرین راه‌حل، محاسبه کنید». ترفندی که باید از آن استفاده کنید، این است که تشخیص دهید کدام طرح‌ها را کپی کنید.

^۱ Harry Belafonte: هری‌بلافونته

^۲ BSD(BPSD): مخفف "Barell Per Stream Day"، تعداد بشکه در طول روز

^۳ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

ملاحظات ایمنی

خطرات نیتروژن

در سال ۱۹۸۲، ایده خارق‌العاده‌ای برای بهبود قابلیت اطمینان «سیستم هوای ابزار دقیق»^۱ ضعیف‌مان در پالایشگاه گود هوپ^۲ واقع در لوئیزیانا^۳ داشتیم. خط ورودی نیتروژن را به هوای ابزار دقیق وصل کرده بودم. شیر کنترلی که باعث می‌شد نیتروژن وارد مجرای اصلی (هدر)^۴ هوای ابزار دقیق شود، هنگامی باز می‌شد که، فشار هوای دستگاه به کمتر از ۳۰ psig رسیده باشد.

آن موقع، ابزار دقیق اتاق کنترل ما به وسیله هوای ابزار دقیق تغذیه می‌شد. هر ابزار، از ۵-SCFM ۱۰ هوا استفاده می‌کرد.

یک روز بعد از ظهر، زمانی که عملیات پالایشگاه را در اتاق کنترل تماشا می‌کردم، زنگ خطر عجیبی به صدا درآمد و پس از آن چراغ قرمز شروع به چشمک‌زدن کرد.

همه گیج و سردرگم شده بودند و به اطرافشان نگاه می‌کردند. این صدا، زنگ هشدار «کمبود اکسیژن» بود که روی میزان اکسیژن ۱۸٪، تنظیم شده بود. سیستم فشار برگشتی هوای ابزار دقیق به نیتروژن من به دلیل کاهش فشار هوا، فعال شده بود. انحلال نیتروژن در هوا موجب تنگی نفس یا سایر ناراحتی‌های جسمی نمی‌شود. وقتی سه کارگر وارد رآکتوری در تگزاس سیتی^۵ شدند که با نیتروژن پاکسازی^۶ شده بود، جان باختند. مقادیر بیش از حد نیتروژن و اکسیژن کم، موجب مرگ می‌شوند. من از آن حادثه در تگزاس سیتی با این توجیه دفاع کردم که وقتی از نیتروژن برای پاکسازی وسل^۷ استفاده می‌شود، از چند درصد کربن دی اکسید نیز، استفاده شود. کربن دی اکسید موجب تنگی نفس شده و بدین ترتیب، پرسنل متوجه کمبود اکسیژن می‌شوند.

^۱ Instrument Air System: سیستم هوای ابزار دقیق

^۲ Good Hope: گود هوپ

^۳ Louisiana: لوئیزیانا

^۴ Header: هدر، مجرای اصلی، لوله اصلی، لوله مادر

^۵ Texas City: شهر تگزاس

^۶ Purge: پرچ

^۷ Vessel: محفظه، ظرف

آیا مدل سازی کامپیوتری، واقعیت را نشان می دهد؟ - نقطه انجماد دیزل^۱

چکیده:

روغن دیزل تولیدشده در پالایشگاه، اغلب به جای نقطه جوش، توسط نقطه انجماد، محدود می شود. تلاش برای پیش بینی محدودیت نقطه انجماد دیزل ممکن است به نتیجه کاملاً اشتباه منجر شود. مگر این که مدل کامپیوتری نیز براساس تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی نمونه محصولات طراحی و تنظیم شود. از این قبیل مشکلات در مورد محدودسازی نفت سفید یا ابر سوخت جت (منظور نقطه مه نیست) وجود دارد.

کلمات کلیدی:

دیزل؛ مه؛ انجماد؛ نقطه ابری؛ راندهان تفکیک؛ شبیه سازی؛ تست آزمایشگاهی

^۱ Diesel Freeze Point: نقطه انجماد دیزل

این یک داستان واقعی است؛ کلمه به کلمه. عدد به عدد. تنها کاری که انجام دادم، این بود که اسامی را تغییر دادم. البته به جز کتی^۱. معتقدم که این بخش، مهم‌ترین بخش این کتاب است.

خواننده ناامید خواهد شد؛ چراکه در انتهای این فصل کوتاه، علت ناهمخوانی فراوان بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های رایانه‌ای را مشخص نکرده‌ام. سیاستمداران، حقوقدانان و بانکداران، در جهانی وابسته به فرضیات تئوری فعالیت می‌کنند. اما، اپراتورها و مهندسان فرآیند با واقعیت، محدود می‌شوند.

معمولاً نقطه انجماد، عامل محدودکننده تولید گازوئیل از نفت خام است که البته به محل عرضه سوخت موتور دیزل در بازار و زمان نیز، بستگی دارد. هدف اصلی در یکی از پالایشگاه‌های ایالات متحده، افزایش تولید دیزل به حداکثر میزان ممکن بود که با نقطه انجماد محدود شده بود. یکی از شرکت‌های مهندسی مشاور از هیوستون^۲ تصمیم گرفت امکان‌سنجی‌های لازم را برای افزایش تولید دیزل از نفت خام، بررسی کند.

چندین حالت با کمک شبیه‌سازی مدل کامپیوتری آسپن^۳ از فرآیند تقطیر نفت خام ارائه شد. هفده حالت ارائه شدند و نشان دادند که جریان دیزل، قابلیت افزایش بین ۳۰۰ تا ۱۱۰۰۰ BSD را دارد. با در نظر گرفتن بازیابی بیشتر سوخت دیزل از فرآورده‌های سنگین‌تر، سرمایه‌گذاری لازم برای حالت‌های مختلف در محدوده چهار میلیون دلار تا دوازده میلیون دلار قرار داشت.

اد، مدیر فنی پالایشگاه از من خواست این ۱۷ حالت را بررسی کرده و اقتصادی‌ترین گزینه را مشخص کنم. طی اولین صحبت‌هایی که با اد^۴ داشتم، چنین نتیجه گرفتم که او متوجه موارد متفاوت نمی‌شود و برای ارزیابی، به کمک من نیاز دارد.

حجم مواد تولیدی شرکت مشاور در سال گذشته بسیار بالا بود. آمار نتایج شبیه‌سازی و ده‌ها برگه ثبت جریان فرآیندی، حاوی اصلاحاتی بود که به رنگ قرمز مشخص شده بودند. در هر حالت، میزان افزایش دیزل تولیدی و برآوردی از هزینه سرمایه‌گذاری، محاسبه شده بود. چنین نتیجه گرفتم که جذاب‌ترین گزینه اقتصادی، گزینه‌ای بود که باعث حداکثر تولید سوخت دیزل به میزان ۱۱۰۰۰ BSD می‌شد.

آیا واقعاً تمام ۱۷ گزینه، عملی و اجرایی بودند یا خیر؟ من نمی‌توانستم پاسخ دقیقی برای این پرسش بیابم. بسیاری از تغییرات فرآیندی پیشنهادی، حاوی تغییر جزئی در تفکیک‌کننده‌های موجود به روشی شدیداً پیچیده بود که

^۱ کتی: Kathy

^۲ هیوستون: Houston

^۳ آسپن: Aspen

^۴ اد: ED

احتمالاً به لحاظ مکانیکی، غیرممکن بود.

تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی

کتی، مهندس جوان واحد تقطیر نفت خام^۱ بود و در این موقعیت تصمیم گرفت تا نمونه‌های واحد را برای تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی، تهیه کند. او هشت نمونه^۲ گرفت. دو مجموعه از هر واحد تقطیر نفت خام موازی برای موارد زیر:

- نفت‌گاز اتمسفری؛
- نفت‌گاز خلأ سبک؛
- نفت‌گاز خلأ سنگین؛
- پس‌ماند برج تقطیر در خلأ.

تمام نمونه‌ها در آزمایشگاهی، طبق استاندارد ASTM D-1160 و به وسیله دستگاه تقطیر جهت بازیابی محتوای دیزلی خود که توسط نقطه انجماد محدود شده بود، تقطیر شدند. استاندارد D-1160 آزمونی با قابلیت مقایسه با تقطیر TBP (نقطه جوش واقعی^۳) است.

میعانات درام آب‌بند برج خلأ در حال بازیابی به نمک‌زدای واحد نفت خام بودند. به همین دلیل، کتی در تجزیه و تحلیل خود برای یافتن حداکثر تولید سوخت دیزل که توسط نقطه انجماد محدود شده بود، به درستی از این جریان، چشم‌پوشی کرد. وی درصد سوخت دیزل قابل‌بازیابی از هر شش جریانی که قبلاً اشاره شد را، برایمیل کرد. طبق محاسبات من که مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی و جریانات برج تقطیر بود، BSD ۸۰۰ سوخت دیزل قابل‌بازیابی بود؛ نه BSD ۱۱۰۰!

وقتی این موضوع را به اد^۴، مدیر فنی پروژه گزارش دادم، خوشحال نشد. بعد از همه این‌ها، اد در طول سال گذشته ۵۰۰۰۰ دلار در شرکت مهندسی مشاور هیوستون برای مدل‌سازی کامپیوتری، مطالعات موردی، برآورد هزینه، تهیه گزارش‌ها و جلسات، هزینه کرده بود.

^۱ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

^۲ Sample: نمونه

^۳ True Boiling Point: نقطه جوش واقعی

^۴ ED: اد

«آقای لیبرمن؛ خواهش می‌کنم یک روز دیگر به بررسی و مطابقت دادن BSD ۸۰۰ و BSD ۱۱۰۰۰ تولید سوخت دیزلی، اختصاص دهید. پیش‌بینی کرده بودم که برنامه تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی که ماه قبل به کتی داده بودم، مطابق مطالعات موردی شبیه‌سازی باشد و آن‌ها را رد نکند.»

من نتایج و روش شبیه‌سازی‌ای که مشاوران از آن استفاده می‌کردند را، بررسی کردم. ظاهراً محاسبات و مفروضات آن‌ها، مطابق با اصول مهندسی است. در نهایت، نتیجه گرفتم که مطالعات نظری و نتایج مدل‌سازی آن‌ها، که افزایش BSD ۱۱۰۰۰ محصول سوخت دیزلی را نشان می‌دهد، درست است.

کتی تجزیه و تحلیل خود را بر مبنای BSD ۱۸۰۰۰۰ نفت خام به جای بیشترین مقدار پالایشگاهی BSD ۲۱۰۰۰۰ تنظیم کرده بود. پس من BSD ۸۰۰ افزایش تولید دیزل او را به BSD ۱۰۰۰ رساندم.

و پس از آن، اد برنامه یک مکالمه کنفرانسی را تنظیم کرد تا در مورد نتایج من، بحث کند. این نتایج به این شرح هستند:

۱. به نظر می‌رسد که هر دو روش، مناسب باشند.

۲. من موفق نشدم مشکل ناهمخوانی BSD ۱۰۰۰۰ تولید دیزل را، رفع کنم.

۳. روش آزمایشگاهی کتی، بیانگر واقعیت بود.

۴. مدل شبیه‌سازی کامپیوتری، نظریه را نشان می‌داد.

۵. با توجه به اینکه پالایشگاه، سوخت دیزل واقعی را با محدودیت مشخصه‌های نقطه انجماد به جای سوخت دیزل نظری به بازار می‌فرستاد، لازم بود از نتایج آزمایشگاه به صورت راهنمایی برای توجیه سرمایه‌گذاری عملی یا واقعی، استفاده شود.

«اما نورم، ما نمی‌توانیم هیچکدام از ۱۷ مورد سرمایه‌گذاری جایگزین را برای تولید BSD ۱۰۰۰ دیزل توجیه کنیم. من ۵۰۰ هزار دلار برای شبیه‌سازی واحد تقطیر نفت خام، برآورد هزینه و مطالعات موردی هزینه کردم.»

در پاسخ گفتم: «بله اد؛ معمولاً پالایشگاه‌ها چنین مشکلاتی دارند. معمولاً پالایشگاه‌ها مطابقت چندانی با مدل‌سازی کامپیوتری نظری ندارند. تنها در مواردی این مطابقت مشاهده می‌شود که مدل‌ها، مبتنی بر داده‌های واقعی پالایشگاهی و حاوی تجزیه و تحلیل ترکیب محصول باشند.»

این یک داستان واقعی است. اگر دوست دارید هویت واقعی شرکت کنندگان داستان برملا شود، با من تماس بگیرید. از خط تلفن ثابت خود استفاده کنید. نمی‌خواهم با ایمیل مکاتبه داشته باشم و ویکی‌لیکس^۱ مرا هک کند و موضوع خبری شبکه CNN باشم.

حرف آخر

همانطور که سابقاً اشاره کردم، این یک داستان واقعی است. برنت^۲ یکی از مهندسان متبحر کارخانه بود و تجزیه و تحلیل کتی را دوباره انجام داد. او چنین نتیجه گرفت که می‌توان بخشی از تولیدات دیزل با نقطه جوش نهایی^۳ بالا به‌منظور کاهش محدودیت نقطه انجماد، ترکیب کرد. این کار، حداکثر تولید بالقوه را امکان‌پذیر می‌کند. بدین ترتیب، تولید دیزل به جای ۱۰۰۰ BSD که من محاسبه کرده بودم، به ۱۸۰۰ BSD افزایش داد. ما مشغول برنامه‌ریزی برای اصلاح سینی‌های عریان‌ساز بخار آب هستیم تا در سال آینده بتوانیم به این هدف برسیم.

محدودیت‌های نقطه انجماد، دود و ابر

بعضی اوقات نفت سفید، سوخت جت، روغن حرارتی و سوخت دیزل به جای ۹۵ درصد یا نقطه جوش نهایی، توسط نقاط انجماد، دود یا ابر محدود می‌شوند. این محدودیت‌ها وابستگی بالایی به تقطیر دارند.

معمولاً یک پالایشگاه با ظرفیت خوراک ۲۰۰۰۰۰ BSD در بهترین حالت، انتظار تولید ۴۰۰۰۰ BSD – ۵۰۰۰۰ BSD نفت سفید و گازوئیل را دارد. افزایش بازده تقطیر ۲۰۰۰ – ۳۰۰۰ BSD را برای این پالایشگاه می‌توان متصور شد.

معمولاً حذف بخار آب جریان‌ات جانبی از اجزای نفت گاز سبک، موثرترین راه برای رسیدن به این هدف است.

مشاهدات بالا مبتنی بر تجربه پالایشگاهی است، نه مدل کامپیوتری.

محدودیت نقطه مه^۴

لازم است سوخت جت یا نفت سفید، مشخصه‌های نقطه مه را داشته باشد. نقطه مه به محدودیت نقطه ابر ارتباطی ندارد. مه، تابعی از محتوای آبی است که در سوخت جت، حل می‌شود. وقتی جت خنک می‌شود، قابلیت انحلال آب کاهش می‌یابد؛ رسوب می‌کند و سوخت جت به حالت مه درمی‌آید. مه با خشک کردن کنترل می‌شود. معمولاً

^۱ ویکی‌لیکس: WikiLeaks

^۲ برنت: Brent

^۳ End-point: نقطه جوش نهایی

^۴ Haze Point: نقطه مه

با بسترهای سنگ نمک، که مه به آرامی در آن جذب می‌شود. نقطه ابر به اجزای مومی سنگینی مرتبط است که احتمال دارد با خنک‌شدن سوخت جت، رسوب کرده و از محلول خارج شوند. نقطه ابر ارتباطی به محتوای رطوبت محصول تقطیر ندارد. نقطه ابر با کاهش دنباله سنگین و مومی در محصول و بهبود راندمان تفکیک قابل کنترل بوده و شدیداً به تقطیر، وابسته است.



تأثیر پیش گرمایش هوای احتراق بر روی هیتر احتراقی

چکیده:

افزایش دمای هوای احتراق در هیتر احتراقی، موجب صرفه جویی در مصرف انرژی می شود. به ازای هر ۲۰۰ درجه سانتی گراد افزایش دمای هوای احتراق، حدود ۱۰٪ در مصرف سوخت هیتر صرفه جویی می شود.

افزایش پیش گرمایش هوا، سبب کاهش ظرفیت هیتر می گردد. به ازای هر ۲۰۰ درجه سانتی گراد افزایش دما با کاهش جریان گاز دودکش و در نتیجه بازیابی گرما در بخش جابجایی، حدود ۳٪ از ظرفیت هیتر کاسته می شود. پیش گرمایش هوا باعث کاهش طول کارکرد هیتر احتراقی می شود (برای کک زدایی لوله های بخش تابشی باید هیتر را از سرویس خارج نمود).

کلمات کلیدی:

جابجایی؛ تابشی؛ تیوب های هیتر؛ احتراق؛ پیش گرمایش هوا؛ سوخت؛ کک زدایی

سرهنگ نوراگارد^۱ در طول سال‌های جنگ جهانی دوم، خلبان بمبافکن B-۱۷ بود. این تاریخ، سال‌ها قبل از این بود که او را در پالایشگاه نفت آمریکا^۲ (آموکو^۳) در سال ۱۹۷۱ ملاقات کنم.

سرهنگ گفت: «لیبرمن، ما باید نرخ تقطیر را، ۱۰ درصد بالا ببریم.»

پاسخ دادم: «متأسفم قربان؛ ما با محدودیت نرخ گاز سوختی^۴ به میزان SCF/HR^۵ ۴۰۰۰۰۰ مواجه هستیم. در مقادیر بیشتر میزان احتراق، لوله‌های بخش تابشی، بیش از اندازه گرم می‌شوند. می‌توانیم تقطیر بیشتری را با SCF/HR ۴۰۰۰۰۰ سوخت گازی انجام دهیم؛ اما پس از آن، دمای خروجی هیت‌ر کمتر شده و بازیابی سوخت دیزل، دچار مشکل خواهد شد. این کار از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست.»

«این‌جا را نگاه کن لیبرمن؛ من به تنهایی نازی‌ها^۶ را شکست دادم. این مشکل کوچک مرا از پا در نمی‌آورد. فرض کن هوای احتراق را پیش‌گرم کنیم. با افزایش دمای هوای احتراق به میزان هر °F ۳۶۰، مصرف سوخت گازی ۱۰ درصد کمتر می‌شود (شکل ۲۱-۱).»

«بله؛ درست است سرهنگ.»

«پس یعنی می‌توانیم نرخ سوخت گازی را برای BSD ۱۰۰۰۰۰ نفت خام (نرخ تقطیر فعلی) به میزان SCF/HR ۳۶۰۰۰۰ برسانیم.»

«کاملاً درست است قربان.»

«بعداً به محدوده SCF/HR ۴۰۰۰۰۰ برمی‌گردیم و بدون آنکه از محدوده احتراقی که گفتم، فراتر رویم، نرخ تقطیر را ۱۰٪ افزایش می‌دهیم.»

«اما سرهنگ، ما باید...»

^۱ سرهنگ نوراگارد: Colonel Noraguard

^۲ نفت آمریکا: American Oil

^۳ آموکو: Amoco

^۴ گاز سوختی: Fuel gas

^۵ متر مکعب بر ساعت: SCF/HR

^۶ نازی‌ها: Nazis

«لیبرمن؛ با این وجود، دمای دودکش ما ۸۶۰ درجه فارنهایت است. پیش گرمایش هوای احتراق، دمای دودکش را به ۵۴۰ درجه فارنهایت کاهش می‌دهد. احتمال می‌دهم که شاید مقدار زیادی درافت را در اثر دمای پایین‌تر گاز دودکش استک از دست می‌دهیم. آیا یک دودکش بلندتر یا یک دمنده مکش اجباری^۱ لازم داریم؟ نظر تو چیست؟»

«نه قربان! مکش اضافی خیلی زیادی داریم. ما ۶۰٪ از دمپر دودکش را بسته نگه می‌داریم.»

«آیا فشار سوخت گازی برای افزایش ۱۰ درصدی نرخ احتراق کافی است؟ آیا لازم است نوک مشعل‌ها را با دریل سوراخ کنیم؟ آیا با فشار بیش از حد در نوک مشعل، محدودیت داریم؟»

«خیر، قربان. فشار فعلی نوک مشعل فقط ۹ psi است. مشعل‌ها برای تحمل ۳۴ psi طراحی شده‌اند. ما ظرفیت مشعل و سوخت گازی بالایی داریم. افزون‌براین، ورودی‌های هوای^۲ مشعل فقط به میزان ۲/۳ باز هستند. پس هوا، درافت و سوخت، عوامل محدودکننده نیستند.»

سرهنگ نوراگارد، در حمله هزاران بمبافکن B-۱۷ به شهر کلن^۳ در ماه فوریه سال ۱۹۴۵، خلبان رهبر بمبافکن‌ها بود و ۱۰ هزار نفر را کشت. او هر روز با همان حس اعتماد به نفس و پشتکار تزلزل‌ناپذیر بر سر کار خود در پالایشگاه شوگر کریک^۴ حاضر می‌شد.

«قربان، اجازه می‌دهید که مشکل را با جزئیات توضیح دهم؟ این مشکل به خاطر مسئله‌ای ایجاد شده است که من به آن «محدودیت شار حرارتی لوله تابشی»^۵ می‌گویم. این محدودیت مربوط به چگالی گرمایی تابشی ردیف پایین‌تر لوله‌های سقف است (یعنی لوله‌های شوک که در شکل ۲۱-۱ مشخص شده‌اند). لطفاً فقط یک لحظه به طرحم نگاهی بیندازید. می‌توانم توضیح دهم که ...»

«نه سرم شلوغ است. من کل پالایشگاه آموکو را مثل یک خلبان، رهبری می‌کنم. امروز گروه پروژه را جمع کرده و به سرعت نصب پیش‌گرم‌کن هوای احتراق را شروع می‌کنم (بدون فوت وقت^۶). با توجه به تفاوت قیمتی نفت خام با فرآورده حاصله به میزان ۱۵ تا ۲۰ دلار در هر بشکه، می‌توانیم در سال ۷ میلیون دلار درآمد خالص داشته باشیم. گمان نمی‌کنم که پروژه پیش‌گرم‌کردن هوا، بیشتر از یکی، دو میلیون دلار هزینه داشته باشد. سرمایه‌گذاری بسیار جذابی است. این‌طور فکر نمی‌کنی، لیبرمن؟»

^۱ Forced Draft Blower: دمنده مکش اجباری

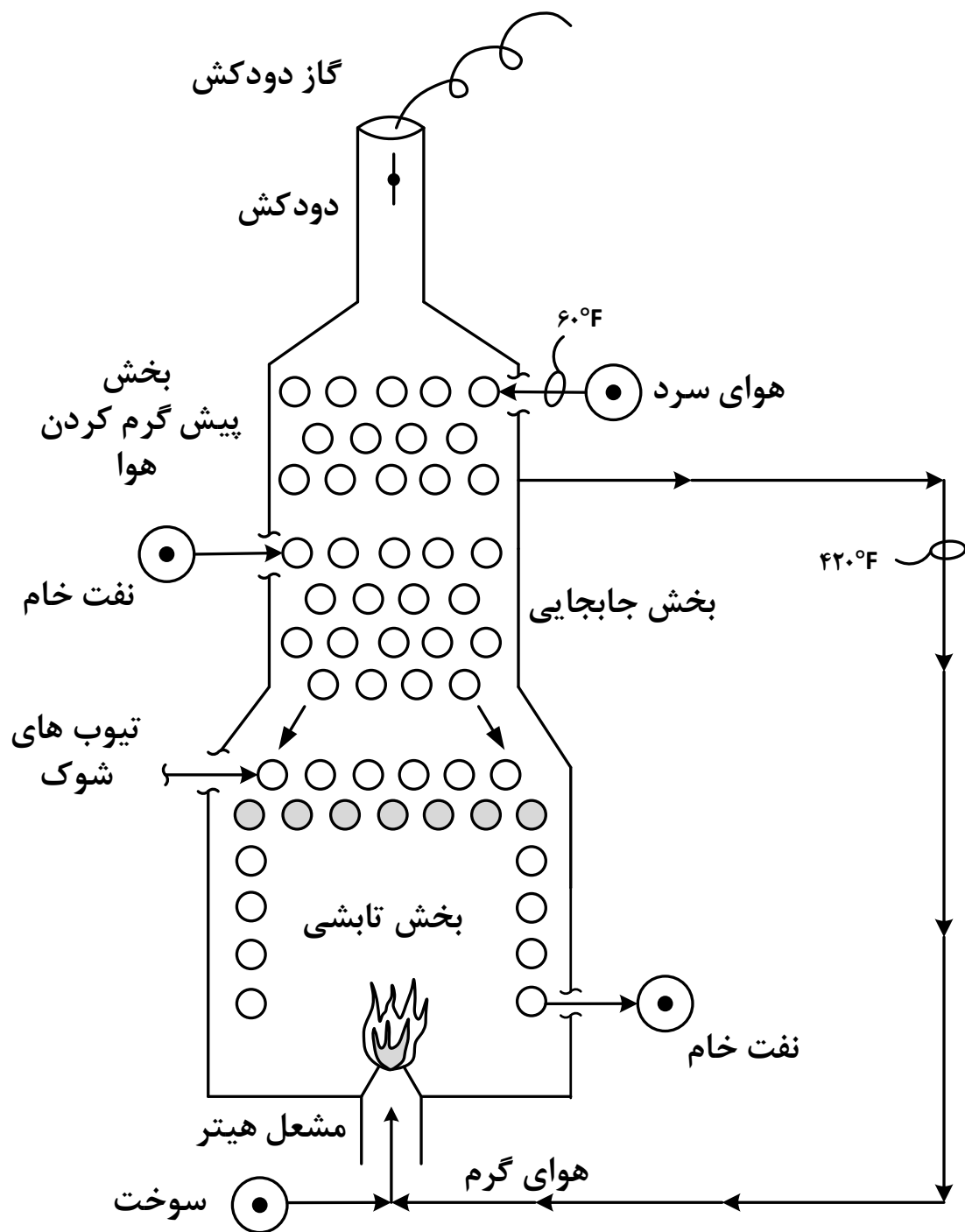
^۲ Air register: ورودی هوا

^۳ Cologne: کلن

^۴ Sugar Creek: شوگر کریک

^۵ Radiant Tube Heat Flux Limit: محدوده شار حرارتی لوله تابشی

^۶ ASAP: "As Soon As Possible" بدون فوت وقت



شکل ۲۱-۱ پیش گرم کردن هوا، موجب افزایش سرعت تشکیل کک در داخل لوله‌ها می‌شود.

تأثیر بر روی دمای شعله

علی‌رغم تلاشی که داشتم، موفق نشدم این موضوع را برای سرهنگ نوراگارد توضیح بدهم که:

• **مرحله ۱-** پیش‌گرمایش هوای احتراق تا دمای °F ۳۶۰، به وسیله تبادل حرارتی با گاز دودکش استک، دمای شعله مشعل را نیز به میزان °F ۳۶۰ افزایش می‌دهد. پس از آن، احتمال دارد دمای شعله از ۲۲۰۰ به °F ۲۵۰۰ برسد.

• **مرحله ۲-** نرخ انتقال حرارت تابشی با توجه به معادله زیر تغییر می‌کند:

$$(1 - 21) \quad \text{نرخ انتقال حرارت تابشی} = (T_R)^4 - (T_A)^4$$

که در این معادله:

○ T_R = دمای منبع تابشی بر حسب °R (یعنی رانکین).

○ T_A = دمای سطح جذب، بر حسب °R، °R = °F + 459

• **مرحله ۳-** تیوب‌های تابشی شامل تیوب‌های شوک در سقف، داغ‌تر می‌شوند.

• **مرحله ۴-** مجموع جذب گرما در بخش تابشی، افزایش می‌یابد.

• **مرحله ۵-** مجموع جذب گرما در بخش جابجایی، کم می‌شود؛ چراکه نرخ گاز دودکش، ۱۰٪ کاهش می‌یابد.

• **مرحله ۶-** نرخ گاز دودکش استک، کم می‌شود؛ چراکه با توجه به پیش‌گرمایش هوا، نرخ احتراق سوخت، ۱۰٪ کاهش می‌یابد.

این موضوع درست است که پیش‌گرمکن‌های هوا موجب کاهش مصرف سوخت می‌شوند؛ اما موجب افزایش دمای محفظه احتراق بخش تابشی نیز می‌شوند که خود به افزایش شار حرارتی (btu/h/ft^2) لوله‌های بخش تابشی می‌انجامد. به موازات داغ‌تر شدن تیوب‌ها، کک‌سازی نیز تسریع می‌شود. مشاهده کردم که دوره کارکرد گرم‌کن در پالایشگاه تگزاس^۱، الدورادو^۲ و کانزاس^۳ از ۲ سال به ۸ ماه، کاهش یافت؛ چراکه در این واحدها یک پیش‌گرم‌کن هوای احتراق، اضافه شده بود.

تأثیر بهبود اختلاط هوا و سوخت

احتمالاً بهبود اختلاط موثر هوا و سوخت در مشعل موجب می‌شود که میزان اکسیژن اضافی از شش درصد به دو درصد کاهش یابد. این موضوع اثر مثبت چشمگیری بر راندمان انرژی دارد. اما در عین حال، دمای شعله مشعل نیز

^۱ Texas: تگزاس

^۲ El Dorado: الدورادو

^۳ Kansas: کانزاس

به شدت بالا می‌رود که به نوبه خود دمای محفظه احتراق را افزایش می‌دهد. افزون‌براین، بازیابی گرما در بخش جابجایی کاهش می‌یابد. این موضوع سبب می‌شود که رنگ تیوب‌های بخش تابشی از قرمز گیلای به قرمز مایل به نارنجی تغییر کند. پس از آن، سرعت تشکیل کک در داخل این تیوب‌ها، افزایش می‌یابد. در واقع، یکی از نتایج بهینه‌سازی نرخ هوای احتراق ورودی به هیتر مشتعل این است که طول زمان کارکرد هیتر، بین فواصل کک‌زدایی تیوب، کاهش می‌یابد.

هوای اضافی^۱

خواننده با توجه به موارد بالا چنین نتیجه‌گیری می‌کند که، تأثیرات مخرب استفاده از پیش‌گرم‌کن هوای احتراق با افزایش هوای اضافی، تا حدودی خطای ماندگار می‌شود.^۲ قبلاً این ایده را با سرهنگ نوراگارد مطرح کرده بودم؛ ولی او سابقاً در یک سمینار حفاظت از انرژی در هیوستون^۳ شرکت کرده بود و در آنجا یاد گرفته بود که اکسیژن اضافی در گاز دودکش، باید دقیقاً بین ۲ تا ۴٪ کنترل شود تا بتوان در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد. موفق نشدم او را قانع کنم که اگر می‌خواهد نرخ تقطیر را به حداکثر برساند، باید از نرخ ۲ تا ۴٪، صرف نظر کند.

توضیح دادم: «سرهنگ، این شرایط، مانند جنگ است. می‌توانید انتخاب کنید که خلبان بمبافکن پیشرویی باشید که موجب ویرانی شهرها می‌شود؛ یا اینکه انسان‌دوستی را انتخاب کنید. نمی‌توانید هر دوی این موارد را در کنار هم داشته باشید.»

تأثیر پیش‌گرم‌کن هوا

آیا پیش‌گرمایش هوای احتراق برای هیتر احتراقی واحد تقطیر نفت خام، صورت گرفت؟

بله!

آیا پس از این اقدام ظرفیت واحد تقطیر نفت خام^۴ ۱۰٪ افزایش ظرفیت یافت؟

بله!

^۱ Excess Air: هوای اضافی

^۲ Off-set: خطای ماندگار، اختلاف موقعیت جدید سطح نسبت به سطح مطلوب برای خنثی کردن متغیرهای عملیاتی را خطای ماندگار می‌گویند.

^۳ Houston: هیوستون

^۴ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

تنها به مدت یک سال. اما به خاطر آسیبی که به لوله‌های ضربه گیر یا همان شوک در بخش تابشی وارد شد، لازم بود که لوله‌های کرومی بخش تابشی که ۱۲٪ تخریب و دچار فرورفتگی شده بودند، با صرف هزینه یک میلیون دلاری، عوض شوند. هرچند، دکتر هورنر^۱ معاون پالایش آموکو، حاضر نشد تخصیص اعتبار لازم برای تیوب‌های جدید هیترا را که به او تحویل دادم، امضا کند.

او به مدیر برنامه‌ریزی آموکو که دستیارش بود، گفت: «نه، می‌توانیم پالایشگاه شوگر کریک را تعطیل کرده و افزایش تقطیر را در واحدهای تگزاس سیتی و وایتینگ^۲، ایندیانا^۳، انجام دهیم. این واحدها به وسیله سیستم‌های خط لوله پلنتیشن^۴ و کپلین^۵ به هم مرتبط هستند. به هر حال، شوگر کریک یک واحد قدیمی و منسوخ است».

تمام اپراتورها، کارکنان بخش تعمیرات و دختران و پسران شاغل در شوگر کریک، تعدیل نیرو شدند. سرهنگ نوراگارد خلبان بمب افکن پیشرو، به سمت مدیریت کارخانه در پالایشگاه عظیم آموکو وایتینگ، ایندیانا، در سواحل زیبای دریاچه میشیگان^۶ منصوب شد.

وی در سال ۱۹۸۰ بازنشسته شد. یک هفته بعد تصادفاً او و همسرش را در فرودگاه اوهارا^۷ شیکاگو^۸ دیدم. زوج قدیمی خوبی به نظر می‌رسیدند. داشتند به خانه سالمندان در کاسپر^۹ واقع در وایومینگ^{۱۰} می‌رفتند.

نقص دیواره تیوب‌های تابشی

اگر چگالی شار حرارتی تابشی در سیستم تقطیر نفت خام از میزان 14000 تا 16000 btu/h/ft^2 فراتر رود، به ویژه در صورتی که نرخ جریان جرمی کمتر از $100 - 120 \text{ lbs/ft}^2/\text{s}$ باشد، کک به دیواره داخلی لوله‌ها می‌چسبد.

^۱ Horner: هورنر

^۲ Whiting: وایتینگ

^۳ Indiana: ایندیانا

^۴ Plantation: پلنتیشن

^۵ Capline: کپلین

^۶ Lake Michigan: دریاچه میشیگان

^۷ O'Hare Airport: فرودگاه اوهارا

^۸ Chicago O'Hare Airport: اوهارا شیکاگو

^۹ Casper: کاسپر

^{۱۰} Wyoming: وایومینگ

کک در داخل لوله‌ها مانع از سردشدن نفت خام در دیواره لوله می‌شود. دمای پوسته لوله نیز، بیشتر خواهد شد. در مورد مواد لوله هیترا با ۱۲٪ کروم، هنگامی که دیواره تیوب به دمای $1350-1400^{\circ}\text{F}$ برسد، تیوب در معرض «وارفتگی تیوب‌ها در اثر دمای بالا»^۱ قرار می‌گیرد و در نتیجه، قطر تیوب در نقطه داغ^۲، افزایش می‌یابد.

تحدب تیوب کم‌کم ضخامت دیواره را کاهش می‌دهد و تا جایی می‌رسد که در نقطه داغ، سبب نقص تیوب می‌شود. اگر اپراتورهای واحد، به این نقص‌ها توجه نکنند، انفجارهایی ایجاد می‌شود که به تلفات جانی می‌انجامد.

می‌توان با کمک یک پیرومتر نوری^۳، لوله‌هایی که بیش از اندازه گرم شده‌اند را، به راحتی شناسایی کرد. رنگ قرمز گیلانی نشان می‌دهد که لوله تقریباً سرد است و رنگ زرد بیانگر این است که لوله به صورت خطرناکی، داغ است. استفاده از نشانگرهای دمای TI برای پوسته و لوله چندان قابل اعتماد نیست و در بهترین حالت، تنها چند موقعیت را روی لوله‌ها، کنترل می‌کند.

^۱ High Temperature Creep: وارفتگی تیوب‌ها در اثر دمای بالا

^۲ Hot spot: نقطه داغ

^۳ Optical pyrometer: پیرومتر نوری



از سرویس خارج شدن ایمن هیتر احتراقی، در اثر نقص تیوب

چکیده:

هنگامی که تیوب یک هیتر احتراقی پاره شود و دود سیاه و آتش از دودکش خارج شود، این دو کار، بلافاصله باید انجام شود:

- خوراک و سوخت ورودی به هیتر قطع گردد.
 - برای جابجایی هوا، مسیر بخار آب خفه‌کن^۱ یا باکس استیم^۲ به محفظه احتراق^۳ برقرار گردد.
- اگر این دستورالعمل رعایت نشود، به احتمال بسیار زیاد، هیتر منفجر می‌گردد و در نتیجه به پرسنل آسیب می‌رسد. با این حال، در صورتی که بخار آب خفه‌کن یا خاموش‌کننده، دارای رطوبت اضافی (یعنی آب) باشد، استفاده از بخار آب خفه‌کن، خطرناک‌تر از انجام ندادن هیچ‌کاری است.

کلمات کلیدی:

بخار آب خفه‌کن؛ محفظه احتراق؛ ناحیه انفجاری؛ اشتعال؛ بخار آب کویل؛ تله بخار؛ راپچر دیسک (دیسک انفجاری)؛ کویل تابشی

^۱ Snuffing Steam: بخار آب خفه‌کن

^۲ Box steam: باکس استیم

^۳ Firebox: محفظه احتراق

کاترین^۱ در حال خندیدن بود. صدای خنده عصبی او در اتاق انتظار، پخش می‌شد. گری آدامز^۲، آرام و بیهوش پشت پارتیشن شیشه‌ای، دراز کشیده بود. پیراهن یونی‌فرم پلی‌استر روی پوستش ذوب شده بود و صورت، بازوها و قفسه سینه‌اش، دچار سوختگی درجه سه شده بودند.

گری و کتی، دوستان و همکاران من در پالایشگاه گود هوپ^۳ واقع در جنوب لوئیزیانا^۴ بودند. گری، دستیار من در واحد غلظت‌شکن - FCU^۵ بود. همسرش کاترین، در آستانه شوک عصبی بود و به طرز آزاردهنده‌ای می‌خندید. فکر کردم: «خدا را شکر که گری شلوار جین پنبه‌ای به تن داشت، نه شلوار پلی‌استر». این شلوار متعلق به زمان قبل از استفاده از روپوش‌های نومکس^۶ در پالایشگاه ما بود (یعنی سال ۱۹۸۲).

نقص تیوب هیتز

گری بعد از ظهر روز قبل، پشت بی‌سیم «لیبرمن، خودت را به واحد کاهش گرانی برسان. همین الان یکی از تیوب‌ها در هیتز خلأ واحد کاهش گرانی نشتی دارد.»

«گری، چه اتفاقی افتاده است؟»

«ما دود سیاه و آتش را دیدیم که از دودکش آن هیتز لعنتی خارج می‌شد. از دریچه‌های شیشه‌ای^۷ دود خارج می‌شود. به بچه‌ها گفتم که روی محفظه احتراق، آب آتش‌نشانی بریزند. نورم؛ فشار ادرار من بیشتر از فشار این آب آتش‌نشانی‌ست.»

«فاجعه‌ست؛ گری!»

^۱ Kathrine: کاترین

^۲ Gary adams: گری آدامز

^۳ Good Hope: گود هوپ

^۴ Louisiana: لوئیزیانا

^۵ FCU-Visbreaker Complex: واحد غلظت‌شکن کراکینگ کاتالیستی بستر سیال

^۶ Nomex: نومکس

^۷ Sight ports: دریچه‌های شیشه‌ای

«بله! قبلاً به مدیریت پالایشگاه گفته بودم که از آب آتش‌نشانی برای خنک کردن فرآیند، استفاده نکنند. در شرایط اضطراری، فشار کافی نداریم!»

«بسیار خب؛ همین الان به آنجا می‌آیم. مسیرهای بخار آب را فراموش نکن. نباید تیوب‌ها، پر از کک شوند.»

حد بالای انفجار

در می‌سی‌سی‌پی لیور لوی^۱، ۲۰۰ فوت عقب‌تر از هیتر ایستادم. از تمام دریچه‌های شیشه‌ای، دود سیاه بیرون می‌زد و شعله‌های روغنی و سیاه، از دودکش بیرون می‌زدند. تامی جونز^۲، سوخت گازی را مسدود می‌کرد و بون بابین^۳، مسیر بخار آب کوئل را برقرار می‌کرد تا پسماندها را قبل از اینکه به کک تبدیل شوند، خارج کند.

گری، خودش شیرهای ۴ اینچی ورودی خوراک هیتر را روی هر چهار مسیر ورودی می‌بست و مطمئن می‌شد که کنارگذر^۴های شیر کنترل، محکم بسته شده‌اند.

شرایط بد به نظر می‌رسید. اما در واقعیت، هیتر در موقعیتی ایمن، قرار داشت. حداقل برای آن لحظه، چرا که محفظه احتراق در «وضعیت پر از سوخت»^۵ و بالاتر از «حد بالایی انفجار»^۶ خود قرار داشت. سوخت بسیار زیادی برای انفجار موجود بود.

یقیناً این موضوع را می‌دانستم. می‌توانستم بخارهای هیدروکربن سوخته‌نشده‌ای را ببینم که از تیوب خراب در گاز دودکش شعله‌ور می‌شوند و از دودکش هیتر خارج می‌شوند. یقیناً غلظت هیدروکربن‌ها در محفظه احتراق به مرور زمان کمتر می‌شد؛ چراکه گری، خوراک را مسدود کرده و تامی، ورودی سوخت را بسته بود. پس از آن نیز با کاهش نسبت سوخت به هوا، محفظه هیتر به ناحیه انفجاری کاهش خواهد یافت و سپس، محفظه منفجر می‌شد. ۱۵ سال قبل، در تگزاس سیتی^۷ شاهد این اتفاق در پالایشگاه نفت آمریکا^۸ بودم.

^۱ Mississippi River Levee: می‌سی‌سی‌پی لیور لوی

^۲ Tommy Jones: تامی جونز

^۳ Boon Babin: بون بابی

^۴ Bypass: کنار گذر

^۵ Fuel Rich Situation: وضعیت پر از سوخت

^۶ Upper Explosive Limit: حد بالایی انفجار

^۷ Texas City: شهر تگزاس

^۸ American Oil: نفت آمریکا

بخار آب خفه کننده

گری حالا باید استیم باکس یا بخار آب خفه کن را وارد محفظه احتراق می کرد. این کار باعث می شد جریان هوا به درون محفظه احتراق به تعویق بیافتد و محفظه، زمان کافی را برای خنک شدن در محیطی با هوای کم، پیدا می کرد. بخار آب، فشار محفظه را به کمی بالاتر از فشار اتمسفر افزایش می داد و موقتاً جلوی جریان هوا به درون محفظه را در اثر درافت، می گرفت.

اما به یقین می دانستم که گری این کار را نمی کند؛ چراکه چند ماه قبل، چهار خط بخار آب ۶ اینچی را از هیتر واحد کاهش گرانشی، مسدود کردم.

اما چرا؟

برای اینکه خطوط بخار آب خفه کن، از میعانات بخار (آب) پر شده بود. به همین دلیل، استفاده آن ها از این خطوط موجب می شد که آب به داخل یک محفظه آجری با دمای °F ۱۶۰۰ دمیده شود و موج فشار بزرگی ایجاد کند که بعداً قیر محترق واحد کاهش گرانشی را، در تمام واحد پخش کند (شکل ۲۲-۱).

به گری آدامز پیشنهاد کرده بودم که به اپراتورها یاد دهد، اگر لوله خراب شد، ورودی های هوای^۱ زیر هیتر و دمپر دودکش را ببندند. با این کار می توان از تشکیل مخلوط انفجاری هوا و سوخت درون محفظه احتراق، جلوگیری کرد.

«بسیار خب؛ آقای لیبرمن. اگر لوله بریده شود، با شما تماس می گیرم تا دمپر و ورودی هوای ثانویه را ببندیم. نمی خواهم جان هیچ یک از کارکنانم به خطر بیفتد. کیجن های^۲ ایالات متحده بسیار باهوش هستند. این کار برای یانکی های نیویورکی مانند شما خیلی خوب است.»

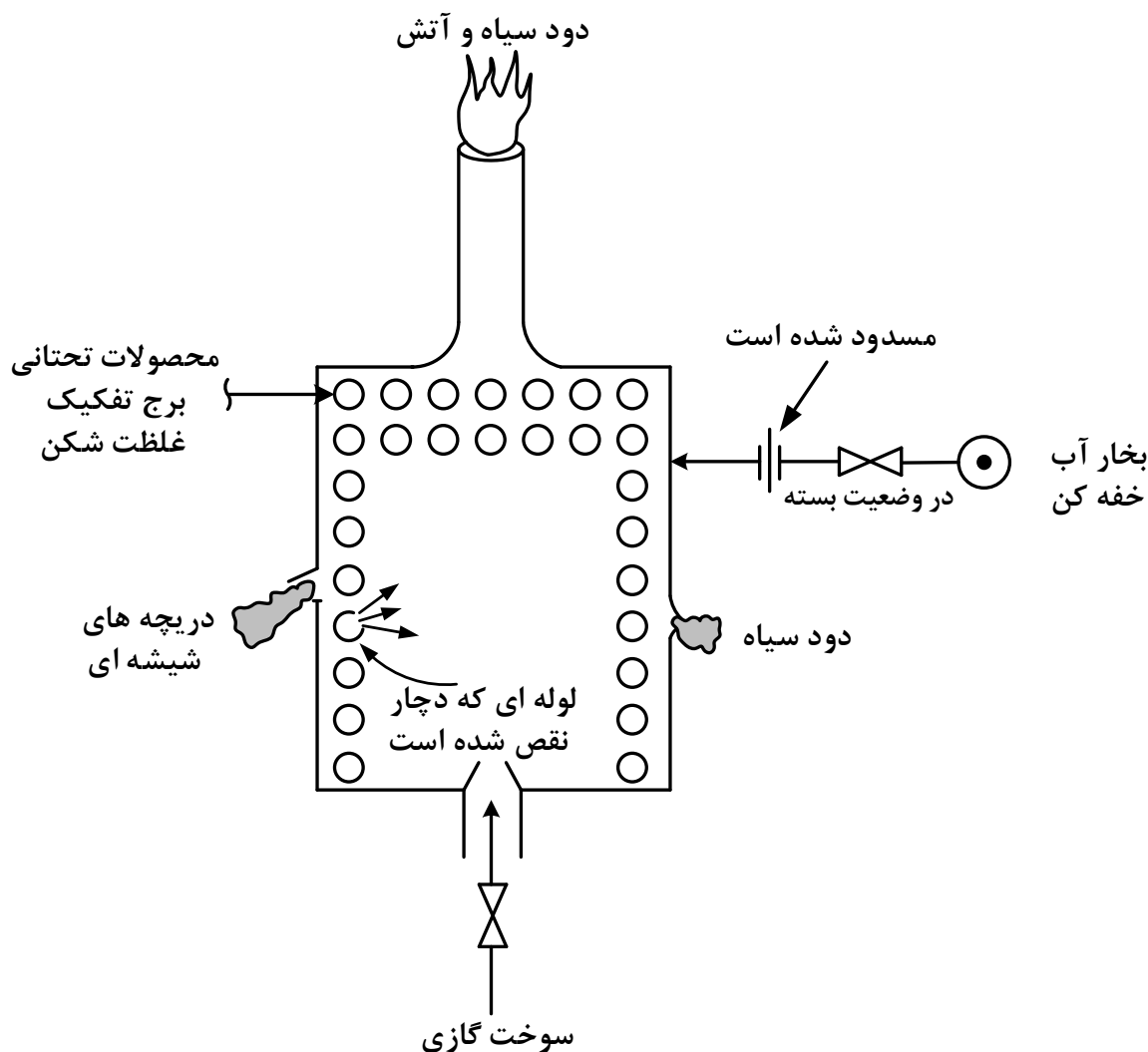
«پس تماس از تو گری!»

^۱ ورودی هوا: Air register

^۲ کیجن ها، عضوی از جوامع مستقل و خودمختار بخش بایو واقع در جنوب لوئیزیانا هستند و نوادگان فرانسوی های کانادایی این جامعه را تشکیل Cajun: داده اند و به زبان فرانسوی غیر مصطلح صحبت می کنند.

به محض اینکه گری آدامز، شیرهای خوراک واحد کاهش گرانروی را بست، انفجار ضعیفی واحد را لرزاند. گری و ۲۰ نفر از اپراتورها و کارکنان واحد تعمیرات، با پیراهن‌های پلی استرشان که آتش گرفته بود، در سراسر واحد پخش شده بودند. خود هیتر و سایر بخش‌های واحد، دچار صدمه جدی نشده بودند.

کمی بعد فهمیدم که روپوش‌های ضد آتش نومکس، پوشش‌های خوبی هستند. پس از آن، شش جفت روپوش در اختیار تمامی اپراتورها و پرسنل واحد تعمیرات قرار گرفت. زیر روپوش نومکس خود، لباس پلی‌استر نپوشید. «کار از محکم کاری عیب نمی‌کند».



شکل ۲۲-۱ اگر لوله دچار نقص شود، نمی‌توان از بخار آب خفه‌کن^۱ استفاده کرد؛ چراکه با آب موجود در بخار آب، از قبل مسدود شده است.

^۱ Snuffing steam: بخار آب خفه‌کن

توقف نصب جعبه‌های بخار^۱

داستان بالا حقیقت دارد. این داستان در سال ۱۹۸۲ و دقیقاً همان‌طور که تعریف کردم، اتفاق افتاد. آنچه به همان اندازه حقیقت دارد، این است که بزرگ‌ترین اپراتور واحدهای پالایشگاهی و شیمیایی جهان، به دلایل فوق، جریان جعبه‌های بخار آب را از هیترهای فرآیندی قطع نمود.

این موضوع برای اولین بار در حدود ۱۰ سال پیش، توجه مرا به خود جلب کرد و در دوره آموزشی‌ام، به نام «سمینار عیب‌یابی تجهیزات فرآیندی» که برای این اپراتور در بزرگ‌ترین پالایشگاه گلف‌کاست^۲ برگزار شد، این موضوع را مطرح کردم. دلیل این تصمیم مهم، مشابه همان دلیلی بود که در داستان مربوط به سال ۱۹۸۰ گود هوپ^۳ تعریف کردم؛ یعنی وجود آب در خطوط ورودی^۴ بخار آب خفه‌کن. انفجارهای دوره‌ای و مکرر هیترهای احتراقی آن‌ها، در اثر نقص تیوب بود. این اتفاق زمانی می‌افتاد که هیترهای معیوب را از سرویس خارج می‌کردند.

اقدامات اصلاحی

به‌تازگی یکی دیگر از اپراتورهای اصلی پالایشگاهی در آمریکای شمالی در مورد راه حلش برای این مشکل جدی و مزمن، با من صحبت کرد. طراحی منطقی آن‌ها برای نصب بخار خفه‌کن را در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده است. مهم‌ترین ویژگی‌های کلیدس این طراحی عبارتند از:

۱. شیر بخار آب خفه‌کن روی سطح زمین قرار دارد.
۲. شیر بخار آب خفه‌کن در فاصله بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ فوتی محفظه احتراق قرار دارد.
۳. خطوط لوله را عایق کرده و توسط بخار آب گرم نگه می‌دارند^۵.
۴. دیسک‌های کربنی انفجاری با فشار ۵ psig، در نازل‌های ورودی بخار آب خفه‌کن محفظه احتراق، پاره می‌شوند.
۵. یک حفره تخلیه ۱/۲ اینچی در تمام نقاط فرو رفته قرار دارد.

^۱ Box Steam: جعبه‌های بخار

^۲ Gulf Coast Refinery: پالایشگاه گلف‌کاست

^۳ Good Hope: گود هوپ

^۴ Supply: ورودی

^۵ Steam traced: توسط بخار آب گرم نگه می‌دارند

۶. شیرهای قفل‌شونده در حالت باز (کارسیل اوپن)^۱ بر روی نازل‌های ورودی محفظه احتراق، قرار دارند.
۷. در بالادست شیر ورودی بخار آب خفه‌کن، یک خط تخلیه میعان‌ات مجهز به تله بخار^۲ قرار گرفته است.
۸. در پایین‌دست شیر ورودی بخار آب خفه‌کن، یک شیر تخلیه قفل‌شونده در حالت باز (کارسیل اوپن) قرار دارد.

دقت کنید که برای فعال‌سازی این سیستم، فقط کافی است که اپراتور، یک شیر (شیر «الف») را روی سطح زمین باز کند. نشی این شیر به وسیله حفره‌ای به عمق ۱/۲ اینچی، تخلیه می‌شود (شکل ۲۲-۲).

شیرهای بخار آب خفه‌کن‌هایی که من معمولاً دیده‌ام، شیرهای فولاد کربنی ۶ تا ۸ اینچی در ارتفاع ۲۰ فوتی پایپرک قرار دارند که دسته آن‌ها برای جلوگیری از باز کردن غیر مجاز آن، با زنجیر قفل شده‌اند. وقتی تلاش می‌کردم تا در شرایط اضطراری این شیرها را باز کنم، شیرها به خاطر این که ثابت بوده‌اند یا در طول ۲۰ سال گذشته روغن‌کاری نشده بودند، گیر می‌کردند. تنها کاری که کردم این بود که، زنجیر را قطع کنم. پس از آن، ضربه‌ای به سرم وارد شد.

یادداشت آخر:

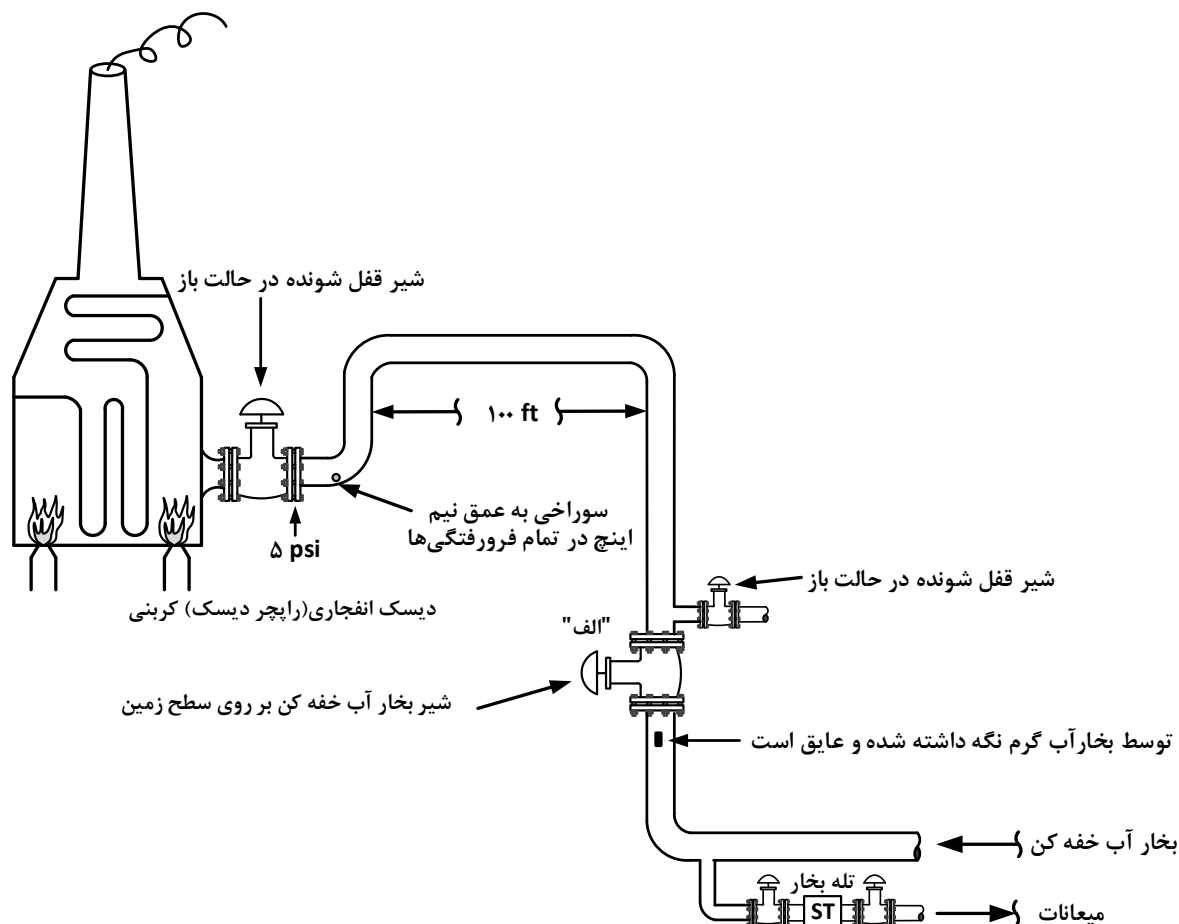
اگر اپراتورها آموزش نبینند، نمی‌دانند که باید در شرایط اضطراری چه کار کنند. آموزش اپراتور یعنی اینکه من با بابی‌بری هد^۳ به سمت شیر «الف» بروم و بگویم: «نگاه کن! وقتی هیتر آتش گرفت، این شیر را برخلاف جهت عقربه‌های ساعت بچرخان. متوجه شدی بابی؟»

«اوِه! نه آقای نورم. ساعت به کدام طرف می‌چرخد؟ دوباره فراموش کردم!»

^۱ شیرهایی که در حالت باز قفل یا مهر و موم می‌شوند تا از حالت باز بودن خارج نشوند. لازم به ذکر است که برای تغییر Car Seal Open Valve: وضعیت اینگونه از شیرها نیاز به پرمیت‌های سازمان‌های رده بالای صنعت است و اپراتور به تنهایی نباید در وضعیت آن تغییراتی به وجود آورد.

^۲ Steam trap: تله بخار

^۳ Bobby Brickhead: بابی بریک هد



شکل ۲۲-۲ طراحی درست بخار آب خفه کن هیتر

رفتن به خانه

گری آدامز ۲ هفته بعد به خانه رفت و چند روز بعد نیز، سر کارش برگشت. ریشش سوخته بود و در دست‌هایش زخم‌های قرمز رنگی دیده می‌شد. یک ماه بعد، آتش‌سوزی بزرگی در فاضلاب^۱ هیدروتیرتر دیزل رخ داد. گری که پیاده‌نظام و کهنه‌سرباز جنگ ویتنام بود، در خط مقدم خدمت آتش‌نشانی قرار گرفت. او واقعاً جسور و نترس بود. من هم که در طول جریان درگیری، به‌خاطر معافیت دانشجویی که داشتم در نیویورک، شجاعانه به کشورم خدمت کرده بودم، آتش‌سوزی را از فاصله امنی در ریور رود می‌دیدیم، «آدم دلیر باید محتاط باشد.»

^۱ فاضلاب: Sewer



برج‌های خلأ

چکیده:

بهبود خلأ در منطقه تبخیر آبی یک برج خلأ روغن روان‌کننده، برای دستیابی به برش‌های مناسبی در روغن روان‌کننده و همچنین بازیابی بیشترین مقدار جداسازی نفت‌گاز روانکاری سنگین، لازم است.

اژکتورهای بخار آب، کندانسورهای میانی و پس‌کندانسورها، در معرض طیف وسیعی از ایرادات هستند که کیفیت روغن روان‌کننده و بازیابی آن را کاهش می‌دهند. شایع‌ترین ایرادات کندانسور مربوط به نوار آب‌بندی در لبه بافل‌های داخلی بخار یا هواست.

کلمات کلیدی:

اژکتور؛ کندانسور؛ نوار آب‌بندی؛ اشتعال؛ بافل هوا؛ پیش‌کندانسور؛ پایه آب‌بند؛ بارومتريک؛ درام آب-بند، بخار آب محرکه

در یکی از برج‌های خلأ روغن روان‌کننده، فشار بالای برج از ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر جیوه تغییر می‌کرد. فشار در طول ۱۵ دقیقه به صورت پایدار، روی ۲۵ میلی‌متر جیوه مانده بود و پس از آن و قبل از اینکه دوباره پایین بیاید، چند دقیقه به سمت بالا نوسان کرد. وجود چنین فشار نامنظمی، برای هیچ برج خلأیی خوب نیست؛ اما مخصوصاً برای تولید مواد پایه روغنی، به مسئله‌ای جدی تبدیل می‌شود.

این سیستم از اجزای زیر تشکیل می‌شود که به صورت سری به هم متصل شده‌اند (شکل ۲۳-۱):

- پیش‌کندانسور؛
- جت اولیه؛
- کندانسور اولیه؛
- جت ثانویه؛
- کندانسور ثانویه؛
- جت مرحله سوم؛
- پس‌کندانسور.

همه جت‌ها یدکی بودند؛ اما فقط یک جت، در هر موقعیت کار می‌کرد. با استفاده از یک دستگاه خلأسنج دیجیتالی، فشار را بررسی کردم. داده‌های زیر به دست آمدند:

- ورودی پیش‌کندانسور = ۲۸ میلی‌متر جیوه؛
- ورودی جت اولیه = ۱۶ میلی‌متر جیوه؛
- خروجی جت اولیه = ۵۸ میلی‌متر جیوه؛
- خروجی جت ثانویه = ۷۶ میلی‌متر جیوه؛
- ورودی پس‌کندانسور = ۰/۶ psig (برابر با ۷۸۰ میلی‌متر جیوه).

نتایج زیر با توجه به داده‌های فوق به دست آمدند:

۱. نسبت تراکم جت اولیه، تقریباً برابر با ۳/۵ است (یعنی ۵۸ تقسیم بر ۱۶ میلی‌متر جیوه)؛
۲. نسبت تراکم جت ثانویه، تقریباً برابر با ۱/۳ است (با صرف‌نظر از ΔP کندانسور اولیه)؛
۳. نسبت تراکم جت نهایی، تقریباً برابر با ۱۰ است (با صرف‌نظر از افت فشار کندانسور ثانویه).

پس از آن، بررسی‌های زیر را انجام دادم:

۱. وقتی فشار ورودی پس‌کندانسور، کمی افزایش پیدا کرد، جت مرحله سوم شروع به سرج^۱ کرد (یعنی صدایی آرام و وزوز مانند می‌داد). احتمالاً فشار ورودی به این جت، به حدود ۲۵ میلی‌متر جیوه رسید (یعنی تا ۱ اینچ خلأ جیوه افزایش یافت).

۲. فشار ورودی پیش‌کندانسور یک‌دفعه زیاد شد (یعنی فشار بالای برج) و به حدود ۲۵ میلی‌متر جیوه رسید. ۳. با گذشت چند دقیقه، فشار پس‌کندانسور دوباره کم شده و مجدداً خلأ عملیاتی نرمال ایجاد شد.

سپس دریافتم که فشار سیستم بازیابی گاز مشعل واحد^۲ پالایشگاه بین مقادیر ۰/۵ - ۰/۱ psi دچار نوسان شده و نمی‌توان این نوسان را کاهش داد. با توجه به اینکه درام آب‌بند اژکتور بر روی فشار مشعل واحد شناور بوده و آخرین کندانسور نیز به درام آب‌بند ونت می‌شد، تغییرات فشار در خروجی اژکتور مرحله سوم اجتناب‌ناپذیر بود.

جت‌ها چگونه کار می‌کنند؟

دمای بخار آب محرکه اژکتور، تقریباً برابر با ۳۵۰ °F است. بخار آب محرکه هنگام گذر کردن از اژکتور تا ۱۰۰ °F سرد می‌شود. این کاهش دمای ۲۵۰ °F، به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود (شکل ۲۳-۲). این فرآیند، یک «انبساط ایزنتروپیک»^۳ است. این فرآیند، سرعت یا انرژی جنبشی بخار آب محرکه است که گازهای کراکینگ و تراکم‌ناپذیر برج خلأ را، متراکم می‌کند. اگر سرعت بخار آب، در بدنه اژکتور (یعنی دیفیوزر) کم شود، انرژی جنبشی آن به فشار تبدیل می‌شود. هرچند، بخش بزرگی از انرژی جنبشی، به حرارت یا گرما تبدیل می‌شود. این گرما، گرمای تراکم است. با کمک تفنگ مادون قرمز متوجه شدم که افزایش دما در امتداد بدنه هر اژکتور، به صورت زیر است:

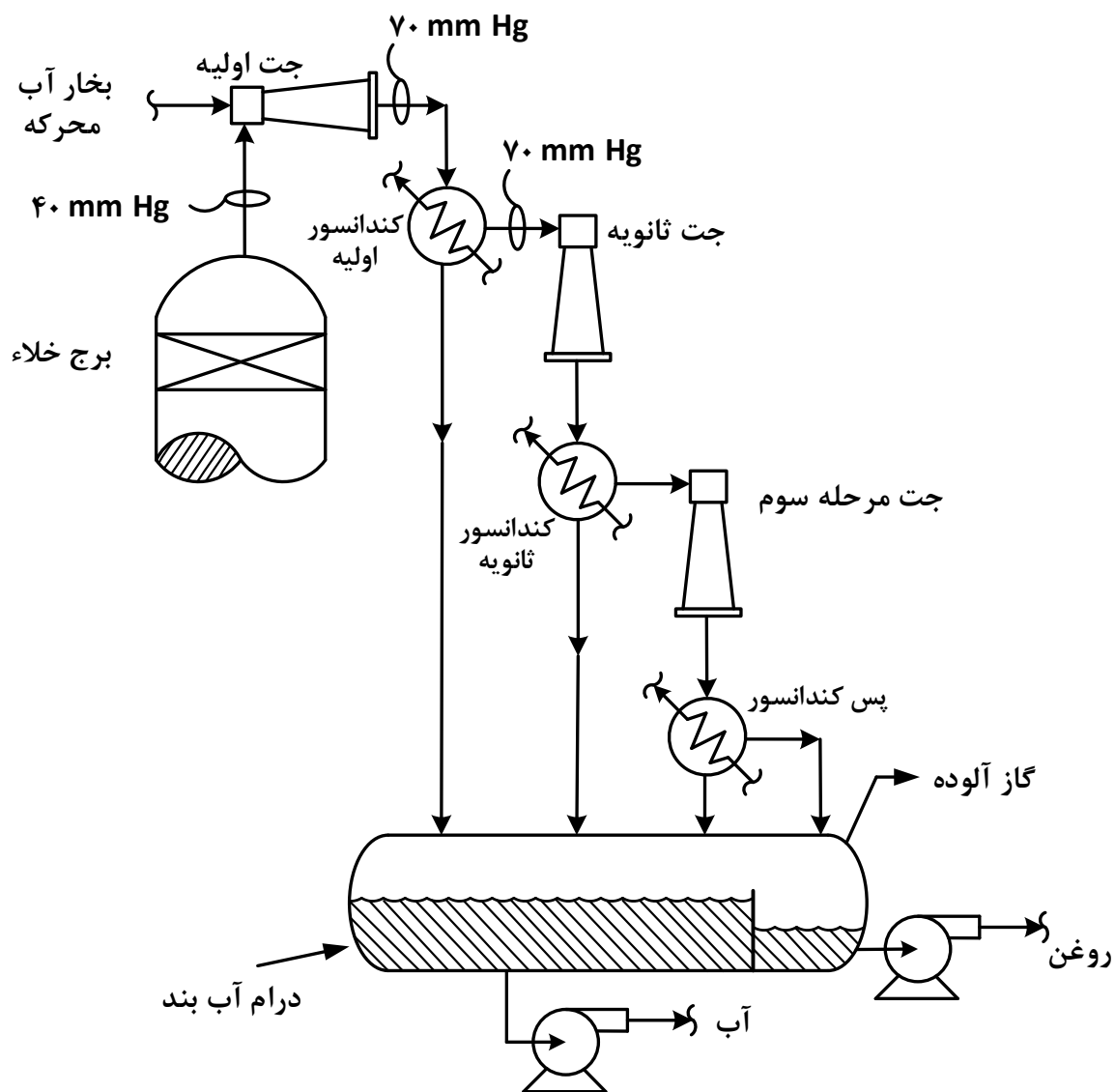
- جت شماره ۱ = تقریباً ۸۰ درجه فارنهایت؛
- جت شماره ۲ = تقریباً ۱۰ درجه فارنهایت؛
- جت شماره ۳ = تقریباً ۱۳۰ درجه فارنهایت.

واضح است که جت شماره ۲ یعنی اژکتور مرحله دوم، کار تراکمی بسیار اندکی را تولید می‌کرد. این داده‌ها، مطابق با اندازه‌گیری‌های قبلی من از فشار بودند.

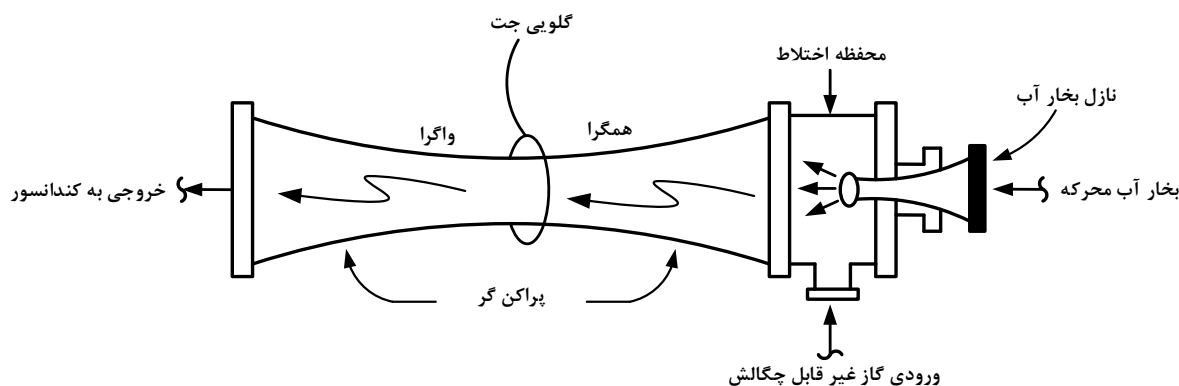
^۱ Surge: موج غلطان، نوسان

^۲ Flare: مشعل واحد

^۳ Isentropic process: فرایند هم‌آنتروپی یا فرایند ایزنتروپیک، فرایندی است که در طی آن میزان آنتروپی سیستم ثابت می‌ماند.



شکل ۲۳-۱ افزایش دمای آب خنک کننده به کندانسور شماره ۱ موجب شکستن خلأ با افزایش فشار خروجی بحرانی از کتور مرحله اول می شود.



شکل ۲۳-۲ اجزای یک جت بخار همگرا- واگرا

عملکرد غیر خطی اژکتورها

جت بخار، دو حالت برای عملیات دارد. من یکی از حالت‌ها را تقویت صوتی^۱ می‌نامم. دومین حالت عملیاتی آن را تقویت سرعت^۲ می‌نامم. این حالت، مرحله تراکم را نشان می‌دهد که در بخش واگرای دیفیوزر اژکتور، انجام می‌شود؛ چراکه سرعت بخارها کاهش می‌یابد. تأمین‌کنندگان اژکتور، حالت عملیاتی تقویت صوتی را «جریان بحرانی»^۳ می‌نامند. آن‌ها حالت عملیاتی دوم، یعنی حالتی را که جت تنها نیمی از کار مورد نیاز خود را انجام می‌دهد، حالت فشارشکنی یا کنترل جریان، می‌نامند.

من در مورد این موضوع، در کتابم با عنوان: «عیب‌یابی سیستم‌های خلأ»، انتشارات وایلی، ۲۰۱۳ مفصلاً بحث کرده‌ام. زمانی که فشار خروجی یک اژکتور از حد خاصی بیشتر شود، ناگهان بخش زیادی از نسبت تراکم آن، کاهش می‌یابد. وقتی این اتفاق می‌افتد، می‌گوییم خلأ یا جت «شکسته‌اند». به این ترتیب، احتمالاً، افزایش نسبتاً کم فشار خروجی اژکتور، ممکن است گاهی اوقات، باعث افزایش نامتناسب فشار ورودی^۴ اژکتور شود. ظاهراً افزایش اندک فشار برگشتی حاصل از سیستم مشعل واحد پالایشگاه، افزایش نامتناسبی را در فشار برج خلأ ایجاد کرده و سبب می‌شود دومین اژکتور بشکند یا تقویت صوتی‌اش را از دست بدهد (بدین معنا که از «جریان بحرانی» خارج شود).

^۱ Sonic Boost: تقویت صوتی

^۲ Velocity Boost: تقویت سرعت

^۳ Critical Flow: جریان بحرانی

^۴ Discharge Pressure: فشار دیشارژ، فشار تخلیه

رفع مشکل

برای رفع مشکل، اژکتور یدکی ثانویه^۱ را در سرویس قرار دادم تا به موازات اژکتور ثانویه کار کند. عملکرد چندان خوبی نداشت. به همین دلیل، در مرحله بعدی، جریان بخار آب محرکه را در اژکتور ثانویه ای که چندین سال کار کرده بود، مسدود کردم. این کار نیز تأثیر مثبتی نداشت. پس از آن، یادم افتاد که شیر ورودی اژکتوری را که قبلاً در سرویس بوده را، ببندم. پس از آن، فشار خروجی کندانسور مرحله دوم از ۷۶ میلی متر جیوه به حدود ۱۴۰ میلی متر جیوه، افزایش یافت. افزون بر این، افزایش دما در طول بدنه جت مرحله دوم کم کم از حدود ۱۰ °F به حدود ۹۰ °F رسید. درسی که باید از این تجربه بیاموزیم، این است که نباید یک جت ضعیف را به موازات یک جت قوی تر، در سرویس قرار دهی. مواد تراکم ناپذیر حاصل از خروجی اژکتور قوی تر، مجدداً در جت ضعیف تر، بازیابی می شوند.

این تغییر منجر به این شد که افزایش اندک فشار در درام آب بند، دیگر تأثیری بر فشار خروجی اژکتور اولیه نداشت. باشد و به همین دلیل، دیگر اژکتور اولیه، متناوباً تقویت صوتی خود را از دست نمی داد. بدین ترتیب، عملکرد این اژکتور، موجب دوبرابر شدن فشار برج خلأ به صورت دوره ای نمی شد. با این وجود، افزایش بسیار بیشتر در فشار برگشتی، همچنان دارای اثر مشابهی بود.

محدودیت فشاربخار^۱ آب

با بهبود عملکرد جت ثانویه، فشار برج خلأ، به طور موثری تثبیت شد؛ اما خلأ بهبود نیافت. حداقل فشار برج خلأ، تابع فشار چگالش پیش کندانسور است. فشار چگالش بخار آب در پیش کندانسور، توسط فشاربخار آب در دمای خروجی بخار (و نه مایع) پیش کندانسور محدود شد. این دمای بخار، به دمای خروجی آب خنک کننده از پیش کندانسور، وابسته بود. قطعاً فشار پیش کندانسور، به راحتی از فشاربخار آب در دمای خروجی بالاتر می رود؛ اما از این مقدار کمتر نیست. تعداد زیادی از برج های خلأ، توسط سیستم اژکتور، محدود نمی شوند؛ اما به وسیله عملکرد پیش کندانسور محدود می شوند. به طور معمول، این مبدل پیش کندانسور، نه در تمام برج های خلأ پالایشگاهی ولی در بسیاری از آنها، سیستمی است که، به شدت موجب رسوب می شود.

^۱ Vapor pressure: فشاربخار

کندانسورهای سطحی خلأ توربین بخار

خلأ در کندانسور سطحی خروجی توربین توسط دو اژکتور کوچک ایجاد می‌شود (شماره‌های ۱ و ۲ شکل ۲۳-۲). به یاد داشته باشید که دو کندانسور خروجی جت کوچک موجود هستند: (الف و ب). این کندانسورها درون یک پوسته قرار می‌گیرند و با یک بافل افقی به دو قسمت تقسیم می‌شوند (به جای بافل عمودی که برای درک بهتر، توضیح داده‌ام). مقدار دلتا P برای کندانسورهای الف و ب، ۲۰ میلی‌متر جیوه فرض شده است. ضریب تراکم هر جت، حدوداً ۴/۳ است. این طرح برای حدود ۱۵۰ سال جهانی بود.

احتمالاً، تقویت خلأ در یک کندانسور سطحی به مقدار متوسط، موجب افزایش کار استخراجی از هر پوند بخار آب محرکه توربین، به میزان ده درصد می‌شود. همیشه مقدار کمی هوا به داخل کندانسور سطحی و خود توربین نشت می‌کند. این هوا به وسیله اژکتورهای دو مرحله‌ای که در شکل ۲۳-۳ نشان داده شده است، خارج می‌شود.

یکی از کنترل‌های لازم بر روی کندانسور سطحی این است که ببینید چطور هوا از ونت خارج می‌شود. هرچند، اغلب مواقع مشاهده می‌کنم که هوا از ونت خارج نمی‌شود. در مقابل، هوا به درون ونت کشیده می‌شود! یعنی اگر یک تکه مقوا را بالای ونت بگذارم، مقوا به ونت می‌چسبد و مقوا توسط خلأ موجود در دودکش، در آنجا مانده است. دلیل این جریان هوای معکوس این است که قسمت پوسته تیغه جداکننده که در شکل ۲۳-۳ مشخص شده است، نشتی دارد. این موضوع باعث می‌شود که هوا از دودکش ونت، مجدداً به ورودی^۱ جت شماره ۲ برگردد. فشار موجود در بخش «ب» کندانسور به طور متناوب زیادتر شده و هوا نیز به صورت متناوب از ونت دمیده می‌شود. این مشکل، نتایج زیر را به دنبال دارد:

۱. جت شماره ۲ دچار اضافه بار می‌شود.
۲. فشار خروجی در جت شماره ۱ افزایش می‌یابد.
۳. فشار در کندانسور سطحی افزایش می‌یابد.
۴. مقدار کاری که از هر پوند بخار آب محرکه توربین، استخراج می‌شود، کاهش می‌یابد.

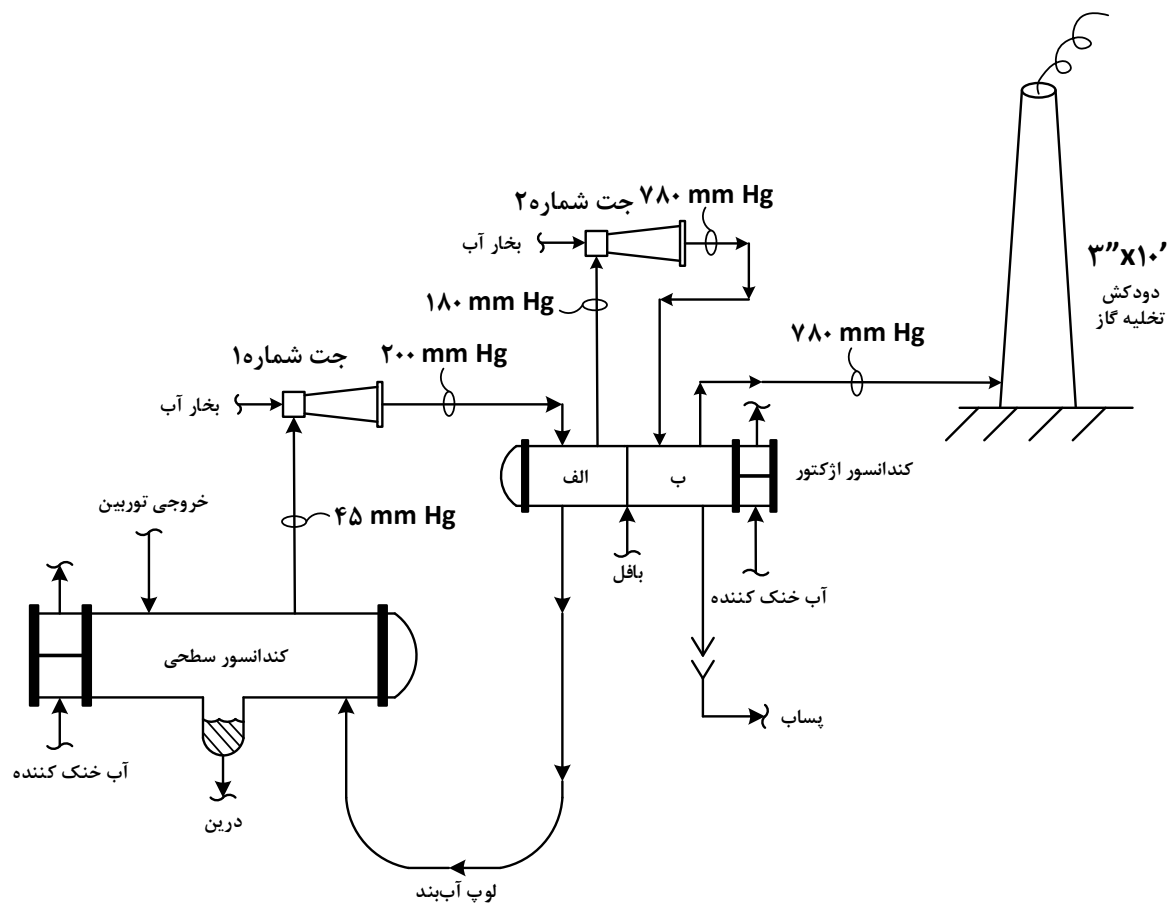
^۱ مکش: Suction

نقش کندانسور «ب»

لازم است برای اصلاح این مشکل، نخست به شکل ۲۳-۳ با دقت بیشتری توجه کنید. کندانسور «ب» چه نقشی دارد؟ پاسخ این است که هیچ نقش و عملکردی ندارد. این یک خطای مهندسی است. تخلیه مستقیم خروجی اژکتور شماره ۲ به دودکش ونت، موجب کاهش فشار خروجی آن از ۷۸۰ به ۷۶۰ میلی‌متر جیوه می‌شود. این موضوع سبب می‌شود که فشار کندانسور سطحی اندکی کاهش یابد. هرچند، در صورتی که بافل بخش‌های الف و ب در کندانسور سیستم اژکتور، نشتی داشته باشد، تخلیه مستقیم کندانسور مرحله دوم به دودکش ونت اتمسفری موجب می‌شود که فشار کندانسور سطحی به میزان زیادی کاهش یابد. در هر صورت راندمان توربین افزایش می‌یابد.

به‌تازگی چند نفر از مشتریان اصلی من که کندانسور «ب» را در واحدهای پالایشگاهی خود در لوئیزیانا^۱ حذف کرده‌اند، متوجه این موضوع شدند که کندانسور «ب» که در طراحی کندانسور سطحی توربین بخار به‌مدت ۱۵۰ سال استاندارد بوده اما ناشی از یک خطای مهندسی است.

^۱ Louisiana: لوئیزیانا



شکل ۳-۲۳ بافل موجود در کندانسور اژکتور، در واقعیت عمودی نیست، بلکه افقی است. این سیستم، یک سیستم معمولی کندانسور سطحی خروجی توربین بخار است.



ارتقای عملکرد برج خلأ

چکیده:

کاهش مقدار نفت‌گاز در پس‌ماند برج خلأ، بهترین راه برای بهبود سودآوری پالایشگاه است. بهبود عملکرد اژکتورهای خلأ و کندانسور، فشار ناحیه تبخیر آنی را کاهش می‌دهد. این امر، سبب افزایش فراریت نفت‌گاز می‌شود. روش دیگر برای بهبود بازیابی نفت‌گاز از محصول پس‌ماند خلأ، افزایش دمای ناحیه تبخیر آنی، بدون افزایش فشار این ناحیه است. استفاده مناسب از بخار آب در گذرهای هیتر نهایی، یکی از گزینه‌های دستیابی به این هدف است.

کلمات کلیدی:

خلأ؛ نفت‌گاز؛ کراکینگ؛ پایه‌های آب‌بند؛ کندانسور؛ اژکتور؛ بخار آب محرکه

در این فصل، به یک بررسی موردی در خصوص ارتقای عملکرد برج خلأ در پالایشگاه گود هوپ^۱ می‌پردازیم. سابقاً در این واحد پالایشگاهی، از سال ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۳ مدیر خدمات فنی^۲ بودم. هدف ما افزایش بازیابی نفت‌گاز از محصول پس‌ماند برج خلأ بود.

کاهش محتوای نفت‌گاز پس‌ماند

وجود هر بشکه نفت‌گاز در انتهای برج‌های خلأ زیان بزرگی است. با این وجود، هم‌اکنون تعداد زیادی از واحدهای بهره‌برداری به‌خاطر ترس از آتش‌سوزی در محل نمونه‌گیری^۳، از جریان پایین برج خلأ، نمونه‌گیری انجام نمی‌دهند. دمای خوداشتعالی^۴ پس‌ماند خلأ، 320°F است. دمای محل نمونه‌گیری از جریان، 450°F است. احتمالاً، بخش ایمنی واحد، استفاده کردن از ایستگاه‌های نمونه‌گیری این‌چنینی را، ممنوع کند.

هرچند، پس‌ماند، در دمایی پایین‌تر از دمای خوداشتعالی (320°F) سفت می‌شود، می‌توانیم بدون هیچ خطری، از آن، نمونه‌گیری کنیم.

می‌توان در دمای خروجی پمپ پائین برج، 680°F درجهٔ فارنهایت و به کمک یک بطری فولادی، کار نمونه‌گیری را انجام داد (شکل ۲۴-۱). صبر کنید تا بطری با پسماند پر شود. سپس شیر ورودی بطری را ببندید و صبر کنید تا خنک شود. پس از آن، بطری را باز کنید و به آزمایشگاه بفرستید.

ظاهراً ساده‌ترین روش برای کاهش اتلاف نفت‌گاز در پسماند خلأ این است که نرخ جریان روغن شست‌شو در بالای شبکه، برای مثال از میزان 5000°BSD به 3000°BSD کاهش یابد (شکل ۲۴-۲). این کار موجب افزایش تولید 2000°BSD محصول نفت‌گاز سنگین، نخواهد شد. نخست، تقریباً 80% از روغن شست‌شوی موجود در شبکه تبخیر می‌شود. بنابراین، کاهش روغن شست‌شویی که در برج خلأ اتلاف می‌شود، فقط به میزان 400°BSD می‌باشد؛ نه 2000°BSD . افزون‌براین، کک‌سازی به علت مرطوب نبودن شبکه، تقویت می‌شود. با گذشت چند ماه، کیفیت محصول نفت‌گاز کاهش یافته و فشار منطقهٔ تبخیر ناگهانی، بیشتر می‌شود.

^۱ Good Hope: گود هوپ

^۲ Tech Service Manager: مدیر خدمات فنی

^۳ Sample point: محل نمونه‌گیری

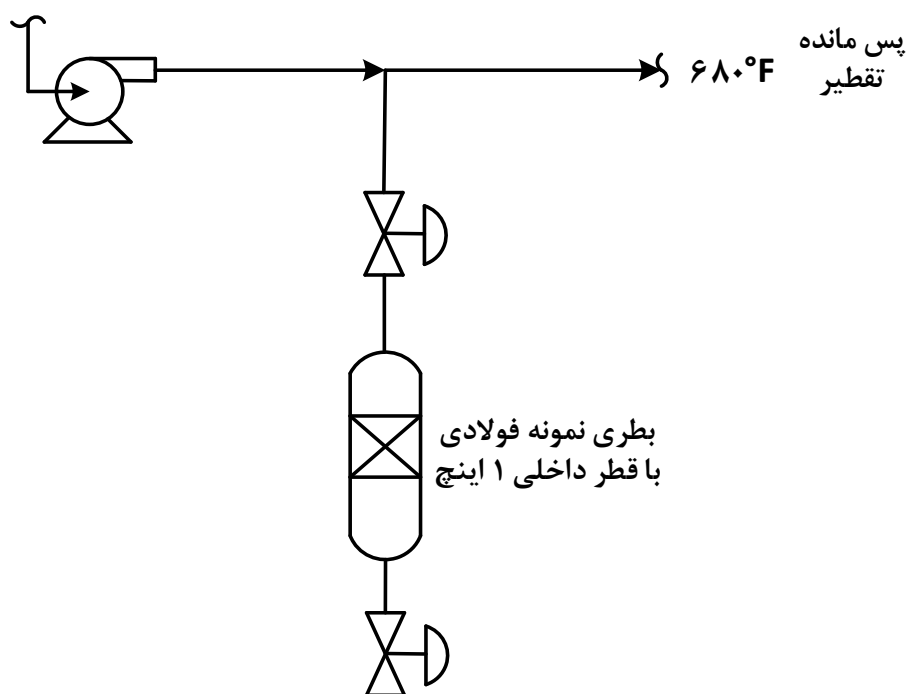
^۴ Auto-ignition: خود اشتعالی

^۵ BSD(BPSD): مخفف "Barell Per Stream Day"، تعداد بشکه در طول روز

میزان فلزات موجود در نفت گاز بیشتر می شود و این مقدار مازاد فلزات، کاتالیزور را در تصفیه هیدروژنی نفت گاز خوراک واحد^۱ FCU، از بین می برد.

افزایش دمای منطقه تبخیر آنی

اگر سرعت اشتعال هیتر بیش از حد نباشد و دمنده هوای مکش اجباری^۲، با سرعتی کمتر از سرعت اسمی کار کند و نیز شعله های مشعل نزدیک تیوب ها قرار نگرفته باشد، می توانیم در طراحی، دمای خروجی هیتر را از ۷۶۰ به ۷۸۰ °F افزایش دهیم. اما مسئله اینجاست که، دمای بالاتر منطقه تبخیر ناگهانی، موجب افزایش جریان گاز کراکینگ شده و در نتیجه، بارگذاری سیستم خلأ، بیش از حد افزایش می یابد. در نتیجه، فشار برج افزایش یافته و بازیافت نفت گاز کاهش خواهد یافت.



شکل ۲۴-۱ بطری نمونه

مخفف «Fluid Catalytic Cracking Unit»، معنی واحد شکست کاتالیستی بسترسیال، واحد شکستن مولکول ها در کاتالیست سیال: FCU^۱

دمنده هوایی مکش اجباری: Forced Draft Air blower^۲

راه‌کار دیگر این است که، همزمان با دمای خروجی بالاتر، میزان بخار آب عبوری از گذرهای هیتر خلأ را افزایش دهیم. با کاهش زمان خیساندن روغن در تیوب، بخار آب، سبب خطای ماندگار^۱ خروجی داغ‌تر می‌شود. پس از آن، گاز کراکینگ کمتری تشکیل می‌شود. افزون‌براین، کوئل بخار آب، فشار جزئی هیدروکربن را در منطقه تبخیر ناگهانی، کاهش می‌دهد.

اما بار بزرگتری بر اژکتور مرحله اول تحمیل می‌شود (شکل ۲۴-۳). با این وجود، بخار آب اضافی در گذرهای هیتر موجب سرکوب دمای متوسط کوئل می‌شود؛ چراکه تبخیر درلوله‌های هیتر، افزایش می‌یابد. دمای پایین‌تر نیز، سبب می‌شود تا سرعت تشکیل گاز کراکینگ در تیوب‌ها، کاهش یابد.

احتمالاً بخار آب اضافی موجب بارگذاری بیش از حد ظرفیت اژکتور مرحله اول شده و در نتیجه، فشار منطقه تبخیر آنی در برج خلأ، بالا می‌رود. تنها با آزمایش در واحد پالایشگاهی، می‌توان متوجه شد که، بهترین راهکار چیست.

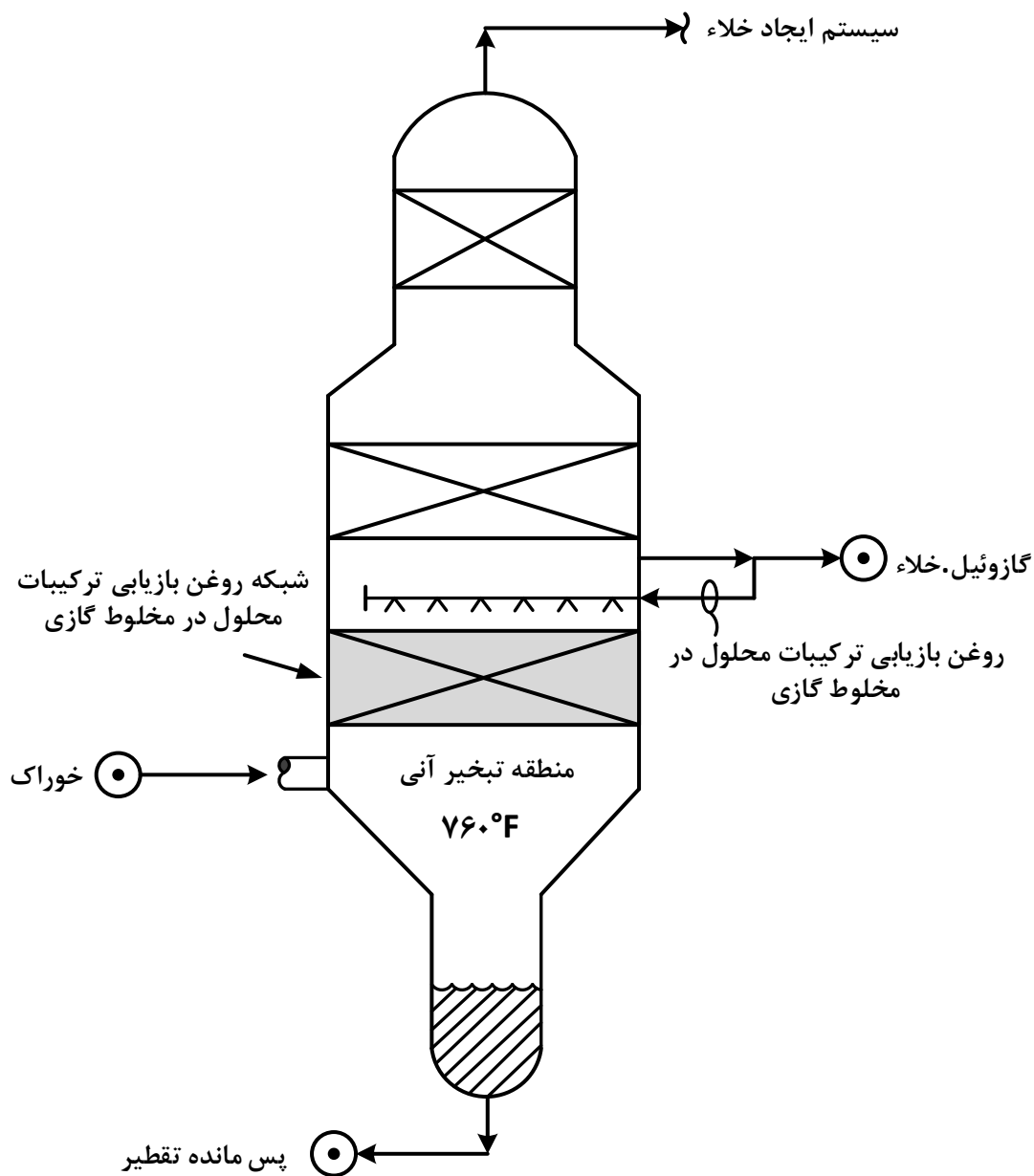
راه‌اندازی اژکتور بخار آب یدکی

یکی دیگر از راهکارها، راه‌اندازی اژکتور بخار آب یدکی مرحله اول است. اما، وقتی این روش امتحان شد، خلأ شکست و فشار بالای برج به ۲۰ میلی‌متر جیوه رسید (شکل ۲۴-۴). چرا؟ آزمون جت به خودی خود، نشان داد که، خوب کار می‌کند. به هر حال، نازل بخار آب تعویض گردید، اما هیچ تفاوتی در عملکرد حاصل نشد.

باز هم تلاش کردیم از جت آماده به کار استفاده کنیم. هرچند، جت مرحله اول جدید، به خودی خود، روی سکویی با ارتفاع ۸۰ فوت قرار داشت. این جت با ۱۲۰ فوت لوله ۱۶ اینچی بدون‌عایق، به خط بخار بالای برج متصل شده بود. وقتی اپراتور بیرونی، شیر دروازه‌ای^۲ ورودی را باز کرد، گیج فشارسنج محلی خلأ از ۳۶ به ۴۸ میلی‌متر جیوه پرید و همچنان به بالا رفتن ادامه داد (شکل ۲۴-۴).

^۱ Offset: خطای ماندگار، اختلاف موقعیت جدید سطح نسبت به سطح مطلوب برای خنثی کردن متغیرهای عملیاتی را خطای ماندگار می‌گویند.

^۲ Gate valve: ولو دروازه‌ای



شکل ۲-۲۴ شبکه روغن، از تشکیل کک در شبکه، جلوگیری می‌کند.

اپراتور مشاهده کرد که این اتفاق هر بار رخ می‌دهد. با این وجود، متوجه شدیم که احتمال دارد خط ورودی^۱ از آب پر شده باشد. وقتی اپراتور شیر «ب» را باز کرد، آب وارد هر دو اژکتور قدیمی و جدید شده و هر دو اژکتور را مسدود کرد. لازم است قبل از اینکه شیر «ب» را باز کنید، خط ۱۶ اینچی را که به جت جدید می‌رود، درین نمایید.

^۱ Suction line: خط ورودی

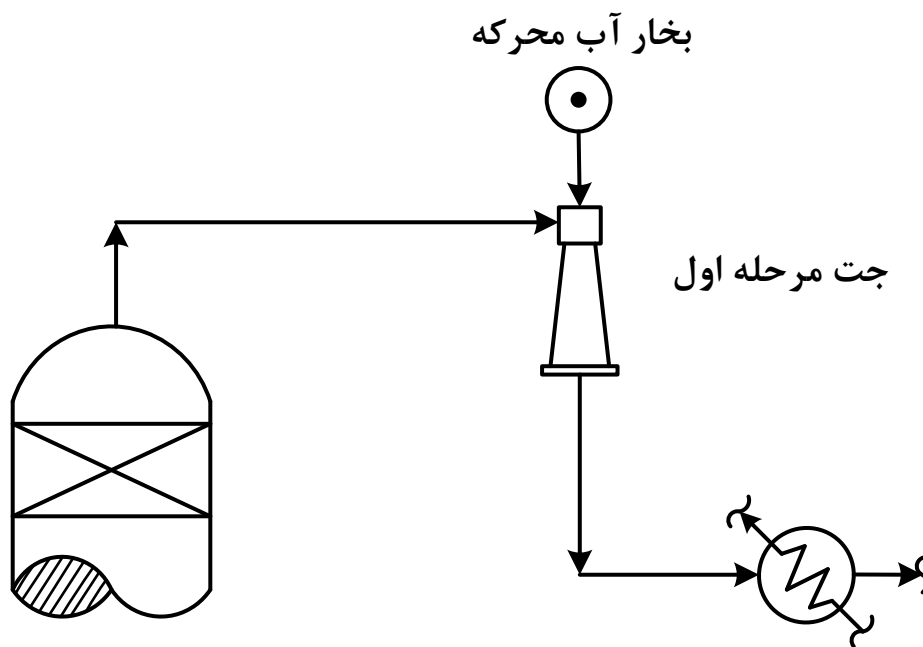
با این وجود، نمی‌توان شیر ۲ اینچی (یعنی «پ») را که دقیقاً در بالادست شیر «ب» قرار دارد، به راحتی باز کرد؛ زیرا خط لوله ۱۶ اینچی، ۱۰۰ فوت زیر خلأ بود. اگر شیر باز می‌شد، هوا به درون جت‌ها کشیده می‌شد و خلأ را می‌شکست.

کاری که ما کردیم این بود که، یک شلنگ را از شیر درین ۲ اینچی را به سطل آبی، ۵۰ فوت پایین‌تر و زیر شیر درین «پ» وصل کردیم (شکل ۲۴-۴). برای انجام این کار، نخست لازم است شلنگ را با آب پر کنید (یعنی آماده‌سازی را انجام دهید). پس از آن می‌توان خط ۱۶ اینچی را قبل از بازکردن شیر «ب» تخلیه نمود.

لازم است شیر درین ۲ اینچی به درون درام آب‌بندی لوله‌کشی شده باشد. این یک اشتباه طراحی بود.

سیلیکا^۱ در نازل بخار

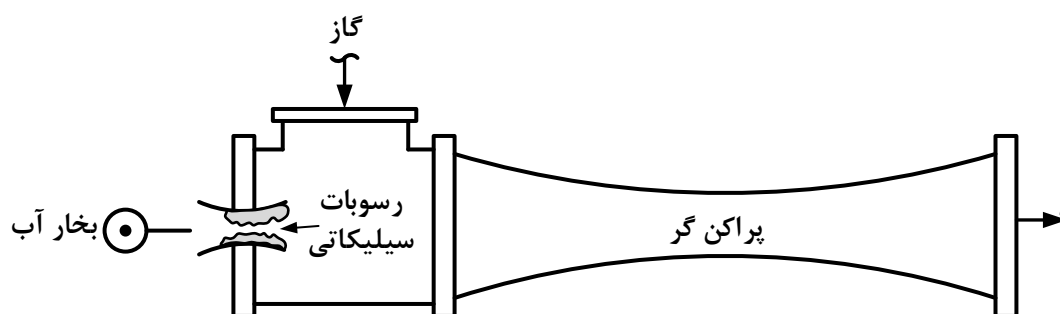
چند ماه پیش، خلأ به طور ناگهانی بدتر شد. یکی از دلایل متداول برای این موضوع، رسوب سیلیکا در نازل بخار آب است (شکل ۲۴-۵). شاید بخار کیفیت خوبی نداشته باشد؛



شکل ۲۴-۳ ورود بخار آب اضافی به هیتر خلأ، موجب بارگذاری اضافی بر روی جت مرحله اول می‌شود.

^۱ سیلیکا، سیلیسیم دی‌اکسید طبیعی که به صورت متبلور و در شکل‌های گوناگون در طبیعت یافت می‌شود: Silica

درپوشی^۱ در پشت جت وجود دارد که امکان تمیز کردن نازل بخار آب را با یک برس سیمی، فراهم می‌کند. وقتی جت در حال کار است، نمی‌توان این کار را انجام داد. اما هنگامی که اژکتور جدید در سرویس است، می‌توان جت قدیمی را تمیز کرد. از این درپوش برای کنترل قطر داخلی نازل بخار آب، استفاده می‌شود. اما می‌توان از آن به‌صورت راهی برای دسترسی به نازل بخار آب و تمیز کردن آن، استفاده کرد. توجه کنید که احتمال دارد در اژکتورهای بزرگ‌تر، این اتصال، تعبیه نشده باشد. در این مورد لازم است محفظه بخار آب محرکه، برای کنترل و تمیز کردن نازل برداشته شود.



شکل ۲۴-۵ رسوب سیلیکاتی، متداول ترین دلیل عملکرد ضعیف اژکتور، در پالایشگاه‌هاست.

بخار آب مرطوب

آبی که در بخار آب وجود دارد، عملکرد جت را کاهش داده و موجب صدمه به اژکتور می‌شود. استفاده از یک «جداکننده بخار آب» مانع از بروز این مشکل می‌شود و می‌توان آن را از شرکت‌های زیر سفارش داد:

- شرکت اندرسون^۲
- کلارک ریلیانس^۳

میعانات از طریق یک تله سطلی^۴ تخلیه می‌شوند. آن‌ها شبیه یک جداکننده گریز از مرکز، عمل می‌کنند.

ما اثر وجود بخار آب محرکه مرطوب، بر روی اژکتور را مشاهده کردیم. درجه حرارت خط خروجی اژکتور، در فاصله چند فوت از خروجی جت، بین ۱۵ تا ۳۰ درجه فارنهایت، کاهش می‌یابد. در صورتی که بخار آب خروجی از یک

^۱ Plug: درپوش

^۲ Anderson Company: شرکت اندرسون

^۳ Clark Reliance: کلارک ریلیانس

^۴ Bucket trap: تله سطلی

انشعاب^۱، در فاصله یک اینچ یا بیشتر نامرئی باشد، یعنی بخار آب خشک است. اگر رنگ بخار آب خروجی، سفید باشد، احتمالاً همچنان به میزان معقولی خشک است (یعنی چند درصد رطوبت دارد). در صورتی که هر چند دقیقه یکبار، آب در نقطه فرو رفته درین جمع شود، ممکن است بخار به قدری مرطوب باشد که اثری منفی بر خلأ داشته باشد. یکبار ۳۰ فوت از خط ۲ اینچی ورودی^۲ بخار آب را با پارچه و عایق پوشاندیم و چندین میلی متر جیوه، بهبود حاصل شد.

جریان آب خنک کننده

متوجه شدیم جریان آب خنک کننده به کندانسور خلأ مرحله اول، اندک اندک کاهش یافته است. بنابراین لوله ها را با مواد شیمیایی تمیز کردیم تا رسوبات را پاک کنیم؛ اما این کار کمکی نکرد.

مشکل ما، رسوب گذاری نبود؛ بلکه هوایی بود که از آب خروجی کندانسور خارج می شد. هوای خروجی، جریان آب را در لوله ها، مسدود می کرد. با بالارفتن آب به میزان ۸۰ فوت و به سمت کندانسورهای سطحی در ارتفاع، آب فشار هد خود را از دست داده و هوا از آن خارج می شد. میزان هوای محلول در آب خنک کننده باید ثابت باشد؛ اما چرا از دست رفتن آب خنک کننده بدتر می شد؟

ارزیابی ها حاکی از این بود که خط لوله ورودی پمپ های آب خنک کننده ۷ فوت بالاتر از سطح آب در مخزن^۳ است. یعنی لوله کشی ورودی به پمپ آب، تحت خلأ ۳ psi یا ۱۲ psia است. در هر psi، ۲/۳ فوت آب وجود دارد. در صورتی که به دلیل خوردگی، حفرات کوچکی در لوله کشی فولاد کربنی ورودی ایجاد شود، هوا به ورودی پمپ کشیده می شود. هوا در فشار ۶۰ psig فشار خروجی پمپ، در آب حل می شود. بدین ترتیب، میزان هوای محلول در آب خنک کننده تا چهار برابر بیشتر می شود. همچنین، احتمال دارد، مشکل با گذشت زمان، حادث تر شود.

می توانید به عنوان یک راه کار، از یک رول نوار چسب پهن استفاده کرده و آن را دور خط ورودی بپیچید. این کار به فشار خروجی پمپ نیز، کمک می کند. یکبار برای برطرف کردن مشکل نشستی هوا، در پراکن گر اژکتور بخار آب، از نوار چسب پهن استفاده کردیم (توجه: با وجودی که نوار چسب پهن برای آب بندی نشستی خلأ به خوبی عمل

^۱ Bleeder: انشعاب

^۲ Supply: ورودی

^۳ Sump: مخزن

می‌کند، اما استفاده از آن، فقط به‌عنوان یک وصله موقت توصیه می‌شود. اگر فلز به قدری نازک باشد که احتمال سوراخ شدنش وجود داشته باشد، ممکن است به‌طور یکنواخت نازک شده و در خود مچاله و جمع شود).

انتخاب مواد لوله

به علت فرسودگی، مجبور به لوله‌گذاری مجدد یکی از اولین کندانسورهای داخلی شدیم. به همین دلیل با آن کندانسور به مشکل برخوردیم. معمولاً کندانسورها در طول عمر عملیاتی خود، دست‌کم یک بار نیاز به لوله‌گذاری مجدد دارند. معمولاً کندانسورها پس از نصب لوله‌های جدید و تمیز، بهتر کار می‌کنند. در این مورد نیز، کندانسور در طول چند ماه اول به خوبی کار کرد. اما در واقع، به خاطر تغییر موادش، انتظار می‌رفت که عملکرد بهتری داشته باشد. لوله‌های ضد زنگ با لوله‌های فولاد کربنی جایگزین شدند. به نظر می‌رسید که لوله‌های فولاد کربنی انتخاب بهتری باشند. این لوله‌ها نه تنها قابلیت دسترسی خوبی داشته و ارزان‌قیمت‌تر هستند، بلکه نرخ انتقال حرارت بیشتری نسبت به لوله‌های ضد زنگ دارند. نرخ انتقال حرارت بهتر، به کندانسور ظرفیت بیشتری می‌دهد.

اما لوله‌های فولاد کربنی انتخاب نامناسبی است. لوله‌های فولاد کربنی این سیستم در معرض آب خنک‌کننده‌ای قرار می‌گیرند که از یک سو غنی از اکسیژن است و از سوی دیگر حاوی بخارات اکسیژن است. هر دو مورد موجب می‌شوند فولاد کربن اکسید شده و زنگ بزنند. لوله‌ها در ابتدا خوب کار می‌کنند؛ اما زیاد طول نمی‌کشد تا زنگ بزنند که همین اتفاق، مانع از انتقال حرارت می‌شود. این زنگ‌زدگی با گذشت زمان موجب توقف جریان آب خنک‌کننده می‌شود و به عملکرد آسیب برساند. معمولاً عمر لوله‌های فولاد کربنی قبل از گسترش نشتی آب خنک‌کننده، بیشتر از یک الی دو سال نیست.

این موضوع، توضیح خوبی برای افزایش نرخ میعان‌ات چاه داغ و تضعیف عملکرد کندانسور است.

لوله‌های فولاد کربنی نه تنها موجب کاهش عملکرد می‌شوند، بلکه با توجه به سرعت خرابی بالایی که دارند، اغلب لازم است آن‌ها را بیشتر تعویض کنیم. این امر مستلزم کار و زمان اضافی است. بنابراین فولاد کربنی به اندازه‌ای که در ابتدا تصور می‌شد، ارزان‌قیمت نیست. در کندانسورهای خلا، لوله‌های فولادی ضد زنگ، لوله‌های برنجی یا لوله‌های ضد زنگ دابلکس، ترجیح داده می‌شوند.

نشستی پایه درین

برای فهمیدن نشستی هوا در لول‌های بالا و غیر عادی اکسیژن و نیتروژن، به ترکیب گاز آلوده^۱ نگاه کنید.

نشستی هوا سبب می‌شود که فشار اژکتور مرحله سوم نسبت به فشار طراحی شده ضعیف‌تر باشد. در این مورد، نشستی در پایه درین کندانسور دوم بود. تقریباً ۱۰ فوت بالاتر از درام میعان‌ات بود.

اما، وقتی پایه‌های درین میعان‌ات پر از مایع شود، هوا چگونه از این پایه‌ها نشت می‌کند؟ اگرچه، پایه‌ها در فشار کمتر از اتمسفر^۲ به سمت پایین لول مایع در دریافت‌کننده^۳ میعان‌ات هستند. اگر در خط سوراخی بزرگ ایجاد می‌شد، هوا را طوری داخل سیستم می‌کشید که حتی با خطی که تحت فشار مثبت بود نیز نشت نمی‌کرد. اما اگر هوا به داخل آن خطوط کشیده می‌شد، چرا با میعان‌ات به سمت پائین چاه داغ، جریان نیافت؟

پاسخ این است که جریان عبوری از پایه‌های آب‌بند نسبت به اندازه خطوطی که برای تهویه برگشتی به کندانسور طراحی شده‌اند، کم است. هوای کشیده‌شده به سوی هر نشستی، به سمت اژکتورهایی که در فشار کمی کار می‌کنند، حرکت می‌کند. وقتی نشستی به قدر کافی بزرگ باشد، هوای ورودی مانع از تخلیه میعان‌ات شده و موجب طغیان کندانسور می‌شود.

خلاصه

چنین نتیجه می‌گیریم که مقدار پسماند خلأ ما با کاهش ۱۰۵۰ درجه فارنهایتی دما از ۱۸ به ۱۰٪ افت کرد. نرخ تولید پس‌ماند خلأ ما تا تقریباً BSD ۲۰۰۰ کاهش یافت. در عین حال، راندمان نفت‌گاز خلأ نیز، به‌طور همزمان BSD ۲۰۰۰ افزایش یافت. اختلاف ارزش، روزانه ۴۰۰۰۰ دلار بود.

^۱ Off-gas: گاز آلوده

^۲ Subatmospheric: کمتر از فشار اتمسفر

^۳ Receiver: دریافت‌کننده



اژکتورهای خلأ همانند کمپرسورهای سرچاهی هستند

چکیده:

اغلب اژکتورهای خلأ، توسط بخار آب کار می‌کنند. با این حال، برخی از اژکتورهای پالایشگاهی، از بخارات هیدروکربنی با فشار بالاتر به عنوان گاز محرکه برای متراکم کردن گاز پالایشی با فشار پایین و تبدیل به یک سیستم فشار متوسط، استفاده می‌کنند. با استفاده از همین اصل، نویسنده، یک سیستم اژکتوری را برای استفاده از گاز طبیعی با فشار بالاتر از سرچاه، برای متراکم کردن گاز طبیعی کم‌فشار از سرچاه، به فشار متوسط انشعاب اصلی جمع‌آوری خط لوله میدان گازی طراحی کرد. این طراحی در شرکت جی-اچ-آر انرژی در جنوب لاریدوی تگزاس انجام شد.

کلمات کلیدی:

گاز طبیعی؛ اژکتور؛ سرچاه؛ خط لوله؛ هدر جمع‌آوری؛ خلأ؛ فشار سیستم

محلّه زاپاتا^۱ در جنوب لاریدو^۲ واقع در تگزاس^۳، فضای وسیع و پهناوری است که، عاشقش هستیم. شاید منظره خوشایندی نداشته باشد. گودال‌های عمیق، تپه‌های خشکیده و فرسوده، علف‌های خشک‌شده و درختان بی‌روح.

اما در اعماق سطح زمین که مملو از خاک رس و سنگریزه است، گنج بزرگی، جا خوش کرده است. سازند ویلکاکس. گاز طبیعی^۴. متان تقریباً خالص. فاقد سولفید هیدروژن و کربن‌دی‌اکسید. گاز در اعماق ۹۵۰۰ فوتی زمین، حدود ۱۰۰ میلیون سال است که با فشار ۲۸۰۰ psi در حال استراحت بوده و حالا منتظر من است.

این موضوع کاملاً درست نیست. گاز پر فشار قبلاً به وسیله بخش تولید شرکت جی‌اچ‌آر انرژی^۵، بازیافت شده است. بخش من، که شامل من و خوان هرناندو^۶ است، مسئول بازیابی ثانویه در میدان گازی زاپاتا است. پس از ۱ یا ۲ سال، بیش از ۹۰٪ از گاز طبیعی، تولید شده است و فشار دهانه چاه از ۲۸۰۰ به ۲۰۰ psig افت کرده است. من به عنوان مسئول چاه‌هایی انتخاب شدم که تا حد زیادی، تخلیه شده‌اند. سرپرستی صدها حلقه از این چاه‌ها بر عهده من است. این چاه‌ها، فقط پنج درصد از گازی را تولید می‌کنند که، به ایستگاه فشرده‌سازی لاریدو می‌رود.

من و خوان در یک بعدازظهر گرم، به سمت چاه تخلیه‌شده‌ای رفتیم که فشار سرچاه آن ۲۰۰ psig بود. فشار سیستم جمع‌آوری خط لوله، برابر با ۶۰۰ psig بود. به همین دلیل، خوان پیشنهاد کرد که یک کمپرسور اینگرسول رند^۷ اجاره‌ای و دو مرحله‌ای رفت و برگشتی، نیرو محرکه گاز طبیعی و سرچاهی را نصب کنیم. این چاه نیز مانند ۱۰۰ چاه دیگر، گاز کم‌فشار سرچاه را برای انتقال به ایستگاه فشرده‌سازی لاریدو، در فاصله ۴۰ مایلی متراکم می‌کرد.

در مورد هزینه‌های اجاره و عملیات برای کمپرسور سرچاهی بحث می‌کردیم. می‌خواستیم تصمیم بگیریم که آیا مقدار گاز بازیافتی، ارزش این هزینه‌ها را دارد یا نه. در این میان، متوجه شدم که در نزدیکی چاه تخلیه‌شده ما، چاه جدیدی قرار دارد که گاز با حجم بیشتری در آن جریان داشته و فشار دهانه چاه نیز برابر با ۲۵۰۰ psig است.

«خوان، من یک ایده دارم. بیا کمپرسور اجاره نکنیم که مجبور باشیم تا سوخت گازی زیادی مصرف کنیم. بیا از فشار گاز چاه جدید استفاده کنیم تا بتوانیم گاز چاه قدیمی را متراکم کنیم.»

^۱ Zapata County: محلّه زاپاتا

^۲ Laredo: لاردو

^۳ Texas: تگزاس

^۴ Wilcox Formation: سازند ویلکاکس، یکی از سازندهای زمین‌شناسی است.

^۵ GHR Energy: شرکت جی‌اچ‌آر انرژی

^۶ Juan Hernando: خوان هرناندو

^۷ Ingersoll Rand: کمپرسور اینگرسول رند

«قربان؛ این سیستم چگونه کار می‌کند؟»

«ما از یک اژکتور بخار استفاده می‌کنیم. اما به جای بخار آب محرکه، از گاز طبیعی چاه جدید با فشار ۲۵۰۰ psig استفاده خواهیم کرد.»

«درک نمی‌کنم آقای نورم. پس اژکتور چه؟ اژکتور چگونه کار کند؟»

«بسیار خب، خوان. تو گوش کن و من صحبت می‌کنم. داستانش مفصل است.»

«بله! بله! نورم. زمان زیادی داریم.»

سیستم خلأ - اژکتورهای بخار

در کودکی رفتن به توالت را یاد گرفتم. یکی از مواردی را که در طول تمرین توالت رفتن به آن توجه می‌کردم، این بود که وقتی از بیرون باد می‌آمد، سطح آب کاسهٔ توالت، ناپایدار می‌شد. از آنجایی که داخل دستشویی ما باد نمی‌آمد، نمی‌توانستم رابطهٔ بین ناپایداری سطح آب توالت و یک روز بادی را درک کنم.

سال‌ها گذشت. یک روز وقتی داشتم با یک نی پلاستیکی شفاف نوشابه می‌نوشیدم، بالای نی را فوت کردم. متوجه شدم که سطح نوشابه در نی، بالاتر از سطح آن در بطری بوده و از نی به بالا کشیده می‌شود. تعجب کردم که چرا این اتفاق می‌افتد؟

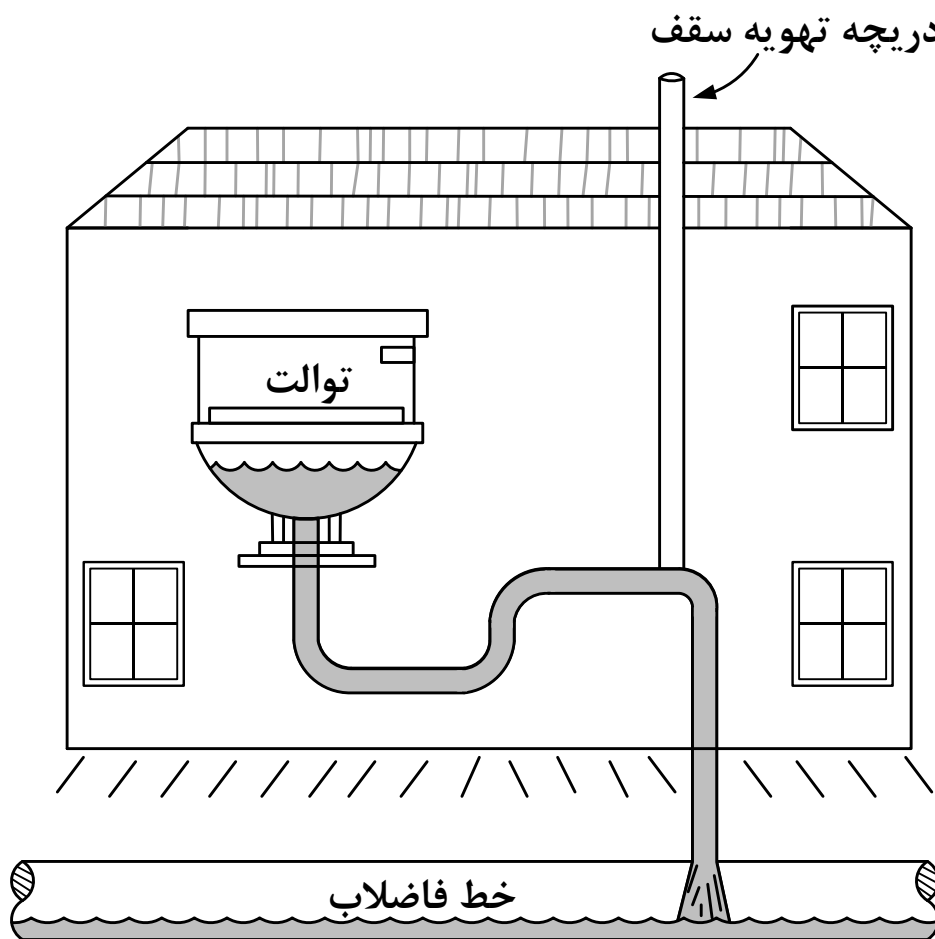
سال‌های بیشتری سپری شدند. از دانشگاه فارغ التحصیل شدم، ازدواج کردم و خانه‌ای خریدم. کارم را با تعمیرات حمام و با تخصص در حوزهٔ خرابی توالت آغاز کردم. یکی از همسایه‌ها پیشنهاد کرد که احتمالاً مشکل فعلی من، ناشی از این موضوع است که هواکش سقف توالت مسدود شده^۱ است (شکل ۱-۲۵).

از این موضوع خبر نداشتم که توالت‌ها برای جلوگیری از انسداد بخار در خط تخلیه به فاضلاب^۲، هواکش‌های سقفی دارند. با بررسی متوجه شدم که پرنده‌ای روی دریچهٔ سقف توالت من، لانه ساخته است. وقتی لانه را برداشتم، مشاهدات دوران کودکی‌ام دربارهٔ رابطهٔ بین باد و سطح آب متلاطم کاسهٔ توالت برایم تداعی شدند. وقتی باد در بالای هواکش سقف شروع به وزیدن می‌کند، منطقه‌ای با فشار کم در لولهٔ تهویه و در خط تخلیهٔ توالت که به

^۱ Plug: مسدود شدن

^۲ Sewer: فاضلاب

فاضلاب وصل است، ایجاد می‌شود. سطح آب به خط تخلیه کشیده می‌شود. منشأ این آب، سطح آب کاسه توالت است (شبیه آزمایش نی نوشابه^۱ من، شکل ۲۵-۱). وقتی باد به صورت ناگهانی عبور می‌کند، فشار در خط تهویه به فشار اتمسفر برمی‌گردد. پس از آن، سطح آب کاسه توالت به حالت عادی برمی‌گردد. باد با سرعت ۲۰ یا ۳۰ مایل بر ساعت (یا ۳۰ تا ۴۰ فوت بر ثانیه)، سطح آب را به میزان کسری از یک اینچ بالا می‌برد^۱. اما فرض کنید سرعت هوا ۱۲۰۰۰ فوت بر ثانیه است (۸۰۰۰ MPH یا ده برابر سرعت صوت). به این ترتیب سطح آب می‌توانست تا ۲۰ فوت بالا رود. وقتی سیالی مانند هوا، بخار یا گاز طبیعی با سرعت زیادی از یک روزنه می‌گذرد، فشار آن روزنه کم می‌شود. به همین دلیل، وقتی باد بالای دودکش^۲ شومینه^۳ می‌وزد، مکش^۴ بیشتر می‌شود.



شکل ۲۵-۱ وزش باد در دریچه تهویه، باعث می‌شود که سطح آب توالت متلاطم شده و بالا و پایین برود.

^۱ نیروی بالابر: Lift

^۲ دودکش: Chimney

^۳ شومینه: Fireplace

^۴ مکش، درافت: Draft

تبدیل گرما به سرعت

لاستیک ماشین، فشاری برابر با ۳۵ psig دارد. اگر شیر سوزنی آن را فشار دهید، هوای خنک را احساس خواهید کرد. هوا با سرعت تقریباً ۱۰۰۰ فوت بر ثانیه به بیرون دمیده می‌شود (سرعت صوت در فشار اتمسفر). بخش عمده انرژی مصرفی برای شتاببخشیدن به هوای لاستیک، ناشی از فشار باد لاستیک نیست؛ بلکه از دمای انبساط هوا، نشأت می‌گیرد. این فرآیند، «انبساط آیزنتروپیک» نام دارد. در اصل، معنای این موضوع این است که، بخشی از محتوای گرمای بخار، به شکل حرارت محسوس، به سرعت تبدیل می‌شود.

معمولاً اگر گازی مثل هوا با کاهش فشار از ۳۵ psig به فشار اتمسفر از یک روزنه ساده عبور کند، با سرعت صوت از آن روزنه، خارج می‌شود. این فرآیند، جریان بحرانی^۱ نام دارد. هرچند، اگر منفذ شبیه نازلی باشد که در شکل ۲-۲۵ می‌بینید، احتمال دارد سرعت خروج گاز از نازل به بیشتر از سرعت صوت برسد. کاهش فشار خروجی این نازل، خیلی بیشتر است. نه یک اینچ افت فشار آب؛ بلکه معادل ۱۰ یا ۲۰ فوت افت فشار آب. بدین معنا که نازل، منطقه‌ای را با افت فشار یا خلأ جزئی ایجاد می‌کند.

در خانه من واقع در نیواورلئان، فشار اتمسفر در سطح دریا، برابر با ۳۴ فوت آب است. اگر نازلی که سرعت بالایی دارد، می‌تواند آب را در نی نوشابه من تا ۱۷ فوت بالا بکشد، می‌توان چنین نتیجه گرفت که خلأیی که نازل ایجاد می‌کند، برابر با ۵۰٪ فشار اتمسفر است:

$$0.5 \times 14.7 = 7.3 \text{ psi}$$

یا می‌توان چنین گفت که اگر، خلأ را بر حسب «اینچ جیوه» اندازه‌گیری می‌کردم و فشار اتمسفر، برابر با صفر اینچ جیوه در سطح دریا بود؛ آنگاه فشارسنج من، خلأ ۱۵ اینچ جیوه را نشان می‌داد.

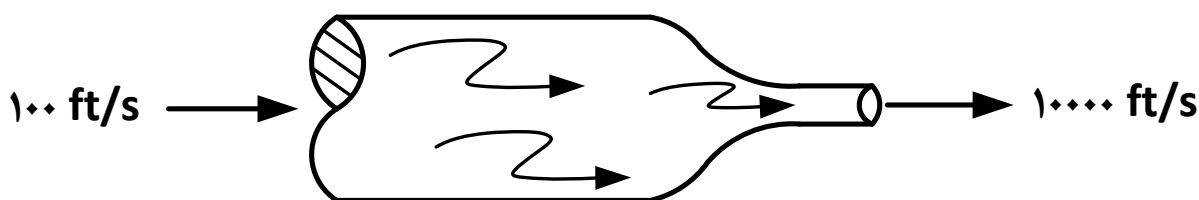
در حالت بعدی، اگر خلأ را بر حسب میلی‌متر جیوه اندازه‌گیری می‌کردم، فشار اتمسفر در سطح دریا برابر با ۷۶۰ میلی‌متر جیوه بود. پس فشارسنج خلأ من باید، فشار ۳۸۰ میلی‌متر جیوه را نشان می‌داد.

در ایالات متحده از سیستم اینچ جیوه استفاده می‌شود. سایر نقاط جهان از میلی‌متر جیوه برای اندازه‌گیری خلأ استفاده می‌کنند. در این شرایط:

$$\bullet \text{ خلأ کامل} = 0/0 \text{ میلی‌متر جیوه؛}$$

^۱ Critical flow: جریان بحرانی

- فشار اتمسفر در سطح دریا = ۷۶۰ میلی متر جیوه.



شکل ۲۵-۲ افزایش سرعت بخار، در عبور از یک نازل. انبساط آیزنتروپیک (آنتروپی ثابت).

اژکتور بخار آب، به عنوان یک کمپرسور

از اژکتور بخار آب در واحدهای فرآیندی و نیروگاه‌ها، برای ایجاد خلأ استفاده می‌شود. اژکتور بخار آب، یکی از پرکاربردترین موارد، در تجهیزات فرآیندی است.

از اژکتورهای خلأ برای تولید موارد زیر استفاده می‌شود:

- آسفالت جاده
- روغن‌های روان‌کننده
- موم‌ها
- انرژی الکتریکی
- آب پرتقال
- آب شیرین‌شده

بیشتر زمان من، به عنوان یک مهندس فرآیند، صرف تقویت خلأ در کندانسورهای سطحی توربین بخار می‌شود. هدفم این است که توربین به ازای هر پوند بخار آب محرکه، نیروی بیشتری تولید کند.

دو نوع اژکتور خلأ وجود دارد:

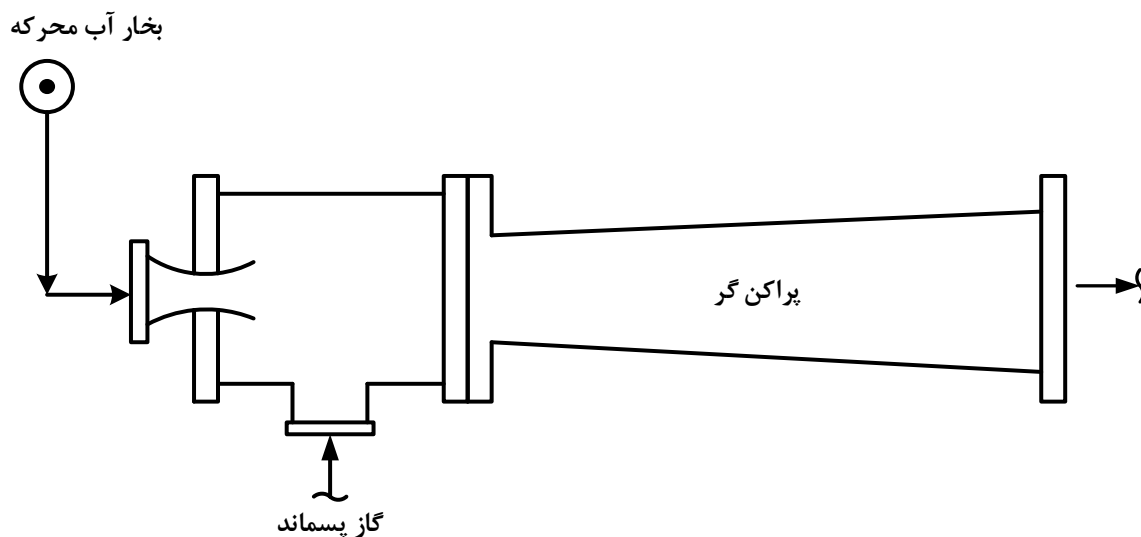
۱. جت ساده و اگر که در شکل ۲۵-۳ نشان داده شده است.
۲. اژکتور واگرا-همگرا که پیچیده‌تر بوده و بعداً در مورد آن صحبت می‌کنم.

معمولاً جت واگرا، ضریب تراکم حدود سه به یک را ایجاد می‌کند. برای مثال، شاید فشار ورودی به جت، ۲۰۰ میلی‌متر جیوه باشد. فشار اتمسفر در دنور (مایل های سیتی)^۱، برابر با ۷۰۰ میلی‌متر جیوه است. بدین ترتیب، ضریب فشرده‌سازی برابر است با:

$$700 \div 200 = 3.5$$

معمولاً، سیال محرک اژکتور، بخار آب است. اما من با استفاده از سیالات زیر نیز، با اژکتورها کار کرده‌ام:

- هوا
- گاز طبیعی
- نیتروژن
- گاز مرطوب پالایشگاه (بیشتر پروپان و بوتان)
- آب
- روغن دیزل



شکل ۲۵-۳ یک اژکتور بخار واگرا یا خمیده

اپراتورها، جت واگرای شکل ۲۵-۳ را جت هوگینگ^۲ می‌نامند. این جت، نسبت به اژکتورهای واگرا-همگرا کمتر کارآمد است و معمولاً در سیستم‌های ادواری، از آن استفاده می‌شود. در این سیستم‌ها، هزینه سیال محرکه اهمیتی

^۱ مایل های سیتی: Mile High City

^۲ جت هوگینگ: Hogging Jet

ندارد. بخار آب محرکه با سرعت ۱۰۰ فوت بر ثانیه به درون نازل بخار وارد می‌شود. بخار با توجه به شکل نازل به سرعت حدود ۱۰۰۰۰ فوت بر ثانیه می‌رسد. معمولاً انرژی لازم برای شتاب‌دهی به بخار از دمای بخار آب به دست می‌آید. آنچه مشاهده کردیم این بود که اگر بخار آب محرکه دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- فشار ۱۵۰ psig؛

- دمای ۳۷۰ °F.

وقتی از نازل بخار آب، خارج می‌شود، با مشخصات زیر جریان پیدا می‌کند:

- فشار ۲۰۰ میلی‌متر جیوه؛

- دمای ۱۵۰ °F.

پس‌ماند گازی که در حال تخلیه است، به درون محفظه اختلاط^۱ اژکتور کشیده می‌شود (شکل ۲۵-۳). معمولاً حدود سه یا چهار پوند بخار آب محرکه، جهت مکش یک پوند پس‌ماند گازی، لازم است.

مخلوط پس‌ماند گازی و بخار آب محرکه به قسمت تخلیه وارد می‌شوند. این بخش را، بخش واگرای جت می‌نامند؛ چراکه سطح مقطع عرضی لوله تخلیه بزرگ‌تر می‌شود. با توجه به اینکه سطح مقطع عرضی بزرگ‌تر می‌شود، سرعت بخار کمتر می‌شود؛ بدین معنا که انرژی جنبشی یا سرعت یا اندازه حرکت^۲ بخارها به فشار تبدیل می‌شود. من به این فرآیند، تقویت سرعت^۳ می‌گویم. گرمای فشرده‌سازی، دقیقاً مانند تمام کمپرسورهای دیگر، سبب می‌شود که دمای بخارها افزایش یابد. مشاهداتم نشان دادند که دمای بخارها به حدود ۵۰ تا ۷۰ درجه فارنهایت می‌رسد.

بیشتر اژکتورهای خمیده به اتمسفر تخلیه می‌شوند. انواع دیگری از آنها به یک کندانسور تخلیه می‌شوند. در کندانسور، بخار متراکم شده و گاز فشرده‌شده باقی‌مانده وارد یک سیستم سوخت گازی با فشار پایین می‌شود.

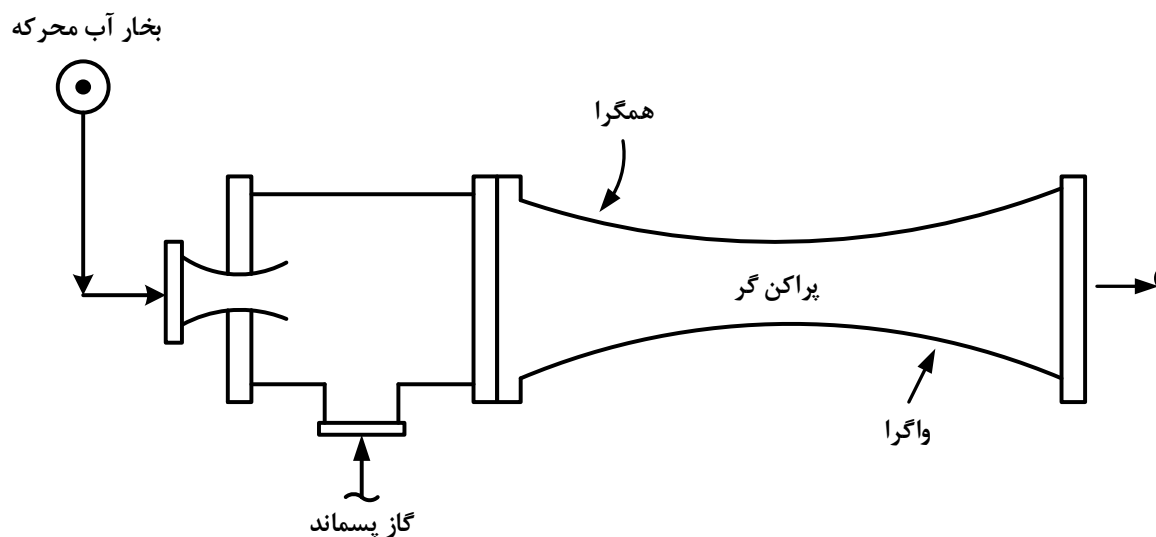
^۱ Mixing chamber: محفظه اختلاط

^۲ Momentum: اندازه حرکت

^۳ Velocity Boost: تقویت سرعت

اژکتورهای بخار همگرا- واگرا

برخی از اژکتورها با توجه به «تقویت صوت»، ضریب فشرده‌سازی بالایی را ارائه می‌دهند (شکل ۲۵-۴). به موازات اینکه بخار آب پرسرعت^۱ در میان اژکتور جریان یافته و با سرعت ۱۰۰۰۰ فوت بر ثانیه حرکت می‌کند، کم‌کم سرعتش در بخش‌های واگرای اژکتور کم می‌شود. سرعت بخارهای در جریان از سرعت صوت به زیر این سرعت می‌رسد. این موضوع، موج فشاری را ایجاد می‌کند که به آن «تقویت صوتی» می‌گویند.



شکل ۲۵-۴ اژکتور همگرا - واگرا

بیشتر اپراتورهایی که با اژکتورهای بخار کار کرده‌اند، به‌صورت دوره‌ای صدای «سرج»^۲ یا «شکار»^۳ را شنیده‌اند و فکر می‌کنند که، این صدا به‌خاطر یک خلأ ضعیف، ایجاد می‌شود. این صدا نشان می‌دهد که، اژکتور بخار به‌صورت متناوب «تقویت صوتی» خود را از دست می‌دهد.

بخش زیادی از تراکم در یک اژکتور همگرا-واگرا، به‌خاطر این تقویت صوتی، ایجاد می‌شود. همزمان با خروج بخارها (بخار آب محرکه به همراه پس‌ماند گازی) از گلویی پراکن‌گر، سرعت آن‌ها به‌خاطر جریان یافتن در بخش واگرای جت کم می‌شود. در این بخش، سطح مقطع، افزایش می‌یابد. بخارهایی که با سرعتی بالاتر از سرعت صوت حرکت می‌کنند، در زمان خروج از گلویی پراکن‌گر، در برخی نقاط، به زیر سرعت صوت می‌رسد. این کاهش سرعت از

^۱ High velocity steam: بخار آب پر سرعت

^۲ Surging: تلاطم

^۳ Hunting: هانتینگ

ما فوق صوت به مادون صوت، یک موج فشار را ایجاد می‌کند. این شرایط، شبیه هواپیمایی است که دیوار صوتی را شکسته و یک «غرش صوتی» ایجاد می‌کند. معمولاً این فرآیند، به عنوان حالت بحرانی عملیات اژکتور، شناخته می‌شود.

تقویت صوتی، جریان‌های بخار را به شدت فشرده می‌کند. فشار برای مثال از ۳۰ به ۲۰۰ میلی‌متر جیوه می‌رسد. این تراکم، دمای بخش واگرای بدنه اژکتور را افزایش می‌دهد.

از بین رفتن تقویت صوتی

برای توسعه یافتن تقویت صوتی، گذار از سرعت ما فوق صوت به مادون صوت در پائین گلوپی پراکن‌گر باید رخ دهد. عواملی که این منطقه گذار را به سمت گلوپی پراکن‌گر جابه‌جا می‌کند، موجب افت و حذف تقویت صوتی به طور ناگهانی و کامل می‌شوند (شکل ۲۵-۴).

منطقه گذار تقویت صوتی به‌خاطر فشار برگشتی در کندانسور پایین‌دست، به عقب جابه‌جا می‌شود. مواردی که موجب افزایش فشار برگشتی از کندانسور می‌شوند، عبارتند از:

- افزایش افت فشار کندانسور؛
- رسوب‌گرفتگی کندانسور و افت راندمان انتقال حرارت؛
- افزایش دمای آب خنک‌کننده (هنگام تابستان)؛
- افزایش فشار برگشتی در خروجی کندانسور. به دلیل این که اژکتور پایین‌دست دچار نقص عملکرد شده است؛

- تجمع کندانس از پایه‌های آب‌بند کندانسور؛
 - نشت هوا در داخل کندانسور.
- علت دیگر این که ناحیه گذار از سرعت ما فوق صوت به مادون صوت، در دیفیوزر، خیلی عقب است، کندبودن بیش از حد سرعت بخاری‌ست که وارد اژکتور می‌شود. با این حال، سرعت هنوز هم ما فوق صوت بوده اما، به اندازه کافی سریع نیست. دلایل احتمالی این امر شامل موارد زیر هستند:

- فشار بخار آب محرکه خیلی پایین است؛
- بخار آب محرکه، مرطوب است؛
- نازل بخار آب، ساییده است؛

- نازل بخار آب در اطراف رزوه‌های خود، یعنی جایی که به بدنهٔ اژکتور پیچ می‌شود، دارای نشتی‌ست؛
- موقعیت نازل بخار آب، به درستی تنظیم نشده است؛
- جت بیش از حد با گاز پر شده است؛
- سوراخی در پراکن‌گر، وجود دارد.

بازیابی گاز طبیعی

من در لاریدو از مفهومی بهره بردم که دربارهٔ اژکتورهای خلأ در پالایشگاه‌ها، آموخته بودم. خوان و من تلاش کردیم تا طرحی برای بازیابی گاز از چاه قدیمی ارائه دهیم و از گاز پرفشار چاه جدید، به جای بخار آب استفاده کنیم.

چاه «A»، یک چاه تخلیه‌شدهٔ قدیمی با فشار سرچاهی ۲۰۰ psig بود. فشار خط سیستم جمع‌آوری نیز، در حدود ۶۰۰ psig بود. گاز با فشار ۲۰۰ psig نمی‌توانست بدون فشرده‌سازی، به سیستم جمع‌آوری جریان یابد. جریان گاز بالقوه از چاه، تنها ۲۰۰۰۰۰ SCFD بود و نصب کمپرسور رفت و برگشتی در سرچاه نیز، به سختی قابل‌توجیه بود. چاه دیگر، یعنی «چاه B»، چاهی جدید، فشاربالا و با فشار سرچاهی ۲۵۰۰ psig بود. گاز از طریق انسداد سر چاهی^۱ با فشار ۶۰۰ psig و با نرخ ۲۰۰۰۰۰ SCFD به درون خط لولهٔ جمع‌آوری، جریان یافت.

من و خوان یک اژکتور مدل هوگینگ (یعنی تک مرحله و واگرا، شکل ۲۵-۳) خریداری کردیم. ما از گاز طبیعی حاصل از چاه «B» (در فشار ۲۵۰۰ psig)، به عنوان گاز محرکه، برای تقویت مقدار گاز حاصل از چاه «B» (در فشار ۲۰۰ psig) تا فشار خط لوله، یعنی ۶۰۰ psig، استفاده کردیم.

برنامه‌ریزی نکنید تا دفعهٔ بعدی که در شهرستان زاپاتای تگزاس^۲ هستید، از این تاسیسات دیدن کنید. در عرض یک سال، فشار چاه «B» به پایین‌تر از حد لازم برای عمل کردن به عنوان گاز محرک اژکتور، کاهش یافت. جی-اچ-آر، انرژی ورشکست شد. خوان هراندو به مزرعه‌اش در شهرستان وب بازگشت. من نیز بازگشتم تا برج‌های خلأ پالایشگاه و توربین‌های بخار آب را در لویزیانا و اینید اوکلاهما^۳، عیب‌یابی و تعمیر کنم.

^۱ Wellhead choke: انسداد سر چاهی

^۲ Zapata County, Texas: شهرستان زاپاتای تگزاس

^۳ Oklahoma: اوکلاهما



کندانسورهای سطحی خلأ توربین بخار

چکیده:

هر دو کندانسورهای بارومتريک و سطحی، برای ایجاد خلأ خروجی توربین بخار و موتورهای بخار آب رفت و برگشتی استفاده می‌شوند تا توان تولیدی محرکه بخار آب را تا حد زیادی افزایش دهند. بهترین خلأیی که می‌توان ایجاد کرد، توسط فشاربخار، آب در دمای خروجی بخار (و نه مایع) کندانسور سطحی محدود می‌شود. خروج مایع سرد، ممکن است نشانه‌ای از خروج میعانات بخار آب باشد که باعث کاهش راندمان محرکه می‌شود.

کلمات کلیدی:

توربین؛ بافل هوا؛ کندانسور؛ بخار آب؛ بارومتريک؛ کندانسور سطحی، فشار بخار

من حرفه‌ام را در سال ۱۹۶۵ به عنوان مهندس فرآیند برای شرکت نفت آمریکا^۱ در وایتینگ^۲ ایندیانا^۳ آغاز کردم. من در کارم تلاش بسیار زیادی داشتم اما هیچ‌گاه در موقعیت شغلی‌ام، پیشرفت نکردم. احتمالاً من توجه خیلی زیادی را به رفع مشکلات فرآیند و توجه بسیار کمی را به تعامل با مدیریت، اختصاص دادم. بنابراین در سال ۱۹۸۰، استعفا داده و موقعیت شغلی‌ام را به عنوان مدیر خدمات فنی در پالایشگاه گود هوپ^۴ در نزدیکی نیو اورلئان^۵ به دست آوردم. من مستقیماً به مالک پالایشگاه، آقای جک استنلی^۶، گزارش می‌دادم. چند روز پس از شروع کارم، تلفن من زنگ خورد: «من جک هستم، K-۸۰۵ سرعت نمی‌گیرد؛ تعمیرش کن!» و سپس تلفن قطع شد.

K-۸۰۵ دمنده^۷ اصلی هوای احتراق^۸ ما در واحد FCU^۹ با ظرفیت ۸۵۰۰۰ بشکه در روز بود. این دستگاه به کندی کار می‌کرد. بنابراین فشار خروجی دمنده، برای تأمین هوای ورودی^{۱۰} برج احیاء کاتالیست، بسیار پایین بود که در نتیجه، موجب کاهش ظرفیت خوراک FCU شد. من از قبل علت کم‌بودن سرعت دمنده هوا را می‌دانستم:

- محرکه توربین بخار تنها ۸۰٪ توان معمولی‌اش را تولید می‌کرد؛
- مقدار کم اسب بخار تولیدی از توربین، به علت فشار بالای خروجی توربین به کندانسور سطحی خلأ بود (شکل ۱-۲۶ را ببینید).

من محاسبه کردم که برای بازیابی توان توربین، باید خلأ کندانسور سطحی را از مقدار فعلی آن، یعنی ۹۰ mmHg (۲۶۵۰۰ Hg) به مقدار ۵۰ mmHg (۲۸۰۰ Hg) بهبود دهم. اما چگونه؟ (توجه: فشار در سطح دریا برابر با ۰/۰ mmHg یا ۱۴/۷ psia یا ۷۶۰ mmHg است).

کندانسورهای خلأ

بر خلأف آن چه که در دبیرستان به ما می‌آموزند، جیمز وات^{۱۱} ماشین بخار آب را اختراع نکرد. وات، کندانسور بارومتریک را اختراع کرد که کار استخراج‌شده از بخار آب را تا ۳۰٪، افزایش می‌داد. طرح وات، بخار آب را از یک

^۱ نفت آمریکا: American Oil

^۲ وایتینگ: Whiting

^۳ ایندیانا: Indiana

^۴ گود هوپ: Good Hope

^۵ نیو اورلئان: New Orleans

^۶ جک استنلی: Jack Stanley

^۷ دمنده، بلوئر: Blower

^۸ هوای احتراق: Combustion air

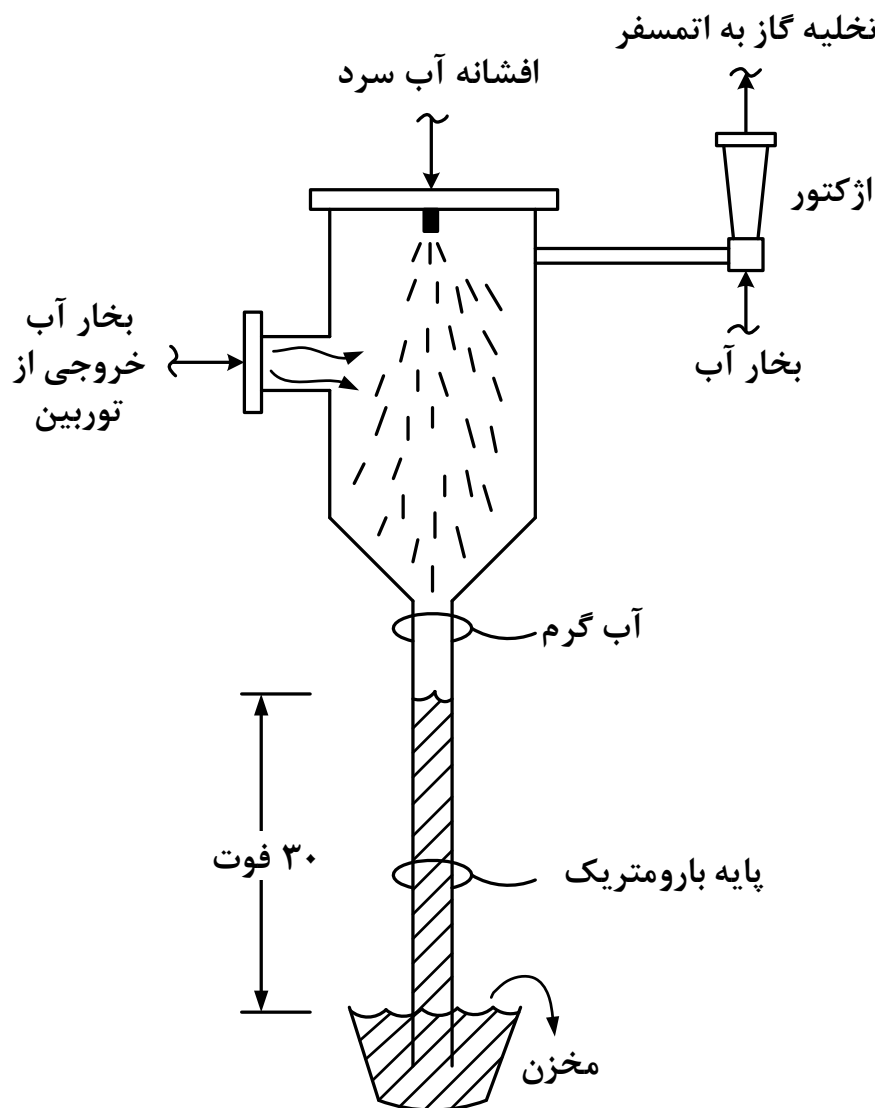
^۹ مخفف «Fluid Catalytic Cracking Unit»، معنی واحد شکست کاتالیستی بسترسیال، واحد شکستن مولکول‌ها در کاتالیست سیال: FCU

^{۱۰} ورودی: Supply

^{۱۱} جیمز وات: James Watt

ماشین بخار آب به یک فضای خلأ تخلیه می‌کرد. به ویژه اگر بخار آب محرک دارای فشار پایینی، مثلاً ۳۰ psig بود، فشار خروجی موتور بخار آب، برای به حداکثر رساندن مقدار توان استخراج‌شده از هر پوند بخار آب، بسیار حائز اهمیت بود.

در کارخانه بازیابی اسید سولفوریک من در شهر تگزاس^۱ که در سال ۱۹۷۴ در آن مشغول به کار بودم، دمنده، توسط توربین بخاری به حرکت در می‌آمد که به یک کندانسور بارومتريک تخلیه می‌شد. من طرحی کلی از آن را در شکل ۱-۲۶ نمایش داده‌ام. این قطعه، بر خلاف سایر قطعاتی که هنوز پس از ۴۳ سال، توام با حس انزجار، به خاطرشان می‌آورم، یکی از تجهیزات بدون مشکل بود.



شکل ۱-۲۶ کندانسور منسوخ بارومتريک.

^۱ Texas City: شهر تگزاس

بخار آب خروجی، به محفظه‌ای با ارتفاع زیاد، جریان می‌یافت که در آن آب سرد بر روی بخار متراکم پاشیده می‌شد. آب گرم و میعان‌ات بخار آب، توسط نیروی گرانش به داخل مخزنی تخلیه می‌شدند. نشت هوا توسط یک اژکتور بخار آب، استخراج می‌شد. فشار کندانسور سطحی کمی بالاتر از فشاربخار^۱ آب در دمای خروجی بخار کندانسور بود.

اگر کندانسور بارومتریک در فشار ۱۰۰ mmHg کار کند و فشار اتمسفری در شهر تگزاس ۷۶۰ mmHg باشد، کندانسور باید تا ارتفاع زیر بالا برود:

$$\frac{(760 - 100)}{760} \cdot 34' = 30 \text{ ft} \quad (1 - 26)$$

من فرض کرده‌ام که، فشار اتمسفری در سطح دریا برابر با فشار ۳۴ فوت آب (۱۴/۷ psia یا ۲۹/۹۷ اینچ جیوه یا ۷۶۰ mmHg) است. خط درین، پایه بارومتریک^۲ نامیده می‌شود؛ بنابراین نام کندانسور، «کندانسور بارومتریک» است.

کندانسور سطحی

اغلب، سیستم‌های اژکتور قدیمی برج خلاء پالایشگاهی، بازسازی و بهسازی شده‌اند تا کندانسورهای بارومتریک‌شان به کندانسورهای سطحی مدرن‌تری، تبدیل شود که معمولاً به خوبی کار نمی‌کنند. ریشه عبارت «کندانسور سطحی» برگرفته از این واقعیت است که «کندانسورهای بارومتریک» فاقد سطح تبادل حرارت هستند اما کندانسورهای سطحی، سطح تبادل حرارت داخلی دارند.

تمامی مبدل‌های پوسته و لوله، سطح تبادل حرارت داخلی دارند. بنابراین معنای حقیقی عبارت کندانسور سطحی این است که همان‌طور که در شکل ۲۶-۲ نشان داده شده، دارای دو خروجی‌ست:

۱. یک خروجی مایع، معمولاً از چاهک^۳ در پایین پوسته؛
۲. یک خروجی بخار برای گازهای غیرقابل چگالش، واقع در بالای پوسته یا در سمت پوسته، اما درون بافل داخلی که برای جمع‌آوری بخارات گازهای غیرقابل چگالش مورد استفاده قرار می‌گیرد (یعنی «بافل هوا»).

^۱ Vapor pressure: فشار بخار

^۲ Barometric leg: پایه بارومتریک

تصحیح فشار بارومتریک

یک گیج فشار خلأ معمولی واحد بهره‌برداری، برای اندازه‌گیری فشار اتمسفریک، دقیق نیست. زمانی که جوان‌تر بودم، متوجه این مسئله نبودم و هنگام عیب‌یابی سیستم‌های خلأ، مرتکب اشتباهات جدی می‌شدم. شما باید با به کارگیری هر یک از موارد زیر از این اشتباه اجتناب کنید:

- یک فشارسنج جیوه‌ای
 - یک مانومتر خلأ مطلق دیجیتالی الکترونیکی
- من از یک «مریام مدل M101-GN0015» استفاده می‌کنم که قیمتش در سال ۲۰۱۵، ۵۵۰ دلار (ایالات متحده) بود. امروزه در ایالات متحده، استفاده از فشارسنج‌های جیوه‌ای در خارج از آزمایشگاه مجاز نیست. هنگام استفاده از گیج فشار خلأ، صرف‌نظر از نوع آن، باید به صورت دستی^۱ موارد زیر را بر روی آن، انجام دهید:
- **مرحله یک** - گیج برای فشار اتمسفری (۲۹/۹۷ اینچ جیوه) در سطح دریا، کالیبره شده است؛
 - **مرحله دو** - تعیین فشار اتمسفری برای موقعیتی که در آن قرار دارید با چک کردن گزارش هواشناسی یا فشارسنج آزمایشگاه. فشار اتمسفری با تغییر ارتفاع و آب‌وهوا، تغییر بسیار زیادی دارد. فشار اتمسفریک در آب‌وهوای سردتر افزایش می‌یابد. زیرا هوای سرد، چگال‌تر است.
 - **مرحله سه** - تصحیح فشارسنج برای ارتفاع کاری‌تان. به ازای هر ۱۰۰ فوت افزایش ارتفاع، فشار اتمسفری ۰/۱۱ اینچ جیوه، کاهش پیدا می‌کند.
 - **مرحله چهار** - برای تعیین خلأ کامل در موقعیتی که هستید، اختلاف میان ۲۹/۹۷ و فشار محیط در سطح را در نظر بگیرید. مثلاً فشار هوا در دنور^۲ کلرادو^۳ (شهری در ایالات متحده با ارتفاع بالا از سطح دریا) ۲۸ اینچ جیوه است:

$$29.97 - 28.00 = 1.97 \text{ اینچ جیوه}$$

اگر شما از نردبانی^۴ با ۱۰۰ پله بالا رفته باشید (یعنی ۱۰۰ فوت)، خواهیم داشت:

$$1.97 + 0.11 = 2.08$$

- **مرحله پنج** - ۲/۰۸ را از ۲۹/۹۷ کم کنید:

^۱ Manual: کنترل دستی

^۲ Denver: دنور

^۳ Colorado: کلرادو

^۴ Ladder: نردبان

$$29.97 - 2.08 = 27.89 \text{ اینچ جیوه}$$

این عددی است که برای خلأ کامل، بر روی گیج فشارتان قرائت خواهید کرد.

- اگر می‌خواهید عددی را که خوانده‌اید (X) به میلی‌متر جیوه (مطلق) تبدیل کنید، مانند کاری که من همیشه انجام می‌دهم، به صورت زیر عمل کنید:

$$\text{میلی متر جیوه مطلق} = (27.89 - x) \cdot 25.4$$

هر اینچ، معادل ۲۵/۴ میلی‌متر است.

یکبار، زمانی که در کانادا و در ارتفاع بالایی کار می‌کردم، انجام این تصحیح را فراموش کردم. من به مشتریانم گزارش دادم خلأ در کندانسور سطحی آن‌ها، واقعاً وضع بدی دارد. آنان بر اساس تجزیه و تحلیل‌های من، تغییرات هزینه‌بر زیادی را انجام دادند که هیچ کدامشان سودمند نبود. در واقع تمام این مدت هیچ مشکلی درباره خلأ وجود نداشت.

محدودیت‌های خلأ به علت فشار بخار آب

بهترین خلأیی که می‌تواند در کندانسوری سطحی ایجاد شود، توسط فشاربخار، آب در دمای بخار آب خروجی کندانسور محدود می‌شود. احتمالاً نیمی از سیستم‌های خلأ در سراسر جهان، توسط این پارامتر ساده و واضح، با محدودیت مواجه می‌شوند. در جدول ۲۶-۱، فشاربخار، آب را در دماهای متداول بخار آب خروجی کندانسور، فهرست کرده‌ام.

من در بیان این محدودیت فرض می‌کنم که مقداری آب آزاد از نازل خروجی مایع، تخلیه می‌شود. من این مشکل رایج را برای شما توضیح خواهم داد. اجازه دهید فرض کنیم که من کندانسوری دارم که دمای بخار آب خروجی آن ۱۰۰ °F است. ترکیب بخار خروجی، ۲۰۰ پوند بخار در هر ساعت و مایع خروجی، ۸۰۰ پوند آب در هر ساعت است. طبق جدول ۲۶-۱، کندانسور در خلأیی برابر با ۴۹ mmHg کار می‌کند.

اکنون من جت ثانویه‌ای را به صورت موازی با جت اول روشن می‌کنم. ظرفیت اژکتور دو برابر می‌شود. بنابراین دو برابر جریان بخار قبلی را از کندانسورها می‌کشد. جریان بخار نیز دو برابر شده و به ۴۰۰ پوند در هر ساعت می‌رسد. جریان مایع خروجی به ۶۰۰ پوند در هر ساعت کاهش می‌یابد. اما با فرض این که دمای بخار خروجی هنوز هم ۱۰۰ °F باشد، خلأ، باز هم همان ۴۹ mmHg خواهد بود.

تنها روش ممکن برای بهبود خلأ کندانسور سطحی، هنگامی که توسط دمای بخار آب خروجی کندانسور سطحی محدود شده، این است که دمای این بخار خروجی را با افزایش راندمان انتقال حرارت در کندانسور سطحی، پایین بیاوریم.

توان دمنده هوای واحد FCU

اکنون به شکل ۲-۲۶ رجوع کنید. توجه داشته باشید که فشار در بخار آب خروجی کندانسور سطحی (۱۲۰ °F) با فشاربخار آب (۹۰ mmHg) در این دمای بخار آب خروجی، مطابقت دارد. این مشاهده، به من نوعی حس اعتماد در تحلیل فنی ام را داد.

من انتظار داشتم که دمای بخار آب خروجی باید برابر یا مقدار اندکی کمتر از دمای چاهک آب باشد. پایین تر به این دلیل که همان طور که در شکل ۲-۲۶ نشان داده شده، بخار از روی چندیدن لوله خنک کننده اضافی در زیر بافل هوا عبور می کند. معمولاً تأثیر این بافل هوا، کاهش دمای بخار آب خروجی و رساندن آن به ۱۰-۲۰ °F زیر دمای خروجی آب چاهک است. اما در این مورد، دمای بخار آب خروجی ۱۲۰ °F بود و دمای آب چاهک نیز ۹۰ °F بود. کاملاً برخلاف انتظاری که من داشتم!

جدول ۲-۱.

فشار بخار آب در دماهای مختلف

دما (°F)	فشار (mmHg)
۸۰	۲۶
۹۰	۳۶
۱۰۰	۴۹
۱۱۰	۶۶
۱۲۰	۸۸
۱۳۰	۱۲۵
۲۱۲	۷۶۰

ارتقای شغلی

لحن تماس تلفنی آقای استنلی موجب ناراحتی من شده بود. لحنش خصمانه به نظر می رسید. من تنها چند روز در این کارخانه کار کرده بودم و نسبت به موقعیت شغلی ام، نامطمئن بودم.

من با پروفایل دمایی بالا مواجه شده بودم که با درک من از نحوه کار کندانسورهای سطحی، دارای تضاد و مغایرت بود.

من با خودم فکر کردم که شاید افت فشار بزرگی در امتداد بافل هوا وجود دارد که باعث می شود، دمای بخار آب خروجی، ۳۰ °F پایین تر از دمای مایع خروجی باشد.

بنابراین من تصمیم گرفتم که فشار را در چاهک آب با استفاده از یک گیج فشار کنترل کنم.

من همیشه سعی می‌کنم برای اطمینان از صحت کار، خودم شخصاً اندازه‌گیری‌های میدانی را انجام دهم. من تصمیم گرفتم گیج فشار خلأ خودم را به سطح بالایی شیشه مایع نما چاهک، متصل کنم. به خاطر دارم که آچار لوله^۶ اینچی خودم را بر روی درپوش^۱ استیل ۳/۴ اینچی قرار دادم تا درپوش را از بالای شیر هواکش (سوپاپ اطمینان) شیشه مایع نما^۲ جدا کنم.

با این حال نیازی به آچار نداشتم زیرا درپوش رزوه شده ۳/۴ اینچی، شل بود! سپس من درپوش را با انگشتانم سفت کردم و:

- نشت گاز به داخل شیشه سطح نما (و دهانه کنترل سطح، شکل ۲۶-۲ را ببینید) متوقف شد؛
- فشار هوا در بالای شیشه کاهش یافت؛
- سطح سیال در داخل شیشه بالا رفت؛
- شیر کنترل سطح چاهک سریعاً باز شد؛
- دمای آب در داخل چاهک بالا رفت (به علت کاهش تجمع میعانات)؛
- دمای بخار آب خروجی کاهش یافت (یعنی کندانسور از تجمع میعانات رنج می‌برد)؛
- خلأ در کندانسور سطحی، از ۹۰ به ۵۰ mmHg بهبود یافت؛
- سرعت توربین افزایش یافت؛
- فشار خروجی دمنده هوای واحد FCU افزایش یافت؛
- اپراتورها جریان دمنده هوای K-۸۰۵ را به واحد بازیابی کاتالیست FCU، برقرار کردند.
- نرخ خوراک واحد FCU احیا و بازیابی شد.

اگر من این به‌سازی را در نفت آمریکا، یعنی شرکت کارفرمای سابقم، انجام می‌دادم، اپراتورها من را تحسین می‌کردند. این نهایت پاداشی بود که دریافت می‌کردم.

اما در پالایشگاه گود هوپ که من مستقیماً برای مالک آن کار می‌کردم، این رویدادی بزرگ بود. آقای استنلی شخصاً بابت کارم، از من تشکر کرد. ما با هم دوست شدیم و این رابطه دوستی تا امروز نیز، پایدار باقی مانده است. این واقعه مربوط به ۳۸ سال پیش بود اما هنوز هم یادآوری آن برایم تازگی و هیجان دارد. اتفاقاتی در زندگی هستند که هرگز فراموششان نخواهیم کرد.

^۱ Plug: درپوش

^۲ Gauge glass: لوله شیشه‌ای نشان دهنده سطح مایع

تجمع میعان‌ات و از بین رفتن آب‌بندی کندانس

این داستانی که برای من اتفاق افتاد، مبین مشکل رایج تجمع میعان‌ات است. مسئله دیگری که مرتبط با همین مشکل است، از بین رفتن آب‌بندی کندانس است. هنگامی که بخار آب، از نازل تخلیه میعان‌ات به سمت بیرون جریان پیدا می‌کند. همچنین این موضوع محدودیتی بسیار رایج در فرآیند است. با این حال صرف‌نظر از این مشکل خاص، کلید موفقیت، مشاهدات شخصی و میدانی به همراه کاربرد اساسی قواعد مهندسی شیمی‌ست. هیچ یک از داستان‌های من، بیانگر نیاز به خرید فن‌آوری‌های جدید یا تجهیزات فرآیندی خاصی نیست. این داستان‌ها قدیمی هستند اما تکنولوژی فرآیند، جاودانه و ابدی است.



کاربرد عملی ترمودینامیک

چکیده:

ترمودینامیک برای اولین بار به عنوان «گرما: حالتی از حرکت» توصیف شد. این موضوع به دو ویژگی متمایز بخار آب، مربوط می‌شود:

- آنتالپی
- آنترופی

یک انبساط آنتالپی ثابت بخار آب، با ثابت نگه داشتن سرعت یا عدم تغییر محتوای گرمای آن، محتوای گرمای بخار آب را حفظ می‌کند.

یک انبساط آنترופی ثابت بخار آب، با تبدیل بخشی از محتوای گرمای آن به یکی از موارد زیر، توانایی بخار آب را برای انجام کار، حفظ می‌کند:

- انبساط - موتور بخار رفت و برگشتی
- سرعت - توربین بخار دوار، که در آن انرژی جنبشی بخار آب، برای چرخاندن روتور توربین استفاده می‌شود.

کلمات کلیدی:

توربین؛ انبساط؛ گرما؛ آنتالپی؛ آنترופی؛ نازل، بخار آب؛ انرژی جنبشی

«ای زمینی! تو برگزیده شده‌ای تا به آگ، سیاره^۱ وطن ما، منتقل شوی.»

«چرا من؟ شما باید فرد جوان‌تری را انتخاب می‌کردید. من ۷۷ سال سن دارم.»

«انتخاب تو به دلیل طول عمر زیادت نبود. الگوریتم انتخاب، تو را بر اساس دانش فنی‌ات برگزیده است. به ویژه دانشت در زمینه به کارگیری بخار آب در فرآوری رسوبات باقیمانده هیدروکربن‌های مایع‌شده، که از سازندهای رسوبی در زیر سطح سیاره شما یعنی زمین استخراج شده‌اند.»

«خیلی خوب! من ۵۷ سال از عمرم را صرف مطالعه بخار آب کرده‌ام. شما علاقه‌مند به دانستن چه چیزی هستید؟»

«ما در آگ مجموعه‌ای از سیالات مختلف شامل آمونیاک، متان، کربن دی‌اکسید و همچنین آب را برای انجام عملکردهای فرآیندی، انتخاب کرده‌ایم. اما زمینی! شما در سیاره خودتان به جای سیالات دیگر، از آب در حالت تبخیرشده بهره می‌برید. به من توضیح بده که چرا آب تبخیرشده مورد ترجیح شماست؟»

«این انتخاب داستانی طولانی دارد. آیا وقت کافی داریم؟»

«مسافت تا آگ ۱۲ سال نوری زمینی ست. ما با سرعت ۹۳۰۰۰ مایل بر ثانیه زمینی سفر خواهیم کرد.»

من گفتم «این یعنی ۲۴ سال. ما زمان خیلی زیادی داریم.»

بخار آب در اژکتورهای خلأ

«دلیل اصلی علاقه من به بخار آب، کاربرد گسترده‌اش در اژکتورهای بخار آب پالایشگاه‌های نفت است. من کتابی نیز در این زمینه تألیف کرده‌ام [7]. در شکل ۱-۲۷ طرحی از یک اژکتور بخار همگرایی-واگرایی را نشان داده‌ام. بیشتر انرژی الکتریکی که ما بر روی زمین تولید می‌کنیم، وابسته به کاربرد اژکتور است. حدود ۳۰٪ از محصولات تمیز با استفاده از اژکتور بخار آب از نفت سیاه بازیابی می‌شوند. اغلب موتورهای غول‌پیکر دوار ما که توربین نام دارند نیز، متکی به همین اژکتورهای بخار آب هستند. اژکتور خلأ، یک کمپرسور گاز است که هیچ کدام از قطعات متحرک مکانیکی را ندارد.»

مهمان اهل آگ پرسید: «پس چه چیزی، گاز را فشرده می‌کند؟»

«انرژی سینتیک یا سرعت، یا سرعت بخار آب. من آن را اصل ونتوری می‌نامم.»

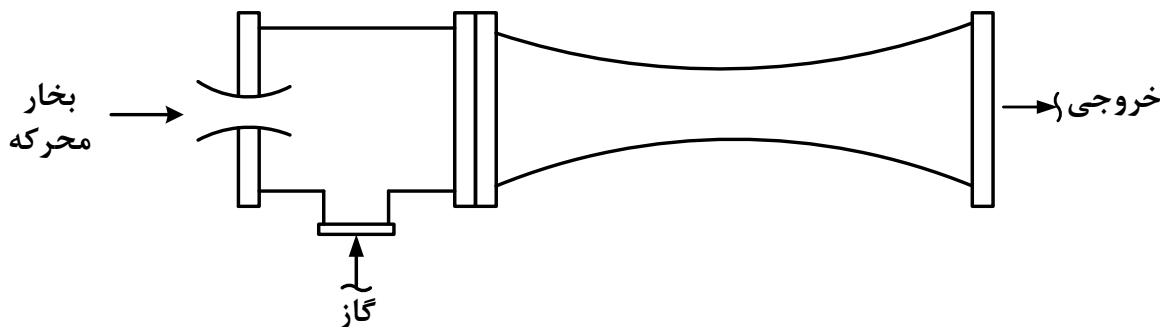
«ونتوری؟ او هم زمینی‌ست؟»

«بله. در شکل ۱-۲۷، بخار آب پرفشار در ۱۷۰ psia و ۴۰۰ °F نمایش داده شده است که با سرعت ۲۰۰ فوت بر ثانیه وارد نازل بخار آب می‌شود. به علت شکل نازل، بخار آب، با سرعت ۱۰۰۰۰ فوت بر ثانیه و معمولاً در فشار

^۱ Og:

۰/۴ psia و ۲۰ mmHg) از نازل بخار آب، خارج می‌شود. افزایش سرعت بخار آب، نشان‌دهنده افزایش زیاد انرژی سینتیک یا اندازه حرکت^۱ (جرم ضربدر سرعت) بخار آب است.»

«بله. فشار بخار آب به سرعت تبدیل می‌شود. این موضوع را هنگامی که آب پرفشار از نازل یا دهانه‌ای کوچک بیرون می‌زند، شخصاً مشاهده کرده‌ام. یک دانشمند زمینی باهوش، یعنی برنولی^۲، این اصل را کشف کرده است.»



شکل ۲۷-۱ اژکتور همگرا-واگرا

«متاسفم اما، ۹۸٪ حرقت اشتباه است. آب، سیالی تراکم‌ناپذیر است. بخار آب، سیالی قابل‌تراکم است. برای سیالی تراکم‌پذیر مانند بخار آب یا هوا، بخش اعظم افزایش انرژی سینتیک یا سرعت ناشی از فشار بخار نیست؛ بلکه از آنتالپی، یا محتوای گرمای خود بخار آب، نشأت می‌گیرد. در مورد بخار آب، گرمای موجود در بخار آب، حدود ۹۸٪ انرژی را تأمین می‌کند تا به بخار آب، شتاب بدهد. بقیه گرما از فشار بخار آب نشأت می‌گیرد.»

«واقعاً واضح و بدیهی‌ست. اگر من بخواهم از بخار آب حاصل از یک بویلر^۳، برای تولید برق شهری استفاده کنم، آب خوراک بویلر^۴ را، از طریق یک خط ورودی آب ۱۲ اینچی، تأمین خواهم کرد. اگر من با استفاده از هیدرو الکتریک (انرژی برق-آبی)، برق شهری را تأمین کنم، به رودخانه‌ای کامل، نیاز خواهم داشت. به همین علت است که ما از زغال‌سنگ، نفت، گاز و U-۲۳۵ به منظور تولید بخار آب، برای چرخاندن توربین‌ها در میدانی مغناطیسی استفاده می‌کنیم. به این ترتیب، گرما به نیروی الکتریکی، تبدیل می‌شود.»

«مشکلات موجود بر سر راه تولید برق با بخار آب، شامل موارد زیر هستند:

- برای تبدیل بخش اعظم محتوای گرمای بخار آب به برق، بخار آب باید در خلأ خوبی، چگالش یابد. برای مثال چگالش بخار آب با فشار ۴۰۰ psig تحت خلأیی خوب، در مقایسه با تخلیه مستقیم بخار آب به جو، تولید نیروی الکتریکی را تا حدود ۴۰٪، افزایش می‌دهد.

^۱ Momentum: اندازه حرکت

^۲ Bernoulli: برنولی

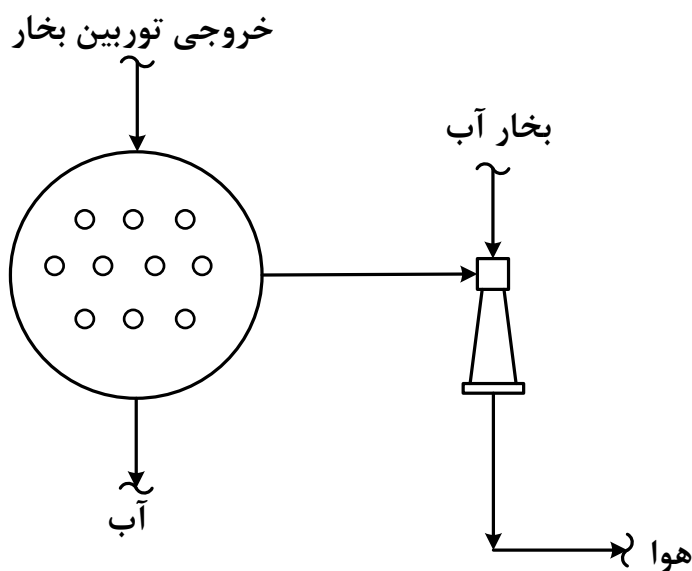
^۳ Boiler: دیگ بخار، جوشاننده

^۴ BFW: مخفف "Boiler Feed Water" آب خوراک بویلر، آبی که نرم یا یون‌زدایی شده و سپس هوازایی شده است.

- ثانیاً برای دستیابی به خلأیی خوب، نشتی‌های هوا و گازهای غیرقابل تراکم باقیمانده، مانند CO_2 نیز باید با استفاده از یک سیستم اژکتور، از کندانسور بخار آب خروجی، تخلیه شوند (شکل ۲۷-۲ را ببینید).
- نهایتاً اگر بخار آب محرک، مرطوب (خیس) باشد، توانایی آن برای ایجاد خلأیی خوب در اژکتور، به دلیل رطوبت، کاهش می‌یابد.»

«مشکل همینجاست. این انرژی سینتیک (جنبشی) بخار آب است که، نشتی‌های هوا را متراکم می‌کند. هر چه بخار آب، سریع‌تر از نازل بخار آب به بیرون فوران کند، کار تراکمی بیشتری نیز می‌تواند بر روی نشتی‌های هوای غیرقابل تراکم، انجام دهد. وقتی سرعت بخار آب، در عبور از دیفیوزر، کاهش می‌یابد (شکل ۲۷-۱ را ببینید)؛ سرعت، انرژی جنبشی یا اندازه حرکت آن، طبق قاعده برنولی، به فشار تبدیل می‌شود. اما انرژی جنبشی بخار آب، از محتوای گرمای آن نشأت می‌گیرد. اگر بخار آب خیلی مرطوب باشد، آن گاه آب، هنگامی که از نازل بیرون می‌آید، به داخل بخار آب، تبخیر می‌شود. این موضوع باعث هدر رفتن مقداری از محتوای گرما یا آنتالپی می‌شود که در غیر این صورت برای تبدیل به انرژی جنبشی، مورد استفاده قرار می‌گرفت.»

«به بیان دیگر رطوبت در هنگام خروج بخار آب از نازل بخار آب، سرعت آن را کاهش می‌دهد. بخار آب کند، به اندازه بخار آب پرسرعت، قادر به متراکم کردن گاز غیرقابل تراکم، نیست. نسبت تراکم درون دیفیوزر (شکل ۲۷-۱ را ببینید) کاهش می‌یابد. چون فشار خروجی اژکتور، توسط فشار چگالش در کندانسور پایین دست، تعیین می‌شود؛ فشار در قسمت ورودی^۲ اژکتور باید افزایش یابد.



شکل ۲۷-۲ توربین بخار.

^۱ High velocity steam: بخار آب پر سرعت

^۲ Suction: مکش، ورودی

«پس یعنی هر مقدار آب در بخار آب محرکه، باعث کاهش عملکرد اژکتور خواهد شد؟»

«در واقع نه. بر اساس چیزی که من مشاهده کرده‌ام یک یا دو درصد رطوبت، حائز اهمیت نیست. اما بیشتر از این مقدار، قطعاً باعث افزایش فشار ورودی اژکتور خواهد شد. چون ما چندیدن دهه سفر در پیش رویمان داریم، داستانی واقعی را برای تعریف خواهیم کرد که، در پالایشگاه پمکس^۱ در مونتری^۲ مکزیک^۳، اتفاق افتاده است.»

خصوصیات بخار آب اشباع

«این پالایشگاه دارای برج خلأیی بود که به یک واحد تقطیر نفت خام^۴ با ظرفیت BSD ۱۵۰۰۰۰ سرویس‌دهی می‌کرد. فشار بالای برج ۳۵ mmHg (۰/۷ psia) بود، که مقدار بسیار بالایی‌ست. طبق طراحی انجام‌شده، فشار بالای این برج باید تنها حدود ۱۵ mmHg می‌بود.»

«خط ورودی بخار آب در فشار ۱۷۰ psia بود و بخار نیز تا دمای °F ۵۰۰ فوق گرم^۵ می‌شد. استفاده از بخار فوق گرم، دبی جرمی بخار آب محرکه ورودی به اژکتور را، کاهش می‌دهد. چگالی بخار فوق گرم، نسبت به بخار آب اشباع، کمتر است. بنابراین پمکس^۶ یک «ایستگاه فوق گرم‌زدایی»^۷ راه‌اندازی کرده بود که دمای بخار فوق گرم را در فشار ۱۷۰ psia به دمای اشباع آن، یعنی °F ۳۶۵ کاهش دهد. ایستگاه فوق گرم‌زدایی، افشانه‌ای از آب را به درون بخار آب فوق گرم، تزریق می‌کند. زمانی که افشانه آب تبخیر می‌شود، بخار آب به دلیل تبدیل دما به گرمای نهان تبخیر آب تزریق‌شده، خنک می‌شود.»

«در عمل به نظر نمی‌رسد که ۲۰ یا °F ۳۰ فوق گرم شدن، تأثیری بر روی عملکرد اژکتور بگذارد. اما °F ۱۳۵ (یعنی °F ۱۳۵ = ۳۶۵-۵۰۰)، قطعاً تأثیرگذار است.»

^۱ Pemex: پمکس

^۲ Monterrey: مونتری

^۳ Mexico: مکزیک

^۴ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

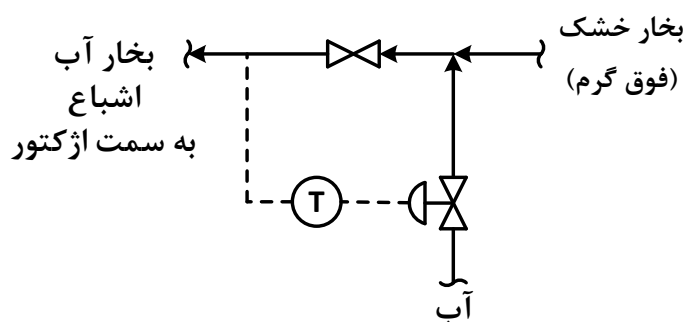
^۵ Superheat: فوق گرم

^۶ Pemex: پمکس

^۷ De-superheating Station: ایستگاه فوق گرم‌زدایی

«برای اطمینان از این که بخار آب به درستی فوق گرم‌زدایی شده، مهندس واحد یعنی پدرو دسوتو^۱، کنترل گرمای فوق گرم‌زدا (دی‌سوپرهیتر) را به گونه‌ای تنظیم کرده بود که در 360°F ، یعنی 5°F پایین‌تر از دمای اشباع آن در فشار جریان بخار آب، شروع به کار کند (شکل ۲۷-۳)».

«من به شیر کنترل ورودی میعانات (TRS) نگاه کردم و شیر به میزان ۴۰٪ باز بود. انتظار داشتم چون نقطه تنظیم 5°F ، زیر دمای اشباع بخار آب بود، شیر کنترل به میزان ۱۰۰٪ باز باشد. اما وقتی موضوع را با کارلوس^۲، اپراتور اتاق کنترل، در میان گذاشتم او گفت: «آقای لیبرمن. این شیر قبلاً به صورت خودکار تا ۱۰۰٪ باز می‌شد. اما من هفته پیش نحوه کنترل شیر را دستی^۳ کردم و آن را تا ۴۰٪ بستم. خلاصه از ۴۰ به ۳۵ mmHg کاهش یافت که بسیار عالیست.»



شکل ۲۷-۳ مافوق گرم‌زدا (دی‌سوپرهیتر)

من پرسیدم: «چرا شیر را بیشتر نبستی؟»

کارلوس پاسخ داد: «زیرا سرپرستم به من گفته بود که بدون دستورالعمل کتبی از سوی مهندس فرآیند واحد من، آقای پدرو، هیچ تغییر دیگری در این فرآیند ایجاد نکنم.»

«بنابراین من به کارلوس گفتم که شیر را تا میزان ۱٪ ببندد و خلاصه از ۳۵ به ۲۰ mmHg بهبود یافت. پس از آن پدرو به من گفت که افزایش بازیابی نفت‌گاز (گازوئیل) از واحد شماره ۶ (خلاصه پس‌ماند)، ۴۰۰۰ BSD، بشکه ۱۰ دلاری یا روزانه ۴۰۰۰۰ دلار بوده است.»

^۱ Pedro Desoto: پدرو دسوتو

^۲ Carlos: کارلوس

^۳ Manual: کنترل دستی

«درست است زمینی^۱. من اهمیت دانستن خواص بخار آب را درک می‌کنم. من درک می‌کنم که تزریق میعان‌ات نمی‌تواند دمای بخار را تا زیر دمای اشباعش کاهش دهد و رطوبت موجود در بخار آب محرکهٔ اژکتور، فشار ورودی اژکتور را بالا خواهد برد و خلأ را نیز کاهش خواهد داد. اما معنای «بشکه» و «دلار» چیست؟»

مشاهدات میدانی

«گاهی اوقات علی‌رغم سن زیادم، وقتی به افراد جوان‌تر می‌گویم سرعت بخار آب، توربین را به حرکت در می‌آورد، یا باعث ایجاد خلأ توسط اژکتور می‌شود، حرفم را باور نمی‌کنند. چیزی که باعث حرکت توربین و ایجاد خلأ توسط اژکتور می‌شود ناشی از فشار بخار آب نیست بلکه از دما یا گرما یا آنتالپی بخار آب نشأت می‌گیرد. بنابراین من برای اثبات این موضوع از آن‌ها می‌خواهم که:

- دمای لولهٔ ورودی بخار آب به اژکتور را (با استفاده از یک تفنگ دمایی مادون قرمز^۲) اندازه‌گیری کرده و آن را با دمای ورودی دیفیوزر اژکتور، مقایسه کنند (شکل ۲۷-۱)

- دمای لولهٔ ورودی بخار آب به توربین بخار را اندازه گرفته و با دمای محفظهٔ بخار آب توربین، مقایسه کنند.

در هر دو حالت، کاهش دمای مشاهده‌شده به علت تبدیل گرما به سرعت است. کتابی مشهور، به نام «گرما: حالتی از حرکت»^۳، حدود ۱۵۰ سال پیش در ارتباط با همین موضوع تألیف شده است [2]. این کتاب مورد علاقهٔ من است. «بازدیدکنندهٔ اهل آگ، اگر قصد داشته باشی رابطهٔ مقداری میان گرما، انرژی حرکتی و کار را تعیین کنی، بهترین کار این است که «نمودار مولیر»^۴ را بررسی و معنی انبساط آنتروپی ثابت^۵ را نیز مرور کنی که من آن را در علم ترمودینامیک آموخته‌ام.»

«بله درست است زمینی! تو باید به من می‌گفتی که در حال توصیف و توضیح فرآیندی هستی که در آنتروپی ثابت رخ می‌دهد. من در سیارهٔ خودم یعنی آگ، تو را به دیدن «معبد آنتروپی»^۶ سیاره‌مان خواهم برد. تمام این معبد از گلوله‌های لیتیم برمید ساخته شده است.»

^۱ Earthling: زمینی

^۲ Temperature gun: گان دمایی، تفنگ دمایی مادون قرمز، دماسنج‌های فر سرخ و غیرتماسی که شماتیک تفنگ را دارند.

^۳ Heat: a Mode of Motion: گرما: حالتی از حرکت

^۴ Mollier Diagram: نمودار مولیر

^۵ Isentropic Expansion: انبساط آنتروپی

^۶ Temple of Entropy: معبد آنتروپی

توربین‌های بخار

«من می‌توانم داستانی دربارهٔ چگونگی این که توربین‌های بخار با راندمان بیشتری کار می‌کنند، با استفاده از مفهوم آنتالپی و آنتروپی در بخار آب، برایت تعریف کنم.»

«من تصمیم گرفته بودم که می‌توانم با افزایش راندمان توربین بخار، توازن بخار آب کارخانه‌ای را، اصلاح کنم. کارخانه دارای تعداد زیادی توربین بخار بود که از بخار آب محرکه با فشار ۴۰۰ psig بهره گرفته و بخار آب را تا رسیدن به فشار ۱۰۰ psig مورد استفاده قرار می‌داد. بخار آب اضافی با فشار ۱۰۰ psig، به جو تخلیه می‌شد. برای متوقف کردن این تخلیه، که موجب اصراف بود، باید با بهره‌گیری از اختلاف میان انبساط آنتروپی ثابت بخار آب و انبساط آنتالپی ثابت، ۳۰٪ کار بیشتر از هر پوند بخار آب محرکه با فشار ۴۰۰ psig، استخراج می‌کردم. من در زمان جوانی‌ام یعنی ۵۷ سال پیش، هنگامی که در دانشگاه، درس ترمودینامیک را مطالعه می‌کردم، برای پیاده‌سازی این روش، آموزش دیده بودم.»

شکل ۲۷-۴ چیزی را نشان می‌دهد که در صنعت پالایشی، «توربین بخار استخراجی»^۱ نامیده می‌شود. توجه داشته باشید که من شیر کنترل سرعت خودکار^۲ و دو نازل بخار آب را در شکل، نمایش داده‌ام.

«بله زمینی، کاملاً متوجه منظورت شدم.»

«دو راه برای کنترل سرعت توربین بخار وجود دارد:

- **روش نامطلوب:** که محتوای گرما یا آنتالپی بخار آب را ثابت نگه می‌دارد؛
- **روش مطلوب:** که آنتروپی یا پتانسیل بخار آب برای انجام کار را ثابت نگه داشته اما محتوای گرمای آن را کاهش می‌دهد.

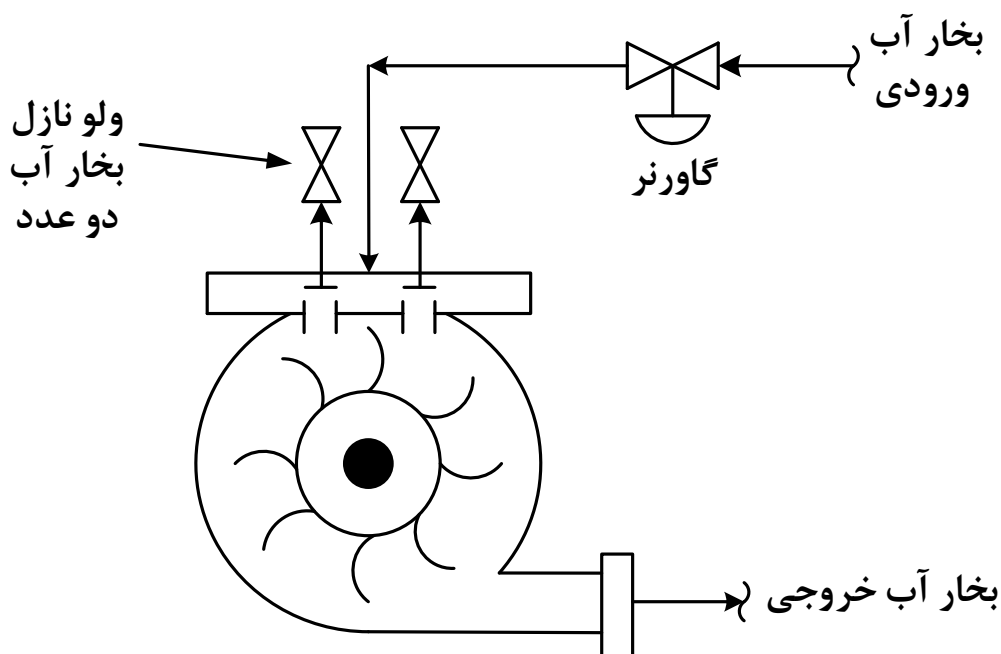
روش نامطلوب بر اساس محدود کردن جریان بخار آب با استفاده از ولو کنترل سرعت گاورنر (خودکار) توربین است و روش مطلوب، از نازل‌های بخار آب استفاده می‌کند (من یک نمودار مولیر را به عنوان مرجع، ضمیمه کرده‌ام؛ شکل ۲۷-۵).

^۱ Topping steam turbine: توربین بخار آب استخراجی

^۲ Governor: ولو کنترل سرعت گاورنر یا خودکار، این ولو با استفاده از تنظیم جریان بخار آب ورودی به محفظه توربین، سرعت توربین را به صورت خودکار کنترل می‌کند.

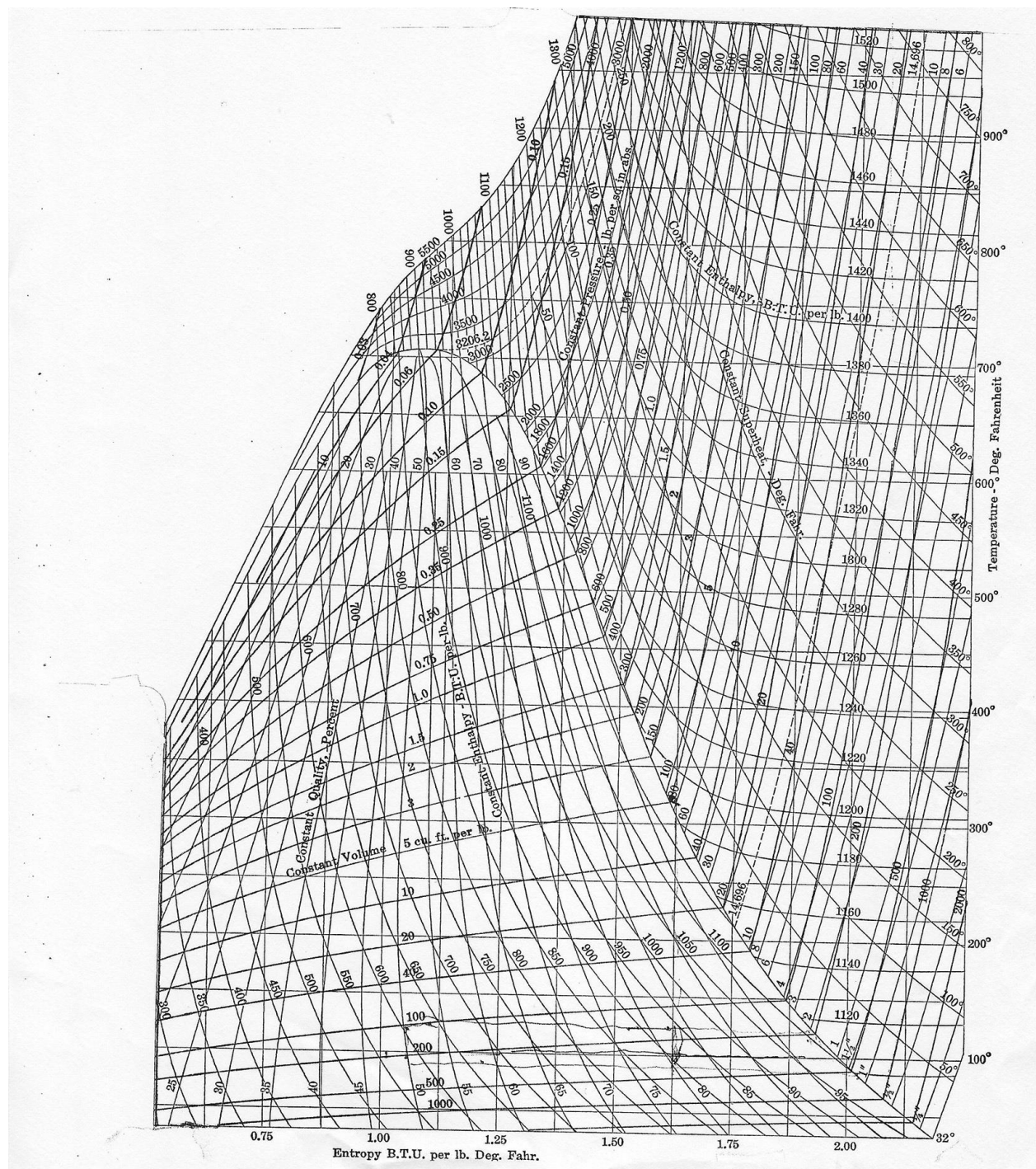
«درست است زمینی! روش مطلوب، از نازل‌های بخار آب در سد نازل^۱ توربین، برای کنترل جریان بخار آب به روش آنتروپی ثابت استفاده می‌کند و از انبساط آنتالپی ثابت بخار آب محرکه، جلوگیری می‌کند. ما در آگ، همه چیز را در این مورد، می‌دانیم. اما ما از آمونیاک یا متان به عنوان سیال کاری استفاده می‌کنیم. زیرا در آگ، مقدار خیلی کمی آب، در دسترس داریم.

«زمینی! آیا به صورت تصادفی، بدن تو می‌تواند انرژی را مستقیماً از نور ستارگان بگیرد؟ ما هیچ اکسیژن آزادی در آگ نداریم. شاید تو بتوانی از یون‌های فلزی یا بخارات هیدروژن سولفید برای حفظ متابولیسم خودت استفاده کنی.»



شکل ۲۷-۴ توربین بخار استخراجی

^۱ سد نازل، تیغه جداکننده محفظه بخار آب از محفظه توربین: Nozzle block



شکل ۲۷-۵ نمودار دما-آنترابی

منابع

[7] N.P. Lieberman, Troubleshooting Vacuum Systems, Wiley Publications, 2015.

[8] J. Tyndall, Heat: A Mode of Motion," D. Appleton, (1838).



بخار آب، چگونه در موتورهای توربین‌ها و اژکتورهای خلأ کار انجام می‌دهد

چکیده:

کار نیرو محرکه یک موتور بخار آب رفت‌وبرگشتی، توسط فشار بخار آب، حاصل نمی‌شود. فشار بخار آب درون سرسیلندر، در فشار بخار آب محرکه یا فشار بخار آب خروجی باقی می‌ماند. این فشار نیست که به کاری تبدیل می‌شود که پیستون را در موتور بخار آب به حرکت در می‌آورد، بلکه آنتالپی (یعنی گرمای) بخار آب است. این اصلی‌ست که توسط نمودار مولیر اندازه‌گیری می‌شود که ما در مدرسه یاد گرفتیم تا از آن استفاده کنیم. انبساط بخار آب را انبساط آیزنتروپیک (آنتروپی ثابت) می‌نامند.

کلمات کلیدی:

آنتالپی ثابت؛ آنتروپی ثابت؛ ترمودینامیک؛ کار؛ انرژی؛ توان (اسب بخار)؛ دبی آب

موتور بخار آب رفت و برگشتی

من در اوایل تحصیلاتم، در سال اول دوره متوسطه، آموختم که انقلاب صنعتی^۱ در انگلستان با اختراع موتور بخار آب رفت و برگشتی، آغاز شد که تصویر آن در شکل ۲۸-۱ به نمایش در آمده است. طرز کار این موتور به اندازه کافی ساده و قابل فهم به نظر می‌رسد. بخار آب اشباع با فشار ۴۰۰ psig، که در دیگ بخار^۲ تولید شده، به یک سر پیستون، فشار وارد می‌کند. در طرف دیگر پیستون، فشار اتمسفری برقرار است (یعنی ۰ psig).

بخار آب محرکه با فشار ۴۰۰ psig، پس از اتمام کار خود بر روی پیستون، به شرح ذیل، به جو تخلیه خواهد شد:

- شیر ورودی^۳ بخار آب با فشار ۴۰۰ psig، بسته خواهد شد؛
- شیر خروجی بخار آب نیز به طور همزمان، باز خواهد شد و بخار آب با فشار ۴۰۰ psig را به جو تخلیه می‌کند.

بخار آب هنگام جریان پیدا کردن به شیر خروجی سیلندر، دارای همان فشار و دمای بخار آب محرکه ورودی بود. یعنی دمای اشباع آن ۴۵۰ °F بود.

کریول کویین^۴

من سال گذشته در سفری که به کریول کویین داشتم، به گردشی با یک قایق بخار آب رفتم که بر روی رودخانه می‌سی‌سی‌پی^۵ در نیواورلئان حرکت می‌کرد. من و دوستم باب به موتورخانه رفتیم که برای بازدیدکنندگان باز بود. باب^۶ طی سفرمان از من پرسید: «نورم، مطمئناً بخار آب، بر روی پیستون کار انجام می‌دهد. کار صورتی از انرژی است. از آنجا که هم دما و هم فشار بخار آب محرکه و بخار آب خروجی در شرایط یکسان هستند (۴۰۰ psig و ۴۵۰ °F)؛ پس این انرژی از کجا نشأت می‌گیرد؟»

^۱ Industrial Revolution: انقلاب صنعتی

^۲ Boiler: دیگ بخار، جوشاننده

^۳ Supply: ورودی

^۴ Creole Queen: کریول کویین

^۵ Mississippi: می‌سی‌سی‌پی

^۶ Bob: باب

من توضیح دادم: «باب این انرژی ناشی از اختلاف فشار بین دو طرف سیلندر است؛ انتهایی از سیلندر که از میل لنگ دور است^۱ و انتهایی از سیلندر که به سمت میل لنگ است^۲. من این موضوع را در دوره اول متوسطه آموخته‌ام.»

باب گفت: «اما نورم، این اختلاف فشار به خودی خود منبعی برای انرژی نیست. حدس می‌زنم بتوان گفت که، ۴۰۰ پوند بخار آب، طرف پرفشار پیستون را هل داده و باعث حرکت میله پیستون می‌شود. اما بخار آب، انرژی هل دادن پیستون را، از کجا می‌گیرد؟»

من می‌توانم ببینم که میله پیستون، پیشران چرخ‌دنده^۳ را بر روی چرخ پره‌داری^۴ حرکت می‌دهد که کریول کوپین را در بر خلاف جریان رود می‌سی‌سی‌پی، به سمت بالا می‌راند. این کار نیازمند انرژی‌ای است که باید از بخار آب محرکه گرفته شود.»

«درست می‌گویی باب.»

«بله؛ اما این انرژی قطعاً از دما یا فشار بخار آب که، نشأت نمی‌گیرد؟»

ترمودینامیک

انرژی موجود در بخار آب می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد:

۱. دما- حرارت محسوس؛
۲. فشار- انرژی پتانسیل؛
۳. سرعت- انرژی جنبشی؛
۴. گرمای نهان- تبخیر یا چگالش.

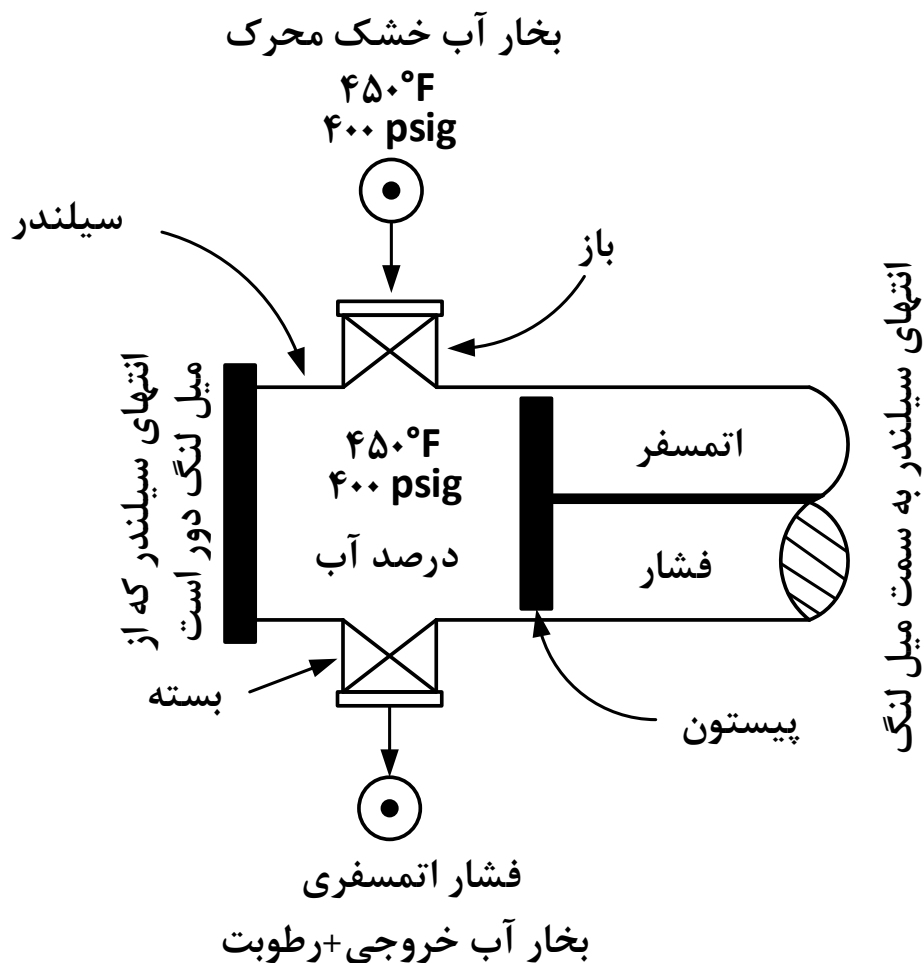
با گذر سنم پی بردم، در واقع چیزهایی را که گمان می‌کردم درک کرده‌ام، هرگز به خوبی متوجه نشده بودم. هرچه پیرتر می‌شوم، چیزهای ساده و پیش پا افتاده برایم، رمزآلودتر می‌شوند. شاید این امر نتیجه بررسی و مشاهده جهان فیزیکی از فاصله نزدیک‌تر باشد. در واقع پرسش باب، قلمروی کاملاً جدیدی از عدم قطعیت را درباره یکی از موضوعات مورد علاقه‌ام، یعنی ترمودینامیک، در برابر رویم گشود.

^۱ سرسیلندر، انتهایی از سیلندر که از میل لنگ دور باشد: Head-end

^۲ انتهای سیلندر به سمت میل لنگ: Crank-end

^۳ gear drive: پیشران چرخ دنده

^۴ Paddle wheel: چرخ پره دار



شکل ۲۸-۱ موتور بخار آب رفت و برگشتی در طی مرحله قدرت.

به طور واضح، حق با باب بود. انرژی تولیدشده توسط موتور کریول کوبین، به هیچ وجه ناشی از دما یا فشار بخار آب محرکه، نبود.

«باب، من مشاهده کردم که در یک توربین بخار، این سرعت یا انرژی جنبشی بخار آب است که چرخهای توربین را به حرکت در می آورد.»

«نورم موضوع صحبت ما درباره توربین بخار نیست. ما درباره موتور بخار آب رفت و برگشتی یک قایق و منشأ انرژی ای که آن را در روخانه به حرکت در می آورد، بحث می کنیم.»

«خیلی خوب باب. این انرژی آخرین مورد در فهرست من، یعنی مورد شماره چهار و گرمای نهان است.»

نمودار مولیر

هنگامی که به خانه‌ام در نیواورلئان برگشتیم، از میان اوراق و اسنادم یک نمودار مولیر قدیمی را بیرون کشیدم (شکل ۲۸-۲). «باب، با جریان یافتن بخار آب به درون سیلندر، یعنی بین پیستون و سرسیلندر (شکل ۲۸-۱)، بخار آب نیروی بسیار زیادی را بر سر پیستون اعمال می‌کند. کار ناشی از انبساط بخار آب، میله پیستون را هل داده که آن نیز چرخ پره‌دار را می‌چرخاند.»

«بسیار خوب، حرفت را می‌پذیرم. اما انرژی‌ای که این کار یا نیروی انبساطی را اعمال می‌کند، از کجا نشأت می‌گیرد؟»

«باب هنگامی که بخار آب در فشار ثابت منبسط می‌شود، به طور جزئی شروع به انبساط می‌کند. بخار هنوز هم در دمای °F ۴۵۰، حالت اشباع دارد اما، محتوای گرما یا آنتالپی آن کاهش پیدا کرده است؛ زیرا هنگام هل دادن پیستون کار انجام می‌دهد. مقداری از بخار آب از حالت بخار به آب مایع تبدیل شده است.

یا به عبارت دیگر هنگامی که بخار آب منبسط می‌شود و پیستون را حرکت می‌دهد، نیرویی را در مسافتی اعمال می‌کند و داریم:»

$$\text{کار} = (\text{نیرو}) \times (\text{فاصله})$$

«نورم بخار آب، چه مقدار کار انجام می‌دهد؟»

«بسیار خوب باب؛ بیا نگاهی به نمودار مولیر بیندازیم. می‌توانی ببینی که ۱۴ وزن بخار آب اشباع در فشار psig ۴۰۰ متراکم شده است. محتوای گرمای بخار از ۱۲۰۵ btu/lb به ۱۰۹۵ btu/lb کاهش یافته است. حدود ۱۱۰ از بخار آب محرکه، تلف شده است.»

«منظورت را فهمیدم نورم. گرمای اتلافی به کار تبدیل شده است. اما چقدر کار؟»

«هر اسب بخار حدوداً معادل ۲۵۰۰ btu ست. پس:

$$(110) \div (2500) = 0.044 \text{ hp/(lb STM)}$$

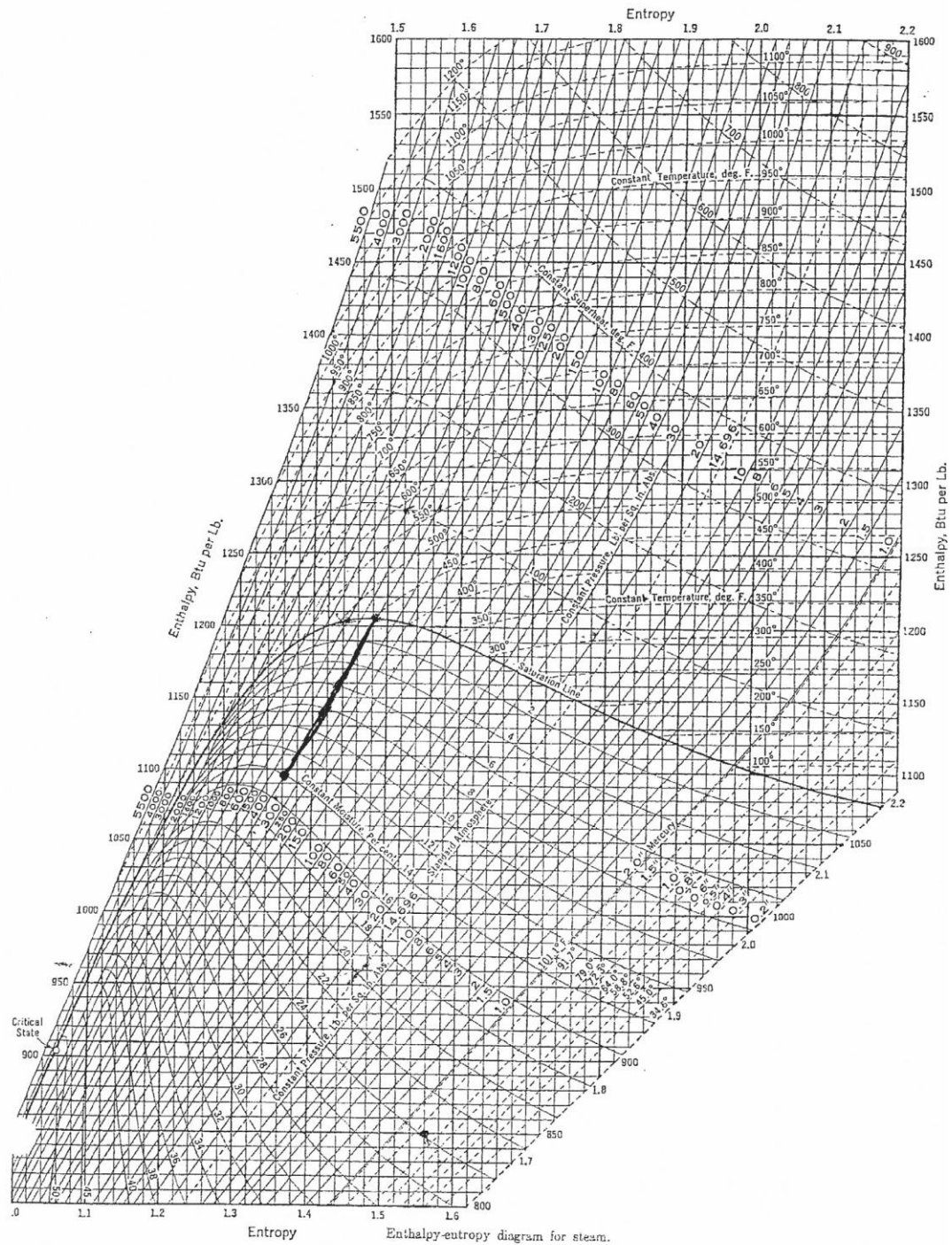
من از مهندس ارشد کریول کوبین پرسیدم که آن‌ها چقدر بخار آب در بویلرشان تولید می‌کنند. او گفت ۱۲۰۰۰ پوند در هر ساعت.»

«خیلی خوب، این بدان معنی‌ست که مقدار کار تولیدی آن‌ها برابر است با:

$$(0.044) \cdot (12000) = 528 \text{ hp}$$

«نورم آیا فقط ۱۴٪ بخار آب، چگالش یافته است؟»

«نه باب. به دلیل تلفات حرارتی محیط، اصطکاک، تلفات شیر و سایر نواقص مکانیکی، احتمالاً بیشتر از آن است.»



ENTROPY

شکل ۲۸-۲ نمودار مولیر

«نورم فکر می‌کنم، واقعا درک نکرده بودم که موتورهای بخار آبی که در اوایل دهه ۱۷۰۰ اختراع شدند، چگونه کار می‌کردند.»

«من هم همینطور. فکر می‌کردم که فهمیده‌ام اما تا سال قبل واقعاً درکش نکرده بودم.»

«تعجب می‌کنم که چرا در دبیرستان نیویورک، طرز کارش را به درستی برایمان توضیح ندادند؟»

«باب به احتمال زیاد چون آقای استاین‌بک^۱، دبیر علوم، خودش هم نمی‌دانست!»

«به هر حال نورم، هیچ وقت برای یادگیری دیر نیست.»

توربین‌های بخار

من در سال ۱۹۸۰، زمانی که در اعتصاب ۵ ماهه تگزاس سیتی^۲ به عنوان یک کارگر اعتصاب‌شکن کار می‌کردم، طرز کار توربین‌های بخار را یاد گرفتم. من می‌دانستم که یک اعتصاب‌شکن هستم زیرا هنگامی که اپراتورها به سر کارشان برگشتند، لباسی به من دادند که رویش نوشته شده بود «اعتصاب‌شکن کثیف!»

طرز کار توربین‌های بخار، با موتور بخار آبی که درباره‌اش توضیح دادم، متفاوت است. موتور بخار آب رفت و برگشتی، محتوای گرمای بخار آب را با هل دادن پیستون، مستقیماً به کار تبدیل می‌کند.

در توربین بخار، محتوای گرمای بخار آب ابتدا به انرژی جنبشی یا اندازه حرکت^۳ تبدیل می‌شود. عاملی که چرخ توربین را به حرکت در می‌آورد، همان انرژی جنبشی ناشی از آنتالپی یا گرمای بخار آب است. من قبلاً فکر می‌کردم فشار بخار آب عاملی است که توربین را می‌چرخاند. اجازه دهید محاسبه کنیم که چه مقدار از توان خروجی^۴ یک توربین، صرفاً از فشار بخار آب نشأت می‌گیرد.

تبدیل فشار بخار آب به توان

^۱ استاین‌بک: Steinback

^۲ شهر تگزاس: Texas City

^۳ اندازه حرکت: Momentum

^۴ خروجی: Output

یک توربین بخار معمولی به ازای ۱۰ lb/h بخار آب با فشار ۱۰۰۰ psig، ۱ hp توان (کار) تولید می‌کند. چه مقدار از این ۱ hp ناشی از فشار بخار آب است؟

- گام اول: ۱ psi معادل 2.3 ft آب است؛
- گام دوم: $(2.3 \text{ ft}) \times (1000 \text{ psi}) = 2300 \text{ ft}$
- گام سوم: هر btu (گرما) معادل 770 ft – lbs (یعنی انرژی پتانسیل) است؛
- گام چهارم: $(10 \text{ lbs of steam}) \times (2300 \text{ ft}) / (770 \text{ ft – lbs}) = 30 \text{ btu}$

محتوای گرمای ۱ hp حدوداً معادل 2500 btu است. بنابراین:

$$(30 \text{ btu}) / (2500 \text{ btu/hp}) = 1\%$$

به عبارت دیگر تنها ۱٪ انرژی مورد استفاده برای تولید نیرو توسط یک توربین بخار، از فشار بخار آب حاصل می‌شود.

یا باید گفت که من برای تولید همان مقدار کار، به ۱۰۰ پوند آب با همان فشار یک پوند بخار آب، نیاز دارم.

یک کارخانه که نیروی برق آبی (هیدروالکتریسیته) تولید می‌کند، به کل جریان رودخانه بزرگ، نیاز دارد.

یک کارخانه برای تولید برق از بخار آب به یک خط ۱۰ اینچی آب، نیاز دارد.

اندازه حرکت بخار آب

فشار آب در خانه من در نیواورلئان، ۴۰ psig است. بعد از این که آب از نازل شلنگ باغچه‌ام بیرون می‌آید، این فشار به سرعتی در حدود ۷۰ فوت بر ثانیه تبدیل می‌شود (این عدد، بدون در نظر گرفتن تلفات ناشی از اصطکاک، محاسبه شده است). اگر من آب را با فشار روی چرخ دوچرخه‌ام که در هوا معلق است؛ بپاشم، اندازه حرکت آب را که ناشی از فشار آن است به انرژی چرخشی تبدیل کرده‌ام.

اگر من همین آزمایش را با بخار آبی در فشار ۴۰ psig انجام بدهم، سرعت آبی که به چرخ برخورد می‌کند ۷۰۰ فوت بر ثانیه خواهد بود. این سرعت اضافی ناشی از آنتالپی بخار آب است.

طرز کار توربین بخار نیز، مشابه همین است. بخار آب، از محفظه بخار آب^۱ و از طریق نازل‌های بخار آب به بیرون جریان می‌یابد. بسته به فشار بخار آب خروجی‌ای که از بدنه توربین بیرون می‌آید، بخار آب خروجی از نازل‌ها،

^۱ Steam chest: محفظه بخار آب

می‌تواند دارای سرعت ۱۰۰۰ یا ۱۰۰۰۰ فوت بر ثانیه باشد. اگر بخار آب خروجی از بدنه توربین به سیستم بخار آب با فشار کم (۳۰ psig) تخلیه شود، شاید بتواند نازل را در سرعت ۱۰۰۰ فوت بر ثانیه، ترک کند.

اگر بخار آب خروجی از بدنه توربین به داخل یک کندانسور سطحی خلأ تخلیه شود که در فشار ۲۴ اینچ جیوه (۷۵ mmHg) کار می‌کند، شاید بتواند با سرعت ۱۰۰۰۰ فوت بر ثانیه از نازل‌ها به بیرون جاری شود. در هر صورت بیش از ۹۸٪ انرژی لازم برای سرعت‌بخشیدن به بخار آب محرکه، ناشی از گرمای بخار آب است نه فشار آن.

عملکرد گاورنر^۱ توربین

دیدن موقعیت گاورنر در سایت، دشوار است. من برای تخمین موقعیت آن، فشار بخار آب محرکه را با فشار درون محفظه بخار آب، مقایسه می‌کنم. شما به‌ندرت یک اتصال فشار را بر روی محفظه بخار مشاهده می‌کنید. با این وجود، من از خط درین آب از محفظه بخار آب، برای این منظور استفاده می‌کنم. اگر فشار محرکه و فشار محفظه در محدوده ۵-۱۰ psi باشند، گاورنر، ۱۰٪ باز است.

کار شیر گاورنر، کنترل فشار محفظه بخار آب است. اگر توربین، در سرعتی بالاتر از سرعت تعیین‌شده یا موردنیاز خود کار کند:

۱. گاورنر بسته می‌شود؛
۲. فشار محفظه بخار آب کاهش پیدا می‌کند؛
۳. جریان بخار آب از نازل‌ها به محفظه بخار آب، کاهش می‌یابد؛
۴. جرم و سرعت (یعنی اندازه حرکت) بخار آب محرکه‌ای که به چرخ توربین برخورد می‌کند، کاهش می‌یابد.
۵. سرعت توربین به مقدار تنظیم شده‌اش، می‌رسد.

افت فشار بخار آب با عبور از گاورنر، توانایی بخار آب را برای انجام کار کاهش می‌دهد؛ زیرا گاورنر محتوای گرما را به طور موثری به انرژی جنبشی تبدیل نمی‌کند.

پورت یا شیرهای دستی

ولو کنترل سرعت گاورنر یا خودکار، این ولو با استفاده از تنظیم جریان بخار آب ورودی به محفظه توربین، سرعت توربین را به صورت Governor^۱ خودکار کنترل می‌کند.

شیرهای دستی برای ذخیره بخار آب، مورد استفاده قرار می‌گیرند:

- **گام اول:** بستن یک شیر دستی، جریان بخار آب محرکه وارده به چرخ توربین را کاهش می‌دهد؛
- **گام دوم:** سرعت توربین کاهش می‌یابد و باعث باز شدن گاورنر می‌شود؛
- **گام سوم:** اثر ترکیبی گام اول و دوم، افزایش فشار بخار آب، در محفظه توربین است؛
- **گام چهارم:** مقدار بخار آب و در نتیجه سرعت بخار آب خروجی از نازل‌های باز، افزایش پیدا می‌کند. این امر باعث بازیابی سرعت توربین با مقدار بخار آب کمتری می‌شود.

اپراتور باید تا زمانی که گاورنر کاملاً باز شود، به بستن شیرهای دستی ادامه دهد. یک قاعده سرانگشتی ساده این است که به ازای بستن هر شیر دستی، بخار آب مصرفی توسط توربین ۱۰٪ کاهش پیدا می‌کند. راه دیگری برای صرفه‌جویی در مصرف بخار آب، کاهش دادن سرعت توربین است. به ازای ۱۰٪ کاهش سرعت توربین، بخار آب محرکه ورودی حدوداً ۲۵٪ کاهش می‌یابد.

در تگزاس سیتی^۱، هنگامی که برای آموکو^۲ کار می‌کردم، دوازده ساعت از شبی را در سال ۱۹۸۰، صرف تنظیم توربین‌های بخار کردم. من با این کار در هر ساعت ۲۰۰۰۰ پوند بخار آب با فشار ۴۰۰ psig را صرفه‌جویی کردم. فکر می‌کردم لری دورلند^۳، مدیر کارخانه، به خاطر این کار به من جایزه ستاره طلایی می‌دهد یا با اهدای تقدیرنامه، از من قدردانی می‌کند یا... اما تنها چیزی که دریافت کردم یک نامهٔ اخطاریه بود برای این که هرگز بدون کسب اجازه از مدیر تعمیرات، در عملکرد توربین بخار، تغییری ایجاد نکنم!

انبساط آنتروپی ثابت

بخار آب پرسرعتی^۴ که چرخ توربین را تحت تأثیر قرار می‌دهد، باعث چرخش توربین می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۲۸، نمودار مولیر، نشان داده شده است، این سرعت ناشی از گرما یا آنتالپی بخار آب محرکه است. اگر از بخار محرکه اشباع با فشار ۴۰۰ psig استفاده کنیم و بخار به جو تخلیه شود، در نمودار مولیر مستقیماً به سمت پایین حرکت کرده‌ایم (یعنی در امتداد خط آنتروپی ثابت) و اعداد را به صورت زیر می‌خوانیم:

- بخار آب محرکه = ۱۲۰۵ btu/lb

^۱ Texas City: شهر تگزاس

^۲ Amoco: آموکو

^۳ Larry Durland: لری دورلند

^۴ High velocity steam: بخار آب پر سرعت

• بخار آب خروجی = ۹۶۵ btu/lb

• گرمای تبدیل شده به انرژی جنبشی = ۲۴۰ btu/lb

چون هر اسب بخار تقریباً معادل ۲۵۰۰ btu است پس توان تولیدی هر پوند بخار برابر است با:

$$240/2500 = 0.096 \text{ hp}$$

راندمان توربین

در واقع محاسبات بالا کاملاً صحیح نیستند. این محاسبات بر اساس راندمان ۱۰۰٪ انجام شده‌اند. به احتمال زیاد و بر اساس محاسباتی که من سال گذشته در کارخانه کودسازی در اینید^۱ اوکلاهما^۲ کردم، راندمان را باید حدود ۷۰ تا ۸۰٪ در نظر گرفت.

از سوی دیگر می‌توان مقدار کاری را که از یک پوند بخار آب گرفته می‌شود، با روش‌های زیر افزایش داد:

- تخلیه بخار به داخل یک کندانسور تحت خلأ؛
- باز کردن بیشتر شیر گاورنر؛
- سوپرهیت کردن بخار آب محرکه؛
- افزایش دادن فشار بخار آب محرکه.

من به خواننده توصیه می‌کنم که با استفاده از نمودار مولیر (شکل ۲۸-۲)، کار اضافه‌ای را محاسبه کند که می‌توان با تخلیه بخار آب به داخل خلأیی خوب (۲۶۰۰ اینچ جیوه)، بازیابی کرد.

اژکتور خلأ

قسمت اعظم کار من به عنوان مشاور فرآیند، حول طراحی و عیب‌یابی اژکتورهای خلأ است. یک اژکتور بخار آب خلأ، شبیه به یک کمپرسور دو مرحله‌ای ست که، هیچ قسمت متحرکی ندارد. پس چه چیزی گاز آلوده^۳ حاصل از برج خلأ یا نشت هوا از کندانسور سطحی توربین را، فشرده می‌سازد؟

این عامل، سرعت بخار آب محرکه است.

^۱ اینید: Enid

^۲ Oklahoma: اوکلاهما

^۳ Off-gas: گاز آلوده

بخار آب با سرعت ۱۰۰ الی ۲۰۰ فوت بر ثانیه به نازل بخار آب، جریان پیدا می‌کند. این بخار آب با سرعت ۱۰۰۰۰ الی ۱۲۰۰۰ فوت بر ثانیه، ده برابر سرعت صوت، از نازل بخار آب، خارج می‌شود. یک یا دو درصد انرژی لازم برای سرعت دادن به بخار آب، ناشی از کاهش فشار بخار از ۱۵۰ psig به ۲۰ اینچ جیوه^۱ خلأ، تأمین می‌شود.

در سال ۱۹۶۵، زمانی که من مهندس فرآیندی تازه‌کار در یک واحد تقطیر نفت خام^۱ بودم و در شرکت نفت آمریکا^۲ کار می‌کردم، مطلع شدم که دمای بخار آب ورودی به جت‌های برج خلأ 380 °F است. با این وجود تنها چند اینچ بعد از ورود بخار آب به انتهای جلویی جت، بخار آب تا دمای 100 °F خنک شده بود.

بخار به صورت ناگهانی گرما از دست داده بود:

$$(380^{\circ}\text{F} - 100^{\circ}\text{F}) \times (0.55) = 154 \text{ btu/lb}$$

که در این رابطه ۰/۵۵، گرمای ویژه بخار آب است.

بخار آب، هیچ انرژی‌ای از دست نداده است. مقدار ۱۵۴ btu/lb، به سرعت جریان بخار آب، تبدیل شده بود.

تبدیل اندازه حرکت به فشار

هنگامی که بخار آب از طریق جت جریان می‌یابد، سرعتش کاهش پیدا می‌کند. حدود نیمی از انرژی جنبشی بخار آب، مجدداً به گرما تبدیل شده است. یعنی دمای خروجی جت به ۲۰۰ °F افزایش پیدا می‌کند. نیم دیگر انرژی جنبشی جت، به کار تبدیل می‌شود و گاز آلوده را از ۲۶ به حدود ۱۰ اینچ جیوه فشرده می‌سازد.

(تذکر: ۲۶ اینچ جیوه مطلق = ۱۰۰ میلی‌متر جیوه مطلق؛ ۱۰ اینچ جیوه = ۵۰۰ میلی‌متر جیوه مطلق).

افزایش فشار در طول جت، یکنواخت نیست. بخش کوچکی از افزایش فشار، در بالادست گلوگاه دیفیوزر، رخ می‌دهد. حدود ۷۰٪ افزایش فشار، بعد از دهانه دیفیوزر، رخ می‌دهد؛ بدین ترتیب، سرعت بخار آب از سرعت صوت به زیر سرعت صوت، کاهش می‌یابد. این پدیده «تقویت صوتی»^۳ نامیده می‌شود. این تقویت صوتی می‌تواند در اثر نواقص و اختلالات زیر از بین برود:

- بخار آب محرکه مرطوب؛
- نرخ بیش از حد گاز؛

^۱ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

^۲ American Oil: نفت آمریکا

^۳ Sonic Boost: تقویت صوتی

- فشار خروجی بالا؛
- فرسایش نازل بخار آب.

هنگامی که تقویت صوتی برای بار اول از بین می‌رود، جت یک صدای نوسانی یا موجی ایجاد می‌کند؛ زیرا بخش اعظم کار تراکمی آن، از بین رفته است.

خلاصه

صرف نظر از نحوه کار بخار آب در انواع مختلف ماشین‌ها، فشار بخار آب، عامل تأمین‌کننده بخش اعظم انرژی نیست. این آنتالپی یا گرمای بخار آب است که چرخ توربین را به چرخش در می‌آورد یا گاز موجود در داخل جت خلأ را متراکم می‌کند یا پیستون را در موتور بخار آب، هل می‌دهد. کتابی به نام «گرما: حالتی از حرکت»، که در دهه ۱۸۳۰ توسط دکتر تیندال^۱ به چاپ رسیده است، نحوه کار موتور بخار آب را توضیح می‌دهد. در قرن بیستم، عنوان این موضوع به «ترمودینامیک» تغییر نام داد. این کتاب فوق‌العاده هنوز هم تجدید چاپ می‌شود. من زمانی که این کتاب را می‌نوشتیم، نسخه‌ای از ویرایش سوم این کتاب را بر روی میز کارم داشتیم.

^۱ تیندال: Tyndall



پمپ‌های سانتریفیوژ (گریز از مرکز)

چکیده:

پمپ‌های گریز از مرکز با تبدیل سرعت به انرژی پتانسیل، فوت هد ایجاد می‌کنند. افزایش سرعت سیال از پروانه نشأت می‌گیرد. فشار در نوک پروانه تقریباً با فشار ورودی برابر است. فشار خروجی، تنها زمانی به دست می‌آید که سرعت مایع در عبور از دیفیوزر^۱ یا خروجی پوسته حلزونی پمپ، کاهش یابد. برای سیالاتی با ویسکوزیته پائین‌تر از ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی استوک، فوت هد ایجادشده توسط پمپ، تابعی از چگالی سیال پمپ‌شونده نیست.

کلمات کلیدی:

گریز از مرکز؛ آب‌بندی؛ شست‌شو با فشار؛ پروانه؛ فشار؛ چگالی؛ انرژی جنبشی

دیفیوزر، پراکن‌گر، ولوشگر، ولونده، وسیله‌ای در مکانیک شاره‌ها که با تغییر سطح مقطع مجرای عبور، سرعت شارش را کاهش می‌دهد و به Diffusor^۱ فشار آن می‌افزاید

«من قبلاً گفتم که از فشار ۱۰۰ psi برای تمیزکاری آب‌بند^۱ استفاده نکنید. بیست پوند کافیهست.»

«اما این عدد خیلی پایین است. فشار خروجی پمپ ۸۰ psi است. فشار تمیزکاری آب‌بند باید حدود ۲۰ پوند بالاتر از فشار خروجی باشد.»

«این حرف کاملاً اشتباه است. فشار تمیزکاری آب‌بند پمپ باید کمی بیشتر از فشار ورودی^۲ باشد؛ نه فشار خروجی. به ویژه پمپی که در حال پمپاژ پسمانده تقطیر اولیه^۳ است و سیال تمیزکاری^۴ برای آب‌بند نیز دیزل می‌باشد. شما مقداری زیادی از محصول با ارزش دیزل را به پسمانده تقطیر اولیه می‌ریزید.»

«لیبرمن واقعاً این مقدار چقدر است؟ زیاد که نیست؟»

«این مقدار تا حد زیادی به طراحی آب‌بند مکانیکی^۵ بستگی دارد. برای پمپی قدیمی با آب‌بند قدیمی از جنس استیل، خواهیم داشت:

- هنگامی که پمپ در حال کار است ۳ الی ۴ گالن بر دقیقه بر اینچ قطر شفت؛
- در صورت ایده‌آل بودن پمپ نصف این مقدار است؛
- اگر هم در بخش درونی^۶ و هم در بخش بیرونی^۷ آب‌بند وجود داشته باشد، دو برابر این مقدار است؛
- برای پمپ‌های جدیدتر با آب‌بند فشنگی (کارتربجی) یک سوم این مقدار را به کار ببرید.
- اگر فشار تمیزکاری آب‌بند از فشار طراحی شده‌اش به مقدار زیادی تجاوز کند، یعنی به جای این که فقط بالاتر از فشار ورودی باشد، در فشاری بالاتر از فشار خروجی کار می‌کند و در نتیجه مقدار تمیزکاری آب‌بند، ممکن است طبق رابطه زیر افزایش زیادی پیدا کند:»

$$\text{مقدار جریان روغن آب‌بند} \approx (P_{\text{seal}} - P_{\text{suction}})^{1/2}$$

که در این رابطه:

^۱ Seal flush: روان‌کاری آب‌بند، شست‌شوی آب‌بند

^۲ Suction Pressure: فشار مکش

^۳ Reduced crude: پسمانده تقطیر اولیه

^۴ Flushing fluid: سیال تمیزکاری

^۵ Mechanical seal: آب‌بند مکانیکی

^۶ Inboard: بخش درونی

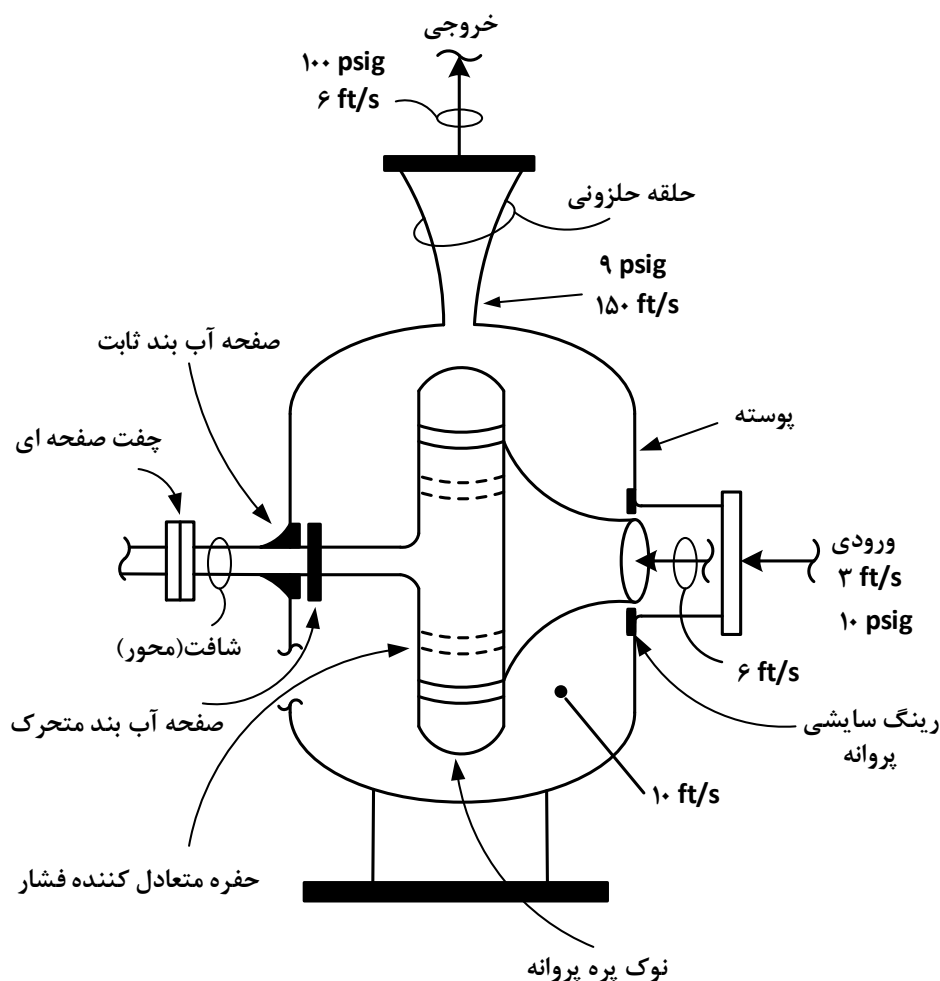
^۷ Out board: بخش بیرونی

• P_{seal} = فشار روغن آب‌بند در پایین‌دست شیر تنظیم جریان آب‌بند بر حسب psi؛

• P_{suction} = فشار ورودی پمپ در پایین‌دست صافی (توری) ورودی بر حسب psi است.

«آقای لیبرمن صحبت‌های شما این احساس را در من به وجود آورد که فشار داخل کل پوسته پمپ، برابر با فشار ورودی است نه فشار خروجی. اما فشار مایع در داخل پوسته پمپ قطعاً برابر با فشار خروجی است. این امر بدین دلیل است که مایع، توسط پروانه پمپ، تحت فشار قرار گرفته است (شکل ۲۹-۱ را ببینید).»

«این موضوع درباره پمپ گریز از مرکز صادق نیست. چیزی که تو فکر می‌کنی برای پمپی با جابه‌جایی مثبت صدق می‌کند. با این وجود ۹۵٪ پمپ‌های موجود در واحد ما، پمپ‌های معمولی گریز از مرکز هستند که در آن‌ها وظیفه پروانه، افزایش فشار مایع فرآیندی نیست؛ بلکه سرعت‌بخشیدن به جریان است.»



شکل ۲۹-۱ فشار داخل بدنه پمپ برابر با فشار ورودی^۱ پمپ است. با جریان پیدا کردن مایع از طریق حلزونی، فشار افزایش پیدا می‌کند.

^۱ فشار ورودی، فشار مکش: Suction Pressure

«آقا! می‌توانید این موضوع را برایم توضیح دهید؟ من گمان می‌کردم که می‌دانم طرز کار پمپ‌هایم چگونه است. اما حالا کاملاً گیج شده‌ام.»

سرعت، ارتفاع (هد) و فشار

«یک بار زمانی که ۱۲ ساله بودم آزمایشی را انجام دادم. به من گفته شده بود که فشار آب در داخل حمام‌مان ۴۰ psig است و من قصد داشتم آن را اندازه‌گیری کنم. بنابراین ترازوی داخل حمام‌مان را به حیاط پشتی بردم. سپس نازل شلنگ را طوری تنظیم کردم که بیشترین فشار خروجی را از شلنگ دریافت کنم. پس از آن جت آب را مستقیماً به سمت ترازو هدایت کردم.»

در کمال ناامیدی، عدد ترازو تا ۴۰ پوند افزایش نیافت و فقط به ۶ پوند رسید. اما بعداً متوجه شدم که جریان آب تنها در حلقه‌ای به قطر نیم اینچ متمرکز شده است. نیم اینچ برابر با مساحت زیر است:

$$(2 - 29) \quad (0.5)^2 \times \frac{\pi}{4} = 0.2 \text{ in}^2$$

بنابراین من عدد ۶ پوند را که از روی ترازو خوانده بودم بر 0.2 in^2 تقسیم کردم:

$$(3 - 29) \quad 6 \text{ lbs}/0.2 \text{ (in)}^2 = 30 \text{ lbs}/(\text{in}) = 30 \text{ psi}$$

من دریافتم که این ۱۰ psi ($40 - 30 = 10$) باید به دلیل وجود اتلاف‌های مختلف باشد؛ زیرا آب باید از مخزن آبی که در بلوار ویترنز^۱ بود، یک مایل فاصله را طی می‌کرد تا به خانه من برسد.

می‌توانستم اتلاف ۱۰ psi را درک کنم؛ اما چیزی که مرا گیج و سردرگم می‌کرد، این بود که فشار آب جاری از نازل شلنگ باغچه، ۳۰ یا ۴۰ psig نبود؛ بلکه ۰ psig یا در فشار اتمسفری بود. بنابراین من متعجب شدم که فشار ۳۰ psig که بر روی ترازوی حمام‌اندازه‌گیری کرده بودم، از کجا آمده بود؟

^۱ Veteran Blvd: بلوار ویترنز

تبدیل سرعت به فشار جریان

دنیل برنولی^۱ اهل سوئیس^۲ بود. طبق گفته وی، انرژی می‌توانست به چندین صورت ظاهر شود:

- گرما ← انرژی گرمایی؛
- سرعت ← انرژی جنبشی؛
- ارتفاع (هد) ← انرژی پتانسیل؛
- فشار ← تأثیر جاذبه؛
- الکتریسیته.

هدایت کردن مستقیم جت آبی از شلنگ باغچه، سرعت بالای (انرژی جنبشی) آب را به ارتفاع یا هد (انرژی پتانسیل) تبدیل می‌کند. در ارتفاع سطح دریا در نیواورلئان داریم:

$$D_H = 0.178 \cdot V^2 \quad (4 - 29)$$

که در این رابطه

- D_H = ارتفاع ستون آب بر حسب اینچ؛
 - V = سرعت آب بر حسب ft/s؛
 - عدد ۰/۱۷۸ فاکتور تبدیل تئوری برای تبدیل کردن انرژی جنبشی یا سرعت آب (ft/s) به ارتفاع (هد) آب بر حسب اینچ است (یعنی انرژی پتانسیل).
- اگر آب خروجی از شلنگ باغچه با سرعت ۳۰ ft/s مستقیماً به سمت بالا هدایت شود، تا ارتفاع زیر خواهد رسید:

$$0.178 (30)^2 = 160 \text{ in} = 13.5 \text{ ft} \quad (5 - 29)$$

در واقعیت به دلیل اتلافات ناشی از اصطکاک، آب دقیقاً تا ارتفاع ۱۳/۵ ft بالا نخواهد رفت.

^۱ Daniel Bernoulli: دنیل برنولی

^۲ Switzerland: سوئیس

عملکرد پروانه پمپ

«آقای لیبرمن شما از موضوع پروانه‌های پمپ منحرف شده‌اید».

«در واقع نه دونالد. بیا دوباره به شکل ۲۹-۱ رجوع کنیم. سرعت خط لوله ورودی ممکن است در حدود سه فوت بر ثانیه باشد. پس از آن، مایع به داخل چشمی پروانه پمپ جاری شده و تا حدود ۶ فوت بر ثانیه سرعت می‌گیرد. این افزایش سرعت جریان از سرعت ۳ تا ۶ فوت بر ثانیه، به انرژی نیاز دارد.»

«آیا انرژی لازم برای افزایش سرعت، از طریق پروانه پمپ تأمین می‌شود؟»

«نه. این انرژی، ناشی از انرژی پتانسیل مایع یا هد آن است.»

«این همان چیزی ست که شما مهندسان، آن را NPSH مورد نیاز^۱ پمپ می‌نامید؟»

«بله.»

دونالد گفت: «و اگر NPSH مورد نیاز، بیشتر از هد مایع در دسترس در داخل وسلی باشد که من در حال پمپ کردن آن به بیرون هستم، باید لول مایع وسل را بالا ببرم. در غیر این صورت، در پمپ من، پدیده کاویتاسیون (حفره‌زایی یا حباب‌زایی) رخ می‌دهد.»

«بله. در این حالت آب‌بند مکانیکی پمپ به علت ایجاد ارتعاش ترک می‌خورد.»

«موضوع دارد جالب می‌شود آقای نورم. خب پس از این که مایع به داخل چشمی پروانه جریان یافت، چه اتفاقی برایش می‌افتد؟»

«مایع در داخل پروانه به چرخش در می‌آید. همان‌طور که در شکل ۲۹-۱ نشان داده‌ام، هنگامی که مایع از نوک پره پروانه خارج می‌شود، سرعت آن از شش متر بر ثانیه به ۱۰۰ فوت بر ثانیه افزایش می‌یابد.»

«نورم، انرژی لازم برای سرعت‌بخشیدن به مایع از کجا تأمین می‌شود؟ باز هم از NPSH در دسترس^۲؟»

هد خالص مثبت مورد نیاز در دهانه مکش، برابر حداقل فشار مورد نیاز سیال در دهانه مکش پمپ است، به طوری که کاویتاسیون Required NPSH^۱ اتفاق نیفتد. این پارامتر توسط کارخانه سازنده پمپ تعیین می‌شود.

هد خالص مثبت در دسترس در دهانه مکش پمپ، نشان دهنده فشار در دهانه مکش پمپ است. این پارامتر به مشخصات خط Available NPSH^۲ مکش پمپ ارتباط دارد.

«نه. توسط موتور الکتریکی یا توربین بخاری تأمین می‌شود که پروانه را می‌چرخاند. طبق گفتهٔ دنیل برنولی، الکتریسته که حالتی از انرژی است، می‌تواند به انرژی جنبشی تبدیل شود. این همان اتفاقی است که درون پروانهٔ چرخان پمپ می‌افتد.»

«فشار مایع خروجی از پروانه، مقدار خیلی اندکی کمتر از فشار ورودی پمپ است. فشار خروجی پروانه همان فشاری است که در داخل کل محفظه برقرار است. همان طور که در شکل ۲۹-۱ نشان داده‌ام، فقط برای این که اطمینان کامل پیدا کنیم که آب‌بندی پمپ به هیچ وجه تحت فشار بسیار بالاتری از فشار ورودی پمپ قرار نمی‌گیرد، سوراخ‌هایی (سوراخ‌های متعادل کنندهٔ فشار^۱) در سرتاسر پروانه ایجاد شده‌اند.»

«بله آقای لیبرمن. من این سوراخ‌ها را قبلاً دیده‌ام. جری به من گفت که، این سوراخ‌ها در آنجا وجود دارند تا فشار را در دو طرف پروانه برابر نگه دارند. درست است؟»

«بله دونالد. جری درست می‌گوید. اما این فشاری که جری به آن اشاره کرد، فشار ورودی پمپ است نه فشار خروجی آن.»

«آقای نورم، هیچ یک از این‌ها منطقی به نظر نمی‌رسد. چگونه فشار خروجی پمپ از فشار ورودی ۱۰ psig به فشار خروجی ۱۰۰ psig افزایش می‌یابد؟ من هنوز هم گیج هستم.»

تبدیل سرعت به هد

«بیا به نازل خروجی یک پمپ بدون فلنج (لبهٔ برگردان) نگاه کنیم. فلنج خروجی، شش اینچ است؛ اما دهانهٔ (دریچهٔ) داخل محفظهٔ پمپ بسیار کوچک‌تر است. برو و نگاه کن دونالد.»

«درست است آقا. به نظر می‌رسد که دریچه حدود ۱/۵ اینچ است.»

«بنابراین می‌توان (از شکل ۲۹-۱) نتیجه گرفت که سرعت در فلنج تخلیهٔ ۶ اینچی، از ۱۰۰ فوت بر ثانیه به ۶ فوت بر ثانیه کاهش یافته است:

$$100 \text{ ft/s} \cdot \left(\frac{1.5}{6}\right)^2 = 6 \text{ ft/s} \quad (6 - 29)$$

و این کاهش در سرعت تبدیل شده است به...»

^۱ Pressure balancing holes: سوراخ‌های متعادل کنندهٔ فشار

«آهان! فهمیدم! درست مثل این که قطار ترن هوایی سرعتش را کم کرده و از یک سربالایی صعود می‌کند. سرعت قطار تبدیل به افزایش ارتفاع می‌شود یا همان چیزی که تو آن را هد می‌نامی. یا همان چیزی که آن مرد سوئیسی یعنی برنولی آن را انرژی پتانسیل نامیده بود. اما این پدیده تا زمانی که مایع از خود پمپ خارج شود، اتفاق نمی‌افتد. به همین علت است که فشار تمیزکاری آب‌بند باید فقط کمی بالاتر از فشار ورودی پمپ باشد. در واقع فشار خروجی تأثیری بر فشاری که آب‌بند مکانیکی پمپ باید داشته باشد، ندارد و حتی اگر فشار تمیزکاری آب‌بند در پشت پروانه، اندکی افزایش پیدا کند، این فشار از طریق سوراخ‌های متعادل کننده فشار (که در طرف پشتی پروانه تعبیه شده‌اند)، به فشار ورودی پمپ کاهش پیدا می‌کند. درست است! متوجه شدم!»

رابطه هد با فشار خروجی

«آقای نورم، تو مدام درباره هد صحبت می‌کنی. این کلمه برای من هیچ مفهومی ندارد. من به انواع یک اپراتور فقط به فشار توجه دارم و نه به هد. آیا پمپ گریز از مرکز فشار خروجی مشخصی را ایجاد نمی‌کند؟»

«در واقع هم نه و هم بله دونالد.»

«امکان دارد منظورت را واضح‌تر بیان کنی؟ آیا پمپ گریز از مرکز، فشار مایعی را که پمپ می‌کند، افزایش می‌دهد؟»

«یک پمپ گریز از مرکز، که سیالی غیرلزج (غیرویسکوز) را پمپ می‌کند، در حجم مشخصی از جریان، صرف‌نظر از وزن مخصوص یا چگالی مایع پمپ‌شده، هد مشخصی را ایجاد می‌کند. واضح‌تر بگویم...»

«آقای لیبرمن، منظورت اصلاً واضح نیست. اما ادامه بده. آرام صحبت کن و من نیز گوش خواهم داد.»

«خیلی خوب دونالد. برای تبدیل هد (که همان چیز است که پمپ ایجاد می‌کند) به فشار (که مفهوم مورد علاقه توست) از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:»

$$DP = \frac{(D_H) \cdot (SG)}{2.31} \quad (7 - 29)$$

که در این معادله:

- DP = افزایش فشار خروجی نسبت به فشار ورودی بر حسب psi؛
- D_H = افزایش هد ایجادشده به وسیله پمپ بر حسب فوت؛

• SG = جرم ویژه مایع در دمای جریان در مقایسه با چگالی آب سرد در 60°F .

«پس چون دیزل از نفتا (بنزین سنگین) چگال تر است، افزایش فشار خروجی توسط پمپی که دیزل را پمپ می کند بیشتر از افزایش فشار خروجی در پمپی است که نفتا را پمپ می کند.»

«درست است دونالد.»

«خیلی خوب. من مفهوم جرم ویژه را درک می کنم. اما منظورت از کلمه «غیر لزج» چیست؟»

«ببین دونالد. بیش از ۹۰ درصد چیزهایی که در پالایشگاه جابجا می شوند ویسکوزیته پایینی، یعنی کمتر از ۵۰ سانتی استوک^۱، دارند. در واحد ما، تنها سیالی که ویسکوزیته بالا دارد، نفت خام سنگین سرد ونزوئلایی^۲ یا موم سرد پسماند برج خلأ^۳ است. سیالاتی با ویسکوزیته بالاتر از ۵۰ الی ۱۰۰ سانتی استوک را نمی توان با پمپ گریز از مرکز جابجا کرد؛ بلکه به نوع دیگری از پمپ، یعنی پمپ جابه جایی مثبت نیاز خواهیم داشت.»

«آقای نورم، بیا فعلاً به همان بحث پمپ های گریز از مرکز بچسبیم. بعداً می توانی، پمپ های جابجایی مثبت را توضیح دهی. اما در مورد چیزی که گفتی، در یک "جریان حجمی مشخص" معنایش چیست؟»

منحنی پمپ

«بیا به شکل ۲۹-۲ رجوع کنیم. محور افقی نمودار، جریان بر حسب GPM است. محور عمودی در سمت چپ نمودار، هد بر حسب فوت است. محور عمودی در سمت راست نمودار توان (اسب بخار) مورد نیاز است. فرقی نمی کند آب را با جرم ویژه ۱/۰۰ پمپاژ کنید یا گازوئیل با جرم ویژه ۰/۷۵. تا زمانی که GPM یا جریان پمپ ثابت باشد، فوت هد تولیدشده توسط پمپ نیز ثابت باقی خواهد ماند.»

«بسیار خوب. اما آن منحنی اسب بخار چطور؟ حدس می زنم، آن هم برای آب و گازوئیل یکسان باشد. درست است؟»

^۱ Centistokes: سانتی استوک

^۲ Cold heavy Venezuelan Crude: نفت خام سنگین سرد ونزوئلایی

^۳ Cold Vacuum Tower Slop Wax: موم پسمانده سرد برج خلأ

پاسخ دادم «نه. گیج کننده است. توان موتور یا مقدار آمپری^۱ که موتور می کشد، تابعی خطی از جرم ویژه^۲ (S.G.) است. اگر S.G. تا ۲۰٪ افزایش پیدا کند، آمپر موتور نیز ۲۰٪ افزایش پیدا خواهد کرد. منحنی های پمپ با استفاده از آب در دکل آزمایشی^۳ ایجاد می شوند. حتی اگر پمپ برای پمپ کردن دیزل با جرم ویژه ۰/۸۵ طراحی شده باشد، توان نشان داده شده در محور عمودی سمت راست منحنی پمپ، احتمالاً مربوط به آب خواهد بود.»

«واقعا گیج کننده است.»

«بله همینطور است.»

«اما آقای لیبرمن، من واقعا خوشحالم که شما این موضوع را برایم توضیح دادید. این مسئله توضیح می دهد که چرا هنگامی که از کاستیک^۴ به جای آب استفاده می کنم، پمپ P – 403 من در آمپرهای بالای موتور، از سرویس خارج می شود^۵؛ مگر این که ابتدا میزان خروجی پمپ را محدود کنم^۶.»

«درست است دونالد. وزن مخصوص آب ۱/۰۰ و وزن مخصوص کاستیک ۱/۲۰ است. در S.G. بزرگ تر، توسط توان (اسب بخار) موتور محدود خواهی شد نه توسط ظرفیت پمپ.»

^۱ Amps: آمپر

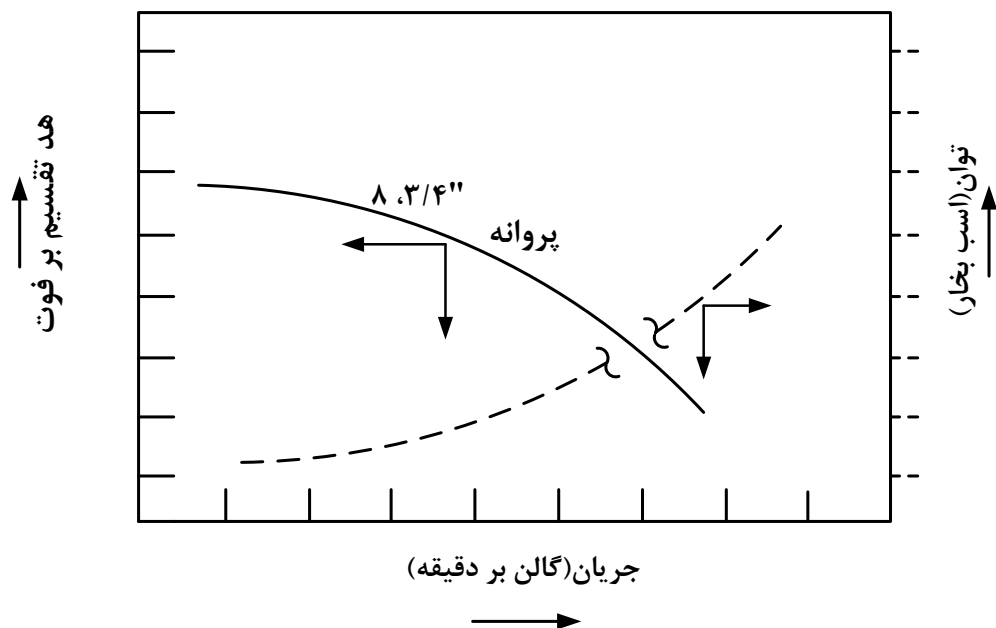
^۲ Specific gravity: جرم ویژه

^۳ Test rig: دکل آزمایشی

^۴ Caustic: کاستیک

^۵ Trip: از سرویس خارج شدن

^۶ Throttle back: محدود کردن



شکل ۲۹-۲ منحنی عملکرد پمپ، آمپر با توان (اسب بخار) موتور متناسب است.

پمپ‌های جابجایی مثبت^۱

«پایان شیفت من نزدیک است و به زودی کارم تمام می‌شود. اما یک سوال دیگر هم دارم. ما در واحد مخازن نفت خام، یک پمپ داریم که به من گفته شده، با تمام پمپ‌های گریز از مرکزی که در واحدها داریم، متفاوت است. اما مدتی پیش به آن نگاه کردم و شبیه پمپ‌های گریز از مرکز خودمان به نظر می‌رسید. تفاوت آن چیست؟»

«من هم گیج شده بودم دونالد. هر دو نوع پمپ مشابه به نظر می‌رسند. اما پمپی که داخل مخزن قرار دارد احتمالاً پمپ جابجایی مثبت است. تفاوت مهمش نیز، این است که:

- پمپ‌های گریز از مرکز برای دبی مشخص، هد یکسانی را ایجاد می‌کنند؛
- پمپ‌های جابجایی مثبت بر روی منحنی کار نمی‌کنند. آن‌ها هر مقدار هد یا فشار خروجی‌ای را که مورد نیاز باشد، ایجاد می‌کنند. اگر نیاز باشد که پمپ ۱۰۰۰۰۰ BSD نفت خام را به داخل مخزن انتقال دهد، فشار تخلیه آن، احتمالاً تنها ۲۵ psig خواهد بود. اگر نیاز باشد که پمپ، ۱۰۰۰۰۰ BSD نفت خام را به واحد تقطیر نفت خام^۲ شما منتقل کند، فشار تخلیه آن، می‌تواند ۱۵۰ psig باشد.»

^۱ Positive Displacement Pumps: پمپ‌های جابجایی مثبت

^۲ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

جریان روغن آب‌بند^۱ به پمپ‌های بدون حرکت (کار)^۲

«توضیحات خوبی بود آقای لیبرمن. من فشار تمیزکاری آب‌بند را مجدداً روی تمام پمپ‌هایم تنظیم خواهم کرد. همان‌طوری که شما به من گفتید، کمی بالاتر از فشار ورودی پمپ. آیا این موضوع برای پمپ‌های یدکی‌ای که در سرویس نیستند، نیز درست است؟»

"نه! به عنوان مثال پمپ‌های پسمانده تقطیر خودت را، که از گازوییل برای تمیزکاری آب‌بند استفاده می‌کنند، در نظر بگیر. دونالد، هنگامی که پمپ را خاموش می‌کنی چند دقیقه صبر کن تا نفت دیزل از طریق پمپ، پاک‌سازی شود. سپس دیزل تمیزکاری آب‌بند را مسدود کن. حتی اگر پمپ کار نکند، جریان تمیزکاری آب‌بند باز هم حدود ۶۰٪ جریان خود را که در زمانی که پمپ در سرویس بود را، حفظ می‌کند. هر بشکه نفتی که وارد پسماند می‌کنی حدود ده دلار برای پالایشگاه هزینه دارد؛ شاید هم بیشتر. بسیار خوب دونالد. پس بیا سیال تمیزکاری آب‌بند را روی پمپ‌هایی که در سرویس نیستند را، به هدر ندهیم.»

«باید زمانی که استخدام می‌شدم این موضوع را به من می‌گفتند. من به مدت ۲۰ سال جریان سیال تمیزکاری آب‌بند را در تمام پمپ‌های خارج از سرویسم، داشتم برقرار می‌کردم. کسی باید به ما اپراتورها می‌گفت، که این کار را نکنیم. چه قدر حیفا!»

«درست است دونالد. حالا که می‌دانی می‌توانی از این اتلافات جلوگیری کنی.»

ملاحظات ایمنی

هرچه ماده‌ای سنگین‌تر باشد، دمای خود اشتعالی^۳ آن نیز پایین‌تر خواهد بود. دمای خود اشتعالی (اشتعال خودبه-خود) بنزین ۴۸۰ درجه فارنهایت است. آسفالت، زمانی که روی سطحی متخلخل مانند لباس‌تافتن پخش شود، در دمای ۳۰۰ درجه فارنهایت، خودبه‌خود مشتعل می‌شود. به همین دلیل است که، نشستی آب‌بند روی پمپ‌های نفت گاز خلأ سنگین، بسیار خطرناک است. نمونه‌گیری از نفتا در دمای ۳۵۰ درجه فارنهایت بسیار ایمن‌تر از نمونه‌گیری از پسمانده خلأ، در همان دماست.

^۱ آب بند نفتی: Sael Oil

^۲ Idle Pumps: (کار) پمپ‌های بدون حرکت

^۳ Auto-ignition: خود اشتعالی

مزایای NPSH در دسترس اضافی

تأمین «هد ورودی مثبت خالص در دسترس» اضافی به وسیله کاهش گردش مجدد در داخل پروانه، با جلوگیری از تولید حباب‌ها و بنابراین کاهش احتمال کاویتاسیون داخل پروانه پمپ، همراه است. این امر با افزایش عمر کاری آب‌بند مکانیکی پمپ همراه بوده و قابلیت اطمینان و ایمنی پمپ را بهبود خواهد بخشید. هم چنین هزینه‌های مربوط به تعمیرات آب‌بند نیز به میزان زیادی کاهش خواهد یافت و عمده‌تاً هزینه سرمایه‌گذاری برای افزایش ارتفاع مخزن پمپ را نیز خطای ماندگار^۱ خواهد کرد. خرید یک آب‌بند مکانیکی دوگانه جدید، ممکن است ۵۰۰۰۰ دلار (ایالات متحده) هزینه داشته باشد.

خطای ماندگار، اختلاف موقعیت جدید سطح نسبت به سطح مطلوب برای خنثی کردن متغیرهای عملیاتی را خطای ماندگار می‌گویند. Off-set:^۱



پمپ‌های گریز از مرکز: NPSH مورد نیاز اولیه^۱

چکیده:

در هنگام راه‌اندازی یک پمپ گریز از مرکز برای جلوگیری از کاویتاسیون، مقدار هد مکش در دسترس باید بیشتر از مقدار NPSH مورد نیاز (هد خالص مثبت مورد نیاز در دهانه مکش پمپ)، باشد. NPSH در دسترس^۲، فشار بخار مایع است که از فشار واقعی ورودی پمپ کم می‌شود. NPSH مورد نیاز، فشار واقعی مشاهده‌شده در ورودی پمپ است که بر حسب فوت یا انرژی پتانسیل بیان می‌شود. هر چه جریان ورودی به چشمی پروانه پمپ بیشتر باشد، NPSH مورد نیاز نیز بیشتر است. تلفات اصطکاکی در خط ورودی پمپ و تلفات نازل نیز، NPSH مورد نیاز برای پمپ گریز از مرکز را افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی:

NPSH اولیه؛ هد مکش؛ کاویتاسیون؛ پروانه؛ آب‌بند مکانیکی، شست‌شوی آب‌بند، NPSH مورد نیاز

^۱ Required Starting NPSH: NPSH مورد نیاز اولیه؛ هد خالص مثبت مورد نیاز اولیه در دهانه مکش پمپ

^۲ Available NPSH: هد خالص مثبت در دسترس در دهانه مکش پمپ، نشان دهنده فشار در دهانه مکش پمپ است. این پارامتر به مشخصات خط مکش پمپ ارتباط دارد.

یک مشکل رایج در راهاندازی پمپ‌های گریز از مرکز، ایجاد جریان برای ورودی پمپ است. به عبارت دیگر پمپ به محض فشار دادن دکمه استارت، دچار کاویتاسیون^۱ می‌شود. در هنگام مواجهه با این مشکل، اپراتور ممکن است کارهای زیر را انجام دهد:

- سطح مایع وسل بالادست را افزایش دهد؛
 - خط برگشتی^۲ خروجی به ورودی را باز کند (شکل ۳۰-۱ را ببینید)؛
 - بر روی خط ورودی و محفظه پمپ، آب سرد بپاشد.
- داستان ذیل به بیان مشکلی می‌پردازد که در ظرف تبخیر ناگهانی^۳، یک واحد تقطیر نفت خام در پالایشگاهی در غرب میانه ایالات متحده رخ داده است.

مشکلات راهاندازی

داشتن مشکل را با یکی از دوستان جوانم، هوارد^۴ بررسی می‌کردم.

«آقای نورم، ما امروز در دانشگاه درباره هدر ورودی مثبت خالص پمپ آموختیم. ابتدا NPSH مورد نیازمان را به دست می‌آوریم. آن را از منحنی پمپ می‌خوانیم (شکل ۳۰-۲). با افزایش جریان، NPSH مورد نیاز نیز افزایش پیدا می‌کند. برای NPSH در دسترس:

$$NPSH = (P_1 + P_A) - (VP) \cdot 2.31 \div SG \quad (1 - 30)$$

که در این رابطه:

- $NPSH =$ فوت؛
- $P_1 =$ فشار در دهانه ورودی پمپ (psig)؛
- $P_A =$ فشار جو، psi؛
- $VP =$ فشار بخار سیال در دهانه ورودی پمپ (psi)
- $SG =$ جرم ویژه سیال جاری.

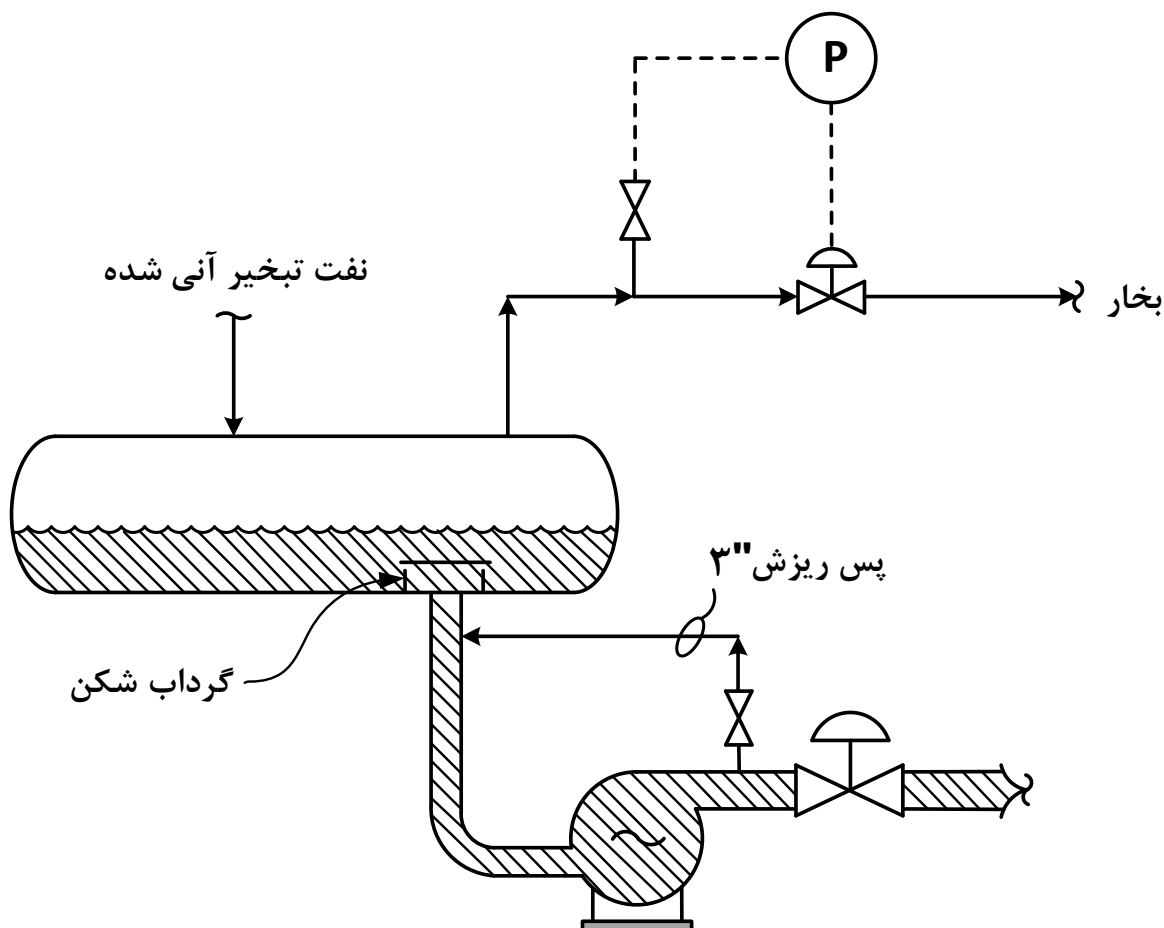
^۱ Cavitates: کاویتاسیون، تبخیر مایع در یک فضای محدود مثل نازل

^۲ Spill back: برگشتی یا پس ریزش

^۳ Flash Drum: ظرف تبخیر آبی، فلاش درام، جداکننده دوفازی

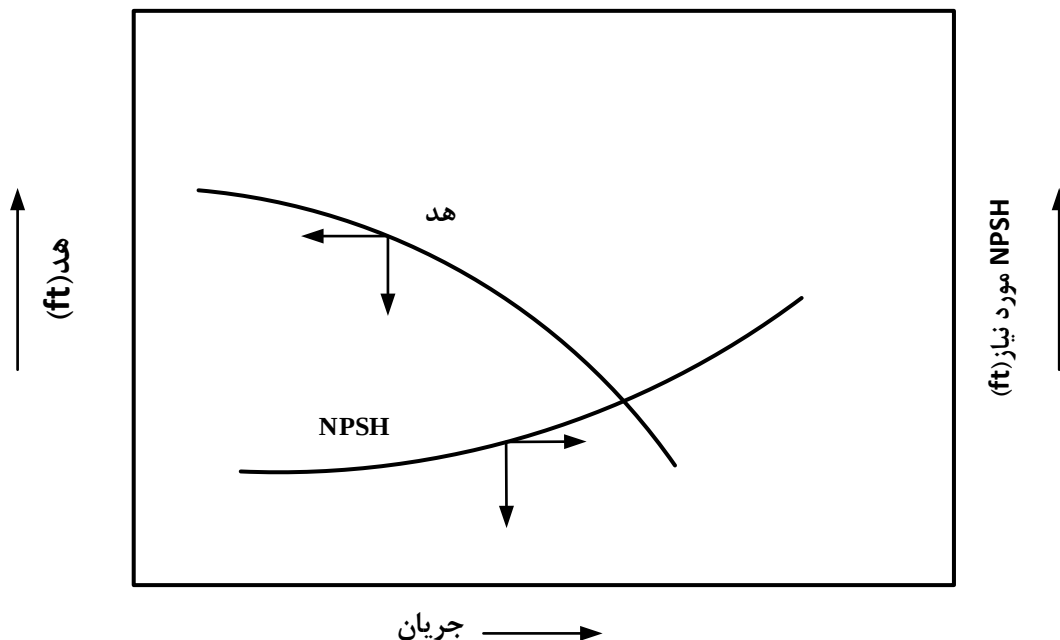
^۴ Howard: هوارد

هوارد گفت: «تنها کاری که باید انجام دهیم NPSH در دسترس را به اندازه کافی تأمین کنیم تا با مقدار NPSH موردنیاز در حداکثر دبی طراحی شده برای پمپ، برابر باشد. می‌توانیم این مقدار NPSH را با افزایش ارتفاع درام بالای پمپ در سرویس یا با فروسرمایش^۱ مایعی که در حال پمپاژ شدن است، تأمین کنیم. شاید بتوان با پاشیدن آب سرد روی خط ورودی پمپ نیز چنین کاری را انجام داد. این عمل، مایع را تا زیر دمای اشباع آن خنک می‌کند.»



شکل ۳۰-۱ چیدمان پمپ معمولی

^۱ Sub-cooling: فراسرمایش، فرایندی است که در آن مایعات، طی سرد شدن سریع، بدون هسته‌زایی به دمایی پایین‌تر از نقطه انجماد معمولی خود می‌رسند (بدون اینکه منجمد شوند).



شکل ۳۰-۲ منحنی پمپ سازنده که NPSH مورد نیاز را نشان می‌دهد.

افت فشار سیال خط لوله و نازل

هوارد گفت: «سه عامل وجود دارد که NPSH مورد نیاز را به مقداری بیش از میزان مشخص شده در منحنی عملکرد سازنده، افزایش می‌دهد. یکی از این عوامل، افت فشار سیال در نازل و دیگری، افت فشار سیال در خطوط لوله می‌باشد. برای ویسکوزیته‌های پایین، یعنی کمتر از ۲۰ الی ۳۰ cSt، افت فشار سیال در خروج از نازل^۱ به صورت زیر است:

$$D_{H1} = (0.3) \cdot (V)^2 \div 12 \quad (2 - 30)$$

که در آن:

- D_{H1} = کاهش NPSH به علت افزایش سرعت سیال در هنگام عبور از نازل است، فوت؛
- V = سرعت سیال در هنگام عبور از نازل، برحسب فوت بر ثانیه.

^۱ افت فشار سیال در خروج از نازل: Nozzle exit loss

«ضریب ۰/۳ فرض می‌کند که هیچ گرداب‌شکنی^۱ در بالای نازل وجود ندارد (شکل ۳۰-۱)». در صورت وجود گرداب‌شکن، باید در معادله ۲-۳۰ ضریب ۰/۳ را به ۰/۵ افزایش دهید. همچنین در خط لوله ورودی نیز به دلیل اصطکاک، افت فشار وجود دارد. می‌توان با استفاده از رابطه زیر افت فشار سیال در خطوط لوله را محاسبه کرد:

$$D_{H2} = \frac{4}{ID} \cdot \frac{D_L}{62.3} \cdot \frac{(V)^2}{27.7} \quad (3 - 30)$$

در این معادله:

- D_{H2} = افت فشار سیال در خط لوله به ازای هر صد فوت معادل، psi؛
- D_L = چگالی سیال، lb/ft³؛
- V = سرعت سیال در خط لوله، ft/s؛
- ID = قطر لوله بر حسب اینچ.

می‌توان به روش زیر، افت فشار سیال را از psi به فوت تبدیل کرد:

$$(D_{H2}) \cdot (2.31) \div \text{جرم ویژه} \quad (4 - 30)$$

«در این محاسبه در داخل خط لوله، ضریب زبری^۲ متداولی را در نظر گرفته‌ام.»

هوارد پرسید: «اما چگونه باید قبل از طراحی خطوط لوله واحد، فوت معادل خط لوله را بدانم؟»

پاسخ دادم: «نمی‌دانیم. من به عنوان یک حدس، از فاصله واقعی میان پمپ و وسل استفاده کرده و آن را دو برابر می‌کنم.»

هوارد گفت: «اما برای ضریب زبری داخل لوله هم مقداری فرضی را در نظر گرفته‌اید. من فکر می‌کنم که آن زبری برای محاسبه ضریب اصطکاک، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر ضریب اصطکاک را حدس زده باشید، افت فشار سیال در خط لوله ورودی نیز مقداری حدسی به دست خواهد آمد. این کار حرفه‌ای به نظر نمی‌رسد. مهندسين نباید حدس بزنند!»

^۱ Vortex Breaker: گرداب‌شکن، یک وسیله مکانیکی که بر روی یک نازل خروجی نصب می‌شود تا مانع از خروج بخار به همراه جریان مایع در اثر تشکیل گردابه شود.

^۲ Roughness Factor: ضریب زبری

ضریب بوپال^۱

«حق با توست هوارد. اگر ما دقت نکنیم، مردم می‌میرند. درباره فاجعه بوپال هند^۲ در سال ۱۹۸۴ چیزی شنیده‌ای؟ بیش از ۱۰۰۰۰ نفر کشته شدند.»

هوارد پرسید: "دلیل کشته‌شدن مردم... کار نکردن پمپ بود؟ مثلاً پمپ دچار کاویتاسیون^۳ شده بود؟ یا مثلاً NPSH آن کافی نبود؟»

«خوب بله، اما فقط به صورت غیرمستقیم. اول باید کمی بیشتر درباره کاویتاسیون توضیح دهم. همه چیز اینقدر ساده نیست.»

علائم کاویتاسیون

«هوارد، فکر می‌کنی علائم کاویتاسیون در پمپ گریز از مرکز چیست؟»

«فشار خروجی پمپ نامنظم و کم است. جریان پمپ نیز گهگاهی نامنظم است. پمپ غالباً صدای تق تق می‌دهد. مانند اینکه تعدادی پیچ را در یک قوطی فلزی بریزی و تکان بدهی. همچنین کارکردن پمپ در حالت کاویتاسیون به آن آسیب می‌رساند. پروانه یا محفظه آسیب خواهد دید؟ اما تا زمانی که NPSH مورد نیاز، تنها مقدار اندکی کمتر از NPSH در دسترس باشد، کاویتاسیون به هیچ وجه رخ نخواهد داد.»

«هوارد، اکثر پمپ‌هایی که من در حالت کاویتاسیون دیده‌ام، فشار خروجی نامنظمی نداشته‌اند؛ مگر آنکه خط ورودی یا نازل خروجی محصول از برج^۴ نسبتاً محدود شده باشد. مطمئناً فشار خروجی ممکن است تنها ۵۰ الی ۷۰ درصد هد منحنی عملکرد^۵ باشد. اما فشار خروجی ثابت است و پمپ بدون ایجاد صدا به کار خود ادامه می‌دهد.»

«من این حالت را «کاویتاسیون حدی»^۶ می‌نامم، به این معنا که اگر هد ورودی پمپ را تنها چند فوت بالا ببریم (یعنی یک یا دو psi)، فشار خروجی ممکن است ۱۲۰ تا ۱۸۰ افزایش پیدا کند. در کاویتاسیون حدی، اینگونه

^۱ Bhopal Factor: ضریب بوپال

^۲ Bhopal, India: بوپال هند

^۳ Cavitation: کاویتاسیون، تبخیر مایع در یک فضای محدود مثل نازل

^۴ Draw-off nozzle: نازل خروجی محصول از برج

^۵ Performance curve head: هد منحنی عملکرد

^۶ Marginal cavitation: کاویتاسیون حدی

به نظر می‌رسد که، پمپ بر روی منحنی عملکرد پایین‌تری (تحتانی) کار می‌کند. اندکی افزایش در NPSH در دسترس، باعث بازگشت پمپ به منحنی عملکرد مناسب خودش می‌شود.»

من اضافه کردم: «مشکل اینجاست که حتی زمانی که NPSH در دسترس محاسبه شده چند فوت بیشتر از NPSH مورد نیاز منحنی باشد، باز هم امکان دارد که سیال حین عبور از پروانه پمپ تبخیر جزئی داشته باشد. حباب‌های بخار می‌توانند به صفحه نرم کربنی آب‌بند مکانیکی^۱ پمپ آسیب برسانند. این امر با گذشت زمان منجر به نشتی آب‌بند می‌شود.»

هوارد پرسید: «متوجهم. اما چگونه می‌توان از این اتفاق جلوگیری کرد؟»

«خوب هوارد باید ورودی پمپ را برای NPSH اضافی، یعنی فراتر از حداقل مقدار مشخص شده توسط منحنی عملکرد پمپ، طراحی کنی.»

«اما نورم، چقدر NPSH اضافی مورد نیاز است تا بتوانیم اطمینان حاصل کنیم که آب‌بندی به علت کاویتاسیون آسیب نمی‌بیند؟»

«در کارخانه تولید آفت‌کش^۲ بوپال، آب‌بند پمپ مکرراً نشتی داشت. بنابراین پمپ بای‌پس^۳ شد و از فشار نیتروژن به منظور هل‌دادن واکنش‌گر سمی به داخل رآکتور تولید آفت‌کش استفاده کردند. اما در جریان کنارگذر کردن پمپ، آلارم مربوط به دمای بالای رآکتور خوراکشان را هم از کار انداختند. بنابراین هنگامی که آب تصادفاً وارد مخزن خوراک شد، با یکی از مواد شیمیایی سازنده آفت‌کش واکنش داده و گاز کشنده‌ای را تولید کرد. اما بدون آلارم دمای بالا، اپراتورهای کارخانه متوجه وجود مشکل نشدند. اگر پمپ با NPSH در دسترس بیشتر، طراحی شده بود، این مشکل رخ نمی‌داد.»

هوارد پرسید: «اما آیا این تنها دلیل موجود برای اهمیت NPSH در دسترس اضافی در هنگام طراحی یک پمپ گریز از مرکز جدید است؟»

^۱ آب بند مکانیکی: Mechanical Seal

^۲ pesticide Plant: کارخانه تولید آفت‌کش

^۳ By Pass: بای‌پس، کنار گذر

الزامات NPSH اولیه

"دلیل اساسی تری برای تأمین^۱ NPSH در دسترس، اضافه بر NPSH محاسبه شده توسط سازنده (که در منحنی عملکرد پمپ نشان داده شده) وجود دارد. بیا نگاهی به شکل ۳-۳۰ بیندازیم. در ابتدا هنگامی که اپراتور، یک پمپ گریز از مرکز موتوری را روشن می کند، پمپ را به صورت ذیل «راه اندازی» می کند:

۱. شیر دهانه ورودی^۲ را کاملاً باز می کند؛
 ۲. ونت بالای محفظه پمپ را تا حدودی باز می کند؛
 ۳. شیر خروجی^۳ را خیلی کم، باز می کند. یعنی شیر خروجی را حدود یک ششم دور کامل (در جهت خلاف عقربه های ساعت) می چرخاند تا باز شود؛
 ۴. دکمه روشن کردن موتور را فشار می دهد؛
 ۵. سپس شیر خروجی را تا آخر، با بیشترین سرعت ممکن باز می کند، به طوری که فشار ورودی^۴ پمپ (P_2) شکل ۳-۳۰ افت نکند.
- هوارد پرسید: «اما، آیا بهتر نیست شیر را به آرامی باز کنیم؟»

پاسخ دادم: «نه. راه اندازی یک پمپ گریز از مرکز در سرعت بسیار پایین، باعث لرزش بیش از حد آن می شود که برای یاتاقان ها^۵ و آب بندهای پمپ، مضر است.»

«اما من در دانشگاه آموختم که کاویناسیون هم برای پمپ بد است. پس به نظر من بهتر است فشار خروجی را کنترل کنیم و اگر فشار خروجی در P_3 (شکل ۳-۳۰) به طور نامنظمی پایین بود، شیر خروجی را آهسته تر باز کنیم.»

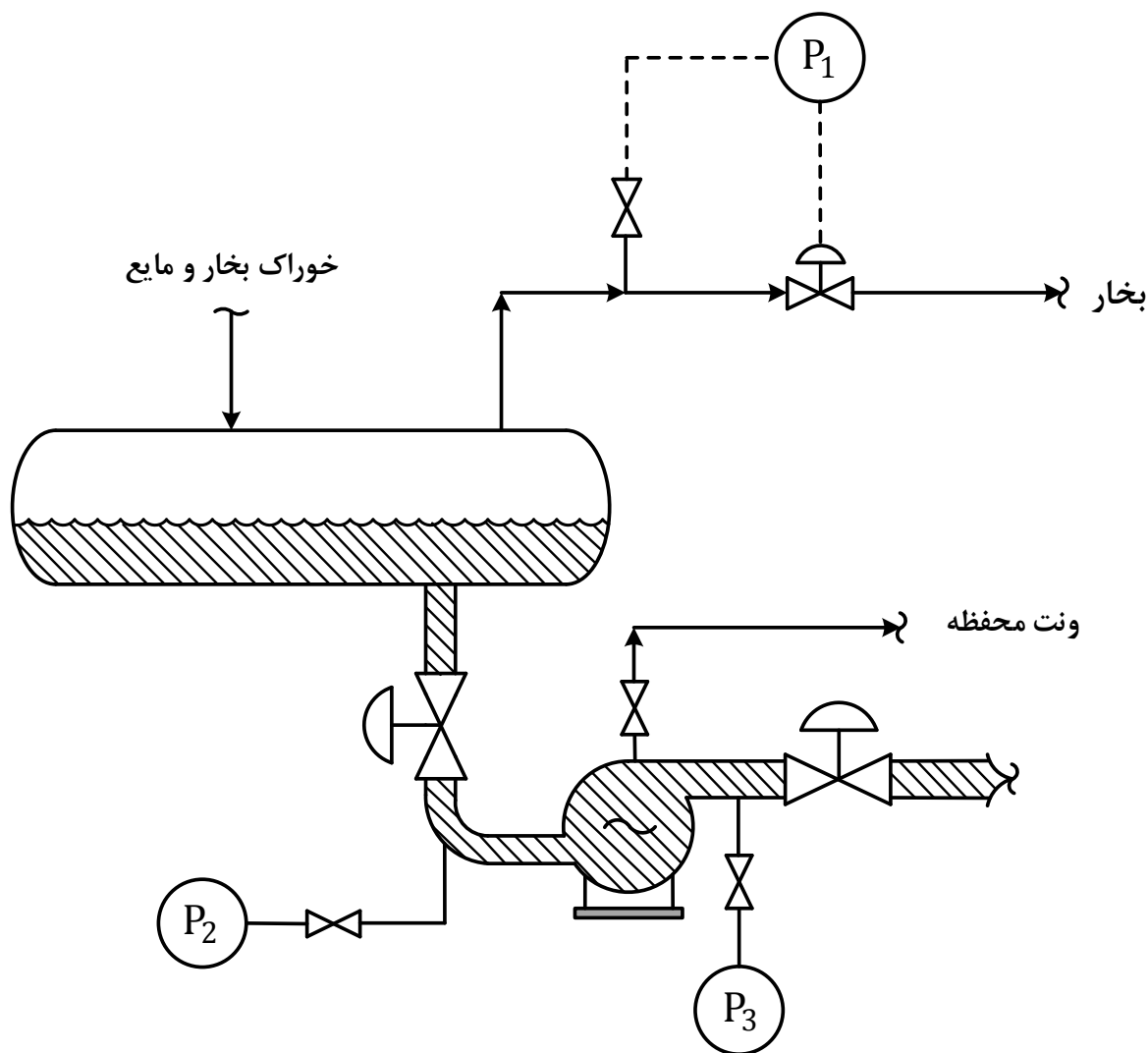
^۱ Supplying: تأمین

^۲ Suction Valve: ولو ساکشن، شیر مکش

^۳ Discharge Valve: ولو دیشارژ، شیر تخلیه

^۴ Discharge Pressure: فشار دیشارژ، فشار تخلیه

^۵ Bearings: یاتاقان ها



شکل ۳۰-۳ افزایش ناگهانی فشار درام، NPSH در دسترس برای راه اندازی را موقتاً افزایش می دهد.

«حق با توست. اگر پمپ دچار کاویتاسیون شود، به یاتاقان های پمپ و به ویژه آب بند مکانیکی، آسیب می رسد. بیشتر پمپ هایی که در واحدهای فرآیندی مورد استفاده قرار می گیرند، «پمپ های خود فلاش»^۱ هستند. به این معنا که سیال تمیزکاری آب بند^۲، به خودی خود از خروجی پمپ تغذیه می شود. اگر پمپ دچار کاویتاسیون شود، جریان سیال فلاش آب بند متوقف می شود. سپس آب بند، روانکاری و خنک کنندگی اش را از دست می دهد. اما بهتر است فشار ورودی را کنترل کنیم. هنگامی که فشار خروجی با گذر زمان کاهش پیدا کند، پمپ در حال کاویتاسیون

^۱ Self Flushed Pump: پمپ های خود فلاش، یک پمپ گریز از مرکز که مایع شستشوی آب بند خود را از خروجی پمپ به دست می آورند

^۲ Seal Flush Fluid: سیال تمیزکاری آب بند

بوده است و به آب‌بند آسیب وارد می‌کند. با کنترل کردن فشار ورودی می‌توانیم از رخ‌دادن کاویتاسیون و آسیب دیدن آب‌بند، قبل از شروع مشکل، اجتناب کنیم.»

«این بدان معناست که همیشه روی ورودی‌های پمپ، فشارسنج وجود دارد؟»

«متأسفانه نه هوارد.»

«پس اپراتورهای واحد بهره‌برداری، چگونه می‌توانند فشار ورودی را کنترل کنند؟»

«پمپ‌های فرآیندی تقریباً همواره دارای پمپ یدکی هستند که به صورت موازی با پمپ اصلی لوله‌کشی شده است. باید فشار خروجی پمپ یدک را، که در سرویس نیست (با شیر ورودی باز و شیر خروجی بسته)، کنترل کرد. این فشار، همان فشار ورودی پمپ در سرویس، خواهد بود.»

«اما چرا پمپ‌ها اغلب هنگام شروع راه‌اندازی دچار کاویتاسیون می‌شوند ولی این اتفاق در زمانی که در سرویس هستند، زیاد رخ نمی‌دهد؟»

توضیح دادم: «پمپ‌ها در زمان راه‌اندازی به دلیل «NPSH موردنیاز اولیه» دچار کاویتاسیون می‌شوند.»

«این همان NPSH موردنیاز است؟ یا چیز متفاوتیست؟»

«به شکل ۳-۳۰ نگاه کن. هنگامی که پمپ روشن می‌شود، مایع راکد موجود در خط ورودی، باید تا حدود ۳ فوت بر ثانیه سرعت بگیرد. نکته اینجاست: پمپ‌های گریز از مرکز هل می‌دهند، مکش نمی‌کنند.»

محاسبه NPSH مورد نیاز

هرکسی که تا به حال با یک پمپ گریز از مرکز موتوری سرعت ثابت کار کرده باشد به این نکته توجه کرده که باید جریان را به آهستگی افزایش دهد. این مشکل، در راه‌اندازی توربینی با سرعت متغیر وجود ندارد. سپس سرعت توربین به آرامی افزایش پیدا می‌کند.

مشکل ما در اینجا، تأمین انرژی لازم برای شتاب گرفتن سیال در خط خوراک پمپ است. اگر خط ورودی کوتاه باشد، این مشکل وجود دارد. برای مثال اگر پمپ یدکی را در سرویس قرار دهیم و پمپ اصلی را از سرویس خارج

کنم، جریان در ۹۰٪ خط لوله ورودی از قبل برقرار است. بنابراین می‌توانم پمپ را با شیر تخلیه کاملاً باز، راه‌اندازی کنم.

اما اگر خط ورودی طولانی باشد، برای شتاب گرفتن جرم مایع در داخل خط ورودی، می‌بایست انرژی تأمین کنم. این انرژی از خود پمپ تأمین نمی‌شود. بلکه از هد استاتیک مایع در داخل خط ورودی نشأت می‌گیرد. به عبارت دیگر از NPSH در دسترس، تأمین می‌شود. خلاصه که پمپ‌های گریز از مرکز، به سه نوع NPSH نیاز دارند:

۱. NPSH نشان داده شده در منحنی پمپ (شکل ۳۰-۲)؛
 ۲. افت فشار هیدرولیکی سیال در خط لوله ورودی و افت فشار سیال در هنگام خروج از نازل؛
 ۳. شتاب‌گیری مایع در داخل خط ورودی.
- من مورد آخر را که معمولاً بزرگ‌تر از دوتای دیگر است؛ «NPSH مورد نیاز اولیه» می‌نامم. این مورد تابعی است از:
- طول خط لوله ورودی؛
 - سرعت بازکردن شیر خروجی پمپ توسط اپراتور بهره‌برداری.

افزایش دبی فرآیند

هوارد پرسید: «اما فرض کن که پمپی نزدیک به NPSH در دسترس طراحی شده‌اش کار کند. سپس اپراتور تصمیم می‌گیرد که جریان را ۲۰٪ افزایش دهد. NPSH مورد نیاز، به مقدار زیادی افزایش پیدا می‌کند؛ زیرا سرعت در خط ورودی نیز ۲۰٪ افزایش می‌یابد. پس پمپ دچار کاویتاسیون می‌شود، فلاش آب‌بند متوقف خواهد شد و آب‌بند به دلیل فقدان روغن کاری آسیب خواهد دید.»

توضیح دادم: «آن مهندس، هنگام تصمیم‌گیری درباره ارتفاع وسل، باید این عوامل را در نظر بگیرد. خراب‌شدن آب‌بندهای مکانیکی پمپ، پرهزینه و در عین حال خطرناک است.»

افزایش NPSH در دسترس اولیه^۱ در فلش درام^۲ واحد تقطیر نفت خام^۳

ابتدا فشار پیش فرض^۳ درام را، ۱۰ psi افزایش می دهیم. بعد، شیر خروجی پمپ را ربع دور باز می کنیم (شکل ۳۰-۳ را ببینید). سپس پمپ را روشن کرده و در عرض چند دقیقه، شیر خروجی را کاملاً باز می کنیم.

فشار ورودی، ۱۰ psi افزایش خواهد یافت. به نظر می رسد که فشار بخار نفت خام فلش شده نیز، ۱۰ psi افزایش پیدا کند. مطابق با معادله^{۱-۳۰}، افزایش فشار بخار نفت خام فلش شده، فشار ورودی بالاتر را، جبران می کند.

اگر چه، در ابتدا به دلیل زمان ماند ۱۰ دقیقه ای مایع در داخل درام، مایع با فشار بخار بالاتر که در سطح مشترک بخار-مایع تشکیل می شود، به مدت ۱۰ دقیقه به داخل ورودی پمپ حرکت نخواهد کرد. اگر بتوان پمپ را به سرعت راه اندازی کرد، نوسان موقتی در NPSH در دسترس ایجاد می شود.

این ترفندیست برای که برای راه اندازی، استفاده کرده ام. بهتر است تجهیزات به درستی طراحی شده، پمپ به درستی راه اندازی شود و همچنین الزامات مربوط به NPSH مورد نیاز رعایت شوند. اغلب، اپراتورها هنگام یادگیری این ترفند، مکرراً باعث کاویتاسیون پمپ شده و به آب بند آسیب می رسانند.

گام های عملی برای به حداقل رساندن کاویتاسیون

«هوارد به طور خلاصه این ها مواردی هستند که آب بند مکانیکی را از آسیب های ناشی از وقوع کاویتاسیون در امان نگه می دارد:

۱. قراردادن فشارسنجی با یک علامت قرمز (تعیین کردن محدوده مجاز فشار) بر روی ورودی پمپ. آموزش دادن اپراتورها برای باز کردن شیر خروجی پمپ با حداکثر سرعت ممکن، به نحوی که فشار ورودی از این علامت قرمز، پایین تر نیاید؛
۲. دقیقاً قبل از راه اندازی پمپ، فشار درام ورودی را سریعاً چند psi بالا ببرید. سپس هنگامی که پمپ به طور عادی کار می کند، فشار را خیلی آرام کاهش دهید؛
۳. طی عملیات های عادی، جریان ها را به طور خیلی آهسته افزایش دهید؛

^۱ Preflash: پیش تبخیر ناگهانی

^۲ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

^۳ Set Point: پیش فرض

۴. نزدیک به بیشینه لول ایمن درام کار کنید؛
۵. پاشیدن آب سرد بر روی بدنهٔ پمپ و خط ورودی به منظور فرسود کردن مایع؛
۶. کارکردن با دو پمپ در حالت موازی به NPSH کمتری نیاز دارد اما، کنترل آن‌ها اغلب دشوار است؛
۷. تزریق یک جریان پس‌رو^۱ مادون سرد به داخل ورودی پمپ، NPSH در دسترس را افزایش می‌دهد؛
۸. برگشت دادن خروجی به خط ورودی، NPSH در دسترس را کاهش و NPSH مورد نیاز را افزایش می‌دهد؛
۹. برای پمپ‌های توربینی، سرعت توربین را به آهستگی افزایش دهید؛
۱۰. نگهداری از صافی^۲ ورودی پمپ و تمیز نگه داشتن آن‌ها.

خلاصه

رویکردهای معمول در زمینهٔ مهندسی طراحی فرآیند، اغلب نیاز به سرعت گرفتن مایع در داخل خط ورودی پمپ را در نظر نمی‌گیرند. این امر برای خطوط لوله کوتاه‌تر، پیامد چندانی در بر ندارد. هم چنین مشکل کاویتاسیون پمپ را می‌توان با آهسته باز کردن شیر خروجی، تا حد زیادی کاهش داد. با این حال برای بیشتر کاربردها، تأمین مقداری بیشتری NPSH در دسترس، راه‌اندازی پمپ‌های گریز از مرکز را ساده‌تر و آسان‌تر می‌کند و NPSH اضافی، قابلیت اطمینان آب‌بند مکانیکی پمپ را افزایش داده و هزینهٔ تعمیرات پمپ‌های گریز از مرکز واحد بهره‌برداری را کاهش می‌دهد. احتمالاً هزینهٔ اضافی‌ای که باید برای افزایش ارتفاع وسل به منظور تأمین NPSH مورد نیاز اولیه صرف شود، با هزینهٔ صرفه‌جویی شده برای تعمیرات آب‌بند، خطای ماندگار^۳ می‌شود.

مثال‌هایی دربارهٔ چرخه NPSH

محاسبات ذیل، در ابتدا به عنوان سمیناری برای پالایشگاه مونرو^۴ در پنسیلوانیا^۵ و توسط الیزابت لیرمن ارائه شده است.

^۱ Slip-stream: جریان پس‌رو

^۲ Screen: صافی، توری

^۳ Off-set: خطای ماندگار، اختلاف موقعیت جدید سطح نسبت به سطح مطلوب برای خنثی کردن متغیرهای عملیاتی را خطای ماندگار می‌گویند.

^۴ Monroe: مونرو

^۵ Pennsylvania: پنسیلوانیا

NPSH مورد نیاز اولیه

لزوم شتاببخشیدن به سیال جاری در ورودی یک پمپ، NPSH مورد نیاز اولیه نامیده می‌شود (شکل ۳۰-۴ را ببینید). به منظور محاسبه NPSH مورد نیاز اولیه، بیاید فرض کنیم:

- طول خط لوله ورودی = 100 ft ؛
- قطر خط هشت اینچ؛
- سیال = آب @ 62 lb/ft³؛
- سرعت اولیه صفر است؛
- سرعت نهایی 100 ft/s است.

پاسخ

جرم موجود در خط لوله، 2170 پوند است (شکل ۳۰-۵ را ببینید).

تغییر اندازه حرکت^۱ (مومنتوم) در خط لوله برابر است با

$$10 \text{ ft/s} \times 2170 \text{ lbs} = 2170 \frac{\text{ft} \cdot \text{lbs}}{\text{s}}$$

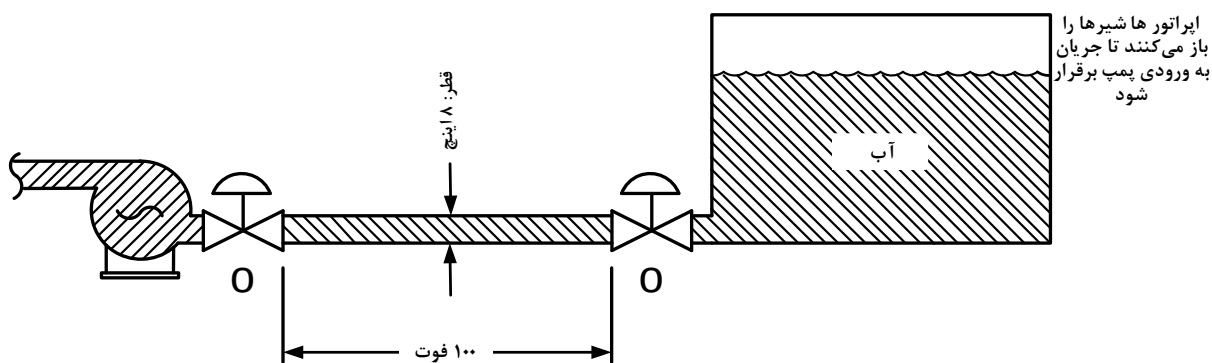
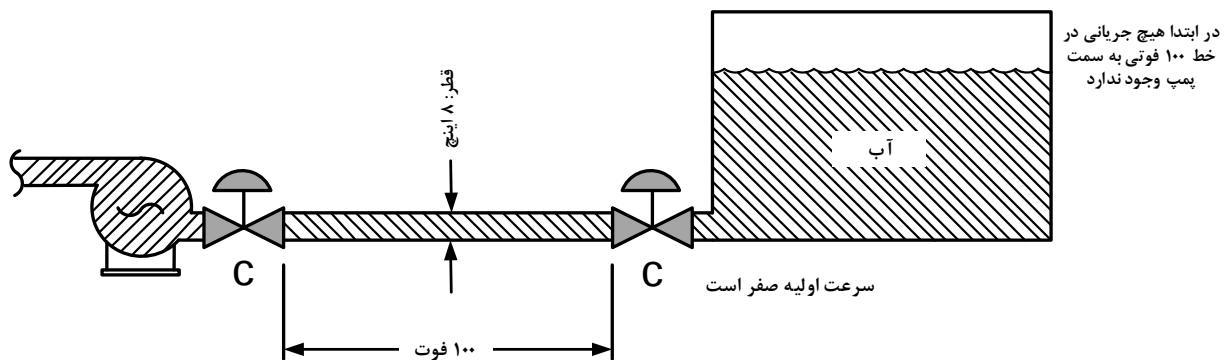
اگر اپراتور طی 100 ثانیه، دبی را به طور یکنواخت افزایش دهد، تغییر اندازه حرکت به صورت زیر است:

$$21700 \frac{\text{ft} \cdot \text{lbs}}{\text{s}} \div 100 \text{ s} \approx 222 \frac{\text{ft} \cdot \text{lbs}}{\text{s}^2} (\text{m})$$

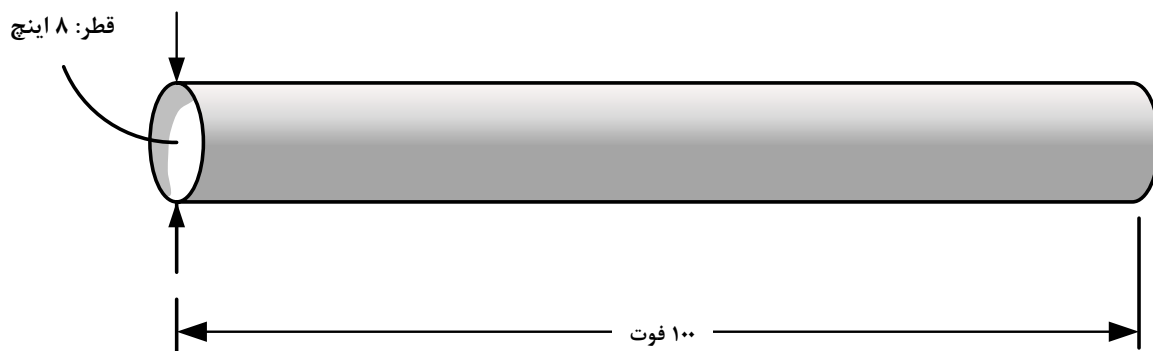
یک پوند جرم برابر است با نیروی تک‌گذری ضربدر s^2/ft . بنابراین نیروی لازم برای سرعتبخشیدن به آب در داخل ورودی پمپ به صورت زیر است:

$$222 \text{ lbs (f)}$$

^۱ Momentum: اندازه حرکت



شکل ۳۰-۴ پمپ کردن آب از یک مخزن ذخیره سازی.



شکل ۳۰-۵ حجم خط خوراک به طول ۱۰۰ فوت و قطر ۸ اینچ.

مساحت خط ورودی ۸ اینچی، ۵۰ اینچ مربع است. بنابراین فشار اولیه به صورت زیر خواهد بود:

$$222 \text{ lbs (f)} \div 50 \text{ in}^2 = 4.4 \text{ psi}$$

یا:

$$4.4 \text{ psi} \times 2.31 = 10.1 \text{ فوت آب}$$

سیالی که پمپ می‌شود، آب با چگالی $\rho = 62 \text{ lb/ft}^3$ است.

سرعت اولیه 0 است.

خط ورودی پمپ 100 فوت طول و 8 اینچ قطر دارد.

سرعت نهایی 10 ft/s است.

فرض کنید زمانی که هیچ جریانی وجود ندارد، خط لوله پر از آب است.

اولین گام، محاسبه جرم آب موجود در خط لوله است.

حجم خط لوله

$$\pi r^2 \times 100 \text{ ft}$$

$$r = \frac{4}{12} = \text{اندازه شعاع لوله}$$

$$\pi \frac{16}{144} \times 100 = 0.1111 \pi \times 100 = 0.3490 \times 100 = 34.9 \text{ ft}^3$$

اگر حجم خط لوله با 100 فوت طول و 8 اینچ قطر، 34.9 ft^3 باشد،

بنابراین هنگامی که لوله از آب با چگالی $\rho = 62 \text{ lb/ft}^3$ پر شود؛

جرم آب موجود در خط لوله برابر خواهد بود با:

$$62 \times 39.4 = 2164.16 \text{ lb}$$

(یا تقریباً 2170 پوند)

بنابراین وزن آب موجود در خط لوله که باید از 0 تا 10 ft/s شتاب بگیرد، 2164 lb است.

• فرض کنید اپراتور دبی را در مدت 100 ثانیه به طور یکنواخت از 0 تا 10 ft/s افزایش دهد.

شتاب در داخل خط لوله برابر خواهد بود با:

$$\frac{10 \text{ ft/s} - 0 \text{ ft/s}}{100 \text{ s}} = \frac{10 \text{ ft}}{100 \text{ s}} \cdot \frac{1}{\text{s}} = 0.1 \text{ ft/s}^2$$

نیروی لازم برای شتاب گرفتن مایع از 0 تا 10 ft/s در داخل خط لوله برابر است با:

$$\text{شتاب} \times \text{جرم} = \text{نیرو}$$

$$\frac{2164 (lb) \times 0.1ft}{s^2} = \frac{216}{4} \text{ پوندال}$$

• سطح مقطع عرضی لوله با قطر داخلی 8 اینچ برابر است با:

$$\pi\left(\frac{4}{12}\right)^2 = \pi\left(\frac{16}{144}\right) = 0.394 \text{ ft}^2$$

همانطور که قبلاً دیدیم

• 0.394 ft^2 برابر است با:

$$0.349 \text{ ft}^2 \xrightarrow{1 \text{ ft}=12 \text{ in.}} 0.349 \times (12 \text{ in.})^2 = 0.349 \times 144 \text{ in}^2 = 50.25 \text{ in}^2 \approx 50 \text{ in}^2$$

بنابراین NPSH مورد نیاز اولیه به صورت زیر داده می‌شود:

نیروی لازم برای شتاب گرفتن مایع از 0 تا 10 ft/s در داخل خط، بر مساحت مقطع عرضی لوله تقسیم می‌شود:

$$\frac{216.4}{50} \text{ psi} \frac{[M][L][T]^{-2}}{[L]^2} = 4.328 \text{ psi} [M][L]^{-1}[T]^{-2}$$

توجه داشته باشید که ۲/۳۱ فوت آب معادل با ۱ psi است.

$$4.328 \text{ psi} \times 2.31 \frac{\text{ft of water}}{\text{psi}} \rightarrow 9.997 \text{ فوت آب} = \text{NPSH مورد نیاز اولیه}$$

NPSH مورد نیاز اولیه، به منظور جلوگیری از کاویتاسیون در هنگام راه‌اندازی، برابر است با ۱۰ فوت آب.

کنترل فشار ورودی

من در ژانویه ۲۰۱۸ در کلمبیا^۱ کار می‌کردم و مشغول راه‌اندازی یک برج خلأ به منظور گاز زدایی آب در یک میدان نفتی بودم. پساب حاصل از برج نفت خام تولیدی از چاه با کربن دی اکسید خورنده، اشباع شده بود. من

^۱ کلمبیا: Colombia

برج پرشده^۱ی را با قطر داخلی ۱۰ فوت و ارتفاع حجمی^۲ ۳۰۲ فوت، طراحی کردم تا کربن دی اکسید را در خلأ ۲۵ اینچ جیوه (۱۲۵ mmHg) تخلیه کند.

اندازه نیمه پایینی وسل به گونه‌ای طراحی شده بود که زمان ماند آب، پنج دقیقه باشد تا از پمپ‌های آب پائین وسل در برابر کاویتاسیون، به علت سطح پائین مایع، محافظت کرده و همچنین از برگشتن آب به داخل بستر پرشده، که می‌تواند منجر به طغیان برج شود، جلوگیری کند.

مطابق معمول، در شمای داخلی برجی که طراحی کرده بودم، شیر اتصال^۳ پایینی را ۶ اینچ بالاتر از خط مماس کف وسل نمایش دادم. همچنین مشخص کردم که ارتفاع دامن وسل^۴، ۱۳ فوت بالاتر از ارتفاع خط مرکزی پمپ‌های پایین برج است. هدفم از این کار، تأمین NPSH موردنیاز برای پمپ‌ها بود، به گونه‌ای که مقدار آن در حداقل سطح مایع داخل برج، ۱۲ فوت باشد.

من با همین معیار، صدها مخزن فرآیندی طراحی کرده‌ام. اما در این مورد اشتباهی وجود داشت. شیر اتصال پایینی، ۱۰ فوت بالاتر از خط مماس کف وسل قرار داشت. اپراتورهای کلمبیایی مجبور بودند به منظور کنترل لول پایین وسل، سطح آب را به شکل خطرناکی نزدیک بستر پرشده نگه دارند. سطح بسیار بالا، منجر به طغیان بستر پرشده می‌شد.

چون شیر اتصال پایینی در موقعیت خیلی بدی قرار گرفته بود، تصمیم گرفتم استفاده از کنترل لول را کاملاً رها کنم و برای پمپ‌های پایین وسل به «کنترل فشار ورودی» متکی باشم.

مشتری من (اکوپترول)^۵ همیشه پمپ‌ها را با فشارسنج در ورودی پمپ طراحی می‌کند تا به اپراتورهای واحد درباره کاویتاسیون قریب‌الوقوع پمپ به دلیل افت سطح مایع هشدار دهد. من خروجی^۶ این فشارسنج را به «شیر کنترل لول»^۷ در خط خروجی پمپ، متصل کردم.

^۱ packed tower: برج پرشده، برج مخصوص جذب یا جداسازی مواد، که برای افزایش سطح تماس، با ذرات ریزی پر می‌شود و در آن مایع در حال ریزش و شاره بالارونده در مجاورت هم قرار می‌گیرند

^۲ Tangent to Tangent(T-T): تانژانت به تانژانت، فاصله بین دو خط جوش کلاهک‌های استوانه‌ای وسل، ارتفاع حجمی مورد استفاده در عملیات

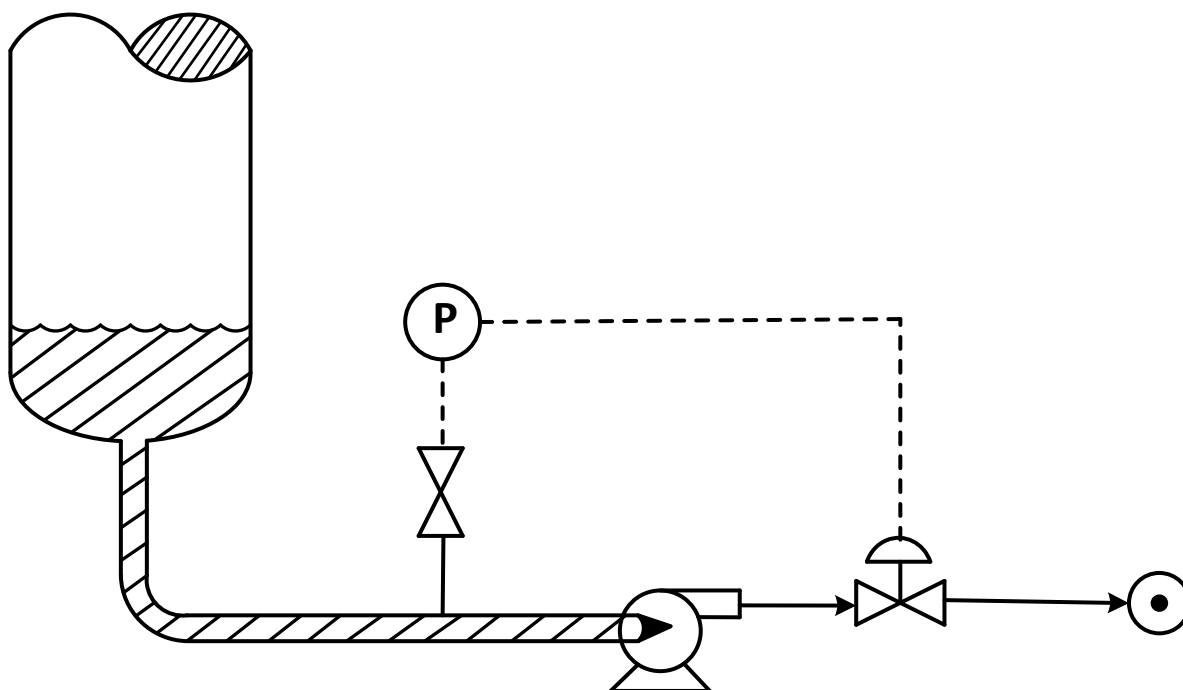
^۳ Level taps: شیرهای اتصال، تپینگ سطح سنج

^۴ Vessel skirt: دامن وسل، ساپورت سیمانی پایین برج یا وسل

^۵ Ecopetrol: اکوپترول

^۶ Output: خروجی

^۷ Level Control Valve: شیر کنترل سطح



شکل ۳۰-۶ کنترل فشار ورودی پمپ، شیر کنترل لول خروجی و شیرهای اتصال لول بر روی مخزن فشار را حذف می‌کند.

از آن جا که NPSH مورد نیاز پمپ 12 ft بود، تصمیم گرفتیم فشار ورودی پمپ را به گونه‌ای تنظیم کنیم که هد، 6 ft افزایش یابد و ارتفاع آن به 18 ft برسد. یک اینچ جیوه حدوداً معادل 1.2 ft آب گرم است. بنابراین:

$$18' \div 1.2 = 15''\text{Hg} \quad (5 - 30)$$

برج گاز زدایی خلأ، در خلأ 25''Hg کار می‌کند؛ پس فشار نقطه تنظیم من به این صورت خواهد بود:

$$25''\text{Hg} - 15''\text{Hg} = 10''\text{Hg vacuum} \quad (6 - 30)$$

در واقع من درباره محاسبه فوق دروغ گفتم. کاری که واقعاً کردم این بود که به طور دستی^۱ فشار ورودی را پایین آوردم تا زمانی که پمپ اندکی دچار کاویتاسیون شد. سپس فشار ورودی را حدود 5''Hg بالاتر تنظیم کردم. تمام این کارها را بدون مراجعه به لول واقعی آب برج که زیر شیر اتصال لول سنج بود، انجام دادم و بنابراین غیرقابل رویت بود.

^۱ Manually: کنترل کردن به صورت دستی

دمای محیط °F 102 بود و هیچ ابری در آسمان دیده نمی‌شد. به خاطر می‌آورم که با خودم اندیشیدم: «دیگر برای این چیزها خیلی پیر شده‌ام؛ اما واقعاً عاشق کارم هستم.»

آیا این بدان معناست که کنترل سطح برای ورودی پمپ، خطایی مهندسی ست؟ بله! می‌توانید دست‌کم از کنترل فشار ورودی برای عملیات برج خلأ استفاده کنید (شکل ۳۰-۶ را ببینید).

من علاوه‌بر گرمای طاقت‌فرسا با مشکل دیگری در این شغل مواجه بودم. صافی(توری)^۱ ورودی پمپ، در پایین‌دست نقطه حسگر فشارسنج قرار داشت. بنابراین هنگامی که صافی پمپ در آن شب مسدود^۲ شد، پمپ به دلیل افت فشار ورودی، شروع به کاویتاسیون کرد.

صبح روز بعد من صافی ورودی را با صافی‌ای با حفرات بزرگتر تعویض کردم. درسی که گرفتم این است که هنگام به‌سازی پمپ برای کنترل فشار ورودی، نقطه حسگر فشار ورودی^۳ باید در پایین‌دست صافی ورودی قرار گیرد و به هیچ وجه در بالادست آن نباشد.

صافی‌های ورودی پمپ

من در حال راه‌اندازی هوازدای خلأ جدید آب چاه بودم که برای عملیات حفاری یک میدان نفتی در کلمبیا طراحی کرده بودم. پمپ‌های پایین برج، برای هد پایین و ظرفیت ۶۰۰۰۰ BSD طراحی شده بودند. من فکر می‌کردم که آب بازیافتی چاه تمیز است. اما تصورم اشتباه بود. صافی ورودی پمپ که در خط ورودی ۱۲ اینچی قرار داشت، مخروطی بود و با مش نازکی پوشیده شده بود. تنها پس از ۱۲ ساعت عملیات، بیش از ۹۰٪ آن مسدود شد.

اما علت وجود صافی‌های ورودی پمپ چیست؟ آیا واقعا وجودشان ضروری و لازم است؟

شاید بله شاید هم نه. کاملاً بستگی دارد.

اولاً هر پمپی یک «حداکثر گذر (عبور) آزاد»^۴ مشخص دارد. این مقدار، حداقل فاصله میان پروانه و بدنه پمپ است. این فاصله معمولاً حدود چند دهم اینچ است. من مشخص می‌کنم که حفرات توری ورودی، شاید نصف این

^۱ Screen: توری، صافی

^۲ Plug: مسدود شدن

^۳ Suction pressure sensing point: نقطه دریافت فشار مکش

^۴ Maximum Free Passage: حداکثر گذر(عبور) آزاد

مقدار یا کمی کمتر از آن باشند.

مقداری بسیار حیاتی‌تر، حداکثر اندازه ذراتی است که آب‌بند مکانیکی پمپ قادر به تحمل آن است. اندازه ذرات قابل تحمل، احتمالاً بسیار کوچک است. این مقدار صرفاً در مورد پمپ‌های «خود فلاش» به کار می‌رود؛ به این معنا که سیال تمیزکاری آب‌بند، جریان پس‌رو بسیار کوچکیست که، از خط خروجی پمپ و سپس از میان اریفیس محدودکننده^۱ جریان پیدا می‌کند.

برنامه من این بود که صافی ورودی پمپ را با جایگزینی مش ریزدانه با مخروطی دارای حفرات یک چهارم اینچی، تعویض کنم. اندازه این حفرات ربع اینچی، کوچک‌تر از حداکثر گذر آزاد پمپ است که در داده‌برگ پمپ نشان داده شده است.

به منظور محافظت از آب‌بند مکانیکی دوگانه پمپ (که قطعه گران‌قیمتی به ارزش ۶۰۰۰۰ دلار (ایالات متحده) بود) در برابر خراشیدگی سطوح آن با ذرات، جریان آب خروجی به سمت آب‌بند را قطع نمودم. سپس از طریق لوله ضدزنگ، آب آشامیدنی موجود در اتاق کنترل را که تمیز به نظر می‌رسید، به اتصال نیم اینچی متصل کردم.

ضمناً می‌توان به جای استفاده از «آب‌بند مکانیکی دوگانه» گران‌قیمت، از «پمپ آکنده یا فشرده»^۲ برای پمپ کردن آب استفاده کرد و از بروز این مشکل جلوگیری کرد. پمپ‌های آکنده به طور اجتناب‌ناپذیری از نشت در امتداد محور(شافت) خود رنج می‌برند و به همین علت برای کارکردن با هیدوکربن‌ها یا مواد شیمیایی مناسب نیستند. با این حال هنگامی که ماده پمپ‌شونده صرفاً آب تمیز است، هزینه اضافی مربوط به تعمیرات آب‌بند مکانیکی هیچ توجیه و هدفی ندارد.

پس از گذشت چندین ماه هیچ گزارشی مبنی بر افزایش افت فشار صافی ورودی پمپ دریافت نشده، بنابراین من تصور می‌کنم که همه چیز به خوبی خاتمه یافته است.

^۱ Restriction orifice: اریفیس محدودکننده

^۲ Packed Pump: پمپ آکنده یا فشرده



طرز کار کمپرسورها

چکیده:

سه نوع کمپرسور وجود دارد؛

۱. سانتریفیوژی (گریز از مرکز)

۲. محوری

۳. رفت و برگشتی

که در واحدهای فرآیندی و پالایشگاه‌ها به طور متداول مورد استفاده قرار می‌گیرند. پدیدهٔ سرج (کوبش) و آمپر^۱ بیش از حد موتور، جزو مشکلات اصلی کمپرسورهای گریز از مرکز هستند. کمپرسورهای محوری ممکن است از جرم‌گرفتن^۲ و ایجاد رسوب^۳ بر روی پره و تیغه‌های خود آسیب ببینند و ظرفیت را کاهش می‌دهد. کمپرسورهای رفت و برگشتی به دلیل شکستن فنرها و صفحات شیر با کاهش ظرفیت روبرو می‌شوند. در کمپرسورهای رفت و برگشتی، تنش بیش از حد بر روی میل پیستون که به دلیل نسبت تراکم بالاست؛ منجر به نقص میل پیستون می‌شود.

کلمات کلیدی:

تراکم؛ گریز از مرکز؛ محوری؛ رفت و برگشتی، نسبت؛ فشار ورودی؛ فشار خروجی

^۱ مخفف "Ampere"، آمپر: AMPS

^۲ جرم گرفتن: Fouling

^۳ رسوب: Deposit

افرادی که من با آنها در پالایشگاه‌ها کار می‌کنم؛ اغلب صادق، پایبند به اخلاق، متعهد و البته سردرگم هستند. پیچیدگی تجهیزات فرآیندی منشأ این گیجی و سردرگمی ست و پیچیده‌ترین انواع تجهیزات فرآیندی، کمپرسورها هستند.

سه نوع کمپرسور وجود دارد که من با آنها کار کرده‌ام:

- گریز از مرکز

- محوری

- رفت و برگشتی

برای تعیین CI^۱ (یعنی شاخص گیجی) خودتان، لطفاً به سوالات زیر پاسخ دهید:

- پرسش شماره ۱: موتور محرکه یک کمپرسور گریز از مرکز دور-ثابت، در حجم ثابتی از جریان گاز و با دمای ثابت ورودی و خروجی کار می‌کند. اکنون وزن مولکولی گاز از ۲۰ به ۴۰ افزایش پیدا می‌کند. چه اتفاقی برای لود آمپر موتور می‌افتد؟
- پاسخ شماره ۱: هیچ جوابی وجود ندارد. هم فشار ورودی و هم فشار خروجی (یعنی نسبت تراکم) را نمی‌توان ثابت نگه داشت. چرا؟ زیرا دستگاه، هد یا ارتفاع ثابتی را ایجاد می‌کند. نسبت فشار، تابعی از وزن مولکولی گاز است. بنابراین اگر وزن مولکولی گاز افزایش پیدا کند، نسبت تراکم نیز باید افزایش بیابد. یا باید فشار ورودی پایین بیاید یا باید فشار خروجی بالا برود و یا هر دو.
- پرسش شماره ۲: همان حالت بالا را در نظر بگیرید؛ به جز این که من این بار اجازه می‌دهم تا فشار ورودی به علت افزایش وزن مولکولی، کاهش پیدا کند. فشار خروجی، همچنان ثابت نگه داشته می‌شود. چه اتفاقی برای آمپر موتور می‌افتد؟
- پاسخ شماره ۲: آمپر بالا می‌رود. نه به این دلیل که فشرده‌سازی گاز سنگین‌تر و با وزن مولکولی بالاتر، دشوارتر است؛ درست برعکس. متراکم کردن حجم مشخصی از گاز بوتان با وزن مولکولی ۵۸ در مقایسه با فشرده‌سازی حجم یکسانی از گاز متان با وزن مولکولی ۱۶، به ۱۵٪ آمپر کمتر نیاز دارد. آمپر موتور به این

^۱ شاخص گیجی: Confusion Index

دلیل افزایش پیدا می‌کند که، نسبت تراکم (فشار خروجی تقسیم بر فشار ورودی) افزایش پیدا کرده است؛ حتی با وجود این که فاکتور تراکم‌پذیری (Z) برای بوتان در مقایسه با متان، ۱۵٪ کاهش یافته است.

- پرسش شماره ۳: یک کمپرسور رفت و برگشتی که دارای موتور محرکه‌ای بوده که در دور-ثابت، در حجم ثابتی از گاز متان (با وزن مولکولی ۱۶) با فشار خروجی و ورودی ثابتی، کار می‌کند. اکنون کمپرسور می‌خواهد برای فشرده‌سازی پروپان (با وزن مولکولی ۴۴) استفاده شود. چه اتفاقی برای آمپر موتور می‌افتد؟
- پاسخ شماره ۳: لود آمپر حدود ۱۰٪، کاهش پیدا می‌کند. چرا؟ چون فاکتور تراکم‌پذیری گاز، Z ، نیز حدود ۱۰٪ کاهش می‌یابد.
- پرسش شماره ۴: برای کمپرسور گریز از مرکزی با دور متغیر، اگر مجبور باشیم هم فشار خروجی و هم فشار ورودی را ثابت نگه داریم و حجم ورودی و دمای ورودی نیز ثابت هستند و وزن مولکولی گاز نیز در حال افزایش باشد؛ باید؛

A. دور کمپرسور را کم کنم؛

B. دور کمپرسور را زیاد کنم؛

C. تغییر سرعت هیچ تاثیری ندارد.

- پاسخ شماره ۴: کاهش دور کمپرسور، بوسیله خطای ماندگار اثر ناشی از چگالی یا وزن مولکولی بالای گاز را خنثی می‌کند. این کار را می‌توان با استفاده از موتور محرکه‌های AC با بسامد متغیر (یعنی VFD)، انجام داد.

اگر به تمام پرسش‌های اشتباه پاسخ دادید باید به شما تبریک بگوییم! «شاخص گیجی» شما ۱۰۰٪ است. بهتر است به خواندن مطالب ادامه دهید.

کمپرسورهای گریز از مرکز در مقایسه با کمپرسورهای محوری

تنها کمپرسور محوری‌ای که با آن کار کرده‌ام، کمپرسور هوای غول‌پیکری در واحد FCU^۱ ماراتون^۲ در گریویل^۳ لوئیزیانا^۴ بود. در امتداد محور کمپرسور، ده‌ها پرّه چرخنده وجود داشت. این پرّه‌ها، به هوا شتاب می‌بخشیدند.

در امتداد پوسته کمپرسور نیز، ده‌ها پرّه ثابت وجود داشت. این پرّه‌ها انرژی جنبشی هوا را، که ناشی از چرخش محور بود، به فوت هد تبدیل می‌کردند. برای تبدیل فوت هد به افزایش فشار داریم:

$$K \cdot H_p = \text{psi} \quad \text{افزایش فشار هوا برحسب} \quad (1 - 31)$$

که در اینجا:

• K = ثابتی متناسب با چگالی هوا که هد پلی‌تروپیک را به فشار تبدیل می‌کند؛

• H_p = فوت هد پلی‌تروپیک.

نکته حائز اهمیت درباره کمپرسورهای گریز از مرکز و محوری این است که هر دوی آن‌ها صرف نظر از چگالی گازی که متراکم می‌شود، فوت هد یکسانی را ایجاد می‌کنند. اگر هوا در تابستان‌های لوئیزیانا گرم‌تر شود، فشار گاز خروجی از کمپرسور هوای محوری^۵ کاهش پیدا می‌کند، اما فوت هد ایجادشده ثابت باقی می‌ماند. بنابراین اگر فشار خروجی دمنده هوا^۶ در فصل زمستان بسیار بالا باشد، می‌توانیم:

• ورودی را محدود کنیم؛

• دور دمنده را کم کنیم؛

یا همانطور که در کارخانه ماراتون در گریویل اتفاق افتاد، پرّه‌های کمپرسور هوای محوری واقعاً کثیف شود.

^۱ Marathon: ماراتون

^۲ FCU مخفف «Fluid Catalytic Cracking Unit»، واحد شکست کاتالیستی بسترسیال، واحد شکستن مولکول‌ها در کاتالیست سیال

^۳ Garyville: گاریویل

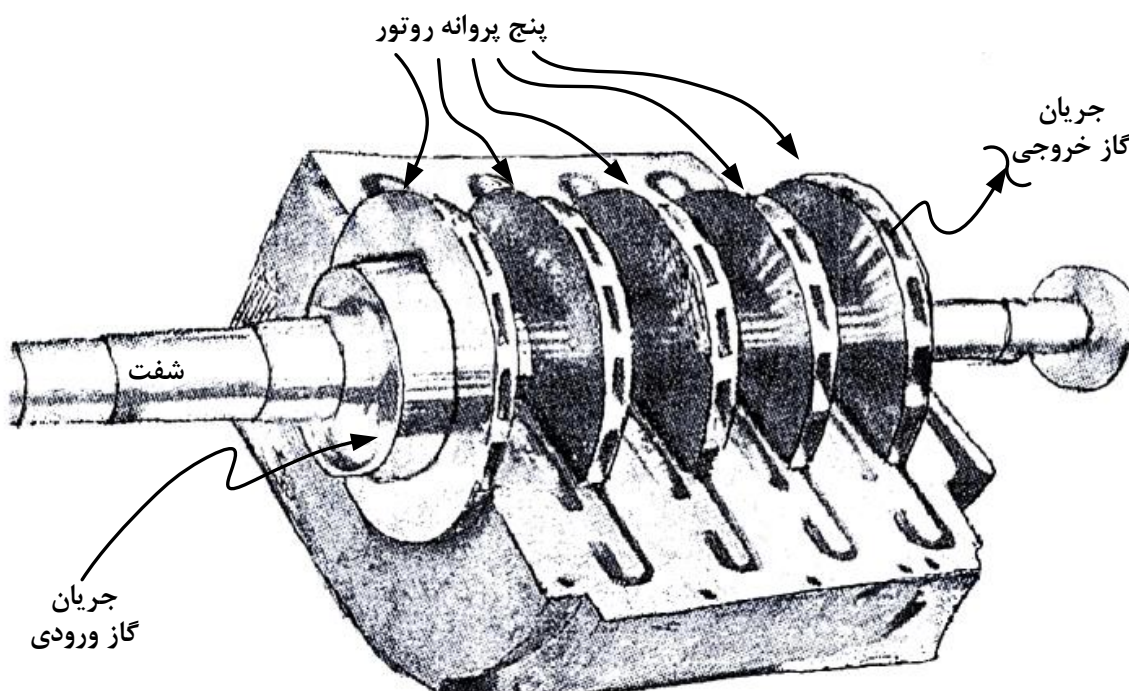
^۴ Louisiana: لوئیزیانا

^۵ Axial Air Compressor: کمپرسور هوای محوری

^۶ Air Blower: دمنده هوا، بلوئر

کمپرسورهای گریز از مرکز

شکل ۱-۳۱ نمایی از قسمت‌های دوار کمپرسور گریز از مرکز را نشان می‌دهد. به جای پره‌های چرخنده به دور محور، پروانه‌هایی وجود دارند. پروانه‌ها، انرژی جنبشی تولیدشده از انرژی چرخشی پروانه‌ها را، به گاز منتقل می‌کنند. هنگامی که گاز از هرکدام از پروانه‌ها خارج می‌شود، به داخل یک محفظه ثابت دایره‌ای شکل، که «استاتور»^۱ نامیده می‌شود، جریان پیدا می‌کند. در داخل استاتور، سرعت گاز کم شده و انرژی جنبشی منتقل شده از پروانه به گاز، به فوت هد تبدیل می‌شود. برای تبدیل از فوت هد به فشار، از معادله ۱-۳۱ استفاده می‌کنیم. نکته‌ای که من به آن اشاره دارم این است که فوت هد ایجادشده، صرف نظر از وزن مولکولی یا چگالی گاز متراکم شده، تغییر نمی‌کند.



استاتور: بخش ثابت کمپرسور گریز از مرکز

شکل ۱-۳۱ $\Delta P \sim \rho \theta H p$ ، $H p$ هد پلی تروپیک).

برای ایجاد فوت هد بیشتر به منظور افزایش فشار خروجی، می‌توانیم:

- دور کمپرسور را زیاد کنیم؛

^۱ استاتور، ایستانه Stator

• تعداد پروانه‌ها را افزایش دهیم؛

• قطر پروانه‌ها را افزایش دهیم.

یا در عوض می‌توانیم با کارهای زیر فشار خروجی کمپرسور را افزایش دهیم:

• بالا بردن فشار ورودی؛

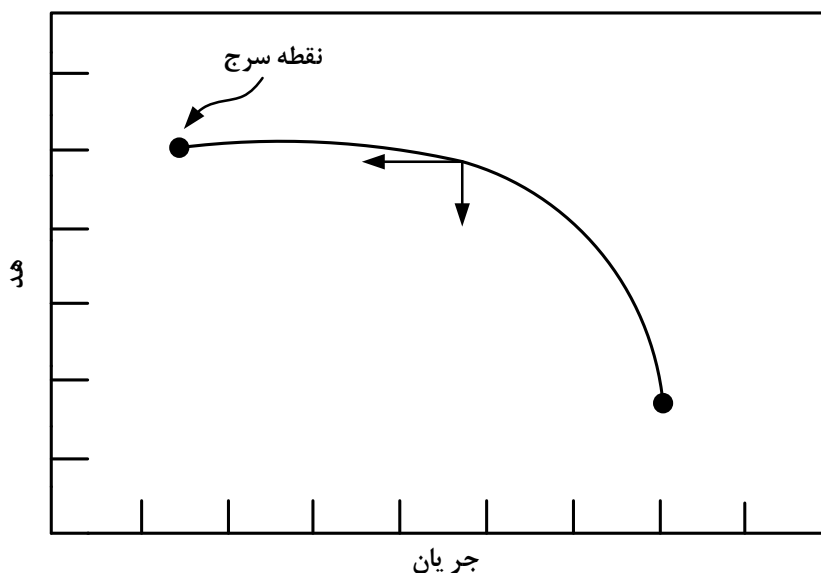
• کم کردن دمای ورودی؛

• بالا بردن جرم مولکولی؛

• یا کم کردن جریان گاز.

منحنی عملکرد کمپرسور گریز از مرکز

شکل ۲-۳۱ منحنی عملکرد یک کمپرسور گریز از مرکز است. مانند پمپ گریز از مرکز، با محدود کردن خروجی کمپرسور، جریان کاهش یافته و فوت هد (یعنی فشار خروجی) افزایش پیدا می‌کند. اگر بیش از حد خروجی کمپرسور را محدود کنیم، به نقطهٔ «کوبش»^۱ می‌رسیم.



شکل ۲-۳۱ منحنی عملکرد یک پمپ گریز از مرکز.

^۱ کوبش، سرج یا موج غلتان، یک حالت عملیاتی ناپایدار و خطرناک یک کمپرسور گریز از مرکز: Surge

سرج بسیار بد است. جریان گاز متوقف شده و جهت معکوس می‌شود. محور و پروانه‌ها به سمت عقب می‌لغزند. انتهای محور با سرعت و به شدت، به یاتاقان محوری‌اش^۱ برخورد می‌کند که با هر سرج، مقدار اندکی تغییر شکل می‌دهد. پروانه‌های چرخنده نیز به بخش‌های ثابت محفظهٔ پمپ نزدیک و نزدیک‌تر می‌شوند.

من در هشتم فوریهٔ سال ۲۰۱۶ دچار ایست قلبی شدم. نه نبضی، نه تنفسی و نه ضربانی. در اصطلاح پزشکی من فوت کرده بودم. خوشبختانه همسر، لیز، با اورژانس تماس گرفت و من در عرض ۸ دقیقه با شوک الکتریکی به زندگی برگشتم.

در مورد سرج هم همینطور است. بهتر است سریعاً و پیش از این که پروانه‌های کمپرسور با بخش‌های ثابت آن تماس پیدا کرده و دستگاه را خراب کنند، کاری انجام دهید. ممکن است شما هم تنها ۸ دقیقه فرصت داشته باشید.

توقف سرج

من در آگوست ۱۹۷۵، در جریان کار با کمپرسور مبرد واحد آلکیلاسیون، در شهر تگزاس، در این زمینه تخصص پیدا کردم. انتخاب‌های من به شرح زیر بودند:

۱. کاهش فشار خروجی؛

۲. افزایش فشار ورودی؛

۳. کاهش دمای ورودی؛

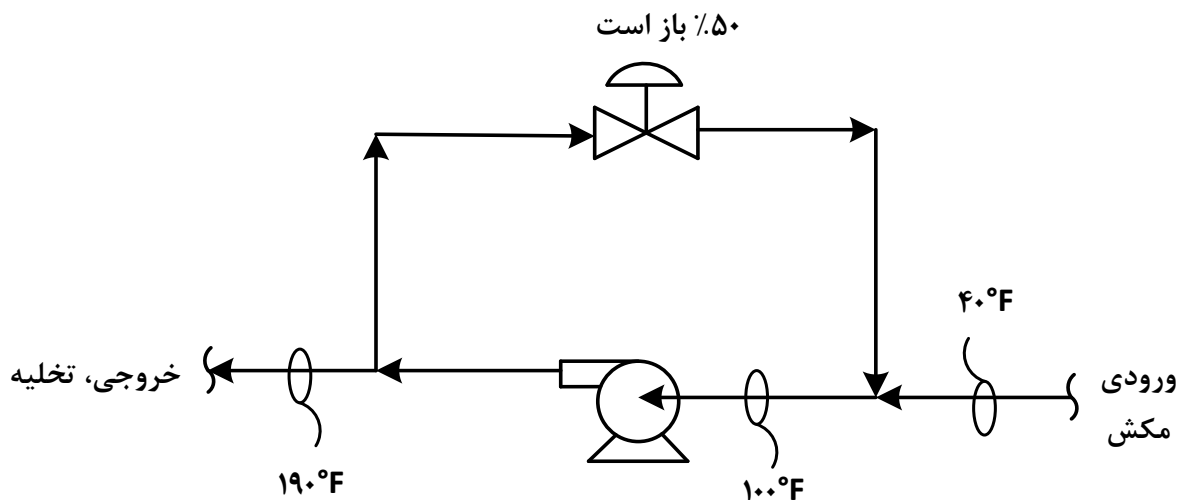
۴. افزایش جرم مولکولی گاز فرآیندی؛

۵. افزایش جریان.

باید هر کاری را که از دستتان برمی‌آید، برای افزایش چگالی بخار در ورودی دستگاه، انجام دهید. باید هر کاری را که از دستتان برمی‌آید، برای کاهش فشار خروجی، انجام دهید. من در شهر تگزاس، فوراً شیر برگشت ورودی به

^۱ Thrust bearing: یاتاقان محوری

خروجی^۱ را باز کردم (شکل ۳-۳۱ را ببینید) تا جریان، افزایش یابد.



شکل ۳-۳۱ باز کردن بیش از حد شیر پس ریزش منجر به سرچ کمپرسور می شود.

اما چون هیچ خنک کننده‌ای در خط برگشت وجود نداشت؛ دمای ورودی، گرم تر و گرم تر شده و با کاهش چگالی بخار ورودی، وخامت سرچ افزایش یافت. فرانک سیتک^۲، مدیر من در ایست پلنت^۳، راهنمایی مفیدی کرد: «لبیرمن این سرچ لعنتی را متوقف کن. اگر دستگاه را خراب کنی، اخراج خواهی شد!»

بنابراین، کمپرسور و هم‌چنین بزرگ‌ترین (۲۶۰۰۰ BSD) واحد آلکیلاسیون دنیا را (که نیم درصد از بنزین ایالات متحده را تولید می‌کرد) را از سرویس خارج کردم. من در فصل ۳۲ دربارهٔ سرچی که در واحد آلکیلاسیون شهر تگزاس رخ داد، با جزئیات بیشتری توضیح خواهم داد.

مزیت کنترل فشار مکش در کمپرسورهای گریز از مرکز

بیاید فرض کنیم، همانطور که در شکل ۳-۴ نشان داده شده، یک کمپرسور گریز از مرکز دارم که موتور محرکه آن، دور-ثابت می‌باشد. من باید فشار را در P-1 ثابت نگه دارم تا فشار در مخزن رفلکس تفکیک کنندهٔ واحد FCU ثابت بماند. اما زمانی که جرم مولکولی گاز از ۳۰ به ۳۳ افزایش می‌یابد، چگالی گاز نیز ۱۰٪ افزایش پیدا می‌کند.

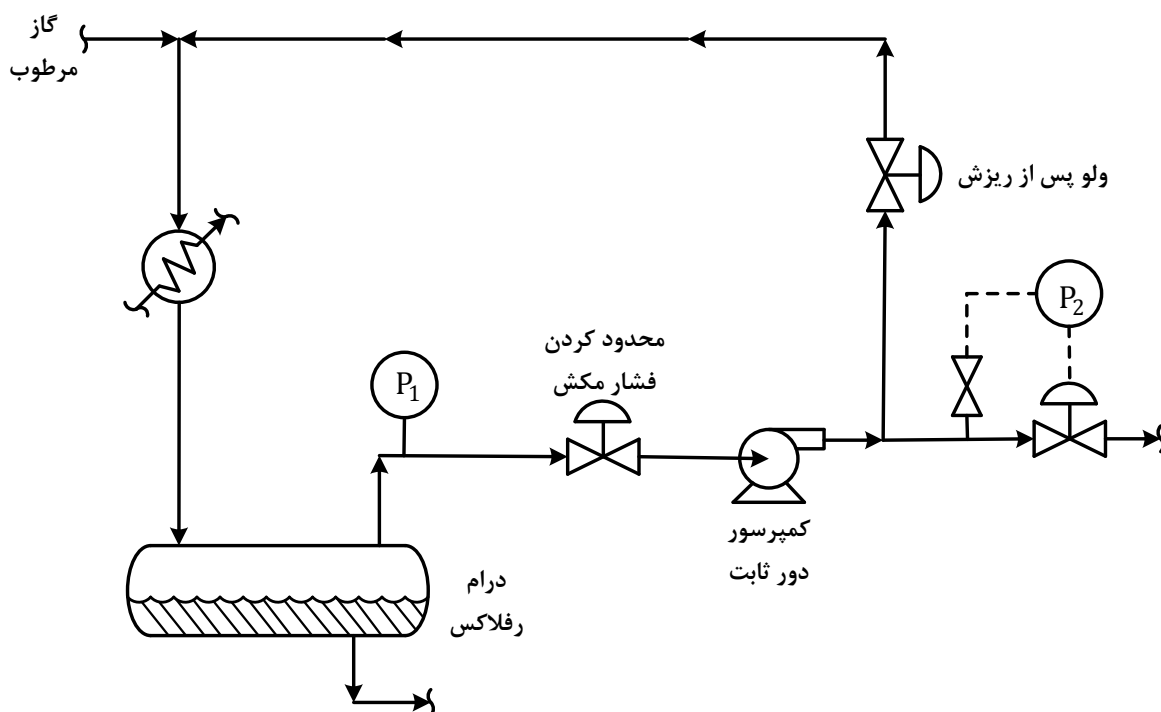
^۱ Discharge- to-suction pressure spill-back valve: شیر برگشت مکش به تخلیه، ولو پس ریزش

^۲ Frank Citek: فرانک سیتک

^۳ East Plant: ایست پلنت

از آن جا که فشار خروجی و هم چنین فوت هد ایجا شده توسط کمپرسور ثابت و جریان گاز نیز ثابت است، فشار ورودی (P-1)، افت می کند و این اتفاق ناگواری است. چه باید کرد؟ من دو انتخاب داشتم:

- **شماره ۱:** ولو پس ریزش را که در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده، بیشتر باز کنم. این کار باعث می شود کمپرسور فوت هد کمتری تولید کند (شکل ۴-۳۱). فشار ورودی نیز افزایش پیدا خواهد کرد. این همان چیزی ست که می خواهم اتفاق بیفتد؟



شکل ۴-۳۱ مقایسه ولو پس ریزش در مقایسه با شیر کنترل فشار P-1.

- **شماره ۲:** بستن شیر کنترل فشار ورودی کمپرسور برای مهار کردن فشار برگشتی در مخزن رفلکس (P-1). این کار فشار ورودی کمپرسور را کاهش نمی دهد؛ بلکه تنها فشار برگشتی درام رفلکس را، مهار می کند.

شماره ۲، انتخاب ارجح است. کمی پیچیده است. اما این طبیعت «تجهیزات فرآیندی»^۱ است و به همین دلیل، در واحدهای بهره‌برداری، به حضور زنان و مردانی متخصص نیازمندیم.

شکل منحنی کمپرسور

به شکل ۳۱-۲، نگاه کن. محور افقی مربوط جریان و محور عمودی مربوط به هد است. ما معمولاً کمپرسورهای گریز از مرکز را برای کارکردن بر روی بخش هموار منحنی طراحی می‌کنیم؛ جایی که وقتی خروجی کمپرسور را محدود کنیم، جریان به سرعت کاهش یافته و هد به آرامی افزایش پیدا می‌کند.

درک نحوه کار یک کمپرسور گریز از مرکز دور-ثابت، مسئولیتی پیچیده و حیاتی ست. اگر خروجی کمپرسور را محدود کنیم، دو اتفاق رخ می‌دهد:

- **اتفاق اول:** هد حدود ۱۰٪ افزایش می‌یابد؛

- **اتفاق دوم:** جریان حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد.

کار یا آمپراژ موتور یا توان با فوت هد متناسب است.

کار متناسب است با هد × جریان.

کنترل فشار خروجی کمپرسور (کاهش دبی کمپرسور) باعث می‌شود که با افزایش افت فشار در امتداد شیر خروجی، فشار در $P - 1$ (شکل ۳۱-۴) افزایش پیدا کند. اما برای نگه‌داشتن فشار $P - 1$ در نقطه تنظیم فشار (Setpoint)، ولو پس‌ریزش، که فشار $P - 1$ را در مقداری ثابت کنترل می‌کند، باید بسته شود.

اجازه دهید این نکته را اضافه کنم تا بهتر بفهمید. در حالت تعادل (یعنی در حالت پایدار^۲)، فشار ورودی کمپرسور، تحت تأثیر بستن یا بازکردن شیر کنترل فشار ورودی قرار نمی‌گیرد.

^۱ Process Equipment: تجهیزات فرآیندی

^۲ Steady state: حالت پایدار

اگر شما رودخانه‌ای را در حالت تعادل و در حالت پایدار سد کنید، زمانی که آب با جریان معمولی خود از سد سرریز^۱ کند، ارتفاع رودخانه در بالادست سد افزایش می‌یابد؛ اما سطح رودخانه در پایین‌دست سد، تحت‌تأثیر سد قرار نمی‌گیرد.

در موردی که ما داریم، اثر کنترل فشار ورودی، منجر به بسته‌شدن ولو پس‌ریزش می‌شود. از آنجا که کار متناسب با جریان ضربدر هد است، آمپراژ (مقدار آمپر) موتور کاهش پیدا می‌کند که، اتفاق خوبی‌ست.

شیر ضد سرج^۲

اگر به شکل منحنی کمپرسور نگاه کنید خواهید دید که کنترل فشار ورودی برای صرفه‌جویی در آمپراژ موتور، کمپرسور را به سرج نزدیک‌تر می‌کند. این اتفاق تا زمانی که کمپرسور سرج نکرده و به خودش آسیب نزده، خوب است.

برای محافظت در برابر سرج مخرب، ما ولو پس‌ریزش نشان داده شده در شکل ۳۱-۴ را، به منظور حفظ حداقل جریان ورودی به کمپرسور، طوری طراحی می‌کنیم که زیاد بسته نشود.

به همین دلیل است که ولو پس‌ریزش، معمولاً به عنوان شیر ضدسرج شناخته می‌شود.

آیا ساده‌تر نیست که از این همه پیچیدگی اجتناب کنیم؟ آیا بهتر نیست که شیر کنترل فشار ورودی و شیر پس‌ریزش نداشته باشیم؟ آیا بهتر نیست که صرفاً سرعت کمپرسور را تغییر دهیم تا فشار P-1 ثابت باقی بماند؟
قطعاً بله!

به همین دلیل است که «موتور محرکه‌های دور متغیر»^۳ و توربین‌های بخار داریم. تصور می‌کنم مهندسی جوانی که در سال ۲۰۵۹ کتابم را می‌خواند به همه ما می‌خندد. به شیر کنترل فشار ورودی و شیر پس‌ریزش می‌خندد؛ اما اکنون شما را با فکر جدایی (مرگ)، تنها می‌گذارم.

^۱ Overflow: سرریز می‌کند

^۲ Antisurge valve: شیر ضد سرج

^۳ Variable Frequency Drives: درایوهای فرکانس متغیر، موتور محرکه‌های دور متغیر

بستن شیر ورودی، در انرژی صرفه‌جویی کرده اما کمپرسور را به سرج نزدیک‌تر می‌کند. شبیه ازدواج کردن است. شما از بخشی از آزادی‌تان چشم‌پوشی می‌کنید تا از احساس تنهایی در هنگام بازگشت به خانه‌ای خالی، اجتناب کنید.

کمپرسورهای رفت و برگشتی

درک حرکات رفت و برگشتی بسیار آسان است. من در شکل ۳۱-۵ یک حرکت رفت و برگشتی (نوسان) را به همراه منحنی عملکرد آن نشان داده‌ام. منحنی مذکور، نمودار فشار در مقایسه با حجم است. این حجم مربوط به جریان عبوری از کمپرسور نیست. این حجم مربوط به گاز موجود درون سیلندر کمپرسور، بین سرسیلندر و سرپیستون است. چیزی که هنگام مطالعه «چرخه کارنو»^۱ در مدرسه مرا گیج می‌کرد این بود که، فکر می‌کردم محور افقی مربوط به حجم جریان عبوری از کمپرسور است. این حقیقت ندارد! محور افقی، حجم گاز موجود درون پیستون است که با حرکت پیستون تغییر می‌کند.

دستگاه‌های رفت و برگشتی، دستگاه‌های دو طرفه^۲ هستند. پیستون با حرکت در هر دو سمت، گاز را متراکم می‌کند. من این را نادیده می‌گیرم. بیاید فقط وانمود کنیم که گاز تنها هنگامی متراکم می‌شود که پیستون به سمت سرسیلندر حرکت می‌کند. چهار مرحله وجود دارد:

• **مرحله ۱: تراکم** - پیستون کارش را از دورترین فاصله ممکن نسبت به سرسیلندر آغاز می‌کند. این موقعیت را «نقطه مرگ پایین»^۳ می‌گویند. پیستون به سمت سرسیلندر حرکت می‌کند، در حالی که هم سوپاپ ورودی و هم سوپاپ خروجی، بسته هستند. گاز درون سیلندر، یعنی بین سرسیلندر و پیستون، متراکم می‌شود.

• **مرحله ۲: خروجی** - فشار داخل سیلندر به اندازه فشار خط خروجی و حتی اندکی بیشتر، بالا می‌رود. اکنون فشار داخل سیلندر بیشتر از فشار خط خروجی شده است و گاز را از طریق سوپاپ خروجی به داخل خط خروجی هل می‌دهد. سوپاپ ورودی، همچنان بسته است. پیستون به حرکت خود ادامه می‌دهد تا

^۱ Carnot Cycle: چرخه کارنو

^۲ Double acting: دو طرفه، دو نوبتی، دو اثره

^۳ Bottom dead center: نقطه مرگ پائین

زمانی که به «نقطه مرگ بالا»^۱ می‌رسد. پیستون زمانی که حدود یک سوم مساحت دهانه سوپاپ خروجی را پوشش داد، متوقف می‌شود. اگر پیستون کل مساحت دهانه سوپاپ خروجی را پوشش دهد، گاز نمی‌تواند به داخل خط خروجی هل داده شود.

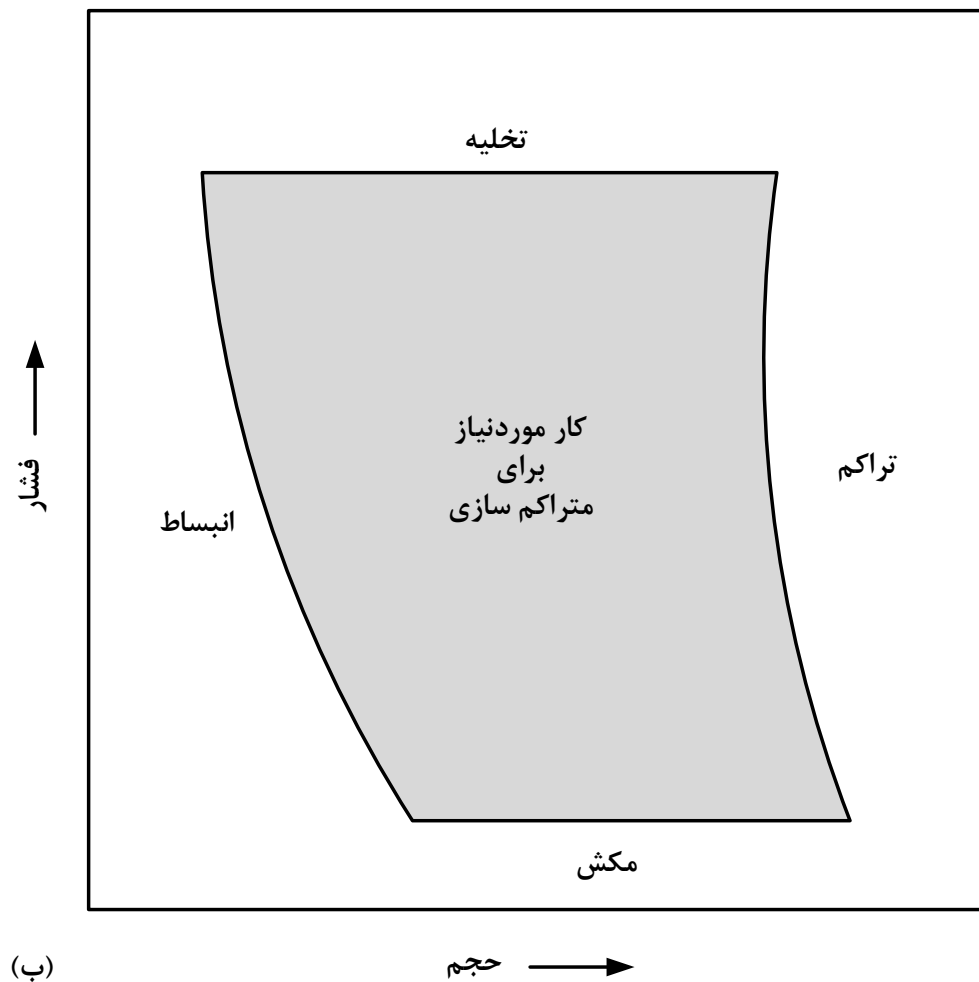
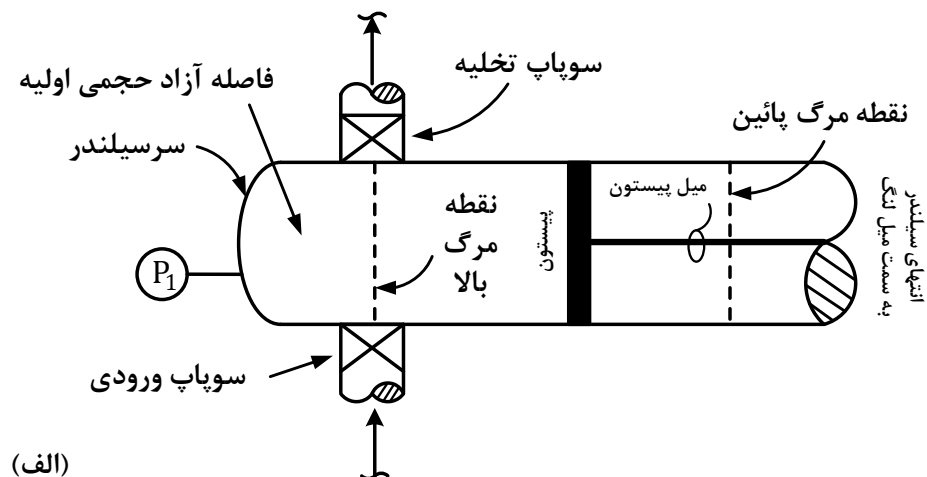
حجم گاز به دام‌افتاده بین نقطه مرگ بالا و سرسیلندر «فاصله آزاد حجمی اولیه»^۲ نامیده می‌شود. شیر ورودی هنوز باز نشده است.

• **مرحله ۳: انبساط** - اکنون پیستون معکوس به سمت نقطه مرگ پایین حرکت می‌کند. گاز به دام‌افتاده در فاصله آزاد حجمی اولیه، منبسط شده و فشار در داخل سیلندر کاهش می‌یابد. توجه داشته که هنوز هر دو سوپاپ ورودی و خروجی بسته هستند. گاز، منبسط شده و فشار کاهش پیدا می‌کند؛ تا زمانی که فشار در داخل سیلندر، اندکی کمتر از فشار خط ورودی شود.

• **مرحله ۴: ورودی** - اکنون فشار گاز در خط ورودی، سوپاپ ورودی را مجبور به باز شدن می‌کند. گاز جدید از خط ورودی به درون سیلندر مکیده می‌شود تا زمانی که پیستون به نقطه مرگ پایین بازگردد.

^۱ نقطه مرگ بالایی، موقعیت پیستون در درون سیلندر در نزدیک‌ترین فاصله خود به سرسیلندر: Top dead center

^۲ فضای لقی اولیه، فاصله آزاد حجمی اولیه، فضای بین پیستون و سرسیلندر در انتهای استروک کمپرسور رفت- برگشتی: Starting volumetric clearance



شکل ۳۱-۵ (الف) کمپرسور رفت و برگشتی. (ب) منحنی چرخه کارنو برای کمپرسور رفت و برگشتی. حجم گاز بین سرسیلندر و پیستون. فشار در $P - 1$ اندازه گیری شده است.

چرخه کارنو

شکل ۳۱-۵، چرخه کارنو است. مساحت داخلی منحنی فشار در مقایسه با حجم، که من آن را نمایش داده‌ام، اسامی گوناگونی دارد:

- کار تراکم PV؛

- کار تراکم ایده‌آل؛

- کار چرخه کارنو.

با اندازه‌گیری مداوم فشار گاز درون سیلندر و حجم گاز درون سیلندر، بر اساس موقعیت Crank-end موتور محرکه، می‌توان منحنی نشان داده شده در شکل ۳۱-۵ را رسم کرد. این نمودار، به نام های زیر شناخته می‌شوند:

- کارت نمایشگر^۱

یا

- اسکن بتا^۲

پروفايل دما

گاز صرف‌نظر از این که چگونه متراکم می‌شود، گرم خواهد شد. هر چه نسبت تراکم (یعنی فشار خروجی تقسیم بر فشار ورودی) بزرگ‌تر و هر چه کمپرسور ناکارآمدتر باشد، گاز بیشتر گرم خواهد شد. متراکم کردن هوا از ۳۰ تا ۱۵۰ psig ممکن است باعث افزایش دمای آن از ۶۰ به ۲۲۰ °F شود. این یک نمونه معمولی‌ست. امکان دارد نسبت تراکم برای یک پیستون، سه یا چهار به یک، باشد.

تنش بیش از حد بر روی میل‌پیستون

میل‌پیستون، پیستون را هل داده و می‌کشد. بار روی میل‌پیستون عبارت است از:

^۱ Indicator card: کارت نمایشگر

^۲ Beta Scan: اسکن بتا

مساحت پیستون $\times$ (فشار ورودی - فشار خروجی)

که در این جا:

• تنش روی میل پیستون = پوند؛

• مساحت پیستون = اینچ مربع؛

• فشارها = psi.

افزایش دما در طول دستگاه، معیار مستقیمی از تنش بر روی این میل پیستون است. با زیاد شدن افزایش دما، ممکن است تنش بر روی میل لنگ از میزان مقاومت آن تجاوز کرده و منجر به شکستن میل پیستون شود.

البته افزایش دمای خروجی کمپرسور رفت و برگشتی به دلیل دمای ورودی به خاطر دمای بالای محیط یا دمای آب خنک کننده در خنک کننده بالادست، معیاری از افزایش تنش بر روی این میل پیستون نیست. عدم درک این قاعده کلی برای یک از مشتریانم بین سال های ۱۹۳۹ تا ۲۰۱۷، سالیانه ۱۲۰۰۰۰۰ دلار هزینه به همراه داشت.

سخن پایانی

هدف من از نگارش این دست نوشته، بیان داستانی درباره اهمیت درک نحوه کار تجهیزات فرآیندی بود. من اخیراً به واحد بهره برداری ای مشاوره می دادم که در زمینه عملکرد کمپرسورهای رفت و برگشتی دچار مشکل شده بودند. مشکل آنها، دمای خروجی بیش از حد بود.

در طول روز دمای ورودی کمپرسور از ۷۰ به ۱۰۰ °F افزایش می یابد. این مسئله، هشدار درجه حرارت بالا را که روی ۲۵۰ °F تنظیم شده، فعال می کند. سپس اپراتورها ظرفیت کمپرسورها را کاهش می دهند و این کار باعث افزایش فشار ورودی می شود. این عمل، نسبت تراکم را کاهش داده و منجر به کاهش ظرفیت تولید می شود.

اما آیا دمای بالاتر گاز ورودی، ارتباطی به تنش بر روی میل لنگ ندارد؟ مشتری من باید تنش بر روی میل لنگ را بر اساس فشارهای ورودی و خروجی و مساحت پیستون محاسبه می کرد؛ نه بر اساس دمای خروجی کمپرسور.

ملاحظات ایمنی

ممکن است سرج یک پمپ گریز از مرکز در عرض چند دقیقه یا چند ساعت، بسته به موارد زیر، به خطری ایمنی تبدیل شود:

- دستگاه‌های قدیمی‌تر که در دهه ۱۹۵۰ ساخته می‌شدند، نسبت به سرج مقاوم‌تر هستند؛
 - دستگاه‌هایی با سرعت کمتر (۴۰۰۰ - ۵۰۰۰ rpm) نسبت به سرج مقاوم‌تر هستند؛
 - دستگاه‌هایی با تعداد پروانه کمتر (۳ یا ۴ عدد) نسبت به سرج مقاوم‌تر هستند؛
 - وجود یک شیر یک‌طرفه^۱ بر روی خروجی کمپرسور، نیروی ناشی از سرج را کاهش می‌دهد.
- دستگاهی با دور-متغیر اغلب ممکن است با افزایش سرعتش، یعنی با ایجاد هد پلی‌تروپیک بیشتر، از وضعیت سرج خارج شود.

^۱ Check valve: شیر یک‌طرفه



علت وقوع پدیده سرج در کمپرسورهای گریز از مرکز

چکیده:

نتیجه عدم ایجاد اختلاف فشار کافی برای غلبه بر فشار خروجی کمپرسوری با فشار ورودی معین، وقوع پدیده سرج است. برای مثال موارد زیر به افزایش ایجاد این پدیده کمک می‌کنند:

- وزن مولکولی کم
- فشار تخلیه بالا
- دمای ورودی بالا
- کاهش فشار ورودی

سریع‌ترین راه برای متوقف کردن پدیده سرج، افزایش وزن مولکولی گاز متراکم‌شده یا افزایش جریان گاز از طریق پس ریزش (برگشت جریان) یا یک شیر کنترل ضدسرج است.

کلمات کلیدی:

دور؛ پدیده سرج؛ اختلاف فشار؛ چگالی گاز؛ هد پلی‌تروپیک؛ شیر یک‌طرفه؛ پروانه‌های روتور

مهاجرت وینسنت کاپیدونو^۱ از سیسیل^۲ در کودکی، بخشی از برنامهٔ پروردگار برای دشوار ساختن مسیر زندگی من بود. کاپی، هد اپراتور واحد آلکیلاسیون شمارهٔ ۲ در آبرپالایشگاه نفت آمریکا^۳، در تگزاس سیتی بود. در سال ۱۹۷۴، زمانی که من ۳۲ ساله بودم، مسئول واحد آلکیلاسیون شمارهٔ ۲ شدم که نرخ تولید آن BSD ۲۴۰۰۰ و بزرگ‌ترین واحد آلکیلاسیون سولفوریک اسید در جهان بود.

چهار ماه پس از بر عهده گرفتن سرپرستی واحد، یک روز به کاپی دستور دادم: «سطح مخزن شارژ خوراک در واحد ما خیلی پایین است، باید بازگشت اولفین C₄ به خوراک را به حداقل برسانیم.» هیچ پاسخ یا اقدامی به دنبال آن دریافت نکردم.

«بخشید کاپی، حرفی که الان زدم را شنیدی؟»

«بله به خوبی شنیدم؛ آقای لیبرمن.»

بیست دقیقه گذشت و وینسنت کاپیدونو حتی از پشت میز اتاق کنترل، بلند نشد.

«بین کاپی، ما باید!»

«خیلی خوب، خیلی خوب لیبرمن» کاپی اپراتور جوان اتاق کنترل را صدا زد: «بابی C₄ را به ۹۰۰۰ کاهش بده و ایزوبوتان جبرانی را نیز دو هزار بشکه کم کن.» سپس با ردی از اضطراب و آشفتگی در صدایش افزود: «بابی به دقت مراقب شیر برگشتی خروجی به ورودی کمپرسور تبرید باش. اجازه نده شیر زیاد باز شود.»

کاپی با نگرانی نگاهی به ساعت روی دیوار کرد و گفت: «هنوز دو ساعت به تعویض شیفت باقی مانده بابی.»

«بله. آقای کاپیدونو اما شیر برگشتی کمپرسور تبرید از الان شروع به بازشدن کرده و فشار ورودی کمپرسور نیز یک پوند کاهش پیدا کرده است. امکان دارد برای مدتی هزار بشکه از خوراک اولفین را برگردانم؟ بگذارم شیفت بعد، به این مسئله رسیدگی کند؟»

«نه بابی. چیزی که آقای لیبرمن به ما گفت را شنیدی. باید کاری را انجام دهیم که رییس می‌گوید. درست نمی‌گوییم؟»

^۱ وینسنت کاپیدونو: Vincent Cappidono

^۲ Sicily: سیسیل

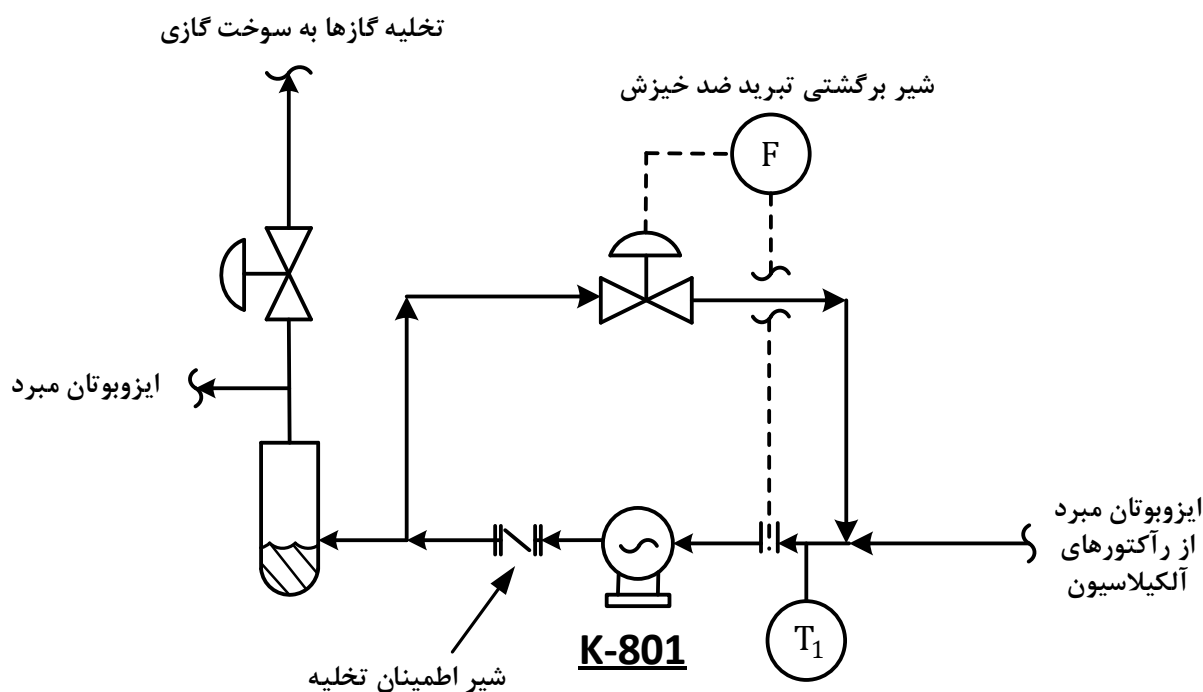
^۳ American Oil Refinery: پالایشگاه نفت آمریکا

علت این خصومت و مقاومت چه بود؟ این گونه نبود که بابی و کاپی، سهمی از درآمد فروش محصول آلکیله شده را دریافت کنند. ولی من قصد داشتم موضوع را بفهمم!

کاپی با هیجان گفت: «دوباره اتفاق افتاد. صدایش را می شنوی؟ حالا به دردرس افتادیم.» تنش در صورتش مشهود بود.

یک صدای عمیق، بلند و غرش مانند برای چند ثانیه و به دنبال آن صدای انفجاری قدرتمند از سمت کمپرسور تبرید بازیابی ایزوبوتان غول پیکر ما، با قدرت ۵۰۰۰ اسب بخار، (شکل ۱-۳۲ را ببینید) از در اتاق کنترل، شنیده شد.

پرسیدم: «این صدای چیست؟ چه مشکلی پیش آمده است؟ چه اتفاقی دارد می افتد؟»



شکل ۱-۳۲ باز شدن بیش از حد شیر ضد سرچ باعث گرم شدن بیش از اندازه ورودی کمپرسور شده و منجر به سرچ کمپرسور می شود.

وینسنت کاپیدونو، اپراتور ارشد، گفت: «کمپرسور ناپایدار شده و در حال سرچ است. نباید این مقدار خوراک را به این روش خارج می کردیم!»

بابی با حالتی عصبی پرسید: «اکنون می خواهید چه کار کنم آقای کاپیدونو؟ شیر بازیابی مبرد از کنترل خارج شده است.»

«اوه! من حدس می‌زنم که آقای لیبرمن باید به ما دستور بدهد بایی. به هر حال او سرپرست عملیات است.»

غرش‌های متناوبی که هر کدام با صدای مهیب بدی همراه بودند، بی وقفه ادامه داشتند. من در طول ده سال کار پیشینم در نفت آمریکا، به عنوان مهندس طراحی فرآیند، شنیده بودم که سرج منجر به خرابی فاجعه‌بار کمپرسور گریز از مرکز می‌شود. در نهایت، تکه‌ای از پروانه روتور می‌شکند. بدنهٔ کمپرسور از داخل منفجر می‌شود و به احتمال زیاد، قطعه‌ای از این انفجار به سر من برخورد می‌کند. بدون شک، نابودشدن k-801، کمپرسور تبرید بازیابی ایزوبوتان، رویدادی خواهد بود که برای من به قیمت پایان یافتن حرفه‌ام، تمام می‌شود.

ملاقات دختران در هواپیما

سرج شبیه به «افت سرعت آیرودینامیکی یا هواپویشی»^۱ است. اجازه بدهید توضیح دهم.

فرض کنید که در هواپیما نزدیک خانم جذابی نشسته‌اید. اولین قدم این است که بگویید: «سلام؛ من دونالد^۲ هستم.» و او پاسخ می‌دهد: «سلام؛ من هم لیندا^۳ هستم.»

سپس می‌گویید: «لیندا معمولاً زیاد با هواپیما سفر می‌کنی؟»

لیندا خواهد گفت: «خوب در واقع، بله.»

سپس می‌گویید: «لیندا آیا تا به حال فکر کرده‌ای که هواپیماها چگونه پرواز می‌کنند؟»

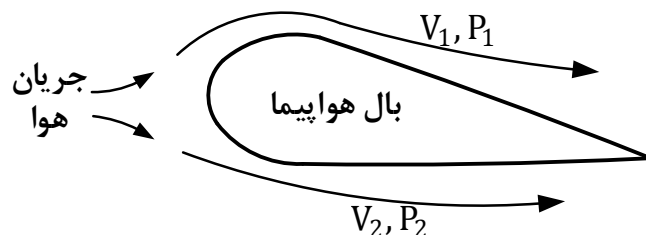
احتمالاً لیندا پاسخ خواهد داد: «خوب نه دونالد. من هیچ وقت در این باره فکر نکرده بودم.»

«پس پیشنهاد می‌کنم تصویری از مقطع عرضی بال هواپیما رسم کنی (شکل ۳۲-۲ را ببینید).»

^۱ افت سرعت آیرودینامیکی: Aerodynamic Stall

^۲ Donald: دونالد

^۳ Linda: لیندا



شکل ۳۲-۲ نیروی بالابر^۱ از تبدیل فشار هوا به سرعت، به وجود می‌آید.

سرج و افت سرعت آیرودینامیکی

«لیندا با توجه به برش عرضی بال و از همه مهم‌تر، زاویه حمله (یعنی زاویه بال هنگام حرکت رانشی هواپیما در هوا توسط موتورهای آن)، سرعت هوا در بالای بال (V_1) بیشتر از سرعت هوا در پایین بال (V_2) است. یعنی هوا در بالای بال، در مقایسه با زیر بال، سرعت بیشتری می‌گیرد.

انرژی لازم برای افزایش سرعت هوا، از موتورهای هواپیما تأمین نمی‌شود. بلکه این انرژی از خود هوا تأمین می‌شود. به بیان دقیق‌تر، این انرژی از فشار بارومتريک هوا می‌آید. از آن‌جا که سرعت هوا در بالای بال (V_1) بیشتر از سرعت هوا در زیر بال (V_2) است، بنابراین فشار در $P - 1$ کمتر از فشار در $P - 2$ خواهد بود. اگر این اختلاف فشار ($P_2 - P_1$) را در مساحت بال‌ها (A) ضرب کنیم:

$$\text{نیروی بالابر} = (P_2 - P_1) \times (A)$$

این همان نیروی بالابرنده آیرودینامیکی است. هنگامی که هواپیما آهسته‌تر پرواز می‌کند، این نیروی بالابر کاهش می‌یابد. همچنین کاهش چگالی هوا در ارتفاعات بالاتر، نیروی بالابر را کاهش می‌دهد. وقتی نیروی بالابر کمتر از وزن هواپیما باشد، هواپیما از آسمان به پایین سقوط کرده، منفجر می‌شود و می‌سوزد. این پدیده «افت سرعت آیرودینامیکی» نامیده می‌شود.

در این زمان، لیندا وانمود می‌کند که به خواب رفته است؛ مگر این که خود او هم مهندس فرآیند باشد. بنابراین این روش دارای پتانسیل مشخص و مشروطی برای دست یافتن به نتیجه‌ای موفقیت‌آمیز است.

^۱ Lift: نیروی بالابر

دلایل سرج کمپرسور گریز از مرکز

هنگامی که یک کمپرسور گریز از مرکز دچار سرج و ناپایداری شود، بر خلاف هواپیما، به کار خود ادامه می‌دهد. ابتدا جریان گاز متوقف شده و سپس از طریق روتور به سمت عقب، جریان پیدا می‌کند (شکل ۳۲-۳).

پروانه‌های در حال چرخش بر روی محور روتور، فشار گاز را چندان افزایش نمی‌دهند؛ اما عمدتاً، به گاز سرعت می‌بخشند. سپس با کاهش سرعت گاز در اجزای ثابت، که بخشی از بدنه کمپرسور هستند، سرعت گاز تأمین شده توسط پروانه‌های چرخنده، به «فوت هد»^۱ تبدیل می‌شود.

برای تبدیل فوت هد (H_p) به اختلاف فشار (DP) (یعنی فشار خروجی منهای فشار ورودی)، فوت هد را در چگالی گاز، ضرب می‌کنیم:

$$DP = D_v \cdot H_p$$

فوت هد متناسب است با:

- دور ماشین؛
 - تعداد پروانه‌ها؛
 - قطر پروانه‌ها.
- چگالی گاز متناسب است با:
- جرم مولکولی گاز؛
 - فاکتور تراکم‌پذیری گاز؛
 - فشار گاز؛

دمای مطلق گاز ($^{\circ}R$ یا $^{\circ}K$).

عواملی که باعث پدیده سرج می‌شوند، عبارتند از:

^۱ Feet of Head: فوت هد

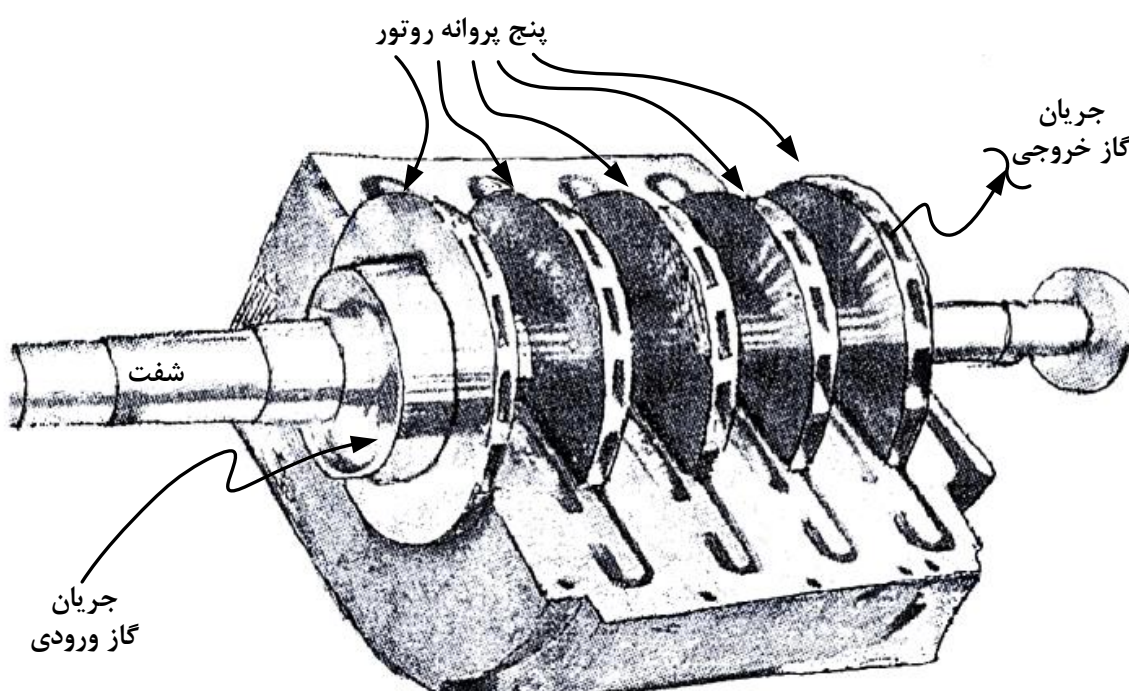
- فشار خروجی بالا؛

- فشار ورودی پایین؛

- وزن مولکولی پایین؛

- دمای ورودی بالا؛

- جریان کم.



استاتور: بخش ثابت کمپرسور گریز از مرکز

شکل ۳۲-۳ مرحله آتش روتور کمپرسور.

هد پلی تروپیک

Hp نشان دهنده هد پلی تروپیک است که تابعی از مراحل و پروانه‌های کمپرسور است. از آنجا که ما نسبت تراکم واقعی را تعیین نمی‌کنیم و صرفاً اثرات موضعی را در نظر می‌گیریم، من تفاوتی میان هد و هد پلی تروپیک قائل نشدم. هد ایجاد شده در کمپرسور گریز از مرکزی با دور ثابت و در دبی حجمی مشخصی از گاز، صرف نظر از تغییرات دما یا وزن مولکولی گاز، ثابت است.

اگر میزان دبی بخار کاهش پیدا کند، شیر برگشتی ضدسرج (شکل ۳۲-۱ را ببینید) باز خواهد شد تا جریان ورودی را بالای جریان نقطه سرج نگه دارد. اما اگر جریان برگشتی ابتدا خنک نشود، دما را در ورودی کمپرسور $(T - 1)$ ، افزایش می‌دهد. این موضوع با کاهش چگالی گاز، وضعیت را وخیم‌تر می‌کند. شبیه وضعیتی که دونالد به جای جلب توجه لیندا، کاری کرد که او وانمود کند به خواب رفته است.

اثر سرج

اگر اختلاف فشار ایجاد شده توسط کمپرسور (DP) بیشتر از اختلاف فشارهای ورودی و خروجی باشد (شکل ۳۲-۱)، آنگاه جریان گاز متوقف شده و از طریق پروانه‌های روتور، به عقب جریان پیدا می‌کند. این همان چیزی است که باعث ایجاد صدای «سرج»^۱ می‌شود.

جریان معکوس گاز، روتور را به شدت به سمت عقب می‌کشانند. سپس به آن در خلاف جهت یاتاقان محوری^۲ ضربه می‌زند (که حرکت محوری شفت روتور را محدود می‌کند). بنابراین با هر سرج، یاتاقان محوری اندکی تغییر شکل می‌دهد. این امر باعث می‌شود پروانه‌های در حال چرخش، به بخش‌های ثابت بدنه کمپرسور، نزدیک‌تر شوند (شکل ۳۲-۳). وقتی یک پروانه در حال چرخیدن، با قسمت ثابت تماس پیدا می‌کند، تکه‌ای از پروانه شکسته شده، بدنه کمپرسور را سوراخ می‌کند و احتمال دارد که به سر من برخورد کند!

نقش شیر یک‌طرفه^۳ در خروجی کمپرسور

گاهی صدای بلند و انفجارمانندی که همزمان با وقوع پدیده سرج به گوش می‌رسد، بسیار آزاردهنده است ولی بد نیست. در واحد آلکیلاسیون من در تگزاس سیتی، این صدای انفجارمانند، ناشی از بسته شدن شیر یکطرفه در خط خروجی کمپرسور (شکل ۳۲-۱) و به علت معکوس شدن جریان گاز بود. این کار، جریان بخارهای معکوس و همچنین نیروی سرجی که روتور را به عقب هل می‌داد، کاهش داد. بنابراین من معتقدم چنین شیر یکطرفه‌ای، باید در طراحی کلیه کمپرسورهای گریز از مرکز، گنجانده شود.

^۱ Surging: موج غلطان

^۲ Thrust bearing: یاتاقان محوری

^۳ Check valve: شیر یکطرفه

پیشگیری از وقوع سرج

معمولاً یک اندازه‌گیر جریان، بر روی ورودی کمپرسور نصب می‌شود تا اطمینان حاصل گردد که، جریان به اندازه کافی زیاد است و بالاتر از حداقل حد پایین جریان، باقی می‌ماند. اگر جریان به پایین‌تر از این حد کاهش یابد، شیر «ضد سرج»^۱ خروجی به ورودی باز خواهد شد. با این حال اگر فشار خروجی بالاتر از مقدار طراحی شده باشد، یا اگر وزن مولکولی گاز پایین‌تر از مقدار طراحی شده باشد، یا اگر دمای ورودی بالاتر از مقدار طراحی شده باشد و یا اگر فشار ورودی پایین‌تر از مقدار طراحی شده باشد، در هر صورت پدیده سرج اتفاق می‌افتد. حتی اگر کمپرسور بالاتر از حداقل جریان گاز طراحی شده برای پیشگیری از وقوع سرج کار کند، باز هم ممکن است این اتفاق رخ دهد.

من قبلاً گمان می‌کردم، برای کمپرسوری با دور-متغیر، مانند سه دمنده هوا^۲ در واحد بازیابی گوگرد تگزاس سیتی، افزایش سرعت توربین بخار، پدیده سرج را متوقف می‌کند. اغلب اینگونه بود؛ اما گاهی اوقات باعث می‌شود که دمنده بدتر، سرج کند. من تعدادی منحنی عملکرد را بررسی کردم و مناطقی در زیر منحنی‌ها وجود داشت که در آن‌ها، دور بالاتر، حداقل جریان هوای لازم برای اجتناب از وقوع سرج را افزایش داده بود. من به طور قطع یک چیز را در خصوص این دمنده‌های هوا آموختم. روشن کردن دمنده‌ای اضافی، هنگامی که به آن احتیاجی نیست، راه خوبی برای آغاز وقوع پدیده سرج، در هر سه دمنده بود.

روتورهای که رسوب گرفته‌اند، تمایل بیشتری به سرج دارند؛ زیرا نسبت به روتورهای تمیز، هد پلی‌تروپیک کمتری ایجاد می‌کنند. پاشیدن محلول نفتا به داخل جریان ورودی (معمولاً یک درصد وزنی)، خصوصاً در کمپرسورهای بازیابی گاز هیدروژن، رسوب‌گرفتنی را، به تأخیر می‌اندازد.

پدیده سرج برای دستگاه‌هایی با ویژگی‌های ذیل، بسیار مخرب‌تر است:

۱. در سرعت‌های بالاتر کار می‌کنند؛ سرعت پایین بین ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ rpm است؛
۲. پروانه‌های متعددی، یعنی بیش از سه یا چهار پروانه، بر روی یک شفت دارند؛
۳. با گازی با وزن مولکولی پایین کار می‌کنند پس به احتمال زیاد به هد پلی‌تروپیک بالایی نیاز دارند؛

^۱ Antisurge: ضد سرج، ضد سرج

^۲ Air Blower: دمنده هوا، بلوئر

۴. کمپرسورهای نسبتاً جدید؛ کمپرسورهای قدیمی‌تر، که قبل از دهه ۱۹۶۰ ساخته شده‌اند، معمولاً طراحی زمخت‌تری دارند؛

۵. در معرض رسوب‌گرفتگی روتور هستند؛

واحد آلکیلاسیون من در تگزاس سیتی

علی‌رغم شک و تردید بابی و کاپی، من دقیقاً می‌دانستم که چگونه باید مشکل سرچ کردن k-801، کمپرسور گریز از مرکز میرد بازیابی ایزوبوتان، رسیدگی کنم. من با هنری زیپ‌رین^۱، سرپرست قدیمی شیفت، در شیفت B تماس گرفتم.

"سلام زیپ. مشغول چه کاری هستی؟"

"به همسر من در نگهداری از نوه‌مان کمک می‌کنم. نورم چه خبر؟"

"بسیار خوب زیپ، آیا امکان دارد کمی زودتر به واحد بیایی؟"

"مثلاً چه ساعتی؟"

"مثلاً همین الان!"

زیپ ۲۰ دقیقه بعد رسید. درست به موقع. مدیر پالایشگاه، آقای دورلند^۲، صدای سرچ کمپرسور را شنیده بود و تصمیم گرفته بود، شخصاً موضوع را بررسی کند. او با صدایی بلندتر از صدای غرش کمپرسور فریاد کشید: «لیبرمن! همانطور آنجا نیست و کاری بکن. تو داری کمپرسور را نابود می‌کنی!»

«بله آقا. همین الان رسیدگی می‌کنم.»

^۱ Henry Zipperain: هنری زیپ‌رین

^۲ Durland: دورلند

زیپ پیر، ابتدا ونت وسل دریافت‌کننده^۱ مبرد خروجی کمپرسور را باز کرد و به سیستم گاز سوختی برقرار کرد که منجر به کاهش فشار خروجی کمپرسور شد (شکل ۳۲-۱). سپس کنارگذرها را در خنک‌کننده‌های خوراک (برای ایزوبوتان جبرانی و اولفین‌های C₄) باز کرد تا جریان بخار مبرد ایزوبوتان را به کمپرسور افزایش دهد.

سپس شیر برگشت خروجی به ورودی را بست و گفت: «آقای نورم من داشتم به شما می‌گفتم که ما در این جریان برگشتی به خنک‌کننده نیاز داریم.» این مرحله هم‌چنین فشار ورودی کمپرسور را حدود ۱ psi افزایش داد.

سپس زیپ، خروجی ریپولر پروپان‌زدای^۲ بازیابی ایزوبوتان را ۵ °F افزایش داد. «این کار، بازیابی ایزوبوتان را با کاهش محتوای پروپان آن پس از مدتی افزایش خواهد داد نورم.» نهایتاً زیپ نرخ بازیابی ایزوبوتان را زیاد کرد. این کار حرارت محسوس بیشتری به رآکتورها منتقل کرد تا بخار مبرد بیشتری را، بدون گرمای اضافی حاصل از واکنش اولفین‌ها و ایزوبوتان برای تولید آلکیلات، تولید کنند.

در عرض نیم‌ساعت، پدیده سرج متوقف شد. آقای دورلند، به ساختمان مدیریت بازگشت، بایی و کاپی شیفیت را تحویل دادند، زیپ برای سیگار کشیدن بیرون رفت و آرامش دوباره به واحد آلکیلاسیون شماره ۲ بازگشت.

کنترل کردن دمای جریان برگشتی بخار

یک ماه بعد، اتحادیه^۳ OCAW، اعتصاب خود را در تگزاس سیتی آغاز کرد. بنابراین من، زیپ و دیگر سرپرست‌ها، واحد آلکیلاسیون را اداره می‌کردیم. یک شب زیپ گفت: «ما باید جریان بخار فوق‌گرم^۴ برگشتی کمپرسور را تعمیر کنیم. ما جریان برگشتی ایزوبوتان مایع را، از طریق اسپری نازلی ۱ اینچی، به داخل خط بخار هشت اینچی تزریق می‌کنیم. این مایع، تبخیر شده و بخار فوق‌گرم برگشتی را خنک می‌کند. ما فقط از اتصالات و لوله پیچ‌خورده استفاده خواهیم کرد؛ پس می‌توانیم این کار را قبل از پایان شیفت تمام کنیم.»

و ما این کار را کردیم. این کار برای جلوگیری از وقوع سرج، هنگامی که شیر برگشتی ضدسرج خیلی باز می‌شد، به خوبی نتیجه‌بخش بود.

^۱ Receiver: دریافت‌کننده

^۲ Depropanizer: جداساز پروپان، دیپروپانایزر

^۳ Ocaw union: اتحادیه کارکنان نفت، شیمی و اتمی در آمریکا

^۴ Superheated vapor: بخار مافوق گرم

خلاصه

من پس از تجربه‌ام در تگزاس سیتی در سال ۱۹۷۴، زمانی که میرد ایزوبوتان آلکیلاسیون من دچار سرج شد، موقعیت‌های مشابه متعددی را پشت سر گذاشته‌ام. من همیشه واکنش مشابهی به این پدیده دارم. یعنی خروجی را به سمت سوخت یا مشعل واحد^۱ تخلیه می‌کنم. سریع‌ترین راه برای پایان دادن به پدیده سرج، کاهش فشار خروجی کمپرسور گریز از مرکز است. تنها دلیلی که من توانستم در حادثه مربوط به تگزاس سیتی از آسیب‌رسیدن به روتور، جلوگیری کنم، وجود کمپرسوری قدیمی‌تر، کندتر و با پروانه‌های نسبتاً کم (یعنی سه عدد) بود. همچنین شیر یک‌طرفه خروجی، نیروی جریان معکوس بخار را سرکوب و خنثی کرد.

^۱ Flare: فلر، مشعل واحد



سیستم تبرید

چکیده:

ظرفیت یک سیستم تبرید را می توان با افزایش فراریت مبرد در حال گردش، افزایش داد؛ مشروط بر اینکه کمپرسور مبرد توسط فشار خروجی بالا یا بار آمپر موتور محرکه یا توان خروجی توربین بخار محرکه، محدود نشود.

فراریت سیستم مبرد پروپان را می توان با افزودن اتان و یا پروپیلن، به مبرد در حال گردش، افزایش داد.

تغییر وضعیت به گردش اجباری از طریق کویل تبخیرکننده، روش دیگری برای افزایش ظرفیت تبرید، با بهبود راندمان انتقال حرارت تبخیرکننده است.

کلمات کلیدی:

مبرد؛ پروپان؛ اتان؛ تبخیرکننده؛ کندانسور؛ کمپرسور؛ گردش

من در کشوی میزم، لوله‌ای از یک مایع زرد رنگ، مات و بسیار گرانبه دارم. این لوله به مدت ۴۹ سال، در کشوی میز من بوده است. این ماده، پلی‌پروپیلن C-20 است؛ یک افزودنی بنزینی که در دهه ۱۹۶۰، به عنوان روان‌کننده سرسیلندر برای موتورهای، توسط تکزاکو^۱، به میزان ۱ سی‌سی در هر گالن، مورد استفاده قرار می‌گرفت.

کارفرمای من یعنی شرکت نفت آمریکا، با واکنش دادن پروپیلن تولیدشده در واحد کراکینگ LPG پالایشگاه الدورادو^۲، C-20 را برای تکزاکو ساخت. سیستم کاتالیستی، متشکل از دانه‌های جامد آلومینیوم کلرید، به علاوه جریان اندکی از ایزوپروپیل کلرید مایع بود.

به منظور مطابقت پیدا کردن با مشخصات ویسکوزیته تکزاکو، واکنش در فاز مایع با دمای ۴۰ °F و فشار ۲۰۰ psig انجام شد. هرچه دمای واکنش پایین‌تر باشد، ویسکوزیته محصول C-20 بیشتر خواهد بود.

پالایشگاه الدورادوی نفت آمریکا، یک کارخانه کاملاً کوچک و فرسوده در آرکانزاس^۳ بود. تنها دلیل نفت آمریکا برای عدم تعطیلی آن کارخانه، این بود که، پالایشگاه الدورادو تنها پالایشگاه نفتی بود که در آمریکا، پلی‌پروپیلن گرانبه تولید می‌کرد.

محدودیت تبرید

جک هورنر^۴، نایب رییس ۱۲ پالایشگاه نفت آمریکا، تصمیم گرفته بود که، پالایشگاه الدورادو را رها کرده و تأسیسات جدیدی برای تولید پلی‌پروپیلن گرانبه، در پالایشگاه شوکر کریک میزوری^۵ بسازد؛ مگر این که ظرفیت تولید پالایشگاه الدورادو، ۵۰٪ افزایش پیدا کند. این برنامه، به اطلاع آقای دورلند^۶، مدیر پالایشگاه الدورادو رسید. آقای دورلند از گروه مهندسان نفت آمریکا در شیکاگو، درخواست کمک کرد. این مأموریت به من، یک مهندس فرآیند تازه‌کار و جوان رسید.

^۱ تکزاکو، شرکت نفت تگزاس: Texaco

^۲ الدورادو: El Dorado

^۳ آرکانزاس: Arkansas

^۴ جک هورنر: Jack Horner

^۵ پالایشگاه شوکر کریک میزوری: Suger Creek Missouri Refinery

^۶ لری دورلند: Larri Durland

سرپرستم، بیل دووال^۱، به من دستور داد: «لیبرمن، نگاه اجمالی به پالایشگاه الدورادو بنداز و سریعاً برگرد. این کار فقط هدر دادن زمان است. دکتر هورنر^۲ می‌گوید، نمی‌توانیم بیش از ۴۰۰۰۰ هزار دلار برای توسعه کارخانه، خرج کنیم. آخرین باری که هزینه توسعه کارخانه را برآورد کردیم، ۶۰۰۰۰۰۰ دلار بود. مطمئناً نمی‌توانیم با صرف تنها ۴۰۰۰۰ دلار ۵۰٪ افزایش تولید داشته باشیم. یک بلیط هواپیمای ارزان قیمت بگیر و با اتوبوس به اوهر^۳ برو. تاکسی خیلی گران است. یادت باشد که سهمیه غذا، ۲۰ دلار در روز است!»

پالایشگاه الدورادو

من به کارخانه رسیدم و آنجا را واقعا متروکه و قدیمی یافتم. در ورودی، که از لولایش آویزان بود، با تکه‌ای زنجیر بسته شده بود. من دروازه را باز کردم و مسیر ریگی را از مقابل واحد تقطیر نفت خام^۴، واحد شکست کاتالیستی بستر سیال و واحد آلکیلاسیون بسیار فرسوده‌ای پیمودم و نهایتاً به ساختمانی بلوک سیمانی با تابلوی راهنمای «اتاق کنترل پلی‌پروپیلن» رفتم. خودم را به لس‌ری‌فورد^۵، تنها اپراتور آن جا معرفی کردم.

«آقای نورم، ظرفیت تبرید ما را دچار محدودیت کرده است. ما دمای رآکتورمان را در ۴۰ °F نگه می‌داریم. اگر دمای رآکتور از این گرم‌تر شود، ویسکوزیته پلی‌پروپیلن خیلی کاهش پیدا می‌کند و دیگر با ویسکوزیته مدنظر تکزاکو مطابقت نخواهد داشت.»

«لس، آیا نمی‌توانید سرعت کمپرسور تبرید را افزایش داده و مبرد بیشتری را به گردش دریاوردید؟»

"نه. این کمپرسوری موتور محرکه است و با سرعت ۳۶۰ rpm کار می‌کند. ما از تمام ظرفیت آن استفاده می‌کنیم. شیر پس‌ریزش^۶ مسدود شده است. من شکلی از لوپ تبرید را، به شما نشان خواهم داد (شکل ۱-۳۳ را ببینید). هیچ کار دیگری نمی‌توان کرد.»

^۱ Bill Duvall: بیل دووال

^۲ Horner: هورنر

^۳ O'hare: اوهر، فرودگاه بین‌المللی شیکاگو

^۴ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

^۵ Les Raiford: لس‌ری‌فورد

^۶ Spillback: برگشتی یا پس ریزش

ما به واحد رفتیم. لس با اشاره به رآکتور تبرید، درام مکش کمپرسور، کمپرسور گریز از مرکز، کندانسوری با هوا خنک می‌شود و درام دریافت‌کننده^۱ مبرد، گفت: «آقای نورم، این درام مبرد، از کروپ^۲ آمده است. به عنوان بخشی از غرامت پرداختی جنگ جهانی اول، در سال ۱۹۱۹ از آلمانی‌ها گرفته شده است. پدرم درباره آن به من گفت.»

«لس، از چه چیزی به عنوان مبرد استفاده می‌کنید؟»

«پروپان. آن را از جریان خروجی رآکتور پروپان‌زدا^۳ می‌گیریم. همان LPG ساده که برای اردو زدن در ظروف ۵ گالنی، می‌خرید.»

«تا به حال به استفاده از ماده دیگری هم فکر کرده‌اید؟»

«نه! کمپرسور تبرید برای استفاده از پروپان، به همراه درصد کمی از بوتان و اتان طراحی شده است.»

شهر الدورادو

تابلوی بالا میز پذیرش هتل کاملاً واضح و صریح بود:

• چک بانک‌های خارج از شهر، پذیرفته نمی‌شود؛

• کارت اعتباری پذیرفته نمی‌شود.

رستوران کناری، تابلویی دست‌نوشته داشت: «رستوران کارل^۴، محل رویارویی مردم رنگین‌پوست برای صرف غذا.»

در داخل خود پالایشگاه، بخش تعمیرات کارخانه، به چهار قسمت تقسیم می‌شد:

• لوله‌کش‌ها؛

• مکانیک‌ها؛

^۱ Receiver: دریافت‌کننده

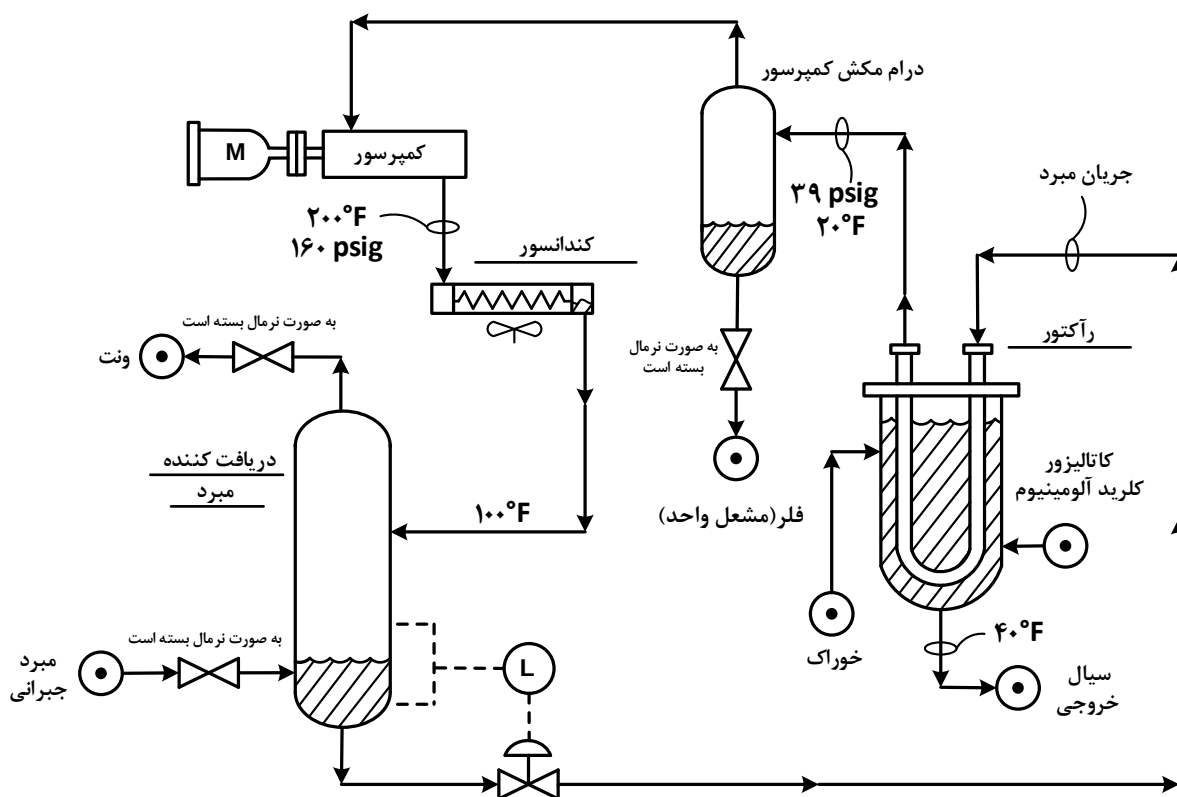
^۲ Krupp: کروپ

^۳ Depropanizer: دیپروپانایزر، جداساز پروپان، دیپروپانایزر

^۴ Carl's Diner: رستوران کارل

• برقکارها؛

• کارگران رنگین پوست.



شکل ۱-۳۳ پروپان

در واقع نفت آمریکا در سال ۱۹۶۸، عنوان «کارگران رنگین پوست» را به گروه مشخصی از شاغلان خود، اختصاص داده بود. دو مدرسه ابتدایی مخروبه وجود داشت؛ یکی برای سفیدپوستان و دیگری برای سیاهپوستان. این مدرسه‌ها در نزدیکی هم واقع شده بودند؛ اما محیطشان کاملاً از هم، جدا بود. رستوران چینی محلی، سیاهپوستان، سفیدپوستان و من را به عنوان مشتری می‌پذیرفت اما پرداخت با کارت اعتباری را قبول نمی‌کرد.

ترکیبات مبرد

من طی بازدید اولیه‌ام، با لسری‌فورد متوجه شدم که کمپرسور موتور محرکه، به مراتب پایین‌تر از نقطه FLA (یعنی حد نهایی آمپر)^۱ خود کار می‌کرد. در خانه، موتورها به دلیل گرم‌شدن بیش از حد ناشی از بار اضافی، از سرویس خارج می‌شوند.^۲ در کارخانه، موتورها زمانی از سرویس خارج می‌شوند که به بار آمپر مشخصی می‌رسند: نقطه FLA.

موتور کمپرسور مبرد، بزرگ‌تر از سایز نرمال^۳ بود. این کار ائتلاف انرژی نیست. در صورتی که بار مصرفی سایر تجهیزات تغییری نکند، دو برابر کردن اندازه موتور از ۱۰۰ به ۲۰۰ BHP، توان مصرفی را، تنها ۳٪ افزایش می‌دهد. هم‌چنین، افزایش هزینه‌های موتورها، اندک هستند.

من به عنوان یک مهندس جوان (در سال ۱۹۶۸، تنها ۲۵ سال سن داشتم) یادگرفتم که عملکرد کمپرسور توسط یکی از عوامل زیر، محدود می‌شود:

۱. توان محرکه پمپ (رانس‌گر یا پیشران)؛

۲. حجم ورودی؛

۳. حداکثر فشار خروجی.

شیر اطمینان واقع بر روی دریافت‌کننده مبرد (شکل ۳۳-۱ را ببینید)، در ۲۶۰ psig یا ۱۰۰ psi بالاتر از فشار خروجی فعلی کمپرسور، تنظیم شده بود. از آنجا که بار آمپر، خیلی پایین‌تر از نقطه FLA موتور بود، مطمئن بودم که تنها محدودیت ما، حجم ورودی کمپرسور است.

چون نیاز بود که دمای رآکتور در ۴۰ °F حفظ شود، دمای ورودی کمپرسور نیز در ۲۰ °F ثابت نگه داشته شده بود. حجم بخار متناسب است با:

۱. تعداد مول‌ها؛

^۱ Full limit Amp Load: حد نهایی آمپر

^۲ Trip-Off: از سرویس خارج شدن

^۳ Oversize: بزرگ‌تر از سایز نرمال

۲. دما ($^{\circ}\text{R}$ یا $^{\circ}\text{K}$)؛

۳. فشار (PSIA و BARA).

چون مورد شماره ۱ باید افزایش می‌یافت و مورد شماره ۲ نیز در 20°F ثابت شده بود؛ من مجبور بودم فشار ورودی کمپرسور، یعنی مورد شماره ۳ را افزایش دهم.

من غذایم را در هتل تمام کردم، صورت حساب شش دلاری را پرداخت کردم و پیاده به هتل محل اقامتم بازگشتم.

افزایش فراریت مبرد

صبح روز بعد پرسیدم: «لس، اگر واحد کراکینگ کاتالیستی^۱ در سرویس نباشد، چگونه خوراک واحد پلی‌پروپیلن را تأمین می‌کنی؟»

«آقای نورم امکان دارد یک دقیقه حواستان به صفحه کنترل باشد؟ من باید به دستشویی واحد کراکینگ کاتالیستی بروم. می‌توانید به آقای دورلند بگویید که، ما باید حتماً یک سرویس بهداشتی در واحد خودمان داشته باشیم؟»

بیست دقیقه بعد، لس توضیح داد: «من حدوداً برای دور روز پلی‌پروپیلن تولیدی از واحد کاتالیستی، ذخیره دارم. پس از آن باید پلی‌پروپیلن خالص وارد کنیم که با واگن قطار به این‌جا می‌آید. پلی‌پروپیلن کاتالیستی مخلوطی از ۶۰٪ پروپیلن و ۴۰٪ پروپان است. چیزی که ما واردات می‌کنیم، عمدتاً پروپیلن خالص به همراه مقدار اندکی اتان است. تنها نیاز است، حدود ۶۰٪ میزان خوراک معمولی، پلی‌پروپیلن خالص به کار ببریم تا به همان مقدار، پلی-پروپیلن ویسکوز، برای تک‌زاکو تولید کنیم. من واگن‌های نفتکش را در مخزن ذخیره‌سازی^۲ آن طرف، خالی می‌کنم.»

«لس، فشار داخل مخزن پلی‌پروپیلن کاتالیستی، چقدر است؟»

«حدود ۶۰ psi»

«فشار در داخل مخزن پلی‌پروپیلن خالص، چقدر است؟»

^۱ نام غیر متداول برای سیستم کراکر کاتالیستی: Cat Cracker

^۲ Storage Bullet: مخزن ذخیره‌سازی

"حدوداً ۲۲۰ psi؛ اما گاهی از این مقدار بیشتر می‌شود؛ زیرا در پروپیلن خریداری‌شده، اتان اضافی داریم. هرچه اتان بیشتر باشد فشار نیز بیشتر می‌شود. من فقط این گاز اتان اضافی را از درام رفلاکس^۱ پروپان‌زدا خارج می‌کنم. مشکل بزرگی نیست."

لس‌ری‌فورد، از میان شیشه‌جلویی اتاق قدیمی کنترل به کارگران سیاه‌پوستی چشم دوخت که بشکه‌های AICI سمی را در رآکتور یدکی، پر می‌کردند.

«آقای نورم به چه چیزی فکر می‌کنی؟ به این فکر می‌کنی که می‌توانیم از خوراک پروپیلن وارداتی استفاده کنیم؟»
«بله.»

«من و جان هنری، قبلاً به طور مفصل درباره‌ی این موضوع صحبت کرده‌ایم؛ اما نتوانستیم بفهمیم که چرا پروپیلن، مبرد بهتری نسبت به پروپان است؟»

من توضیح دادم: «مبرد بهتری نیست. فقط پروپیلنی که وارد می‌کنید ۳۷٪ فرارتر از پروپان خالص است.»

$$(67) \div (220) = 137\%$$

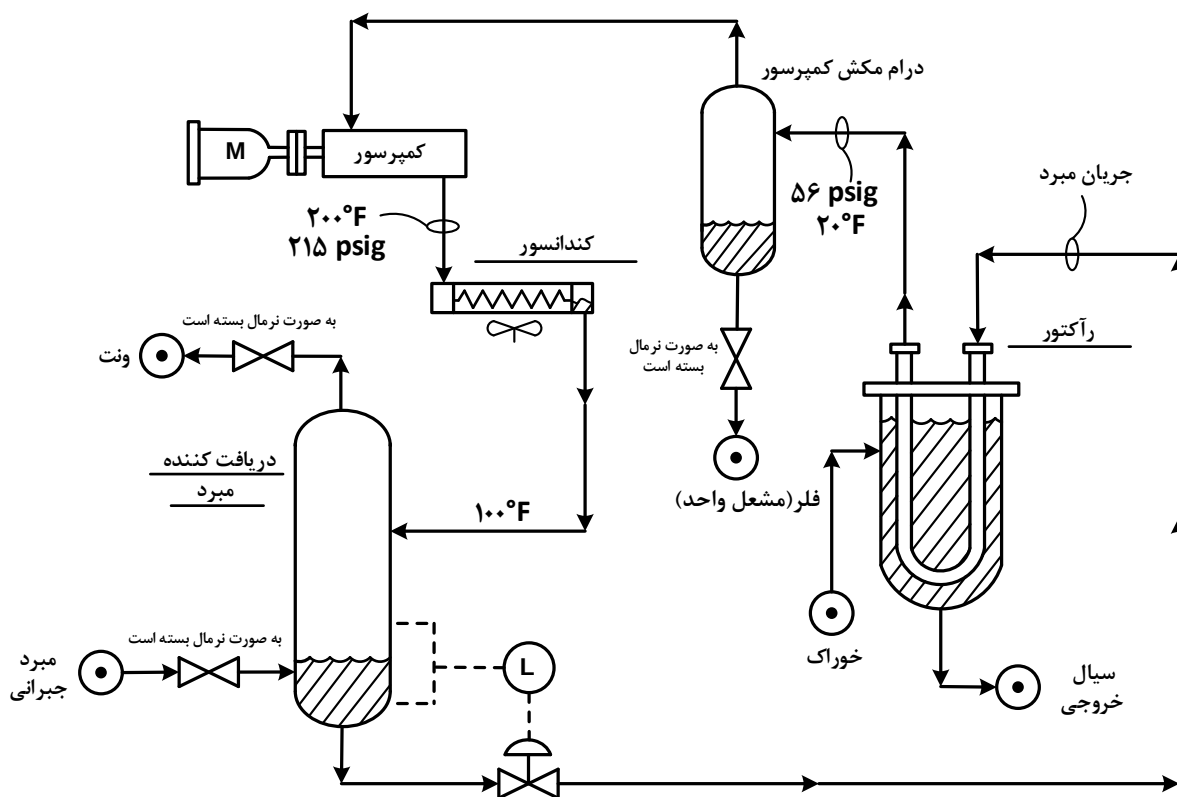
«این بدان معنی است حجم یکسانی از جریان مبرد به کمپرسور، در دمای ورودی یکسان، ۳۷٪ وزن بیشتری خواهد داشت و می‌تواند ۳۷٪ گرمای بیشتری را نیز حذف کند (توجه: من تفاوت اندک میان گرمای نهان مولی تبخیر پروپان و پروپیلن را نادیده گرفته‌ام. هم چنین فراموش کرده‌ام که این محاسبه باید در دمای ورودی کمپرسور، یعنی ۲۰ °F و نه در دمای محیط، در داخل مخازن ذخیره‌سازی، صورت گیرد. اما من ترجیح می‌دهم که این داستان را همان طور که اتفاق افتاده تعریف کنم).

«نورم، من در سال ۱۹۵۰ در خدمت ارتش و در کره^۲ بودم. من در اینچئون^۳ لندینگ جنگیدم. حالا می‌توانیم این کار را امتحان کنیم. من می‌توانم مخزن ذخیره‌سازی پروپیلن وارداتی‌مان را به خط جبرانی مبرد متصل کنم (شکل ۲-۳۳ را ببینید) و در همان زمان مبرد را به سوخت گازی ونت می‌کنم. این کار، محتوای پروپیلن مبرد در گردش را، افزایش خواهد داد.»

^۱ Reflux drum: مخزن جریان برگشتی

^۲ Korea: کره

^۳ Inchon landing: اینچئون لندینگ



شکل ۳-۲ ارتقا دادن بیشتر.

یک آزمایش ارزش هزاران محاسبه دارد

«تو در خط مقدم جنگ با اینچئون بودی؟»

«نه. گروه اول تفنگداران دریایی بودند. من جزو گروه بعدی بودم. کمونیست‌ها فوراً فرار کردند. نبرد خیلی شدید نشد.»

«بسیار خوب. اجازه بده آهسته عمل کنیم. من فشار ورودی کمپرسور را زیر نظر می‌گیرم. دمای رآکتور را نیز ثابت نگه می‌داریم. اگر بتوانیم فشار ورودی کمپرسور را تا چند پوند در ساعت افزایش دهیم، فرضیه من تایید می‌شود.»

«اگر این کار موثر بود موضوع سرویس بهداشتی واحد ما را فراموش نکن. نورم، من درباره فشار تخلیه کمپرسور نیز فکر می‌کنم. حالا نه، اکنون بهار است؛ اما در آرکانزاس جنوبی روزهایی داریم که دما به ۱۰۰ °F می‌رسد. ممکن است خنک‌کننده هوایی خروجی کمپرسور ما، در چگالش این مقدار مبرد پروپیلن، با مشکل مواجه شود.»

محدودیت‌های کندانسور

«لس آیا می‌دانی کولر آبی^۱ چیست؟»

«البته که می‌دانم. زمانی که آب تمیز را به صورت قطرات ریز، در هوا اسپری می‌کنی. آب تبخیر شده و هوا را مثلاً تا حدود ۱۰ °F، خنک می‌کند.»

«بسیار خوب. ما می‌توانیم تعدادی نازل مه‌پاش، از وال‌مارت^۲ خریداری کنیم (شکل ۳-۳۳ را ببینید) و آن‌ها را حدود سه فوت عقب‌تر از فن‌های خنک‌کننده هوایی مکش اجباری، نصب کنیم؛ نه برای خیس‌شدن پره‌های روی لوله‌ها، بلکه برای مرطوب و خنک کردن هوا.»

«نمی‌دانم. به ده‌ها افشانک، نیاز خواهی داشت و با هزینه لوله‌های PVC و شیرها و استخدام افرادی برای نصب کردنشان، ممکن است مجبور باشی به راحتی ۵۰۰ دلار خرج کنی.»

«نگران نباش. من ۴۰۰۰۰ دلار بودجه برای این کار در اختیار دارم. دکتر هورنر، نایب رییس، قبلاً این هزینه را متقبل شده است.»

بیرون کشیدن مبرد^۳

«نورم. یکی از مشکلات ما، بیرون کشیدن مبرد از تبخیرکننده‌مان است. مایع به داخل درام مکش کمپرسور تراوش می‌کند که ما آن را به سمت مشعل واحد، تخلیه می‌کنیم. در نرخ‌های بالاتری که شما در حال برنامه‌ریزی آن هستید، احتمالاً این موضوع تبدیل به مشکل بزرگی خواهد شد.»

«خیلی خوب. از آنجا که درام مکش کمپرسور اندکی بالاتر از رآکتور قرار گرفته است، می‌توانیم این مبرد را دوباره به داخل تبخیرکننده، برگردانیم؟»

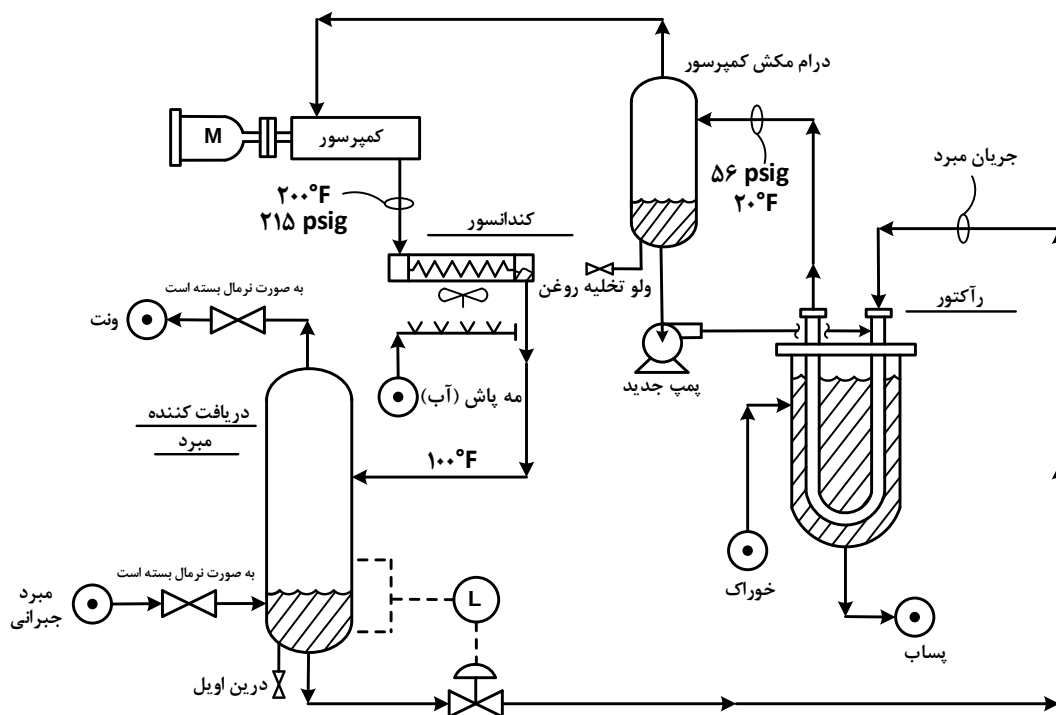
«نه. برای این کار ارتفاع درام، به اندازه کافی زیاد نیست.»

^۱ کولر آبی: swamp cooler

^۲ Walmart: وال‌مارت

^۳ Refrigerant Carry-over: بیرون کشیده شدن مبرد

«بسیار خوب. پس یک پمپ کوچک جدید، نصب می‌کنیم. فراموش نکن که من ۴۰۰۰۰ دلار برای این کار در اختیار دارم (این واقعه مربوط به سال ۱۹۶۸ است. از آن زمان، قیمت پمپ ده برابر افزایش پیدا کرده است).»



شکل ۳-۳۳ ارتقا دادن موارد دیگر.

رسوب‌گرفتگی

«نورم، مشکل دیگری که داریم، رسوب‌گرفتن قسمت خارجی لوله‌ها در تبخیرکننده و قسمت داخلی لوله‌ها در کندانسوری‌ست که با هوا خنک می‌شود.^۱ من شرط می‌بندم که این اتفاق، تأثیر بدی بر روی راندمان انتقال حرارت هر دو مبدل‌ها دارد.»

من پرسیدم: «رسوب‌گرفتگی؟ نباید این طور باشد! مبرد کاملاً تمیز است.»

^۱ کندانسورهایی که با هوا خنک می‌شوند: Air cooled condenser

«آقای نورم، در واقع این روغن روانساز کمپرسور است که به داخل LPG در حال گردش نشت کرده و باعث رسوب گرفتگی می‌شود. در واقع لوله‌ها را با روغن می‌پوشاند.»

«من قبلاً این مشکل را دیده‌ام. اجازه بده تنها دو شیر تخلیه در پایین مخزن ورودی کمپرسور و دریافت‌کننده مبرد نصب کنیم (شکل ۳۳-۳). این دو شیر را یک بار در هفته یا یک بار در روز باز کنید تا روغن روان‌ساز، از مبرد خارج شود. این همان کاری‌ست که فیلتر (صافی) نصب‌شده، بر روی جریان فریون سیستم تهویه مطبوع منزلتان در خط خروجی کمپرسور انجام می‌دهد.»

مبرد اجباری

حدود ۴ ماه پس از پیاده‌سازی تغییرات نشان داده شده در شکل ۳۳-۳، نوئل^۱، مهندس واحد FCU، پیشنهاد داد، پمپی که من نصب کرده بودم تا مبرد مایع را از مخزن ورودی کمپرسور خارج کند، می‌تواند به طور مداوم کار کند تا مارپیچ (کوئل) خنک‌کننده رآکتور از حالت جریان مبرد یکبار گردش، به گردش اجباری تبدیل شود.

من به الدورادو برگشتم تا ایده نوئل را امتحان کنم. من به جای تبخیرکردن بیش از ۹۹٪ مبرد، نرخ گردش را طوری تنظیم کردم تا تنها نیمی از مبرد تبخیر شود. من محاسبه کردم که ضریب انتقال حرارت (یعنی U) تجهیز خنک‌کننده رآکتور از ۶۰ به $90 \text{ btu/h/ft}^2/\text{°F}$ افزایش یافته است. این اتفاق منجر به افزایش ۲۰ درصدی در تولید پلی‌پروپیلن ویسکوز شد.

من به ایده نوئل اعتماد نداشتم و ارزشی برای آن قائل نبودم. من هنوز هم طرفدار گردش اجباری برای کاهش درصد تبخیر در ریبویلرها و تبخیرکننده‌ها هستم و هنوز هم ایده‌های دیگران را تا زمانی که موثر باشند، تحسین و تشویق می‌کنم.

^۱ نوئل: Noel

نتیجه

تغییراتی که من توضیح دادم در طی سه ماه ایجاد شد. تولید پلی پروپیلن و سیکوز ۴۰٪ افزایش پیدا کرد. پسر لس ری فورد، که در LSU مشغول تحصیل مهندسی شیمی بود، با من تماس گرفت تا به من برای موفقیت در پروژه، تبریک بگوید.

یک سال بعد، دکتر هورنر، نایب رییس پالایشگاه، تصمیم به تعطیلی پالایشگاه الدورادو گرفت. تمام اپراتورها، سفیدپوست و سیاه پوست، بدون هیچ گونه تبعیضی ترخیص شدند.

لری دورلند، مدیر کارخانه الدورادو، ترفیع گرفت و به مدیریت پالایشگاه نگزاس سیتی با ظرفیت ۳۶۰۰۰۰ BSD منصوب شد. او در سال ۱۹۷۸ بازنشسته شد.

یک واحد پلی پروپیلن و سیکوز دیگر، که من آن را طراحی کرده بودم، در پالایشگاه نفت آمریکا در شوگر کریک میزوری احداث شد. اما تکزاکو چند ماه بعد، استفاده از این افزودنی، در بنزین تولیدی خود را متوقف کرد. پالایشگاه شوگر کریک نیز مدتی بعد از آن، به حال خود رها شد.

و من نگارنده این داستان واقعی، تا سال ۱۹۸۰ در نفت آمریکا شاغل بودم. من به خاطر ایده ام برای بهینه سازی ترکیب مبرد پلی پروپیلن، پاداش یا ترفیعی دریافت نکردم. اما شاید من پاداشم را گرفته باشم؛ ولی نه از شرکت نفت آمریکا. اسامی این داستان برای حفاظت از مقصر، بدون تغییر بازگو شده اند.



کمپرسورهای رفت و برگشتی

چکیده:

کمپرسور رفت و برگشتی، ماشینی با جابجایی مثبت است. پیستون، فشار گاز را افزایش می‌دهد. در ورودی و خروجی کمپرسور، سوپاپ‌های یک‌طرفه‌ای هستند که توسط فنر باز و بسته می‌شوند که هم در قسمت انتهایی سیلندر (موسوم به سرسیلندر) و هم در انتهای سیلندر که نزدیک میل‌لنگ است، قرار دارند.

در سرسیلندر، معمولاً یک پاکت بی‌بارکننده قابل تنظیم^۱ وجود دارد که روشی مطلوب برای تنظیم ظرفیت کمپرسور است. بستن شیر بی‌بارکننده سرسیلندر، دبی حجمی گاز عبوری از طریق سیلندر کمپرسور رفت و برگشتی را افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی:

پیستون؛ شیر؛ سرسیلندر؛ Crank-end^۲؛ نقطه مرگ بالایی؛ نقطه مرگ پائینی؛ بی‌بارکننده؛ فضای لقی

^۱ Adjustable unloader pocket: پاکت بی‌بارکننده قابل تنظیم

^۲ Crank-end: سمتی از سیلندر که نزدیک میل‌لنگ قرار دارد.

من در میادین گازی در لاریدو^۱ تگزاس، برای گود هوپ انرژی^۲، دومین تولیدکننده بزرگ گاز طبیعی در دهه ۱۹۸۰ بعد از اکسان^۳ کار می‌کردم. من مستقیماً به جک استنلی، مالک گود هوپ گزارش می‌دادم. جک شخصاً و به تنهایی مالک گود هوپ انرژی بود.

«نورمن به ایستگاه متراکم‌سازی ما در لاریدو برو. جریان گاز به اگوا دولس^۴ پایین است. گاز با قیمت ۶/۰۰ دلار به ازای هر میلیون BTU فروخته می‌شود. شمال سرد است و تقاضا و قیمت به اوج رسیده است. باید از این فرصت نهایت استفاده را ببریم. با خوان هرناندز^۵ همراه شو. او در فرودگاه، به دنبال تو خواهد آمد. باید به حاشیه شهرستان-های زاپاتا^۶ و وب^۷ بروید. سرعت کمپرسورهای رفت و برگشتی را افزایش بده تا گاز بیشتری پمپاژ شود. همین حالا برو؛ لیبرمن.»

«آقای استنلی این کار به این سادگی نیست. کمپرسورهای رفت و برگشتی، مشخصات پیچیده‌ای دارند و نواقص متعددی ممکن است باعث این مشکل شده باشد. من کتابی درباره همین موضوع نوشته‌ام که توسط پن‌ول^۸ چاپ شده است. دوست دارید در این باره توضیح بدهم؟»

«نه. وقتی برگشتی، برایم توضیح بده.»

فاصله آزاد حجمی اولیه^۹

هنگامی که سوار کامیون شرکت در فرودگاه شدم گفتم: «خوان امروز هوا خیلی سرد است.»

"بله آقای نورم. سرما، بسیاری از کمپرسورهای رفت و برگشتی میدان گازی ما را، از کار انداخته است. گاز مرطوب، خط ورودی^{۱۰} سوخت گازی را منجمد کرده است. فاجعه بدی است! خطوط سوخت، مملو از یخ هستند.»

^۱ Laredo: لاریدو

^۲ Good Hope Energy: گود هوپ انرژی

^۳ Exxon: اکسان

^۴ Aqua Dulce: اگوا دولس

^۵ Juan Hernandez: خوان هرناندز

^۶ Zapata: زاپاتا

^۷ Webb: وب

^۸ PennWell: پن‌ول

^۹ Starting volumetric clearance: فاصله آزاد حجمی اولیه، فضای بین پیستون و سرسیلندر در انتهای استروک یک کمپرسور رفت و گشتی

^{۱۰} Supply: ورودی

«دقیقاً نه. خطوط با هیدرات‌های گاز طبیعی مسدود شده‌اند که در دمایی به مراتب بالاتر از نقطه انجماد آب، تشکیل می‌شوند. ما خطوط را تمیز خواهیم کرد. اما نگرانی من در خصوص صفحه‌های شکسته شده سوپاپ و مهم‌تر از آن، زیادبودن «فاصله آزاد حجمی اولیه»^۱ میان پیستون و سرسیلندر، در «نقطه مرگ بالا»^۲ است.»

«دوست من این «فاصله آزاد حجمی اولیه» که گفתי، به چه معناست؟ من متوجه نمی‌شوم.»

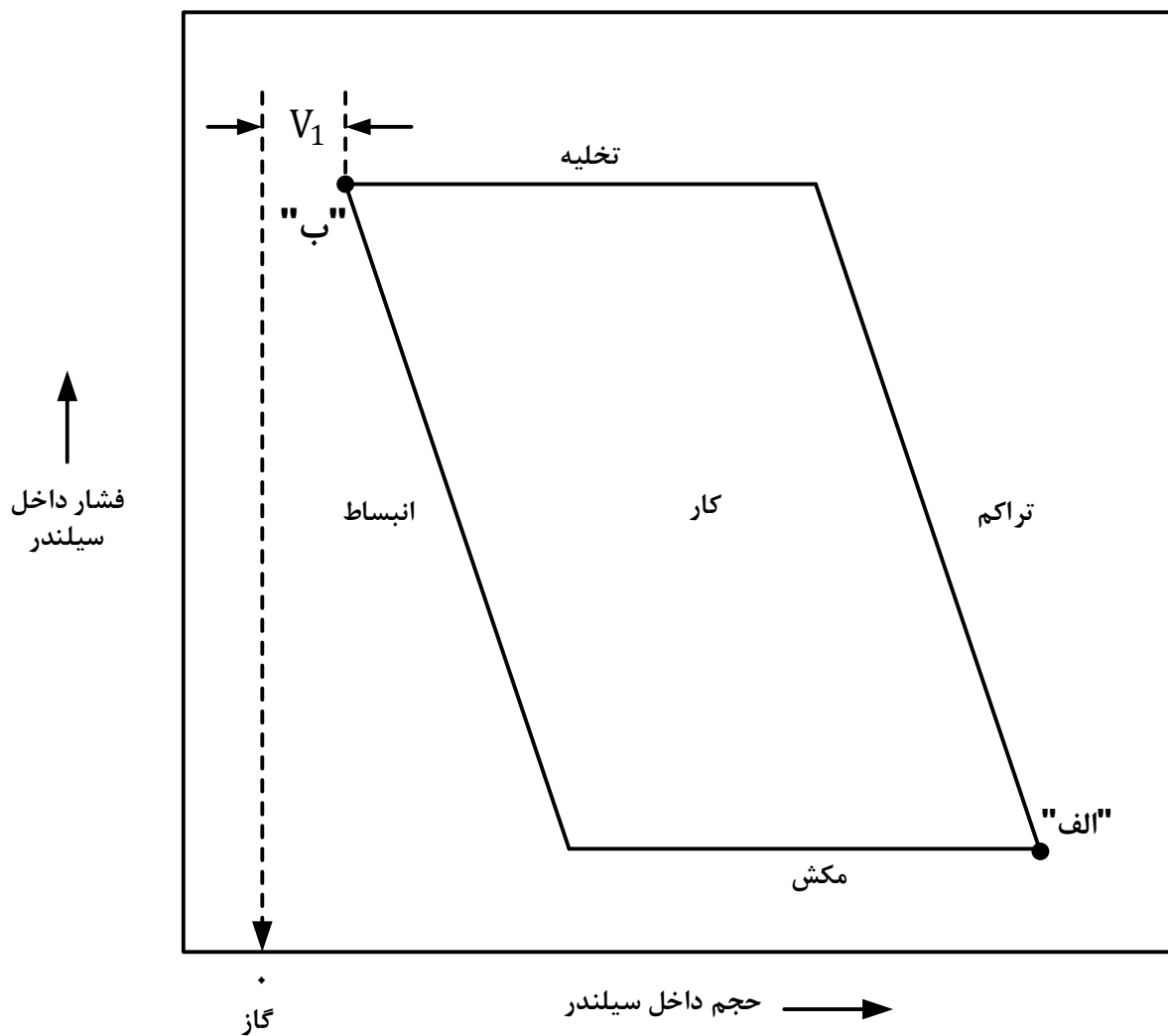
«برو به سمت ایستگاه متراکم‌سازی هبرانویل^۳ تا من هم طرز کار کمپرسورهای رفت و برگشتی را برایت توضیح دهم. تو رانندگی کن و من هم صحبت می‌کنم. برای درک اهمیت حیاتی فاصله آزاد حجمی اولیه در کمپرسور رفت و برگشتی، ابتدا باید درباره چرخه کارنو توضیحاتی بدهم.»

«بله بله. پروفیسور، کارنو بسیار حائز اهمیت است.»

^۱ Starting volumetric clearance: فضای لقی اولیه، فاصله آزاد حجمی اولیه، فضای بین پیستون و سرسیلندر در انتهای استروک کمپرسور رفت- وگشتی

^۲ Top Dead Center: نقطه مرگ بالا

^۳ Hebronville Compression Station: ایستگاه متراکم‌سازی هبرانویل



شکل ۱-۳۴ چرخه کارنو؛ V_1 نشان دهنده فاصله آزاد حجمی اولیه است.

چرخه کارنو

شکل ۱-۳۴ منحنی چرخه کارنو، تئوری کار تراکمی است. محور عمودی، نشان دهنده فشار گاز درون سیلندر است. محور افقی نیز نمایانگر حجم گاز درون سیلندر است. مساحت محصور توسط منحنی، کار (فشار-حجم) یا کار تراکم نظری، نامیده می شود.

شکل ۲-۳۴ نمایی ساده از یک کمپرسور رفت و برگشتی است. من در بحثم در خصوص چگونگی ارتباط حرکت های پیستون به چرخه کارنو، از چند فرض ساده استفاده خواهیم کرد:

۱. کمپرسورهای رفت و برگشتی، کمپرسورهای دو طرفه^۱ ای هستند. گاز ضمن حرکت پیستون، به سمت سرسیلندر و همچنین حرکت پیستون به سمت Crank-end، توسط پیستون فشرده می‌شود. من برای ساده‌سازی، فشرده‌سازی انتهای میل‌لنگ^۲ را نادیده می‌گیرم (ولوها را فقط در سمت سرسیلندر نشان می‌دهم).

۲. من همچنین از نشت گاز در اطراف حلقه‌های پیستون و در اطراف سوپاپ‌ها و نیز سایر نواقص مکانیکی صرف نظر می‌کنم. کمپرسورهای رفت و برگشتی در عمل در معرض نواقص مکانیکی زیادی هستند که اغلب بسیار قابل توجه‌اند.

۳. من تلفات اصطکاکی و نوسانات یا ارتعاشات شیر^۳ را نیز نادیده می‌گیرم که اغلب، بسیار چشمگیر هستند [۵].

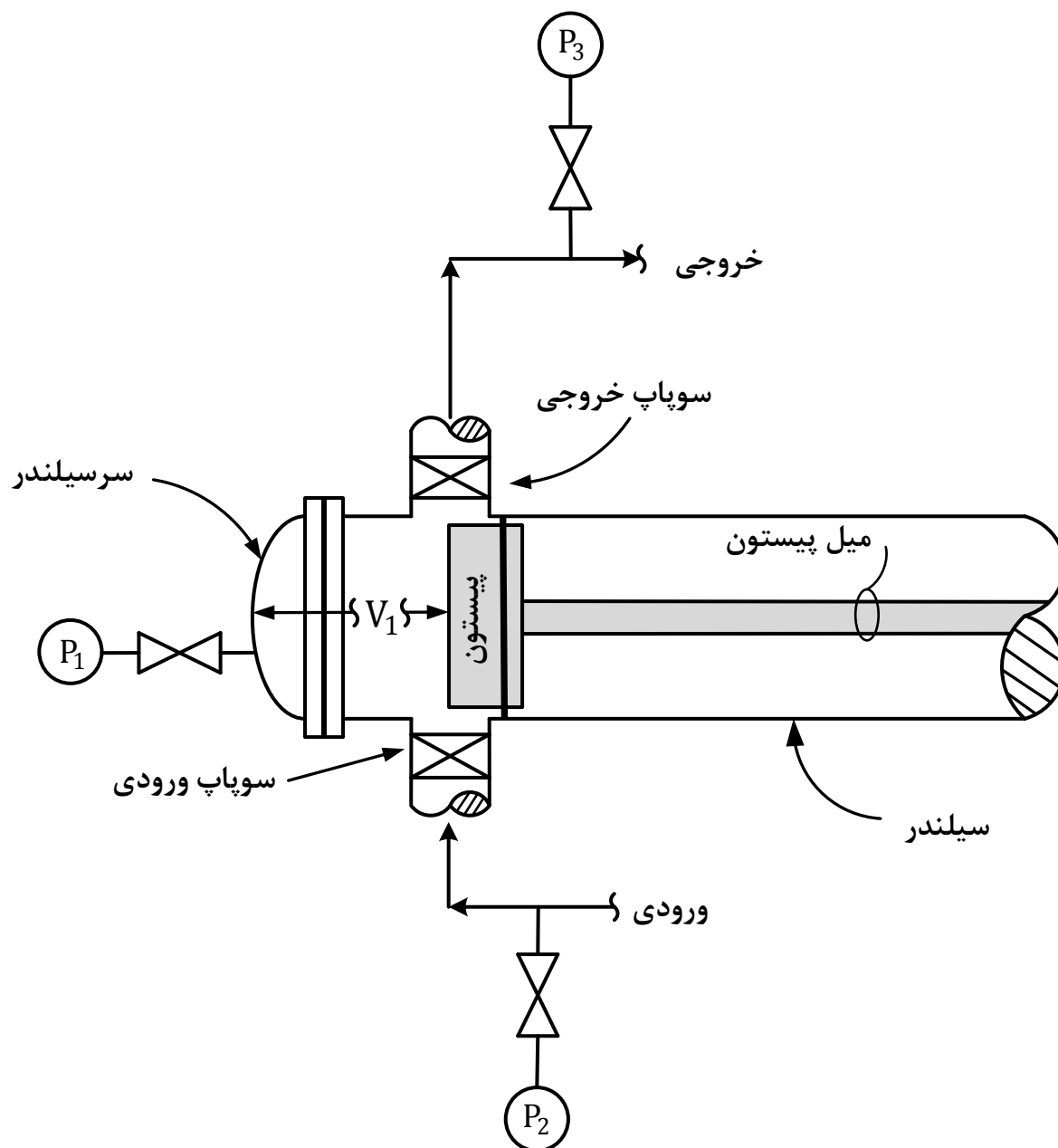
بیا با نگاه کردن به شکل ۲-۳۴ قسمت‌های مختلف کمپرسور رفت و برگشتی را شرح دهیم:

• **پیستون:** درون سیلندر به عقب و جلو حرکت می‌کند. توسط میل‌پیستون به حرکت در می‌آید. برای جلوگیری از نشت گاز بین پیستون و سیلندر، یک حلقه پیستون وجود دارد. درست مانند موتور اتومبیل شما.

^۱ Double-Acting: دو طرفه، دو اثره، دو نوبتی

^۲ Crank-end: انتهایی از سیلندر که به میل‌لنگ نزدیک است

^۳ Pulsation: نوسان یا ارتعاش ولو



شکل ۳۴-۲ اجزای کمپرسور رفت و برگشتی.

- شیرها: سوپاپ‌های یک‌طرفه‌ای^۱ هستند که، توسط فنر باز و بسته می‌شوند.^۲ آن‌ها توسط اختلاف فشار گاز، از حالت بسته به باز و از حالت باز به بسته تغییر وضعیت می‌دهند. فنرها به صفحه‌ها فشار وارد می‌کنند.

^۱ Check valve: شیر یکطرفه

^۲ spring-loaded valve: سوپاپ‌هایی که توسط فنر باز و بسته می‌شوند

اگر فشار گاز درون سیلندر، بیشتر از فشار خط ورودی باشد، صفحه سوپاپ ورودی^۱ توسط فشار گاز به وضعیت بسته، در می آید.

اگر فشار گاز در داخل سیلندر، کمتر از فشار خط خروجی باشد، آنگاه صفحه سوپاپ خروجی توسط فشار گاز به وضعیت بسته، در می آید.

بیا به شکل ۱-۳۴ مراجعه کنیم. نقطه «الف» هنگامی است که پیستون، تا آنجا که می تواند درون سیلندر به عقب رفته باشد. این نقطه «الف» را «نقطه مرگ پایین»^۲ می نامیم. در این نقطه، حجم گاز درون سیلندر (یعنی محور افقی منحنی چرخه کارنو) بیشینه است.

اکنون پیستون توسط میل پیستون به سمت سرسیلندر، رانده می شود. هر دو سوپاپ ورودی و خروجی بسته باقی می ماند؛ زیرا فشار گاز درون سیلندر در $P - 1$ ، که من در شکل ۲-۳۴ نشان داده ام، بیشتر از فشار $P - 2$ (ورودی) و کمتر از فشار $P - 3$ (خروجی) است.

با حرکت پیستون به سمت سرسیلندر و فشرده کردن گاز:

a. فشار گاز درون سیلندر در $P - 1$ بالا می رود. به همین دلیل است که این بخش از چرخه کارنو، تراکم نامیده می شود.

b. مقدار گاز درون سیلندر ثابت باقی می ماند؛ اما، حجم آن کاهش پیدا می کند.

c. گاز گرم تر می شود؛ زیرا پیستون در حال انجام دادن کار تراکم، بر روی گاز است.

فاصله آزاد حجمی اولیه

نکته اصلی بحث من این است. پیستون قبل از عبور از نازل خروجی سیلندر، از حرکت می ایستد.

پیستون نسبتاً طویل است. معمولاً بین ۶ تا ۸ اینچ طول دارد. اگر پیستون بیش از حد حرکت کند و از $1/3$ قطر دهانه باز تخلیه عبور کند، نازل خروجی مسدود می شود. بنابراین پیستون حدوداً در فاصله $1/3$ قطر نازل خروجی،

^۱ Valve plate: صفحه شیر

^۲ Bottom Dead Center: نقطه مرگ پایین

از حرکت باز می‌ایستد. این نقطه، همان نقطه «ب» در منحنی چرخه کارنوی من است (شکل ۳۴-۱) و «نقطه مرگ بالایی» نامیده می‌شود. حجم گاز به دام افتاده میان پیستون و سرسیلندر در نقطه مرگ بالا، فاصله آزاد حجمی اولیه، نامیده می‌شود. این حجم گاز، مقدار «راندمان تراکم حجمی»^۱ کمپرسورهای رفت و برگشتی را تعیین می‌کند و به همین علت حائز اهمیت است. راندمان حجمی معیاریست تا بدانیم که، کمپرسور به ازای هر حرکت پیستون، چقدر فشرده می‌شود.

طی بخش تراکم چرخه کارنو، هر دو سوپاپ‌های ورودی و خروجی نشان داده شده در شکل ۳۴-۲ بسته هستند. وقتی فشار در $P - 1$ ، یعنی فشار گاز درون سیلندر، به فشار خط خروجی در $P - 3$ می‌رسد، خروجی باز می‌شود (شکل ۳۴-۲ را ببینید). پیستون همچنان به حرکت خود به سمت سرسیلندر ادامه می‌دهد. اما اکنون فشار درون سیلندر ثابت باقی می‌ماند (یعنی فشار در $P - 1$). گاز توسط پیستون و از طریق سوپاپ خروجی، از سیلندر به بیرون و به درون خط خروجی رانده می‌شود.

این مرحله در چرخه کارنو بخش تخلیه نامیده می‌شود. طی این بخش از چرخه:

• سوپاپ ورودی بسته است؛

• فشارها در $P - 1$ و $P - 3$ یکسان هستند.

در واقع حرکت پیستون از نقطه مرگ پایین^۲ تا نقطه مرگ بالا^۳، تنها کسری از ثانیه طول می‌کشد.

سوپاپ‌های کمپرسور رفت و برگشتی

خوان پرسید: «آقای نورم لطفاً قبل از توضیح بیشتر به من بگویید این سوپاپ‌هایی که مدام درباره‌شان حرف می‌زنید چه هستند؟ آیا نوعی شیر هستند که درون سیلندر کمپرسور رفت و برگشتی وجود دارند؟ چگونه کار می‌کنند؟ چه کاری باید انجام دهند؟ قبل از صحبت بیشتر درباره پرفسور کارنو و چرخه او لطفاً درباره این سوپاپ‌ها توضیح دهید.»

^۱ Rاندمان تراکم حجمی: Volumetric Compression Efficiency

^۲ Bottom dead center: نقطه مرگ پائین

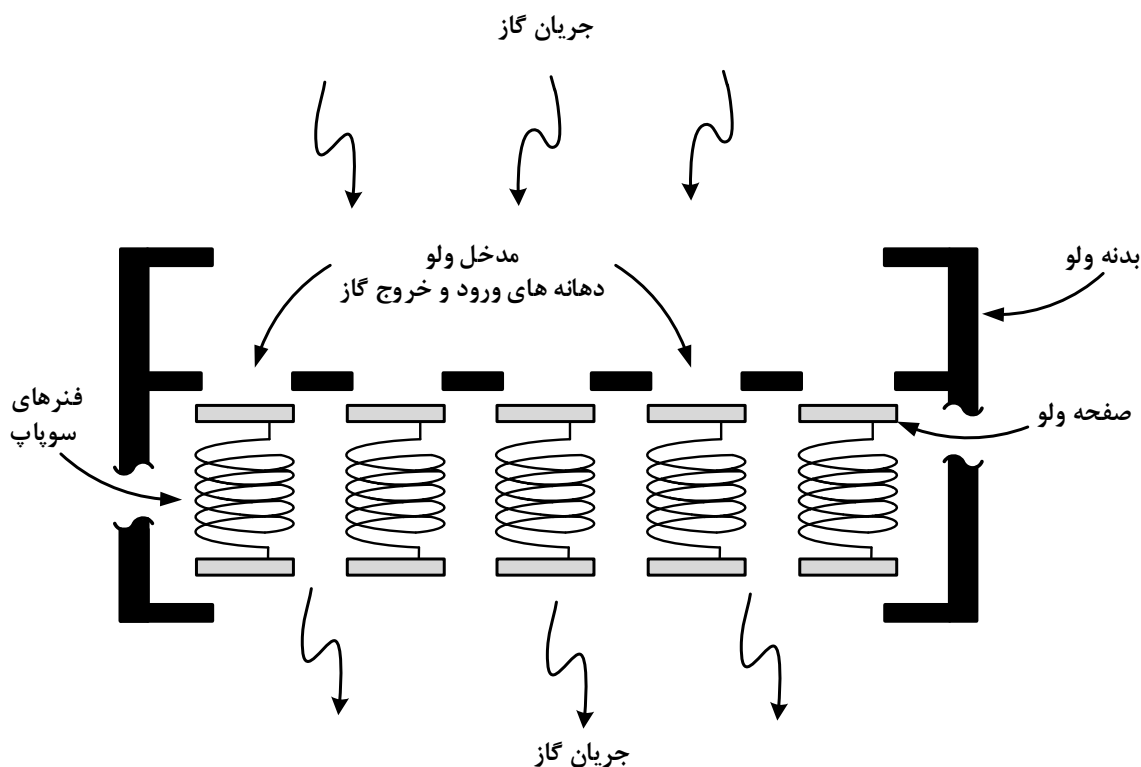
^۳ Top dead center: نقطه مرگ بالا

«بسیار خوب. اجازه بده نگاهی به شکل ۳-۳۴ بیندازیم. یک شیر معمولی، استوانه‌ای گرد و سنگین است. شاید حدود ۶ اینچ طول و در حدود ۴ الی ۸ اینچ عرض داشته باشد. درون شیر دو صفحه وجود دارد. یکی از این صفحه‌ها توسط فنرها به حرکت در می‌آید و دیگری ثابت است. وقتی این دو صفحه، توسط فنرها به سمت یکدیگر رانده می‌شوند، سوپاپ بسته است و جریان گاز متوقف می‌شود. اگر فشار گاز در بالای سوپاپ نشان داده شده در شکل ۳-۳۴ بیشتر از فشار گاز در زیر سوپاپ باشد، آنگاه صفحه به پایین هل داده می‌شود. اکنون گاز می‌تواند از طریق دریچه‌ها جریان پیدا کند و سوپاپ نیز باز است. این همان سوپاپ خروجی است.»

«اگر این سوپاپ را 180° بچرخانیم شبیه سوپاپ ورودی می‌شود.»

«بسیار عالی. حالا متوجه شدم. حالا پس از اینکه پیستون به موقعیت خود در نقطه مرگ بالا رسید، چه اتفاقی در درون سیلندر می‌افتد؟»

«بله خوان. ضمن اینکه تو شکل ۲-۳۴ را بررسی می‌کنی. من هم به توضیح، درباره چرخه کارنو ادامه خواهم داد.»



شکل ۳-۳۴ اجزای سوپاپ خروجی کمپرسور رفت و برگشتی. فشار گاز بر کشش فنر غلبه کرده، صفحه سوپاپ را به پایین هل می‌دهد و سوپاپ را باز می‌کند. جهت سوپاپ ورودی برعکس است. این شکل نمایشی از فرآیند است و نه توصیفی مکانیکی.

انبساط گاز

فشار گاز طبیعی به دام افتاده بین سرسیلندر و پیستون در نقطه «B»، برابر با فشار گاز در خط خروجی است. هنگامی که پیستون حرکت خود را معکوس کرده و شروع به حرکت به سمت نقطه «A» (نقطه مرگ پایین) می‌کند، فشار گاز درون سیلندر، شروع به کاهش کرده و سوپاپ خروجی (شکل ۳۴-۲) بسته خواهد شد. سوپاپ ورودی بسته باقی می‌ماند.

«بله می‌فهمم آقای نورم! هر دو سوپاپ بسته هستند؛ زیرا هنگامی که گاز به دام افتاده، در فاصله آزاد حجمی اولیه منبسط می‌شود، فشار در $P - 1$ بیشتر از $P - 2$ (خط مکش) و کمتر از $P - 3$ (خط تخلیه) است.»

«درست است. گاز با عقب‌نشینی کردن پیستون به انبساط ادامه می‌دهد تا زمانی که فشار گاز داخل سیلندر تا فشار خط ورودی، کاهش پیدا کند. این مرحله همان بخش انبساط چرخه کارنو است (شکل ۳۴-۱). اکنون فشار در $P - 1$ برابر با فشار در $P - 2$ است.»

«خوان توجه داشته باش که هر چه فاصله آزاد حجمی اولیه بیشتر باشد، باید گاز بیشتری قبل از این که فشار داخل سیلندر با فشار خط ورودی برابر شود، انبساط یابد. بدیهی‌ست تا زمانی که، فشار در $P - 1$ به اندازه فشار در $P - 2$ کاهش پیدا نکند، گاز جدیدی نمی‌تواند وارد سیلندر شود. بنابراین افزایش فاصله آزاد حجمی اولیه در داخل سرسیلندر (شکل ۳۴-۲) میزان گاز متراکم‌شده توسط کمپرسور رفت و برگشتی را کاهش خواهد داد.»

مکش

«با کاهش فشار گاز درون سیلندر به فشار خط ورودی، سوپاپ ورودی کمپرسور (که در شکل ۳۴-۳ نشان داده شده) توسط فنرها باز می‌شود. اکنون گاز جدید از سرچاه به داخل کمپرسور جریان پیدا می‌یابد. جریان یافتن گاز ادامه می‌یابد تا زمانی که پیستون به موقعیت اولیه خود در نقطه مرگ پایینی (نقطه «A» در شکل ۳۴-۱) عقب‌نشینی کند.»

«به محض این که پیستون حرکت مجدد خود را به سمت سرسیلندر آغاز کند، فنر سوپاپ ورودی بسته می‌شود. سوپاپ خروجی نیز همچنان بسته است.»

«نورم، آیا مساحت سایه‌خورده بر روی نمودار نام خاصی دارد؟»

«بله خوان این مساحت به یکی از نام‌های زیر خوانده می‌شود:

- کار تراکمی ایده‌آل؛
- کار PV (فشار-حجم)؛
- کار چرخه کارنو.»

«اما یک سوال دارم؛ نورم. از آنجا که برخی از کمپرسورهای سرچاهی ما با موتورهای الکتریکی و در دور-ثابت، کار می‌کنند، اگر گاز بیشتری را پمپ کنند، چگونه ظرفیت‌شان را کاهش خواهیم داد؟»

«خوان، در انتهای عقبی سرسیلندر، جایی که فشارسنج قرار دارد، پیچ این فشارسنج را باز می‌کنیم. سپس بطری یک لیتری فولادی را از داخل کامیون برمی‌داریم. آن را در اتصال ۱/۵ اینچی موجود بر روی سرسیلندر می‌چرخانیم. این کار فاصله آزاد حجمی اولیه را به اندازه یک لیتر، افزایش می‌دهد. افزایش فاصله آزاد حجمی اولیه به اندازه یک لیتر، ظرفیت کمپرسور را کاهش خواهد داد.»

«نورم، پس برای افزایش ظرفیت کمپرسور و پمپاژ گاز بیشتر، برای آقای استنلی، باید «محفظه تنظیم‌کننده فاصله آزاد سر سیلندر»^۱ را با چرخاندن دسته شیر در خلاف جهت عقربه‌های ساعت ببندم. این کار فاصله آزاد حجمی اولیه را کاهش داده و راندمان حجمی^۲ کمپرسور رفت و برگشتی را افزایش خواهد داد.»

«کاملاً درست است دوست من.»

دلایل ناکارآمدی تراکم

«خوان لازم است بگوییم که مشکلات زیادی در ارتباط با سوپاپ‌ها وجود دارد که عملکرد واقعی‌شان را کاهش می‌دهد؛ مانند:

- تلفات سرعت سوپاپ (اصطکاک)؛

^۱ Adjustable Head End Clearance Pockets: پاکت تنظیم‌کننده فاصله آزاد سر سیلندر

^۲ Volumetric efficiency: راندمان حجمی، مقیاسی از حجم گاز جابجا شده در هر استروک یک کمپرسور رفت و برگشتی

• مشکلات نوسان یا ارتعاش سوپاپ^۱؛

• نشستی سوپاپ؛

• شکستن صفحات سوپاپ؛

• نیروی کششی بیش از حد فنر؛

• حلقه‌های پیستون نامناسب.»

«این مشکلات به بهترین نحو با اعمال «کارت نمایشگر»^۲ یا «اسکن بتا»^۳ شناسایی می‌شوند. من کتابی دربارهٔ این موضوع با عنوان «عیب‌یابی فرآوری گاز طبیعی»^۴ نوشته‌ام که، توسط پن‌ول^۵ به چاپ رسیده است. دوست داری یک جلد از این کتاب را بخری خوان؟»

«نه آقای نورم.»

عزیمت به خانه

من به مدت دو روز با خوان، مشغول کار در میدین گازی شهرستان‌های زاپاتا و وب بودم. هیدرات‌های یخ در خطوط سوخت گازی کمپرسور منجمد شده بودند. من و خوان خطوط $3/4$ اینچی خط ورودی گاز را از چاه جدا کردیم تا بلورهای یخ^۶ را بیرون برانیم و کمپرسورها را مجدداً، به کار بیندازیم.

در یکی از چاه‌ها، بلورهای یخ، ناگهان با فشار ۴۰۰ psig از لولهٔ جداشده به بیرون پرتاب شدند. من دیدم که بلورهای یخ، بدون این که آسیبی برسانند، از جلوی صورتم عبور کردند.

^۱ Pulsation: نوسان یا ارتعاش ولو

^۲ Indicator Card: کارت نمایشگر

^۳ Beta Scan: اسکن بتا

^۴ Troubleshooting Natural Gas Processing: عیب‌یابی فرآوری گاز طبیعی

^۵ Pennwell: پن‌ول

^۶ Ice plug: بلور یخ

اما بعد از آن، یک لوله فولادی به طول ۱۰ فوت و از خط $3/4$ اینچی، با نیروی زیادی به پاهایم برخورد کرد. من به شدت آسیب دیدم. خوان مرا به بیمارستانی در لاریدو رساند. روز بعد در حالی که روی ویلچر بودم به فرودگاه رفتیم و من با پرواز به خانه‌ام در نیواورلئان برگشتم؛ اما پس از آن، جریان گاز حدود ۱۰٪ افزایش یافت.

یک هفته بعد سر کارم برگشتم و آقای استنلی اینگونه به من خوش آمد گفت: «لیبرمن کجا بودی؟ آیا در لاریدو با دختری ملاقات کردی؟ انتظار نداشته باش، بابت زمانی که صرف مهمانی رفتن کردی، به تو حقوق بدهم. بهتر است به «ایستگاه متراکم‌سازی هبرانزویل» برگردی. در آنجا مشکلی در واحد آب‌زدایی گلایکول وجود دارد. ممکن است اکسان^۱ به دلیل مرطوب‌بودن گاز برایمان دردسر ایجاد کند. همین حالا آماده رفتن شو.»

تنش بر روی میل پیستون

بزرگ‌ترین تولیدکننده لاستیک در جهان، آرلانکسو^۲ است. آن‌ها با پلیمریزاسیون^۳ بوتادین، لاستیک مصنوعی تولید می‌کنند. این شرکت متعلق به عربستان سعودی است. بزرگ‌ترین کارخانه آن‌ها در اورنج^۴ تگزاس است.

این کارخانه تولید خود را در سال ۱۹۳۹، درست در زمان جنگ جهانی دوم، آغاز کرد. با غلبه ژاپن به مالایا^۵، ویتنام و اندونزی، نیاز شدیدی به لاستیک مصنوعی برای جایگزین کردن منابع از دست رفته لاستیک طبیعی در مزارع درختان کائوچوی بریتانیا و هلند وجود داشت.

سال گذشته، یعنی سال ۲۰۱۷، من یک سمینار آموزشی را در اورنج برای مهندسان و اپراتورهای آرلانکسو برگزار کردم. بعد از ارائه هر قسمت از سمینار، من از کارخانه بازدید می‌کردم تا راهکارهایی را برای بهبود عملیات‌هایشان، توصیه کنم.

^۱ اکسان: Exxon

^۲ آرلانکسو: Arlanxco

^۳ Polymerization: پلیمریزاسیون، فرآیند بسیار قدیمی که از یک بستر جامد اسید فسفریک استفاده می‌کند. واکنش در فاز بخار رخ می‌دهد. خوراک آن معمولاً پروپیلن است و محصولات هگزان و نونان می‌باشد. این فرآیند بسیار گرمازا است.

^۴ اورنج: Orange

^۵ مالایا: Malaya

محدودیت گردش بوتان

تنگنای اصلی آن‌ها برای افزایش تولید لاستیک مصنوعی، محدودیت سرعت گردش بوتان بود. محدودیت گردش بوتان، ظرفیت سه کمپرسور رفت و برگشتی دو مرحله‌ای بود. این وضعیت، به ویژه در ماه‌های ژوئیه^۱ و اوت^۲، وخامت بیشتری می‌یافت.

اورنج تگزاس، تابستان‌های شدیداً گرمی دارد. این شرایط باعث می‌شود که دمای آب سرد خروجی از برج خنک کننده^۳ بیش از ۹۰ °F باشد و به همین علت کمپرسورهای رفت و برگشتی گردش بوتان، به دلیل دمای خروجی بالا، از سرویس خارج می‌شوند^۴.

اختلاف فشار در امتداد پیستون

شکل ۳۴-۴ شمایی از سیلندر کمپرسور رفت و برگشتی است. کمپرسورهای رفت و برگشتی ماشین‌های دوطرفه‌ای هستند. دو مجموعه سوپاپ وجود دارد:

- یک مجموعه در سمت «سرسیلندر»^۵ واقع است. سرسیلندر در انتهای سیلندر تراکم قرار داد؛
 - مجموعه دیگر در سمت «Crank end»^۶ قرار دارد. Crank end بخشی از سیلندر تراکم و نزدیک به محور (شفت) است که میل‌پیستون کمپرسور را به حرکت در می‌آورد.
- هنگامی که پیستون به سمت سرسیلندر حرکت می‌کند، گاز درون انتهای جلوی سیلندر فشرده شده و سپس هنگامی که فشار در جلوی پیستون از فشار خط خروجی بیشتر شود، به داخل خط خروجی، رانده می‌شود.

^۱ ژوئیه: July

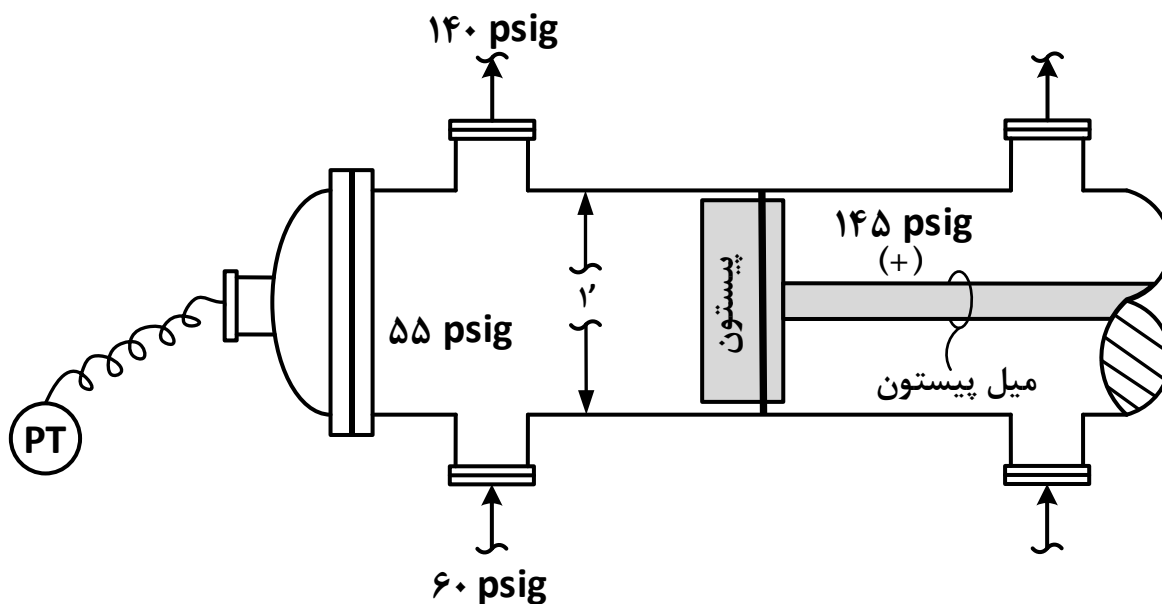
^۲ اوت: August

^۳ آب سرد خروجی از برج خنک کننده: Cooling water supply

^۴ Trip-Off: از سرویس خارج شدن

^۵ Head-end: سرسیلندر

^۶ Crank-end: انتهای سیلندر به سمت میل لنگ



شکل ۴-۳۴ محاسبه تنش بر روی میل پيستون.

$$5 \text{ psi} = \text{افت فشار سوپاپ}$$

$$\text{PT} = \text{فشار اندازه گیری شده در سرسیلندر}$$

$$0.785 \text{ ft}^2 = \text{مساحت سطح}$$

$$\text{افت فشار} = (60 - 5) + (140 + 5) = 90 \text{ psi}$$

$$1018 \text{ lb} = 90 \times 0.785 \times 144 = \text{بار بر روی میل پيستون}$$

وقتی پيستون به سمت سرسیلندر حرکت می کند، فشار گاز درون انتهای عقبی سیلندر کاهش می یابد تا زمانی که فشار آن کمتر از فشار خط ورودی شود. در این نقطه، گاز از خط ورودی، به درون انتهای عقبی سیلندر جریان پیدا می کند.

نسبت فشار خط خروجی تقسیم به فشار خط ورودی، نسبت تراکم^۱ نامیده می شود.

^۱ Compression ratio: نسبت تراکم، فشار خط خروجی تقسیم به فشار خط ورودی

کار تراکمی

من همیشه قبل از راندن دوچرخه قدیمی‌ام، چرخ‌های آن را مجدداً باد می‌کنم. من هوا را از ۱۴/۷ psia (۱ بار) تا ۴۵ psig (۴ بار) متراکم می‌کنم تا نسبت تراکم برابر با ۴ شود. هوای متراکم‌شده به طرز محسوسی گرم‌تر است. این گرم‌تر بودن، تا حدی به علت گرمای تراکم و ناشی از کاریست که من صرف می‌کنم و تا حدی نیز به دلیل تلفات اصطکاکی در پمپ دوچرخه من است.

این اتفاق، شبیه اتفاقی‌ست که در کمپرسور رفت و برگشتی می‌افتد. بخارات متراکم‌شده بوتان، به علت گرمای کار تراکمی و تلفات اصطکاکی در کمپرسور، دما را افزایش می‌دهند. بدین معنا که افزایش دما میان ورودی و خروجی کمپرسور، با نسبت تراکم، متناسب است. اگر دمای خروجی به دلیل افزایش دمای ورودی افزایش پیدا کند، این اتفاق، نشان‌دهنده افزایش نسبت تراکم نیست.

تنش بیش از حد بر روی میل‌پیستون

زمانی که در میادین گاز طبیعی در لاریدوی تگزاس کار می‌کردم، مسئول ۱۰۰ کمپرسور رفت و برگشتی سرچاهی بودم. رایج‌ترین نقص پیش‌آمده در این دستگاه‌ها، شکستن میل‌پیستون (شکل ۳۴-۴ را ببینید)، به دلیل تنش بیش از حد بر روی میل‌پیستون بود.

تنش بر روی میل‌پیستون، بر حسب پوند نیرو بیان می‌شود. به منظور محاسبه تنش بر روی میل‌پیستون یک کمپرسور رفت و برگشتی، داریم:

$$(۳۴-۱) \quad \text{مساحت پیستون} \times (P_D - P_s) = \text{تنش بر روی میل پیستون}$$

که در این رابطه:

- مساحت پیستون، بر حسب اینچ مربع؛
- P_D = فشار خروجی بر حسب psig؛
- P_s = فشار ورودی بر حسب psig؛

- تنش بر روی میل پیستون، بر حسب پوند نیرو است (شکل ۳۴-۴ را ببینید).

از مطالب فوق واضح است که رابطه‌ای میان تنش بر روی میل پیستون، نسبت تراکم و افزایش دما در اثر متراکم شدن گاز، وجود دارد.

در لاریدو، طی روزهای گرم تابستان، دمای محیط تا 120°F افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه دمای خروجی تراکم نیز، افزایش می‌یابد. کمپرسورها، مجهز به تجهیزات شناسایی دمای خروجی بالا بودند. این تجهیزات، کمپرسورها را از سرویس خارج می‌کنند تا از آسیب رسیدن به میل پیستون، در اثر تنش‌های بیش از حد، جلوگیری کنند.

اولین بعد از ظهری که این اتفاق افتاد، من لود روی میل پیستون را از معادله ۳۴-۱ محاسبه کردم و دمای حسگر را مجدداً مطابق با دمای ورودی بالاتر تنظیم کردم که ناشی از دمای بیشتر محیط نسبت به خنک کننده هوای میان مرحله‌ای کمپرسور بود.

ما در سال ۱۹۸۵ در میادین گازی لاریدو به کنترل رایانه‌ای برای محاسبه حداکثر لود مجاز بر روی میل پیستون‌ها، بر اساس فشار خروجی و ورودی، دسترسی نداشتیم. بنابراین من مجبور بودم زمانی که هوا سردتر بود نقطه تنظیم دمای خروجی برای از سرویس خارج شدن را، مجدداً روی عدد پایین‌تری تنظیم کنم. کاری که بسیار طاقت‌فرسا و مایه زحمت بود.

کارخانه پلاستیک آرلانکسئو

برای جلوگیری از سرویس خارج شدن کمپرسورهای بوتان رفت و برگشتی آن‌ها، به علت دمای خروجی بیش از حد، که نتیجه افزایش دمای ورودی به علت افزایش دمای آب خنک کننده در اثر دمای بالای محیط بود، کارکنان بخش عملیات آرلانکسئو، بی‌بار کننده‌های شیر^۱ را فعال می‌کنند.

این بی‌بار کنندگان شیر، یک یا چند سوپاپ خروجی را که در شکل ۳۴-۴ نشان داده شده، غیرفعال می‌کنند. نتیجه این بود که:

- فشار ورودی کمپرسور بالا رفت؛

^۱ بی‌بارکننده‌ها یا تخلیه‌کن‌های شیر: Valve unloaders

• فشار خروجی کمپرسور کاهش پیدا کرد؛

• نسبت تراکم کاهش یافت؛

• و نهایتاً دمای خروجی کمپرسور نیز کاهش پیدا کرد.

هم چنین فعال کردن بی‌بار کنندگان شیر، میزان گردش بوتان و تولید پلاستیک مصنوعی واحد را نیز ۱۰٪ کاهش داد که ضرر ناشی از آن، ۱۰۰۰۰ دلار در هر روز بود. این واقعه از سال ۱۹۳۹ به مدت ۷۸ سال ادامه یافت.

کاربرد کنترل کامپیوتری

در سال ۱۹۳۹ هیچ کامپیوتری برای محاسبه تنش بر روی میل‌پیستون کمپرسور وجود نداشت. بنابراین مهندس طراح ابزار دقیق، بهترین کاری را که برای محافظت از آسیب‌دیدن شاتون کمپرسورهای رفت و برگشتی می‌توانست، انجام داد. او برای این کار، از دمای خروجی به عنوان معیاری از احتمال بیش از حد بودن نسبت تراکم و تنش بر روی میل‌پیستون، استفاده کرد.

من از مهندس فرآیند و ناظر عملیات آرلانکسو پرسیدم که با تجاوز دمای خروجی از دمای تنظیم شده برای از سرویس خارج‌شدن کمپرسور، یعنی 300°F ، ممکن است چه بخشی از کمپرسور دچار آسیب شود؟

آنها هیچ پاسخی به پرسش من ندادند.

تمام این قضایا نشان‌دهنده اهمیت درک طرز کار تجهیزات فرآیندی‌ست. نتیجه این عدم درک، از دست‌دادن روزانه ۱۰۰۰۰ دلار در فصل تابستان به مدت ۷۸ سال است.

تأثیر وزن مولکولی بر کمپرسورهای رفت و برگشتی

من هیچ‌گاه با مردم بحث و مشاجره نمی‌کنم. انتظار دارم همیشه، همه با من هم عقیده باشند. به عنوان مثال من برای شرکت کاستال کورپوریشن^۱ در پالایشگاه‌شان در آروبا^۲ کار می‌کردم. مأموریت من ارتقا دادن تاسیسات تولید

^۱ Corporation Coastal: کاستال کورپوریشن

^۲ Aruba: آروبا

هیدروژن این شرکت بود. طرح من، شامل جایگزین کردن یک جریان گاز پرچ^۱ غنی از هیدروژن، به جای خوراک واحد تولید هیدروژن بود که به عنوان سوخت گازی پالایشگاه مورد استفاده قرار می گرفت. این گاز پرچ، از واحد تصفیه هیدروژنی دیزل، در آروبا نشأت می گرفت. سوخت گازی پالایشگاه نیز عمدتاً از «واحد کک سازی تأخیری»^۲ تأمین می شد. ترکیب شیمیایی این دو گاز به صورت زیر بود:

گاز شوینده (پالایشی)		سوخت گازی
H ₂ %	۸۰	۱۰
وزن مولکولی	۸	۳۲

من محاسبه کردم که گاز پرچ، اگر غنی از هیدروژن باشد، در مقایسه با سوخت گازی، خوراک بهتری برای واحد هیدروژن خواهد بود؛ زیرا عمدتاً متشکل از هیدروژن است.

خوراک گازی واحد هیدروژن، به وسیله دو کمپرسور رفت و برگشتی دو مرحله ای غول پیکر، از ۵۰ تا ۴۰۰ psig متراکم می شد. کل جریان گاز، ۱۰۰ MM SCFD از سوخت گازی پالایشگاه بود. وقتی که روز جایگزینی سوخت گازی با گاز پرچ فرا رسید، در حال آماده شدن بودم که به خانم در نیوراولان بروم که مدیر واحد، آقای فرنچ^۳ با شکایتی به دفتر من آمد: «لیبرمن تو خراب کاری بزرگی کردی!»

«چه مشکلی پیش آمده است آقا؟»

«این دو کمپرسور رفت و برگشتی، برای متراکم سازی گاز پرچ، طراحی نشده اند. آن ها برای متراکم سازی سوخت گازی، طراحی شده اند. به محض این که ما برای فشرده سازی گاز پرچ و فرستادن آن به واحد هیدروژن اقدام کردیم، نرخ جریان گاز از ۱۰۰ به ۵۰ MM SCFD کاهش پیدا کرد. تو واقعاً خراب کاری کردی؛ لیبرمن.»

«آقای فرنچ شما واقعا دارید با من صحبت می کنید؟ من اشتباه نمی کنم.»

^۱ Purge: پرچ، پالایشی.

^۲ Delayed Coking Unit: واحد کک سازی تأخیری

^۳ French: فرنچ

«بله لیبرمن. دارم با خود تو صحبت می‌کنم. من همین الان تلفنی با شرکتی که شیرهای این کمپرسورهای رفت و برگشتی را تأمین می‌کند، صحبت کردم. او به من گفت که این شیرها، برای سوخت گازی با وزن مولکولی ۳۲ طراحی شده‌اند؛ نه برای گاز پرچ، با وزن مولکولی ۱۸»

«و راه‌حل پیشنهادی شما چیست قربان؟»

«آن شرکت می‌گوید: اگر سه روز عملیات را متوقف کنیم، می‌توانیم این شیرها را با شیرهای مناسبی برای گاز پرچ، تعویض کنیم.»

«و هزینه این کار چقدر است؟»

"تقریباً منطقی‌ست. ۹۵۰۰۰۰ دلار."

به یاد دارم که پشت میز نشستم و به تدریج عصبانی‌تر شدم. می‌خواستم از طرح خودم دفاع کنم. پیش از آن که بتوانم چیز بیشتری بگویم، آقای فرنچ ادامه داد: «لیبرمن آیا واقعا متوجه نشدی که اگر وزن مولکولی گاز را چهار برابر، یعنی از ۳۲ به ۸ کاهش دهی، فشار خروجی ایجادشده توسط کمپرسور نیز به طور قابل توجهی کاهش خواهد یافت و این موضوع می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر مقدار گاز متراکم‌شده گردد؟»

بنابراین من گفتم: «بله فکر کرده‌ام»، همه باید یاد بگیرند. تصمیم گرفتم که جر و بحث نکنم و به خانه‌ام در نیواورلئان، رفتم.

دو ماه بعد

روزی که کمپرسورهای مجهز شده با شیرهای جدیدشان، دوباره در سرویس قرار گرفتند، روز بسیار زیبایی در آروبا بود. قرار بود که کمپرسور با خوراک سوخت گازی (وزن مولکولی ۳۲) راه‌اندازی شود و سپس سوخت گازی با گاز پرچ (وزن مولکولی ۸)، جایگزین شود.

من کنار آقای فرنچ ایستاده بودم و جریان‌سنج را نگاه می‌کردم که عدد MM SCFD ۱۰۰ را نشان می‌داد که همان جریان طراحی شده بود. با تغییر جریان خوراک از سوخت گازی به گاز پرچ، میزان جریان گاز نشان داده شده، به MM SCFD ۵۰ کاهش پیدا کرد؛ درست مانند قبل از نصب شیرهای جدید.

آقای فرنچ با نگرانی و اضطراب رو به من کرد: «نورمن چه اتفاقی افتاده است؟ جریان به نصف رسیده است. شیرهای جدید هیچ کمکی نکردند.»

«نه، جریان تغییری پیدا نکرده و هنوز هم همان MM SCFD ۱۰۰۰۰۰ است. توضیح خواهم داد.»

تأثیر وزن مولکولی بر اندازه‌گیری جریان

جریان توسط جریان‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. افت فشار حاصل از جریان در صفحهٔ سوراخ‌دار (اوریفیس پلیت) در شیرهای اتصال^۱ واقع در طرفین اوریفیس، اندازه‌گیری می‌شود. DP از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$DP = 0.6 \frac{D_v}{62} \cdot V^2 \quad (2 - 34)$$

در این معادله:

DP = افت فشار بر حسب اینچ آب؛

D_v = چگالی گاز lb/ft³؛

V = سرعت جریان گازی که از میان صفحهٔ سوراخ‌دار (اوریفیس پلیت) عبور می‌کند (ft/s).

برای محاسبهٔ جریان، سرعت‌های به دست‌آمدهٔ فوق را که بر مبنای اندازه‌گیری DP هستند، در اندازهٔ سوراخ‌های اوریفیس پلیت (یعنی مساحت) که بر روی دستهٔ آن حک شده است، ضرب کنید.

اگر وزن مولکولی گاز از ۳۲ به ۸ کاهش پیدا کند (یعنی با ضریب ۴)، افت فشار نیز بر اساس معادله ۲-۳۴ با ضریب ۴ کاهش می‌یابد. از آنجا که جریان با جذر DP متناسب است، جریان نشان‌داده شده به میزان دو برابر کاهش می‌یابد. اما در واقع جریان حجمی گاز تغییری نکرده است.

تأثیر وزن مولکولی بر کمپرسور رفت و برگشتی

آقای فرنچ پرسید: «اما نورم پس کمپرسور رفت و برگشتی، چگونه تحت تأثیر جرم مولکولی قرار می‌گیرد؟»

^۱ شیر اتصال: Tap

«آقا، یکی از اثرات آن، کاهش تلفات سرعت شیر است. این‌ها تلفات اصطکاکی نسبتاً کوچکی از طریق شیرهای ورودی و خروجی کمپرسور رفت و برگشتی هستند و تأثیر اندکی بر روی راندمان تراکم دارند و به صورت خطی با وزن مولکولی تغییر می‌کنند. کاهش وزن مولکولی با ضریب چهار، راندمان را تنها چند درصد افزایش می‌دهد.»

«مورد جالب‌توجه‌تر، تأثیر آن بر روی کاهش توان مورد نیاز کمپرسور است. فاکتور تراکم‌پذیری (Z) گاز پرچ، نزدیک به ۱/۰۰ است. تراکم‌پذیری گاز سوختی، حدوداً ۰/۹۰ است. این بدان معناست که، زمانی که کمپرسور گاز سبک‌تر و غنی از هیدروژن را متراکم می‌کند، بار آمپر بر روی موتور محرکه، ۱۰٪ افزایش می‌یابد.»

«اما آقای لیبرمن، «کمپرسور گاز برگشتی تصفیه هیدروژن»^۱ ما هنگام متراکم‌سازی گاز سنگین‌تر، DP بسیار بیشتری ایجاد کرده و آمپر و جریان بسیار بیشتری نیز مصرف می‌کند؟»

«آقای فرنچ، این کمپرسور گریز از مرکز است که در آن:

• DP متناسب با هد پلی‌تروپیک ضربدر چگالی گاز است.»

«آقای لیبرمن، ما ۹۵۰۰۰۰ دلار را بیهوده برای شیرهای جدید کمپرسور رفت و برگشتی خرج کردیم. چرا این موضوع را دو ماه پیش به من نگفتی؟ من آمده بودم تا درباره همین موضوع با تو صحبت کنم.»

«بله آقای فرنچ، کاملاً به خاطر دارم. این اشتباه من نبود. آن صحبت، شبیه به مجادله بود و من هیچ وقت با کسی بحث و جدل نمی‌کنم.»

«بسیار خوب لیبرمن. من همین امروز قرارداد مشاوره تو را با پالایشگاه کاستال آروبا، فسخ می‌کنم. سفر خوبی به نیواورلئان داشته باشی.»

محدودیت دمای خروجی کمپرسور رفت و برگشتی

محدودیت در کمپرسورهای رفت و برگشتی، اغلب هشدار برای دمای خروجی بالا است و به دلایل زیر رخ می‌دهد:

• افزایش نسبت تراکم؛

^۱ کمپرسور گاز برگشتی تصفیه هیدروژن: Hydrotreater Recycle Gas Compressor

• تلفات سرعت شیر (DP)؛

• نشتی شیر؛

• دمای ورودی بالا.

محدودیت دما برای محافظت از هیچ کدام از اجزا در برابر دمای بیش از حد، مجاز و مدنظر نیست. علت این کار، محافظت از میل پیستون در برابر شکستگی، به دلیل بارگذاری بیش از حد روی آن است. بارگذاری روی میل پیستون تابعی از موارد زیر است:

۱. نسبت تراکم؛

۲. مساحت پیستون.

افزایش دما در طول کمپرسور، تابعی از نسبت تراکم است. دمای خروجی سیلندر نیز، معیاری از بار بر روی میل پیستون و دمای ورودی کمپرسور است.

به منظور محافظت از کمپرسور در برابر بارگذاری بیش از حد بر روی میل پیستون، ممکن است کمپرسور در دماهای خروجی بالا، از سرویس خارج شود. در موارد زیر، این موضوع منجر به خروج زود هنگام از سرویس می شود:

۱. راندمان کمپرسور به دلیل نشتی شیر، نیروی کششی بالای فنر یا گرفتگی شیر، از مقدار طراحی شده کمتر باشد.

۲. دمای ورودی، بالاتر از دمای طراحی شده برای خارج از سرویس شدن کمپرسور، به دلیل دمای بالا، باشد.

نتیجه: خروج کمپرسور رفت و برگشتی از سرویس، ناشی از دمای بالای محیط است. هنگام وقوع این اتفاق، دمای خروج از سرویس را مجدداً در مقدار بالاتری تنظیم کنید. دمای بالای محیط باعث افزایش بار موجود بر روی میل پیستون، نمی شود.

منابع

[4] N.P. Lieberman, Troubleshooting Natural Gas Processing, PennWell Publications, Tulsa, OK, 1988.

[۵] The Oil & Gas Journal Technical Manual, "Foreman's Page", vol. 2, 43. 1976.



ارتعاشات خط لوله

چکیده:

ارتعاشات لوله‌های هیتر اغلب نتیجه جریان لخته‌ای است که خود نیز ناشی از سرعت‌های پائین در سیستم‌های جریان دو فاز است.

ضربه قوچ آب که نتیجه کاهش ناگهانی سرعت است، ممکن است باعث ایجاد ارتعاش در خط لوله شود. ضربه قوچ بخار آب که نتیجه چگالش جزئی بخار آب است، بر اساس مشاهدات شخصی نویسنده، در زمان گرم کردن به صورت آهسته یک خط بخار آب، سبب ایجاد ارتعاشات وحشتناکی در سیستم‌های بخار آب می‌شود.

اگر ارتعاشات با فرکانس طبیعی موزون خط لوله همراه شوند، سیستم خط لوله می‌تواند به صورت نمایی ایجاد ارتعاش نماید.

کلمات کلیدی:

خط لوله؛ ارتعاشات؛ موزون؛ جریان لخته‌ای؛ سرعت؛ فشار؛

من در انواع مختلفی از سیستم‌های لوله‌کشی، مانند گذرهای (پاس‌های) لوله هیتراحتراقی، ارتعاش (لرزش) را مشاهده کرده‌ام. یک سال پیش، برای رفع چنین مشکلی در یکی از پالایشگاه‌های روغن روان‌کننده در لوئیزیانا^۱، ماموریت مشاوره‌ای، داشتم.

مشتری من از این مشکل به عنوان لرزش در لوله‌های بخش تشعشعی هیتراحتراقی‌شان یاد کرد. اما در واقع، لرزش ارتباط اندکی با خود هیترا داشت. با این حال، این موضوع درسی اساسی درباره علت کلی ارتعاش در سیستم‌های لوله‌کشی به من داد.

هیتراحتراقی، معمولی بود. واحدی کوچک و مدور بود. لوله‌ها، دایره‌ای‌شکل و تک‌گذره^۲ بودند. یعنی تمامی لوله‌ها به صورت سری (متوالی) قرار داشتند. روغن روان‌کننده از طریق نازل ۱۰ اینچی ورودی، به تک‌گذر لوله‌های ۶ اینچی هیتراحتراقی جریان پیدا می‌کرد و پس از ترک هیتراحتراقی پس از عبور از زانوپی ۹۰ درجه به نازل خروجی ۱۰ اینچی وارد می‌شد. ارتفاع نازل ورودی حدود ۵۰ فوت بالاتر از سطح زمین بود و نازل خروجی نیز در سطح چشم قرار داشت (شکل ۳۵-۱).

خوراک کوره، مخلوطی از روغن روان‌کننده بسیار سنگین و هیدروژن، در دمای ۵۰۰ °F بود. هر دو جریان به اندازه ۴۰ فوت از نازل ورودی فاصله داشتند. سرعت ورودی محاسبه‌شده برای مخلوط هیدروژن و روغن روان‌کننده، حدوداً ۳ فوت در ثانیه بود. این مقدار سرعت برای پراکنده‌سازی روغن روان‌کننده مایع در حجم نسبتاً زیادی از هیدروژن، بسیار کم بود.

همچنان که لخته‌های^۳ روغن روان‌کننده همراه با جریان هیدروژن، وارد لوله‌های ۶ اینچی کوره می‌شد، سرعت جریان تا ۹ فوت بر ثانیه افزایش پیدا می‌کرد. اما این سرعت هنوز هم برای ایجاد یک جریان فازی مخلوط یا امولسیون، بسیار پایین بود. حتی پس از گرم‌شدن از ۵۰۰ تا ۷۰۰ °F و چند درصد تبخیر، جریان خروجی از کوره، هنوز در یک رژیم جریان لخته‌ای با سرعت کمتر از ۱۲ فوت بر ثانیه، قرار داشت.

در جریان خروجی از کوره، قطر ۶ اینچی تنها لوله خروجی با یک زانوپی^۴ ۹۰ درجه به ۱۰ اینچ افزایش پیدا می‌کرد. در حالی که آچار لوله‌ام را روی زانوپی ۹۰ درجه فشار داده بودم، یک ضربه تند و تیز را احساس کردم؛ درست

^۱ Louisiana: لوئیزیانا

^۲ Single pass: یک گذر

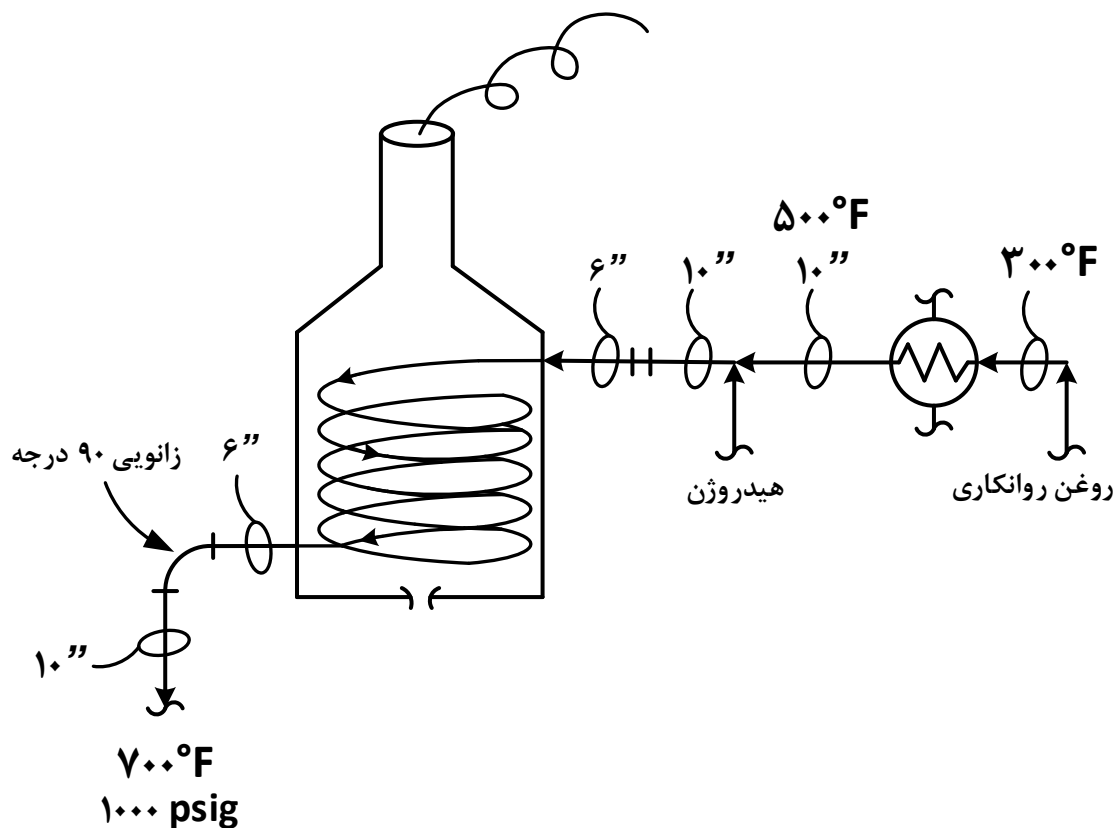
^۳ Slug: لخته

^۴ Elbow: لوله خمیده، زانوپی

همانند آن بود که شخصی هر ۵ یا ۶ ثانیه یک بار با یک چکش ۲۰ پوندی ضربه وارد کند. پس این منشأ ارتعاشات بود. جریان لخته‌ای به زانویی خروجی ۹۰ درجه، ضربه وارد می‌کند.

اندازه حرکت^۱ متناوب لخته‌های روغن روان‌کننده مایع، به ارتعاشی مداوم تبدیل می‌شد و ضربات وارد شده به زانویی خروجی ۹۰ درجه، از طریق گذر ۶ اینچی کوره به سمت بالادست پیشروی پیدا می‌کرد.

شما می‌توانید خودتان، این پدیده را در حصار سیمی طولی مشاهده کنید. از دوستی بخواهید با لوله‌ای فلزی به صورت متناوب به یک رشته محکم سیم ضربه بزند. پنجاه فوت دورتر از نقطه وارد کردن ضربات، ارتعاش مداوم سیم را احساس خواهید کرد اما ضربه‌های متناوب را احساس نمی‌کنید.



شکل ۱-۳۵ ارتعاش در هیتر احتراقی روغن روان‌کننده.

^۱ Momentum: اندازه حرکت

ضربه قوچ بخار آب^۱

من با این نوع ارتعاش، به عنوان پیامد قوچ بخار یا آب، بیشترین آشنایی را دارم.

در یک لوله‌کشی طویل بخار، خنک‌سازی موضعی، منجر به ایجاد ناحیه‌ای کم‌فشار در نتیجه چگالش بخار آب می‌شود. یک لخته آب جریان بالادستی در لوله‌کشی بخار آب، به سمت منطقه کم‌فشار با اندازه حرکت و یا سرعت بالا می‌رود.

هنگامی که لخته‌های آب با سرعت بالا به زانویی یا انشعاب سهراهی ضربه می‌زنند، این ضربات باعث ایجاد صدای انفجارمانندی می‌شوند که به لرزش لوله‌کشی بخار آب می‌انجامد. من بارها از قوچ بخار یا آب، وحشت کرده‌ام اما شخصاً شاهد آسیب دیدن لوله‌کشی، توسط این پدیده نبوده‌ام.

اجتناب از جریان لخته‌ای

من در کارخانه روغن روان‌کننده لوئیزیانا به این نتیجه رسیدم که، علت مشکل مذکور این است که جریان در خط خوراک ۱۰ اینچی، سرعت بسیار پایینی دارد و نمی‌تواند جریانی با فاز مخلوط هیدروژن و روغن روان‌کننده، ایجاد کند. به احتمال زیاد اگر هیدروژن و روغن روان‌کننده در مبدل پوسته و لوله پیش‌گرمایش خوراک روغن روان‌کننده بالادست، با هم گرم می‌شدند و سپس از طریق لوله‌ای ۴ فوت و ۴ اینچی (به جای لوله ۱۰ اینچی موجود) به هیت‌ر احتراقی، جریان پیدا می‌کردند، سرعت جریان تقریباً به ۲۰ فوت بر ثانیه می‌رسید.

هنگامی که در دهه ۱۹۷۰ برای شرکت نفت^۲ کار می‌کردم، به من آموزش دادند که:

- سرعت‌های بیش از ۲۵ فوت در ثانیه، منجر به ایجاد جریان فازی مختلط شده و از ایجاد جریان لخته‌ای جلوگیری می‌کند.
- سرعت‌های کمتر از ۱۵ فوت بر ثانیه، جدایش فازی و جریان لخته‌ای را، خصوصاً در لوله‌کشی‌های رایزر، افزایش می‌دهد.

^۱ Steam hammer: ضربه قوچ بخار آب

^۲ Amoco Oil: شرکت نفت آموکو

تأثیر تبخیر در هیتز

هنگامی که روغن‌های روان‌کننده سبک‌تر و فرارتر در «کارخانه تولید روان‌کننده لوئیزیانا»^۱ فرآوری می‌شدند، ارتعاشات به شدت کاهش می‌یافت یا حتی در مواردی از بین می‌رفت. این مسئله ظاهراً به دلیل درصد تبخیر بالاتر روغن روان‌کننده مایع بود که، جریان فازی مخلوط را تقویت می‌کرد و مقدار مایع فشرده در لوله ۱۰ اینچی و زانویی خروجی ۹۰ درجه را کاهش می‌داد.

کارخانه تا زمانی که تعدادی از آویزهای نگهدارنده لوله^۲ آسیب دیدند، به استفاده از گرم‌کن برای فرآوری خوراک روغن سنگین‌تر ادامه داد. من مشاهده کردم که لوله‌ها هر چند ثانیه حدود یک یا دو اینچ، در جهت افقی جابه‌جا می‌شوند. کاهش ۲۰ الی ۳۰ درصدی دبی خوراک، شدت ارتعاشات را تا میزان قابل‌قبولی کاهش داد.

تنها مشارکت موفقیتی که تا امروز در این پروژه داشته‌ام این است که، ارتعاشات لوله‌کشی خروجی، اکنون به طور مداوم از اتاق کنترل، نظارت می‌شود. خوشبختانه، هشدار برای لرزش بالا وجود دارد که به اپراتورها درباره نقص قریب‌الوقوع را، هشدار می‌دهد.

توضیح علت دقیق این که چرا مشتری من واحد را متوقف نمی‌کند تا ایراد اساسی طراحی مربوط به ایجاد جریان لخته‌ای در لوله‌های خوراک‌دهی به کوره را برطرف سازد، به خوانندگان فاقد تجربه کافی در صنعت پالایش نفت دشوار است.

در صورتی که نقص فاجعه‌باری، در زانویی خروجی ۹۰ درجه رخ دهد، دمای روغن روان‌کننده از دمای اشتعال خود به خودی آن (حدوداً ۴۰۰ °F) بالاتر می‌رود و آنگاه احتمال معقولی برای انفجار ابر هیدروژنی وجود دارد.

از سوی دیگر کوره حدوداً به مدت دو سال هنگام فرآوری روغن روان‌کننده سنگین ارتعاش داشته و «هنوز» هیچ اتفاقی نیفتاده است.

این یک قمار است!

^۱ Louisiana Lube Plant: کارخانه تولید روان‌کننده لوئیزیانا

^۲ tube support hangers: آویزهای نگه‌دارنده تیوب

نگهدارنده‌های لوله^۱

لرزش لوله‌های فرآیندی، اغلب ناشی از نگهدارنده‌های نامناسب است. مشخصاً مثال کوره بالا ارتباطی به قضیه نگهدارنده‌های لوله‌ها نداشت؛ زیرا این لرزش تنها هنگام فرآوری خوراک‌های سنگین‌تر و با درصد تبخیر بسیار کم رخ می‌داد. ارتعاشات هنگام فرآوری خوراک‌های روغن روان‌کننده سبک‌تر، که درصد تبخیر بالاتری داشتند، از بین می‌رفت.

من در مورد مشکلات ارتعاشی مربوط به نگهدارنده لوله، مشتریانم را به شرکت «مهندسی تنش»^۲ ارجاع می‌دهم که شرکتی مشاور، در متایری^۳ لوئیزیانا است و عمدتاً با خرابی‌های لوله‌کشی‌های فرآیندی در صنعت فرآوری هیدروکربن سروکار دارد.

ارتعاشات شیر کنترل

من در چندین مورد، صدای وزوز مانند ناشی از ارتعاش شیرهای کنترل را شنیده و حس کرده‌ام. پس از بررسی مشخص شده که نشیمن‌گاه^۴ شیر کنترل (که قابل تغییر و متحرک است)، شل شده است. شیر کنترل، کنارگذر^۵ شده و مشکل به سرعت و سهولت توسط متخصص واحد ابزار دقیق رفع شده است. شل شدن نشیمن‌گاه شیر کنترل علاوه بر ایجاد صدایی عجیب، باعث شده بود که دبی جریان نیز تا حدودی نامنظم شود.

باید برای شنیدن این صدای وزوزمانند، کاملاً به شیر کنترل معیوب، نزدیک شوید؛ زیرا این صدا به طرز خاصی بلند و واضح نیست.

^۱ Piping supports: نگهدارنده‌های خطوط لوله

^۲ Stress Engineering: مهندسی تنش

^۳ Metairie: متایری

^۴ Seat: نشیمن‌گاه

^۵ Bypass: کنارگذر

فرکانس طبیعی موزون^۱

چندین سال پیش، برای پالایشگاه کوچکی در جنوب ایندیانا^۲ کار می‌کردم. آن‌ها پمپ خلأ مایع^۳ را نصب کرده بودند که، ارتعاشات زیادی داشت. تمام تجهیز برای تعمیر، به تولیدکننده برگشت داده شد. اما این کار بدون نتیجه بود. پس از نصب و راه‌اندازی مجدد، ارتعاشات همچنان ادامه یافت.

در این مرحله، موتور محرکه پمپ با دور ۳۶۰۰ rpm با موتور محرکه‌ای با دور متغیر (یعنی درایوی با بسامد متغیر) جایگزین شد. کاهش بسیار اندکی در دور موتور، لرزش پمپ خلأ را به طور کامل از بین برد.

تحلیل و بررسی نشان داد که لوله‌کشی در ۳۶۰۰ rpm، در فرکانس طبیعی موزون خود کار می‌کرد و به همین دلیل ارتعاشات موزون را به پمپ خلأ انتقال می‌داد.

^۱ Natural Harmonic Frequency: فرکانس طبیعی موزون

^۲ Indiana: ایندیانا

^۳ vacuum seal ring pump: پمپ‌های خلأ مایع



مشکلات اندازه‌گیری متغیرهای فرآیندی

چکیده:

اندازه‌گیری متغیرهای فرآیند، هم برای عملیات و هم برای عیب‌یابی تجهیزات فرآیندی، کاملاً حیاتی است. متغیرهایی که باید اندازه‌گیری شوند، به شرح زیر است:

- فشار
- ارتفاع سطح مایع‌ها
- جریان‌ها
- دما
- گرمای آزادشده
- درافت (مکش)
- ترکیبات
- چگالی‌ها
- ویسکوزیته.

از دیدگاه نویسنده، دشوارترین اندازه‌گیری متغیرهای فرآیندی واحد بهره‌برداری، مربوط به اندازه‌گیری سطح مایعات است. دلیل اصلی آن هم، انسداد شیرهای اتصال مربوط به لول‌ها و تغییر وزن مخصوص است.

کلمات کلیدی:

ارتفاع سطح مایعات؛ دما؛ درافت؛ کروماتوگرافی گاز؛ نمونه‌گیری؛ چاه حرارتی (غلاف ترموکوپل)؛ ترموکوپل؛ پایش

درک آنچه که در واحدهای فرآیندی اتفاق می‌افتد، حتی بدون در نظر گرفتن پیچیدگی‌های سوال برانگیز مربوط به دماها، فشارها، جریان‌ها و سطوح‌ها، به اندازه کافی دشوار است. من توانسته‌ام بسیاری از مشکلات طولانی‌مدت را با دسترسی به داده‌های صحیح و نمونه‌های^۱ دقیق حل و فصل کنم.

بهترین کار این است که تصور نکنید خود تجهیزات از نظر مکانیکی و الکتریکی عملکردی عادی دارند. این که از متخصص هر تجهیز سوال پرسید تا اطمینان حاصل کنید که تجهیز به درستی کار می‌کند، رویکرد بسیار خوبی است. چندیدن نمونه از مشکلاتی که با آن‌ها مواجه شده‌ام، پیچیدگی به دست‌آوردن نمونه‌ها و داده‌های دقیق فرآیندی را نشان می‌دهند. من مشکل را به پنج بخش تقسیم می‌کنیم:

۱. فشارها؛

۲. دماها؛

۳. ارتفاع سطوح‌ها (لول‌ها)؛

۴. جریان‌ها (بخار و مایع)؛

۵. نمونه‌ها (بخار و مایع).

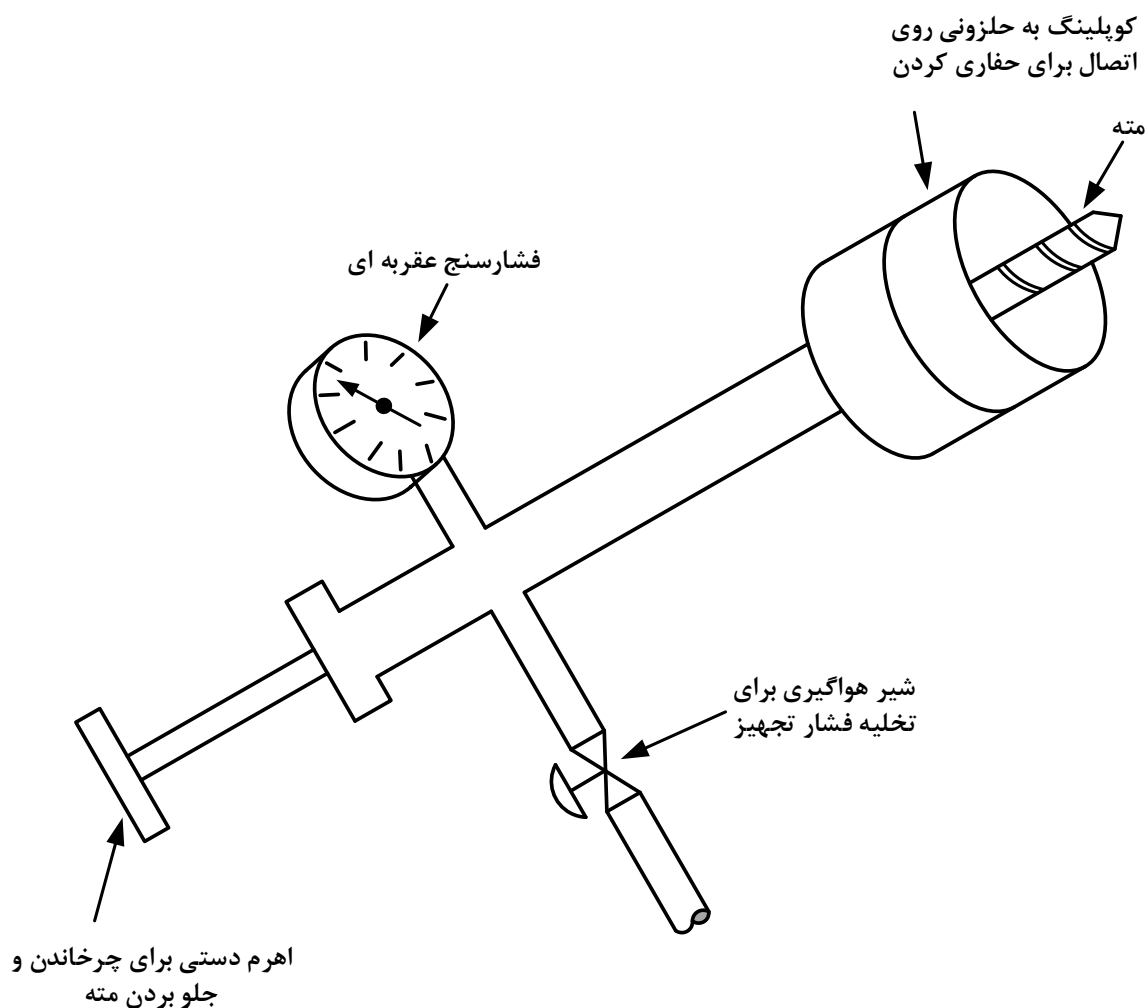
فشارها

هزینه خرید خانه‌ای که در آن زندگی می‌کنم، با هفت حمام، BMW همسرم و استخر شنای ۴۴۰۰۰ گالنی‌مان از طریق بررسی‌های افت فشار پالایشگاهی، پرداخت شده است. رایج‌ترین منبع بروز خطا، مسدود شدن^۲ شیرهای اتصال است. در هنگام قرائت فشارسنج، اگر عقربه آن به آرامی حرکت کند، یعنی اتصال آن تا حدی مسدود شده است. اگر باید ۱۵ ثانیه صبر کنید تا عقربه فشارسنج ثابت شود، مشکلی وجود ندارد. اما اگر این کار ۵ دقیقه طول بکشد، آنگاه اتصال فشارسنج تا حدی مسدود شده و در نتیجه، سرعت قرائت فشار، پایین است.

^۱ نمونه: Sample

^۲ مسدود شدن: Plug

شکل ۳۶-۱ «Rod-Out-Tool»^۱ یا «Angle-Worn» را نشان می‌دهد که احتمالاً در واحد بهره‌برداری محل کار شما، برای رفع مسدودیت انشعابات^۲ در تجهیزات خطرناک در دسترس است. در تمام پالایشگاه‌هایی که در آن‌ها کار کرده‌ام، این ابزار برای تمیزکردن انشعابات مسدودشده در دسترس بوده است. رفع مسدودیت یک انشعاب در مسیر جریان داغ نفت گاز با یک میله جوشکاری خمیده، ممکن است منجر به مرگ زودرس تان شود. برای جریان H_2S با غلظت بالاتر از ۱۰۰ ppm، به یک ماسک اکسیژن^۳ نیاز داریم. رفع مسدودیت انشعابات در مسیر جریان هیدروکربن‌ها و بخار آب پر فشار، بسیار خطرناک است.



شکل ۳۶-۱ ابزار رفع مسدودیت ایمن انشعاب (یعنی rod-out tool).

^۱ Rod-Out-Tool: ابزار رفع مسدودیت ایمن انشعاب

^۲ Bleeder: انشعاب

^۳ Fresh Air Pak: ماسک اکسیژن

همیشه فشارسنج را مستقیم به سمت بالا قرار دهید. اگر فشارسنج در حالت عمودی قرار نگیرد، فشار را به درستی نشان نمی‌دهد. فشارسنج را با دست نچرخانید تا محکم شود. این کار، وضعیت کالیبراسیون فشارسنج را تغییر می‌دهد. از یک آچار برای پیچاندن ساقه، استفاده کنید. هنگام اندازه‌گیری فشار در مسیر جریان آسفالت یا قیر، فشارسنج را در تماس مستقیم با قیر قرار ندهید؛ زیرا مسدود خواهد شد. من از یک اتصال U شکل کوچک که با دیزل پر شده باشد، به عنوان سدی بین فشارسنج و قیر، استفاده می‌کنم.

از آنجایی که هدف از بررسی فشار، تعیین تلفات فشار ناشی از اصطکاک است، فشار خوانده‌شده باید برای ارتفاع تصحیح شود:

$$DP = (DH) \cdot (SG) \div 2.31 \quad (1 - 36)$$

که:

- $DP =$ بر حسب psi
- $DH =$ ارتفاع از سطح زمین، بر حسب فوت؛
- $SG =$ جرم ویژه.

اثر کاهش سرعت

من ۲۰ سال پیش در پالایشگاه کاستال^۱، آروبا^۲، به این مشکل برخورددم. یعنی فشار خروجی یک مبدل گرمایی می‌تواند، بیشتر از فشار ورودی آن باشد. در این مورد، حتی با وجود این که هر دو شیر اتصال^۳ فشار ورودی و خروجی در ارتفاع یکسانی بودند، فشار خروجی باز هم تا حدودی بیشتر بود. این اتفاق چطور ممکن است؟

فرض کنید سرعت آب در نازل ورودی ۳ اینچی، ۱۶ ft/s باشد. اگر اندازه نازل خروجی ۶ اینچ باشد، سرعت خروجی مقدار بسیار کمتری، یعنی ۴ ft/s خواهد بود. برای تبدیل سرعت به فشار (با صرف نظر از تلفات اصطکاکی) خواهیم داشت:

$$IP = \frac{0.18 [V_1^2 - V_2^2]}{28} \cdot (SG) \quad (2 - 36)$$

^۱ Coastal Refinery: پالایشگاه کاستال

^۲ Aruba: آروبا

^۳ Tap: شیر اتصال

که:

• V_1 و V_2 = سرعت‌های ورودی و خروجی، بر حسب فوت بر ثانیه؛

• SG = میانگین جرم ویژه؛

• IP = افزایش فشار سیال به دلیل کاهش سرعت.

کاهش سرعت آب از ۱۶ به ۴ فوت بر ثانیه، معادل با ۸ psi افزایش فشار است.

در مثال بالا، تجهیز مذکور یک مبدل حرارتی بود که جریان خروجی از یک رآکتور تصفیه هیدروژنی نفت دیزل را خنک و بخشی از آن را میعان می‌کرد. کاهش سرعت به علت خنک‌شدن و میعان جزئی خروجی رآکتور، بسیار بیشتر از مقدار فوق‌الذکر، یعنی ۱۲ ft/s، بود. افزایش فشار واقعی‌ای که من در واحد مشاهده کردم، از ۶۸۰ تا ۶۸۸ psi بود. کم‌کردن اثرات کاهش سرعت از این ۸ psi افزایش، به علت وجود تلفات اصطکاکی، افت فشار ۱۸ psi را در بر داشت. ذرات کاتالیست، بخشی از لوله‌های مبدل را مسدود کرده بودند.

دما

من بیشتر اندازه‌گیری‌های دما را با دماسنج تفنگی مادون قرمز ۸۵ دلاری^۱م، انجام می‌دهم که آن را از والمارت^۱، خریداری کرده‌ام. البته اندازه‌گیری دما با این نوع دماسنج، پوسته‌ای است و فقط هنگامی که هیچ چاه حرارتی^۲ (غلاف ترموکوپل) یا ترموکوپلی^۳ وجود ندارد، انجام می‌شود. اما با فرض این که اتصال صحیح و سیم‌های ترموکوپل نیز به درستی نصب شده باشند، می‌توان تصور کرد دمای تولیدشده از اتصال الکتریکی ترموکوپل همیشه و ضرورتاً درست است و به تعبیری، همین‌طور است. اما با این حال دو مشکلی که من با آن‌ها رو به‌رو بوده‌ام، باعث شده‌اند دماهای اندازه‌گیری شده ۴۰ تا ۶۰ °F پایین‌تر از دما واقعی فرآیند باشد.

^۱ Walmart: والمارت

^۲ Thermowell: ترموول، چاه حرارتی؛ غلاف ترموکوپل

^۳ Thermocouple: ترموکوپل

اولین مشکل، در خروجی کوره^۱ خلأ پالایشگاهی در لوئیزیانا، رخ داده بود. من اطمینان داشتم که دمای ثبت شده^۲ خروجی کوره، بیش از حد پایین است؛ زیرا دمای پایین دست در ورودی برج خلأ، 20°F گرم تر بود. خروجی کوره قبل از ورود به برج خلأ و به دلایل زیر سرد می شود:

- تبخیر؛
- تلفات گرمایی به محیط؛
- کراکینگ^۱ حرارتی.

من ترموکوپل را از چاه حرارتی خارج کردم (شکل ۳۶-۲ را ببینید) و قصد داشتم دماسنجی شیشه ای را در داخل چاه حرارتی قرار دهم تا دما را به طور موضعی اندازه گیری کنم. با این حال فوراً متوجه مشکل شدم. چاه حرارتی و البته ترموکوپل بسیار کوتاه بودند. طول این دو تنها ۴ اینچ، در مقابل خط خروجی ۳۰ اینچی کوره بود. چون این ناحیه از خط لوله، عایق بندی ضعیفی داشت، دمای مشخص شده کمتر از دمای میانگین جریان بود. در هنگام انجام تعمیرات بعدی یک چاه حرارتی ۱۲ اینچی بلند، به عنوان جایگزین ترموکوپل کوتاه موجود، نصب شده بود.

من مشکل نسبتاً مشابهی را نیز در یک «درام غوطه ورسازی غلظت شکن»^۲، در پالایشگاه کاستال (که اکنون متعلق به سیتگو است)، در آروبا مشاهده کردم. من کاملاً اطمینان داشتم که دمای 810°F ، که توسط ترموکوپل نشان داده شده، خیلی پایین است. این دما در نیمه بالایی لبه غوطه ورساز^۳ اندازه گیری شده بود. دمای بخار خروجی از غوطه ورساز، 830°F الی 840°F بود. به دلیل گرمای ناشی از کراکینگ، نیمه پایینی غوطه ورساز باید تا حدی داغ تر می بود. همچنین دمای خروجی هیتر احتراقی غلظت شکن، 860°F تا 870°F بود. بدیهی ست که، دمای نقطه میانی درام غوطه ورساز، باید بین 840°F تا 870°F می بود و نه 810°F .

من به خاطر دارم که یک پوشش عایق فایبرگلاس را دور قسمت بیرونی (یعنی کلاهک^۴) ترموول، پیچاندم (شکل ۳۶-۲). در عرض ۱۰ دقیقه، دمای مشخص شده 20°F تا 30°F افزایش پیدا کرد. من این مشکل را قبلاً در خط بخار فوقانی یک «واحد کک سازی تأخیری» در تگزاس سیتی، دیده بودم. بخش داخلی ترموول با لایه ای ضخیم از کک،

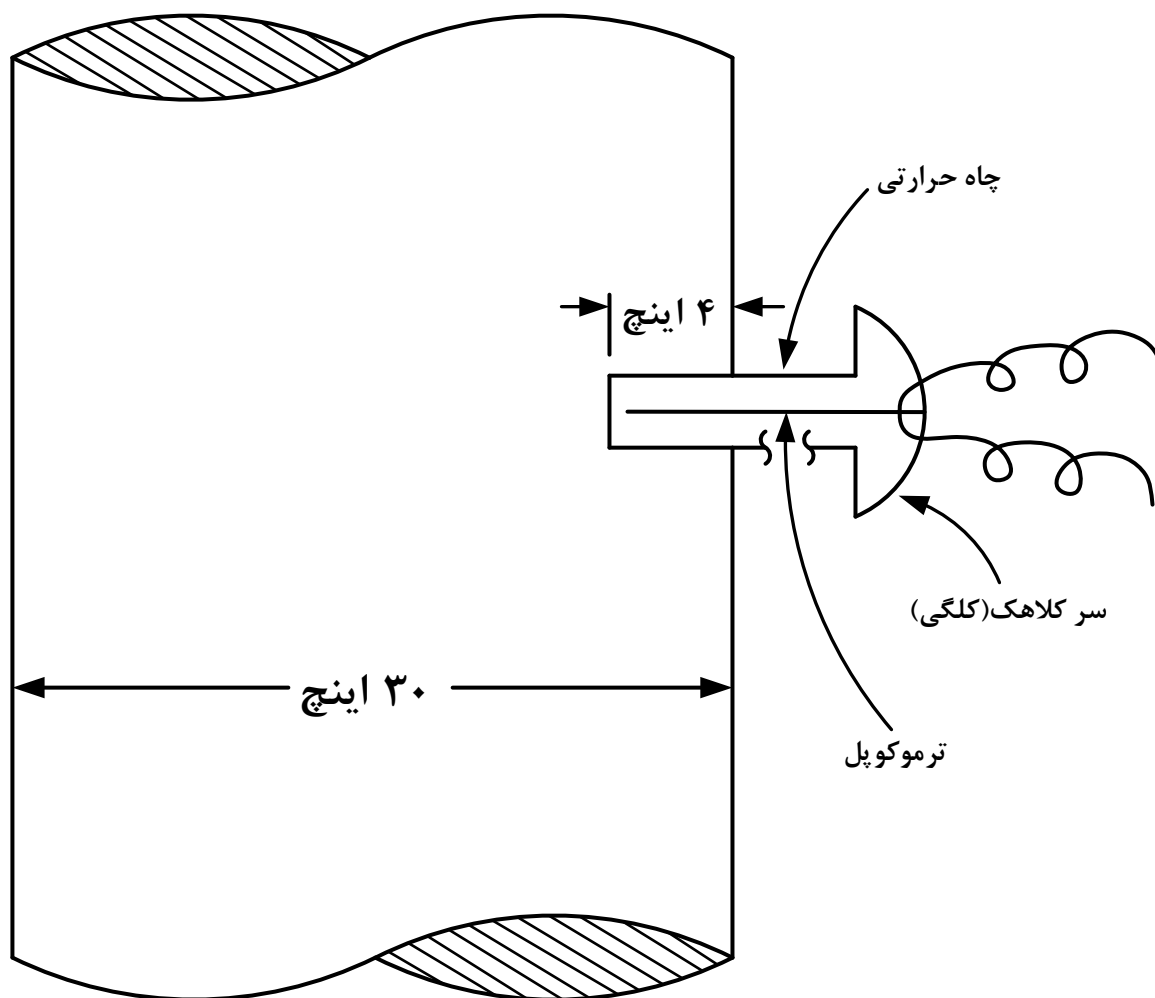
^۱ Cracking: کراکینگ

^۲ Visbreaker Soaking Drum: درام غوطه ورسازی غلظت شکن

^۳ Soaker: غوطه ورساز

^۴ Packer: کلاهک، کلگی

پوشیده شده بود. تشعشع حرارتی از بخش بیرونی تجهیز، محل اتصال ترموکوپل در داخل چاه حرارتی را، اندکی خنک کرد.



شکل ۳۶-۲ چاه حرارتی بسیار کوتاه.

سطح مایعات

ما در گذشته، سطح مایع را مستقیماً با شناور داخلی، اندازه می‌گرفتیم. من تنها دو عدد از این تجهیزات کهنه و قدیمی را، طی ۲۰ سال گذشته دیده‌ام. در پالایشگاهی مدرن، سطح مایع را مستقیماً اندازه نمی‌گیریم. ما میزان سطح را بر اساس فشار تفاضلی^۱، به دست می‌آوریم. معمولاً پیدا کردن سطح بر اساس اندازه‌گیری فشار تفاضلی،

^۱ Differential pressure: اختلاف فشار، فشار تفاضلی

صحیح است. مشکل اینجاست که فشار تفاضلی، همزمان با سطح و چگالی سیال متناسب است. در دنیای واقعی ای که اپراتور فرآیند و مهندس واحد باید در آن کار کنند، جرم ویژه یا چگالی مایع در یک وسل، به چهار دلیل، عمدتاً ناشناخته و غیر قابل شناسایی است:

۱. چگالی با تغییر دما، تغییر می‌کند. به ازای هر 100°F افزایش دما، جرم ویژه نفتا ۵٪ کاهش پیدا می‌کند و برای آب، این میزان، ۲٪ است.

۲. چگالی با تغییر ترکیب شیمیایی شدیداً تغییر پیدا می‌کند. برای مثال نفتای سنگین ممکن است تا ۱۰٪ چگال‌تر از نفتای سبک باشد. این واقعیت، علت اصلی فاجعهٔ مرگ‌بار انفجار در «برج تفکیک رافینیت شرکت نفت بریتانیا»^۱ در محل سابق زندگی‌ام، تگزاس سیتی، در سال ۲۰۰۶ بود.

۳. هد- فشار ایجادشده توسط ۴/۵ فوت نفتا، معادل هد- فشار ایجادشده توسط سه فوت آب است. بنابراین یک لول سه فوتی از آب در شیشهٔ سطح‌نما ممکن است، معادل لول ۴/۵ فوتی سیال دیگری در یک وسل باشد.

۴. تقریباً تمام وسل‌های فرآیندی در واحدهای بهره‌برداری ترکیبات هیدروکربنی، یک لایهٔ کف (فوم) دارند که روی سطح مایع داخل برج، شناور است. من تراکم کف را (با استفاده از تشعشع) در مجاری فرآیندی پالایشگاه مشاهده کرده‌ام که، از ۱۰ تا ۴۵ پوند بر فوت مکعب تغییر می‌کند. نشانگر سطح^۲ (که در واقع فقط یک فرستندهٔ فشار تفاضلی است)، توسط متخصص ابزار و بر اساس چگالی ترکیبات هیدروکربنی فاقد کف، کالیبره می‌شود.

این موضوع کاملاً مسلم است: هنگامی که لول واقعی در یک وسل (خواه حاوی کف یا حاوی نفتای داغ)، از شیر اتصال بالایی، بالاتر رود، نباید انتظار داشت که سطح نشان‌داده شدهٔ مایع در داخل وسل، افزایش پیدا کند. اپراتورهای شرکت نفت بریتانیا در تگزاس سیتی، طبق شهادتشان در جریان شکایتی که پس از وقوع آن انفجار و آتش‌سوزی هولناک در برج تفکیک رافینیت شرکت نفت بریتانیا بابت فسخ قرارداد کاری‌شان از شرکت نفت بریتانیا کردند، از این واقعیت اطلاع نداشتند.

^۱ BP Raffinate Splitter: برج تفکیک کننده رافینیت شرکت نفت بریتانیا

^۲ Level Indicator: نشان‌گر سطح

دبی‌ها

هنگام نوشتن این کلمات، در حال برگشتن از سفری هستم که، از پالایشگاه رپسول^۱ در پورتولانو^۲ اسپانیا بازدید داشته‌ام. من با گروهی از مهندسان بسیار توانا همکاری کردم. رهبر گروه آن‌ها، جو سوتو^۳، گفت: «جریان سنج گاز آلوده^۴ سیستم آب‌بند^۵ مان کار نمی‌کند. جریان‌های بسیار نامنظمی را به ما نشان می‌دهد که بدون هیچ دلیل مشخصی، با ضریب دو یا حتی سه، تغییر می‌کنند. این موضوع عیب‌یابی خلأ ضعیف^۶ ما را دشوار کرده و سودآوری پالایشگاه مان را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. فاجعه بار است!»

من قبلاً هم شکایت‌هایی در مورد «کار نمی‌کند» را دربارهٔ جریان‌سنج‌های گاز آلوده برج خلأ به مدت ۵۰ سال، شنیده بودم. اما این بار تصمیم گرفتم، موضوع را به دقت بررسی کنم.

با مراجعه به شکل ۳-۳۶، مشاهده کردم که نصب جریان‌سنج صحیح است. اوریفیس پلیت^۷ به درستی نصب شده بود (یعنی اندازهٔ صفحه اریفیس بر روی دسته به سمت بالادست بود). ظروف گلیکول به درستی پر شده بودند و شیرهای اتصال اریفیس، واضح و تمیز بودند. معمولاً بهتر است یک اریفیس متر را در جهت افقی خط لوله نصب کنید؛ اما در جریان گاز، این موضوع اهمیت خاصی ندارد. اولین چیزی که مشاهده کردم این بود که، شیر «الف» بسته است. شیر «پ» نیز بسته بود، که کاملاً درست است. شیر «ب» باز بود که این نیز صحیح است. اما چرا شیر «الف» بسته بود؟

پس آن را باز کردم. متخصصان ابزار دقیق، شیرهای اتصال را تخلیه و ظروف گلیکول را مجدداً پر کردند تا اطمینان حاصل کنند که، همه چیز به درستی کار می‌کند. جریان نشان داده شده، همچنان کاملاً نامنظم و بسیار بالا بود.

^۱ Repsol Refinery: پالایشگاه رپسول

^۲ Puertollano: پورتولانو

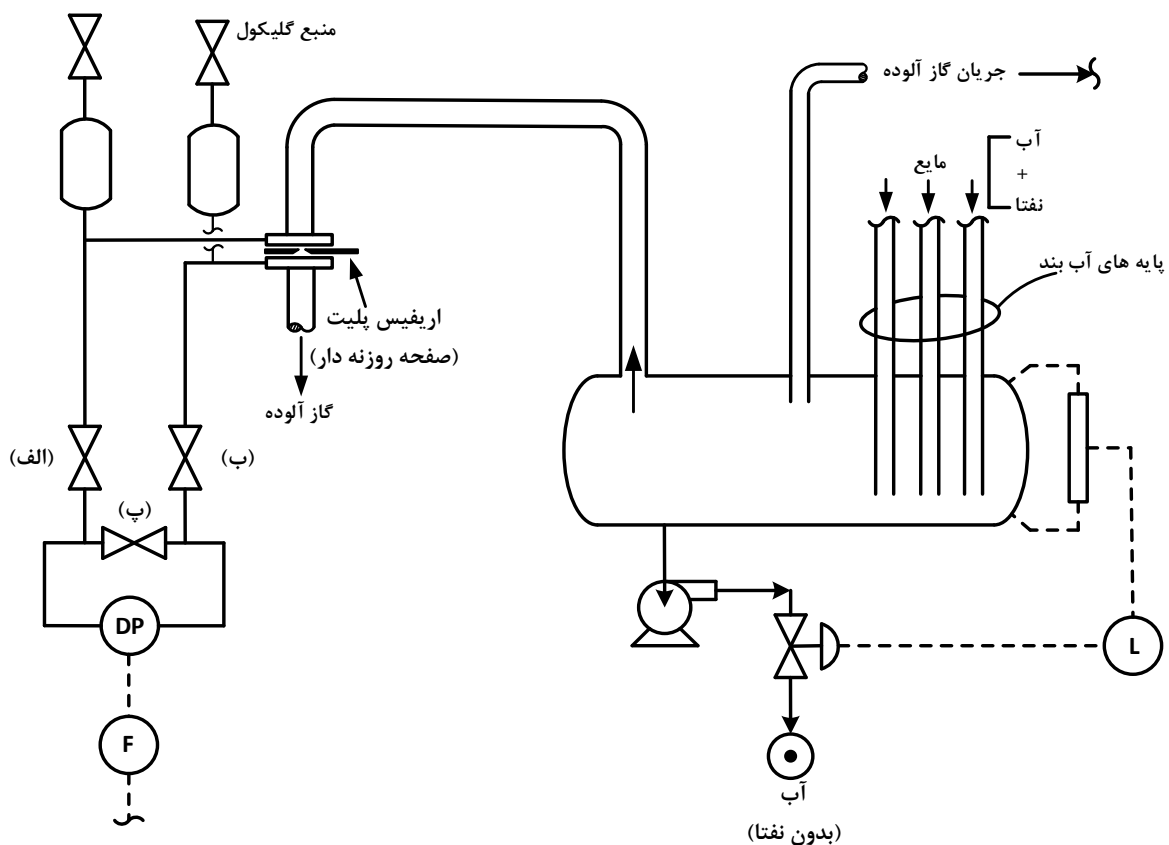
^۳ Jose Soto: جوسوتو

^۴ Off-gas: گاز آلوده

^۵ seal drum: سیستم آب‌بند

^۶ Poor vacuum: خلأ ضعیف

^۷ Orifice plate: اوریفیس پلیت، صفحه روزنه‌دار



شکل ۳-۳۶ کنترل ضعیف حد لول بین سطحی، منجر به تضعیف عملکرد جریان سنج گاز پسماند شده بود.

جو گفت: «فاجعه بار است آقای نورم! همیشه همین اتفاق می افتد. اصلا منطقی نیست.»

من پرسیدم: «اما جو، مقدار نفتای موجود در آب سیستم آب بند، چقدر است؟»

«صفر.»

پرسیدم: «جو، نرخ تولید نفتا چقدر است؟»

«صفر. ما هیچ نازلی برای خروج محصول^۱ نفتا از برج نداریم.»

پرسیدم: «اما جو پس نفتایی که همراه با آب از پایه های آب بند به داخل سیستم آب بند تخلیه می شود، کجا می رود؟»

^۱ نازل خروجی محصول از برج: Draw-off

«آهان نورمن. احتمالاً با گاز آلوده به بیرون جریان پیدا می‌کند. این موضوع، چگالی و DP گاز عبوری از دی‌سنج را افزایش می‌دهد. به همین علت است که مقادیر خوانده‌شده توسط گازسنج ما، همیشه بسیار نامنظم و بسیار بالا است. این مشکل ابداً ربطی به تجهیزات ابزار دقیق مربوط به جریان، ندارد. مسئله این است که ما هیچ نشانه‌ای از سطح فصل مشترک میان فازهای نفتا و آب، در سیستم آب‌بند نداریم. ضمناً هیچ راهی برای تخلیه فاز مایع نفتا از درام، وجود ندارد. این یک خطای فرآیندی است. مشکلاتی مانند این، اغلب در آمریکا هم رخ می‌دهند؟»

«قطعاً. به نظرت من پول کافی برای خرید خانه‌ای با هفت سرویس بهداشتی و یک استخر شنا را چگونه به دست آورده‌ام؟»

هیچ جریان سنج روزنه‌داری نمی‌تواند یک جریان متغیر بخار-مایع را تحمل و نتیجه منطقی، تولید کند. این سرعت نیست که تغیر می‌کند؛ بلکه چگالی است که تغییرات بسیار زیادی دارد.

اریفیس‌ها (برخلاف شکل ۳۶-۳)، ۹۹٪ مواقع در جهت افقی لوله‌کشی واقع هستند. شیرهای اتصال اریفیس باید بر خلاف بسیاری از واحدهای فرآیندی، بالاتر از لبه‌های (فلنج‌های) اریفیس قرار بگیرند (نه در زیر لبه‌های آن) تا از گرفتگی و تجمع آب در خطوط لوله پرشده از گلیکول را، کاهش دهد.

نمونه‌ها

دوستم، استیو^۱، سرانجام مدرک حقوقش را اخذ کرد. او اکنون در بومانت^۲ مشغول وکالت است و دیگر در حرفه مهندسی فعالیت نمی‌کند. موارد زیر، سه مورد از اشتباهاتی هستند که استیو هنگام نمونه‌گیری مرتکب شده است:

• **اشتباه اول** - استیو به یک نمونه نفتا از واحد تقطیر نفت خام^۳ برای طراحی برج بوتان‌زدای جدید نفتا نیاز داشت. فشار و دمای درام رفلاکس (جریان برگشتی) برج نفت خام، به ترتیب ۱۰ psig و ۱۳۰ °F بود. او نمونه را شخصاً و در یک بطری شیشه‌ای گرفت. تا زمانی که او نمونه را به آزمایشگاه تحویل دهد، بیشتر اتان و پروپان موجود در نفتا، تبخیر شده بود. شبیه‌سازی کامپیوتری او نشان داد که فشار مورد نیاز بوتان‌زدا

^۱ استیو: Steve

^۲ Beaumont: بومانت

^۳ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

۸۰ psig است. در واقع او به فشاری معادل ۱۳۰ psig، برای متراکم‌سازی برش‌های سبک انتهایی، احتیاج داشت. استیو باید از یک نمونه بمبی^۱ که کاملاً از مایع پر شده بود، استفاده می‌کرد.

● **اشتباه دوم** - استیو به یک نمونه گاز مرطوب از همان درام رفلاکس، برای تعیین اندازه و مشخصات کمپرسور گریز از مرکز جدید، نیاز داشت. او نمونه را در یک بمب گرفت. تا زمانی که نمونه را به آزمایشگاه تحویل دهد، بیشتر پنتان و هگزان موجود در نمونه، متراکم شده بودند. او وزن مولکولی موردنیاز برای این کمپرسور جدید را ۳۸ MW به دست آورد. اگر او ترکیبات متراکم‌شده نفتا را نیز در نظر می‌گرفت، وزن مولکولی ۵۲ به دست می‌آمد. در نتیجه، موتور محرکه نصب‌شده برای کمپرسور جدید کوچک^۲ بود و در آمپره‌های بالا، از سرویس خارج می‌شد. استیو باید قبل از عبور دادن نمونه از کروماتوگراف گاز برای آنالیز آن، نمونه را در آزمایشگاه گرم می‌کرد.

در هر دو مورد، دوست من باید مطمئن می‌شده است که، نمونه‌های او در نقطه حباب محاسبه‌شده (نفتا) یا نقطه شبنم محاسبه‌شده (گاز مرطوب) باشند.

● **اشتباه سوم** - استیو از اپراتوری خواست تا نمونه‌ای از پسماند برج خلأ در دمای ۴۵۰ °F در یک ظرف نمونه^۳ بگیرد. اپراتور ظرف نمونه را انداخت و پسماند خودبه‌خود مشتعل شد. دمای اشتعال خودبه‌خودی قیر داغ، ۳۲۰ °F یا حتی کمتر است. ما اجازه نداریم نمونه‌های گرفته‌شده را در دمایی بالاتر از دمای اشتعال سیالات، در ظرف‌های درباز، نگهداری کنیم. دمای خوداشتعالی بنزین نیز معمولاً ۴۵۰ °F است.

استیو وکیلی فوق‌العاده خواهد بود. او احتمالاً ثروتمند خواهد شد؛ به ویژه با پیش‌زمینه‌ای که در مهندسی فرآیند دارد. مطمئنم بسیاری از مشتریان من می‌توانند از مشاوره‌های حقوقی او بهره‌مند شوند. در حال حاضر درآمد او برای یک ساعت کار، بیشتر از من است. او احتمالاً خانه‌ای با هشت سرویس بهداشتی و برای همسرش نیز یک مرسدس بنز خواهد خرید.

^۱ Bomb sample: نمونه بمبی

^۲ Undersize: کوچک

^۳ Sample can: ظرف نمونه



تمیز کردن تجهیزات فرآیندی

چکیده:

در سرویس تقطیر برای تمیزکاری شیمیایی یک بستر پرشده، از گردش محلول زایم^۱ یا اسید سیتریک استفاده می‌شود. برای جلوگیری از ایجاد کاناله‌شدن مسیر مایعات، بهتر است، به گردش درآوردن این مواد در بستر، از پائین به بالا صورت گیرد.

تمیز کردن سمت لوله مبدل پوسته لوله U شکل و لوله مبدل‌های گرمایی، زمانی که زانویی برگشتی مسدود شده باشد، می‌تواند دشوار باشد.

در صورت استفاده از لوله‌هایی با گام مثلی یا در صورتی که فاصله بین لوله‌ها تیوب‌ها کمتر از ۳/۸ تا ۱/۲ اینچ باشد، تمیز کردن سمت پوسته مبدل‌ها، بسیار دشوار است. آرایش مربعی دوران‌یافته، بهترین گزینه برای تمیز کردن مطلوب سمت پوسته است.

کلمات کلیدی:

زایم؛ گام لوله؛ تمیز کردن؛ بستر پرشده؛ سمت پوسته؛ لوله‌های U شکل؛

^۱ Zyme solution: محلول زایم

پنج نوع تجهیز فرآیندی وجود دارند که باید به طور منظم تمیز شوند:

۱. برج‌های تقطیر: هم از نوع پرشده و هم از نوع سینی‌دار؛

۲. مبدل‌های‌های حرارتی: سمت پوسته و لوله؛

۳. کوره‌ها: سمت لوله - کک زدایی؛

۴. کولرهای هوایی (ایرفن‌ها): لوله‌های پره‌دار خارجی (این موضوع درباره توده تیوب‌های جابجایی کوره‌ها نیز صادق است)؛

۵. پروانه‌های روتور کمپرسورهای گریز از مرکز.

من تصمیم دارم در مورد هر دو شیوه شست‌شو، چه زمانی که واحد در سرویس است و چه زمانی که واحد خارج از سرویس است، بر اساس تجربیاتم و نه بر اساس ادعاهای بیشمار منتشرشده از سوی سازندگان که، شست‌شوی شیمیایی^۱ را پیشنهاد می‌دهند، بحث کنم.

ستون‌های تقطیر پرشده

بر اساس مشاهدات من پس از به جریان‌انداختن مجدد، تمیزکردن برج‌هایی که با بستری از پکینگ‌های نوع انباشته‌ای (حلقه‌ای یا رنده‌ای^۲) پر شده‌اند، دشوار است. به عنوان مثال، من برج گازشویی^۳ با قطر داخلی ۸ فوت و ۶ اینچ داشتم که با پکینگ پال رینگ^۴ آلومینیومی به قطر ۳ اینچ پر شده بود. من در هنگام انجام تعمیرات، تصمیم گرفتم نمک‌های سولفات محلول در آب را، تمیز کنم؛ چرا که سال گذشته برج گازشوی (اسکرابر) در معرض طغیان

^۱ Chemical cleaning: شست‌شوی شیمیایی

^۲ Saddle: رنده‌ای

^۳ Scrubber: برج شست‌شو دهنده

^۴ Pall Rings: پال رینگ

قرار گرفته بود. دریچه^{۲۴} اینچی ورود به برج^۱ در بالای ستون را برداشتم و ستون را با یک شلنگ آتش‌نشانی^۳ اینچی شست‌شو دادم.

هنگامی که ستون را مجدداً مورد بهره‌برداری قرار دادیم، راندمان شست‌شو، شدیداً پایین بود. ما نتوانستیم بخارات SO_3 را با گردش محلول سولفوریک اسید رقیق، جذب کنیم. مه اسید سولفوریک وحشتناکی از ستون خارج و وارد هوای مرطوب تگزاس سیتی شد. حتی همسرم از خانه با من تماس گرفت تا از مه غلیظ سفیدرنگ اسید شکایت کند. توقف عملیات، تنها راه ممکن بود.

این بار پس از شست‌شوی «بالا به پایین»^۲ برج با آب، وارد برج شدم تا حلقه‌ها را بررسی کنم. ستون پر شده تا ارتفاع چند فوتی بالای بستر کاملاً تمیز بود. اما همین‌طور که عمق پکینگ‌ها را بازرسی و حلقه‌ها را در سطل‌های^۳ ۵ گالنی از برج خارج کردیم، متوجه مشکل شدم.

آبراهه‌شدن^۴! این مشکل هنگامی که تا عمق ۲۵ فوتی بستر پیش رفتیم، تدریجاً بدتر شد. واضح بود که جریان بخار از میان حلقه‌های تمیز جریان یافته و مسیری را دنبال کرده بود که حداقل مقاومت را داشت. به این ترتیب راندمان تماس مایع-بخار شدیداً کاهش یافته بود.

من تک‌تک سطل‌های حاوی حلقه‌ها را، روی زمین ریختم و به دقت با آب شستم. پس از این که حلقه‌ها کاملاً تمیز شدند، دوباره آن‌ها را با سطل به داخل برج برگرداندند. اما این جابجایی، اندازه تعداد زیادی از حلقه‌های ظریف آلومینیومی را تغییر داده بود. این موضوع فضای باز حلقه‌ها را کاهش داد. بنابراین هنگامی که مجدداً عملیات را آغاز کردیم، برج گازشوی، طغیان کرد؛ زیرا فاز مایع نمی‌توانست به آسانی از میان پکینگ‌های آلومینیومی آسیب‌دیده، جریان پیدا کند.

شستن برج‌های پر شده از پایین به بالا

من در سال ۱۹۸۵ در میادین تولید گاز طبیعی در جنوب لاریدو^۵ تگزاس، کار می‌کردم. یکی از روزها، با مشکل طغیان کردن یک برج جاذب آب‌زدایی گلیکول با قطر داخلی ۳ فوت، مواجه شدم. گاز طبیعی با رطوبت، اشباع شده بود و باید قبل از انتقال از طریق خط لوله، رطوبت آن به صورت شیمیایی و با استفاده از گلیکول (ماده‌ای خشک‌کن)

^۱ Manway: دریچه ورود به برج یا وسل

^۲ The Top-Down: بالا به پایین

^۳ Bucket: سطل

^۴ Channeling: آبراهه‌سازی

^۵ Laredo: لاریدو

گرفته می‌شد و آب آن تا غلظت چند ppm، کاهش پیدا می‌کرد. برج جاذب با راشینگ رینگ‌های ۲ اینچی پر شده بود. من بر حسب تجربه آموخته بودم که چنین برج‌هایی به دلیل خوردگی محصولات محلول در اسید، مانند سولفید آهن، طغیان می‌کنند. بنابراین تصمیم گرفتم درخواست کامیونی مجهز به یک پمپ گردشی را بدهم تا در ساعت ۹ شب، در بیابان، به من ملحق شود. ماه جولای بود و در طول روز دما در محل چاه به ۱۱۰ تا ۱۱۵ °F می‌رسید. بهتر بود کار را در خنکی شب انجام دهیم.

اسیدی که سفارش داده بودم، اسید هیدروکلریک (HCl) رقیق‌شده ۱۰٪ بود. در حال حاضر (۲۰۱۹)، من از اسید سیتریک و به دنبال آن یک خنثی‌کننده یا محلول زایم استفاده می‌کنم؛ زیرا اسید هیدروکلریک، بسیار خورنده است.

هنگامی که من با ماشین به محل چاه رسیدم، کامیون اسید در آنجا منتظر من بود. راننده در حال سرهم‌بندی خطوط گردش اسید خود برای به گردش درآوردن اسید از بالا به پایین بود. من با یادآوری ناکامی‌ام در تگزاس سیتی، وی را متوقف کردم.

«دوست من، شلنگ برگشت را به نازل ۳ اینچی بالایی وصل کن. اسید تازه را به نازل ۴ اینچی پایینی متصل کن. ما قبلاً برج را با آب تمیز شست‌شو داده‌ایم. متوجه شدی؟ ما قصد داریم تا نیمه‌شب، اسید را از پایین به بالا بچرخانیم.»

«اما آقا، ما باید تمام ارتفاع ۳۰ فوتی برج را با اسیدمان پر کنیم. شاید کامیون من اسید کافی نداشته باشد یا شاید خالی شود.»

«شاید حق با تو باشد. فوراً یک کامیون اسید دیگر نیز سفارش می‌دهیم.»

این همان مشکلی‌ست که در گرداندن محلول تمیزکننده از پایین به بالا، به جای گرداندن آن از بالا به پایین وجود دارد. تمام بستر پرشده باید از محلول تمیزکننده، پر شود. این کار هزینه‌بر است، اما قطعاً آن شب در لاریدو موفقیت‌آمیز واقع شد. به جز آنکه من از یک مار زنگی ۳ فوتی که خودش را دور پایهٔ برج جاذب حلقه کرده بود وحشت‌زده شدم.

به طور خلاصه، هرچقدر قطر برج کوچک‌تر باشد، چرخاندن محلول از پایین به بالا در آن، عملی‌تر است. برای برج خلأیی با قطر داخلی ۴۶ فوت و ارتفاع حجمی^۱ ۱۱۰ فوت در عربستان سعودی، این کار به هیچ‌وجه عملی نیست.

تانژانت به تانژانت، فاصله بین دو خط جوش کلاهک‌های استوانه‌ای، ارتفاع حجمی مورد استفاده در عملیات: Tangent to Tangent (T-T)^۱

برج‌های سینی‌دار

برای برج‌های مجهز به سینی‌های کلاهکی قدیمی، شست‌شوی شیمیایی برج امکان‌پذیر نیست. هر کلاهک باید باز شود و فضای میان دودکش^۱ و کلاهک به‌صورت دستی^۲ تمیز شود. تلاش برای تمیز کردن چنین سینی‌هایی با حذف این مرحله، با شکست کامل مواجه شده و به نتایج بدی انجامیده است. یعنی برج به محض راه‌اندازی طغیان کرده است.

برای سینی‌های مشبک مانند:

• غربالی^۳؛

• دریچه‌ای^۴؛

• شبکه‌ای^۵؛

• دوطرفه^۶؛

• نواری^۷

چرخاندن محلول تمیزکاری از بالا به پایین ممکن است بسته به قطر برج، نرخ گردش و همچنین تعداد، اندازه و الگوی توزیع سوراخ‌ها، نتایج متفاوتی داشته باشد. سایر متغیرهای حائز اهمیت شامل تعداد سینی‌ها و طول زمان گردش هستند.

تجربه من در رابطه با تمیز کردن سینی‌ها با چرخش از بالا به پایین متفاوت است. معمولاً، اما نه همیشه، بازرسی داخل برج نشان می‌دهد که سینی‌ها به حد معقولی، تمیز شده‌اند. اما در سایر موارد، نتایج کاملاً ناامیدکننده هستند.

^۱ Chimney: دودکش

^۲ Manually: به صورت دستی

^۳ Sieve: غربالی

^۴ Valve: دریچه‌ای

^۵ Grid: شبکه‌ای

^۶ Duplex: دوطرفه

^۷ Tabs: نواری

تمیز کردن سمت لوله مبدل های حرارتی

من برای تمیز کردن سمت لوله یک مبدل حرارتی، با فرض اینکه سیال گرم کننده در سمت پوسته قرار دارد، مراحل زیر را دنبال می کنم (شکل ۳۷-۱) را ببینید:

• **گام اول** - شیر ورودی سمت لوله را ببندید؛

• **گام دوم** - شیر کنارگذر^۱ سمت لوله را باز کنید؛

• **گام سوم** - شیر کوچک سیال تمیزکاری (شستشو) را باز کنید؛

• **گام چهارم** - ۱۰ تا ۳۰ دقیقه صبر کنید؛

• **گام پنجم** - گام های ۱ تا ۳ را معکوس کنید.

رسوباتی که موجب گرفتگی سمت لوله شده اند، به احتمال زیاد به دلیل انبساط حرارتی لوله ها خرد یا در سیال تمیزکاری حل خواهند شد. یا حتی ذوب خواهند شد. یا به دلیل ورود مجدد ناگهانی جریان در سمت لوله، به بیرون رانده خواهند شد.

من این روش، که آن را «رسوب شکنی برخط»^۲ نامیده ام، در سال ۱۹۶۹ در بزرگترین واحد تقطیر نفت خام^۳ جهان، در وایتینگ ایندیانا، به کار برده ام و نتایجی عالی کسب کردم.

در تمیز کردن خارج از سرویس^۴ سمت لوله مبدل، لوله ها به آسانی آب فشانی (هیدروبلاست)^۵ می شوند. به کارگیری این روش برای لوله های مستقیم ساده است؛ اما در مورد یک دسته لوله U شکل، می تواند تا حدی دشوار باشد.

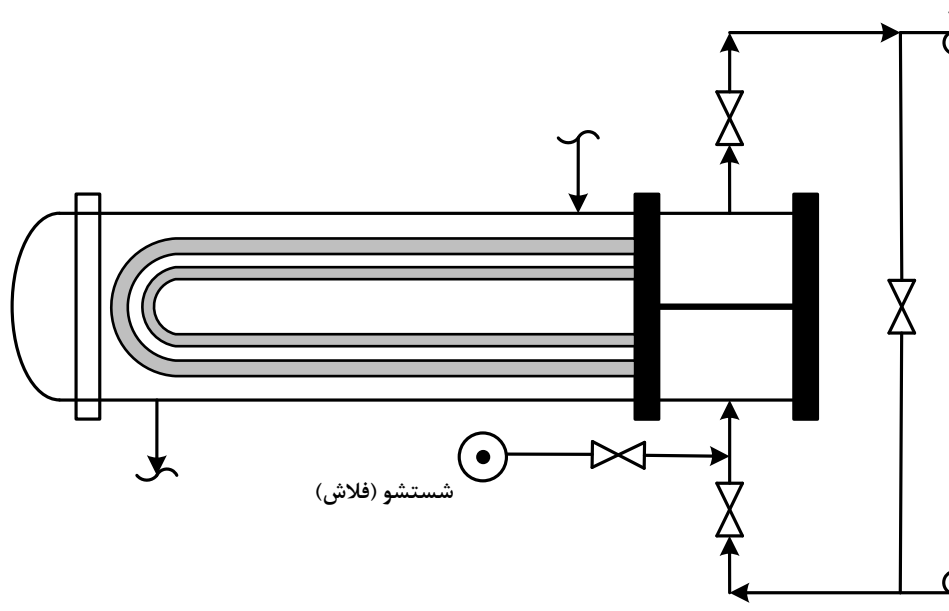
^۱ Bypass: کنار گذر

^۲ On-line Spalling: رسوب شکنی برخط

^۳ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

^۴ Off-line cleaning: تمیز کردن خارج از سرویس

^۵ Hydroblast: آب فشانی، هیدروبلاست



شکل ۳۷-۱ مبدل حرارتی پوسته و لوله با دسته لوله U شکل.

آب‌فشانی (هیدروبلاست) دسته لوله‌های U شکل

یک بار مشغول تماشای یک کارگر تعمیرات قراردادی بودم که دسته لوله‌های U شکلی را که من خواسته بودم تمیز شود، هیدروبلاست می‌کرد. برای چنین دسته لوله‌هایی، هیچ راه بصری‌ای برای فهمیدن این که خم برگشتی واقعاً تمیز شده یا نه وجود ندارد. فرد باید جریان آب خروجی از سمت برگشت لوله U شکل را تحت نظر بگیرد.

در این مثال، من متوجه شدم که در ۲۰ تا ۳۰٪ لوله‌ها، تنها باریکه کوچکی از جریان آب از طرف برگشت بیرون می‌آید. از کارگر تعمیرات پرسیدم که چطور می‌خواهد گرفتگی^۱ زانویی‌های برگشتی دسته لوله U شکل را تمیز کند؟

او توضیح داد: «آقای لیبرمن من از ابزاری مخصوص برای لوله‌های مسدود شده و به منظور جاری کردن آب میان این لوله‌ها استفاده می‌کنم. مشکل ما خم برگشتی است.»

«بسیار خوب. اما چگونه به یاد می‌آوری که کدام یک از این ۵۰۰ لوله مسدود شده است؟»

«آهان! من حافظه‌ای تصویری دارم. من فقط به نوعی به خاطر می‌آورم که کدام لوله مسدود شده است؛ بنابراین می‌توانم بعداً، آن‌ها را تمیز کنم.»

^۱ گرفتگی، انسداد: Plug

حدس می‌زنم دو احتمال وجود دارد. یا آن مرد، صاحب ذهنی افسانه‌ای بود یا اینکه به هیچ وجه قصد تمیز کردن لوله‌هایی که مسدود بودند را نداشت. این مشکلی رایج است. چگونه باید یک دسته لوله U شکل را بررسی کرد تا مطمئن شد که واقعاً به طور کامل تمیز شده است؟ من زمانی که در تگزاس سیتی مشغول کار بودم، هوا را از یک شلنگ هوا به داخل هر یک از لوله‌ها می‌دمیدم و می‌دیدم که آیا هوا از انتهای لوله برگشت خارج می‌شود یا نه؟ در مورد دسته‌های مجاورکننده (کنتاکتور) واحد آلکیلاسیونم با قطر داخلی ۶۰ اینچ، این کار می‌توانست حدوداً یک ساعت یا بیشتر برای هر کدام از دسته لوله‌های U شکل طول بکشد.

تمیزکاری با اسید

من در دهه ۱۹۷۰ استاد تمیزکاری واحد آلکیلاسیونم با اسید بودم. من هر هفته، سمت لوله یکی از ۲۰ تا ۳۰ کولر را هنگامی که در حال کارکردن با آب بود، تمیز می‌کردم.

- **قدم اول**، متصل کردن کامیون هیدروکلریک اسید رقیق شده ۱۰٪ به ورودی آب خنک کننده بود؛
 - **قدم دوم**، متصل کردن یک منبع سودسوزآور^۱ ۱۲-۱۵٪ به خروجی آب بود.
 - **قدم سوم**، به جریان انداختن اسید برای رسیدن به pH یک تا سه در خروجی آب خنک کننده بود.
 - **قدم چهارم**، به جریان انداختن NaOH با نرخ کافی، برای حفظ pH آب برگشتی به برج خنک کننده واحد در مقدار ۵/۵ تا ۷/۵ (ترجیحاً ۶/۵) بود.
- pH بسیار بالا باعث می‌شود که آب خنک کننده گردشی در واحد، به دلیل ته نشینی نمک‌های حل شده آهن، که باعث گرفتگی مبدل‌ها بودند، کدر و قهوه‌ای شود. بدین ترتیب در انشعاب اصلی^۲ برگشتی خطوط لوله آب خنک کننده، که از جنس فولاد کربنی ست، نشتی به وجود می‌آید.

^۱ Caustic: سود سوزآور

^۲ Header: هدر، انشعاب اصلی

برای نتیجه‌بخشی تمیزکاری با اسید، به زمان ۱۵ الی ۳۰ دقیقه یا کمتر نیاز است. من پیش از اسیدشویی (تمیزکاری با اسید) سمت آب راه، شست‌شوی معکوس^۱ می‌دادم. اخیراً اغلب از اسید سیتریک استفاده می‌شود؛ اما من فقط از HCl استفاده کرده‌ام؛ زیرا در شوگرلند^۲ تگزاس فقط شماره تماس شرکتی را داشتم که HCl آموکو^۳ می‌فروخت.

تمیز کردن سمت پوسته

در پیکربندی برخی از مبدل‌های حرارتی، صفحه لوله^۴ ثابت است. ورودی و خروجی سمت لوله، در دو طرف پوسته مبدل واقع شده‌اند. در این نوع از مبدل‌ها نمی‌توان دسته لوله را برای تمیزکاری خارج کرد و هرگز نباید از سیالی که رسوب ایجاد می‌کند، در سمت پوسته این مبدل‌ها، استفاده کرد.

من چندین بار تلاش کرده‌ام که سمت پوسته مبدل‌هایی که صفحه لوله ثابت دارند را با گردش طیف وسیعی از سیالات تمیز کنم و هر بار تا حد کمی، موفق بوده‌ام. افت فشار مبدل، اندکی کاهش یافت اما راندمان انتقال حرارت بهبود چشم‌گیری پیدا نکرد.

حتی زمانی که بتوان دسته لوله را از داخل پوسته آن خارج کرد؛ باز هم در موارد زیر امکان دارد بخش زیادی از آن قابل تمیز کردن نباشد:

- فاصله بین لوله‌ها ۱" یا ۱۵/۱۶" باشد؛
- آرایش (گام) لوله^۵ مثلثی باشد؛
- اندازه لوله، ۳/۴ اینچ باشد؛
- دسته لوله بزرگ (یعنی با قطر داخلی بیش از ۳۶"-۶۰")، باشد.

^۱ Back-flush: شست‌شوی معکوس

^۲ Sugarland: شوگرلند

^۳ Amoco: آموکو

^۴ Tube sheet: صفحه لوله

^۵ Tube pitch: آرایش لوله، گام لوله، فاصله بین مراکز تیوب‌های مجاور در یک مبدل حرارتی

در چنین دسته لوله‌ای هیچ مجرای مستقیمی وجود ندارد. در بهترین حالت، تنها دو یا سه ردیف بیرونی قابل تمیز کردن هستند. در پالایشگاه آموکو، چنین دسته لوله‌هایی به مدت یک یا دو هفته در ظرف‌هایی پر از محلول خورنده کلرید غوطه‌ور می‌شدند که در نهایت، به عقیده من، منجر به حذف رسوبات داخلی می‌شد.

به منظور اجتناب از چنین مشکلاتی من مبدل‌های حرارتی جدیدی را با شرایط:

- لوله‌های ۱ اینچی؛

- فاصله یک و نیم اینچی بین لوله‌ها و

- آرایش^۱ مربعی دوران یافته

طراحی کردم.

چنین پیکربندی‌ای یک مسیر مستقیم ۵/۰ اینچی را میان ردیف‌های لوله و در تمام جهات ایجاد می‌کند. البته این پیکربندی مساحت مبدل را ۳۰ تا ۵۰٪ برای پوسته‌ای با قطر مشخص کاهش می‌دهد. اما این هزینه‌ای است که ما برای حصول توانایی تمیز کردن سمت پوسته، می‌پردازیم.

کولرهای هوایی

من شخصاً با تمیز کردن سه کولر هوایی مکش اجباری^۲، احساس کاملاً خوبی نسبت به بهترین روش تمیز کردن لوله‌های پره‌دار خارجی برای بازیابی جریان هوای خنک‌کننده، دارم. شستن از بالا به پایین، عمدتاً بی‌نتیجه است. این اتفاق هر زمانی که باران می‌بارد رخ می‌دهد. به هر حال بیشتر کثیفی‌ها بین پره‌ها و در دو ردیف پایینی پره‌ها قرار دارند. پیشنهاد من این است که مراحل زیر را دنبال کنید:

- **گام اول:** برداشتن صافی^۳ محافظ پایین و تمیز کردن سطح زیرین پره‌ها با یک جارو؛

^۱ آرایش: Pitch

^۲ Forced draft: گردش اجباری

^۳ Screen: صافی، توری

• **گام دوم:** با فرض اینکه فن توسط یک موتور محرکه AC سه فاز (۲۴۰ ولت) به حرکت درمی‌آید، قطبیت سیم‌ها را معکوس کنید تا فن در جهت عکس حرکت کند و مقداری از حشرات مرده و دانه‌های بید را از لوله‌های پره‌دار را بیرون براند؛

• **گام سوم:** پره‌ها را به مدت چند ساعت در مواد شوینده قرار دهید. سپس یک منبع آب تمیز را با فشار ۳۰-۴۰ psig در ارتفاع پنکه نگه دارید. با استفاده از لوله‌ای ۵/۰ اینچی، آب را از فاصله ۱۲ تا ۱۸ اینچی بین ردیف پایینی لوله‌ها فواره کنید. هشدار: بیشتر پره‌ها آلومینومی هستند و به آسانی تغییر شکل می‌دهند.

من همیشه شخصاً برق موتور فن را قطع می‌کنم. همچنین تیغه فن را نیز با طنابی می‌بندم. برای شست‌شوی یک دسته لوله، حداقل ۱ تا ۲ ساعت زمان لازم است. توجه داشته باشید که تمیز کردن سطح خارجی دسته لوله، بار آمپر روی موتور فن را کاهش نمی‌دهد. این کار نیازمند کاهش زاویه تیغه فن، حداکثر ۲۳ درجه و حداقل ۱۰ درجه، است.

شست‌شوی نواری^۱ لوله‌های خنک کننده هوایی

من باید در یک واحد کک‌سازی تأخیری با ظرفیت BSD ۸۰۰۰ در لس‌آنجلس، عملکرد کولرهای هوایی کندانسور بالاسری ستون تقطیر جزیه‌جز را بهبود می‌دادم. آنجا، ۳۲ عدد از این کولرها به صورت موازی با یکدیگر قرار گرفته بودند. من تصمیم گرفتم تا هشت عدد از دسته لوله‌هایی که بدترین عملکرد را داشتند، با آب شست‌شو دهم. من در یک زمان تنها می‌توانستم یکی از دسته‌لوله‌ها را (بدون توقف جریان فرآیندی) بشویم؛ زیرا توانایی جابجایی پساب حاصل از شست‌شو محدود بود. همچنین من تا پرواز برگشتم به خانه تنها یک روز زمان داشتم. شست‌شوی هر کولر، شامل برقراری اتصالات شلنگ، یک ساعت طول می‌کشید. ترفند این بود که دسته لوله‌هایی را انتخاب کنید که بیشترین گرفتگی یا مسدودشدگی را در طرف لوله داشتند.

من برای شناسایی این کولرها، به دنبال آن‌هایی گشتم که کمترین دمای خروجی را داشتند، که نشانه‌ای محتمل از جریان کم بود. سپس در بین آن‌ها دمای خروجی هوا را بررسی کردم. مبدل‌هایی که هوای خروجی کم، به همراه دمای خروجی پایینی داشتند، همان مبدل‌هایی بودند که به شدت در طرف لوله مسدود شده بودند و به شست‌شوی نواری، نیاز داشتند.

^۱ Slug Washing: شست‌شوی نواری

پس از شسته شدن هر یک از دسته لوله، هم هوای خروجی و هم دمای خروجی، به دلیل بازیابی دبی فرآیندی و بار حرارتی^۱، افزایش پیدا کرد.

لوله‌های جابجایی هیتر احتراقی

اگر لوله‌ها از بالای بخش تشعشعی قابل دسترس بودند، من از همان روش مشابه برای تمیز کردن دسته لوله جابجایی پره‌دار یا گل‌میخ‌دار^۲ استفاده می‌کردم. بسته به سوختی که به کار می‌رود، بیشتر این رسوبات ممکن است به جای دوده، نمک‌های وانادیوم حاصل از نفت کوره باشند. رسوبات وانادیم می‌توانند کاملاً ضخیم باشند و رسوبی سفیدرنگ و نرم، حداقل بر روی سطح لوله‌ها ایجاد کنند.

متأسفانه اغلب پره‌ها در بخش جابجایی به علت شرایط پس‌اشتعالی^۳، اکسید می‌شوند. پره‌ها حالت زنگ‌زده به خود می‌گیرند و می‌توانید آن‌ها را با فشار انگشتان دستتان بشکنید. تمیز کردن لوله‌ها به روش آب‌فشانی^۴، تنها گزینه خواهد بود.

حذف کک از داخل لوله‌های تشعشعی

روش جدید و صحیح برای حذف کک از داخل لوله‌های تشعشعی، ترکیبی از دو روش زیر است:

- پیگزنی یا توپک‌رانی؛

- سوزاندن.

«پیگزنی»^۵ با وارد کردن یک «پیگ یا توپک» از طریق لوله کوره با فشار بالای آب انجام می‌شود. من در حال نوشتن این کلمات چنین پیگی را در دست دارم. طول آن حدوداً ۸ اینچ و عرضش نیز حدود ۵ اینچ است. کار آن حذف کک از داخل لوله کوره‌ای با قطر داخلی ۶ اینچ است. جنس آن از نوعی پلاستیک سخت است و تعداد زیادی

^۱ Heat duty: بار حرارتی

^۲ Stubbed: گل‌میخ‌دار

^۳ After burn: پس‌اشتعالی

^۴ Hydroblasting: آب‌فشانی، هیدروپلاست کردن

^۵ Pigging: پیگزنی یا توپک‌رانی

گل‌میخ فلزی با طول تقریبی ۰/۲۵ اینچ از سطح آن بیرون زده است. هنگام پیگزنی لوله کوره، به تدریج از پیگ‌هایی با قطر بزرگ‌تر تا قطر کمی کوچک‌تر از قطر داخلی لوله استفاده می‌شود.

من اخیراً برای پالایشگاهی در دیترویت^۱ و بر روی یک برج کک‌سازی تأخیری نسبتاً جدید کار می‌کردم. آن‌ها به تازگی کوره‌ای را پس از پیگزنی مجدداً به کار انداخته بودند. عملکرد کوره (یعنی افت فشار کوئل) حاکی از ناقص‌بودن فرآیند حذف کک بود. این اتفاق طبیعی است. پیگزنی تقریباً هیچ‌گاه به معنی حذف کامل کک از داخل لوله‌های کوره نیست.

من به اپراتورهای کارخانه توصیه کردم که با استفاده از روش قدیمی «کک‌زدایی با بخار آب-هوا»^۲ کک باقیمانده را بسوزانند. ترکیبی از چند درصد هوای پراکنده‌شده در بخار آب با فشار ۱۵۰ تا ۵۰۰ psig که تا دمای ۱۰۰۰ الی ۱۲۰۰۰ درجهٔ فارنهایت گرم شده، به داخل لوله‌های کوره تزریق می‌شود. کک باقیمانده در داخل لوله‌ها خواهد سوخت. از کربن دی‌اکسید موجود در خروجی کوره، به عنوان نشانه‌ای از مقدار کک باقیمانده، استفاده می‌شود. هنگامی که هیچ کربن دی‌اکسیدی در خروجی کوره وجود نداشته باشد. تمام کک حذف شده است. من این مرحله را «گواه سوختن»^۳ می‌نامم.

مشتری من در دیترویت نمی‌توانست به توصیهٔ من عمل کند؛ زیرا واحد جدید آن‌ها برای انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از سوزاندن کک از شهر دیتوریت مجوز محیط‌زیستی نگرفته بود.

خرد کردن^۴ و آب‌فشانی کردن

در دههٔ ۱۹۳۰ تا ۱۹۶۰، تمیزکردن کک از لوله‌های کوره با برداشتن دریچه‌هایی (که mule-ears یا گوش الاغی نامیده می‌شدند) که در انتهای لوله‌های قرار داشتند، صورت می‌گرفت. سپس لوله‌ها با روش آب‌فشانی از کک پاک می‌شدند. امروزه تعداد بسیار اندکی از کوره‌ها دارای این ویژگی ارزشمند هستند و در اغلب کوره‌ها، این دریچه‌ها با خم‌های U شکلی جایگزین شده‌اند که در محل خود جوش داده شده و قابل جابه‌جایی نیستند.

^۱ Detroit: دیترویت

^۲ Steam-Air Decoking: کک‌زدایی بخار آب - هوا

^۳ Proof Burning: گواه سوختن

^۴ Spalling: خرد کردن

در دهه ۱۹۶۰، خرد کردن، جایگزین آب‌فشانی شد. لوله‌های داغ در معرض دبی‌ها و دماهای مختلف بخار آب قرار می‌گرفتند که باعث می‌شد کک از داخل لوله‌ها کنده شود. سپس بخار آب، کک را از داخل لوله خارج می‌کرد. مقادیر کمی از هوا به طور متناوب به بخار آب اضافه می‌شد تا کک باقیمانده را بسوزاند. بیش از ۹۰٪ کک، تنها با افزودن چند درصد هوا می‌سوزد. من همیشه این روش قدیمی را برتر از روش جدید پیگ‌زنی، می‌دانستم.

تمیز کردن سطح خارجی لوله‌های کوره

هنگام سوزاندن گاز، هیچ رسوبی بر روی سطح خارج لوله تشکیل نمی‌شود. هنگام سوزاندن نفت کوره صنعتی (یعنی نفت شماره ۶ یا سوخت بنکر^۱) یک رسوب سفیدرنگ ۰/۲۵ اینچی بر روی سطح خارجی لوله جمع می‌شود. این رسوب، یک مخلوط هم‌گداز^۲ متشکل از بیش از ۹۰٪ وانادیم و چند درصد سدیم است. وانادیم به تنهایی میزان انتقال حرارت را به طرز چشمگیری کاهش نمی‌دهد و هیچ ضرری نیز ندارد. وانادیم تنها باعث گداخته شدن لوله و گرم شدن بیش از حد آن می‌شود.

با این حال حضور چند درصد سدیم در کنار وانادیم، یک مخلوط هم‌گداز خورنده را تشکیل می‌دهد. در حدود ۱۲۵۰°F، مخلوط به مایع تبدیل شده و با سرعت بسیار بسیار کمی در لوله‌ها جریان پیدا می‌کند و باعث ایجاد شیارهایی خارجی در داخل لوله‌ها می‌شود. هنگامی که کوره باز می‌شود، این رسوبات باید به روش آب‌فشانی از سطح بیرونی لوله‌ها تمیز شوند.

روتور کمپرسور

من در سال ۱۹۸۷ در لاریدوی تگزاس در تمیز کردن روتورهای کمپرسورهای گریز از مرکز دور-متغیر چند مرحله‌ای مهارت پیدا کردم. مواد رسوبی، یک رسوب سخت به رنگ خاکستری تیره و عمدتاً متشکل از موارد زیر بودند:

• نمک‌ها؛

• گل حفاری؛

^۱ Bunker Fuel: سوخت بنکر

^۲ Eutectic: مخلوط هم‌گداز

• محصولات خورنده خط لوله.

این رسوبات به آهستگی ظرفیت کمپرسور من را (دستگاه توربین گازی محور سولار سنتر ۱۰۰۰۰ hp) را، با تشکیل رسوب بر روی روتور کاهش می دادند. من بر حسب تجربه آموخته بودم که اگر مدت زیادی صبر کنم، این رسوبات روتور را می شکنند. تعادل روتور به هم خورده و ارتعاشات دستگاه زیاد می شود. پس روش تمیزکاری برخط من، که به کار کردن دستگاه در یک rpm متوسط بستگی داشت، دیگر قابل استفاده نبود.

روش مورد استفاده من «ذره پاشی»^۱ بود. یک دریچه بازدید به ابعاد ۱۸"×۳۶" را برمی داشتم و دستگاه تقریباً در ۱/۴ تا ۱/۲ دور معمولی خود به کارش ادامه می داد. سپس با استفاده از یک قاشق شکر، ذرات درشت پوست پی کان^۲ را به آرامی به ورودی اولین پروانه کمپرسور، اضافه می کردم. پس از مدتی (۲۰ دقیقه) اندازه ذرات را، متناوباً ریزتر می کردم. این روش، که چندین ساعت زمان می برد، به شدت موثر و سرگرم کننده بود. ترفند کار این بود که صبر نکنید تا رسوبات بیش از حد ضخیم شوند، پروانه های روتور را بشکنند و نامتعادل سازند.

خلاصه

من توضیحاتم درباره تمیزکردن تجهیزات فرآیندی را به روش هایی که خودم انجام داده ام یا شخصاً شاهدشان بوده ام، محدود کردم. من تا زمانی که خودم روشی را انجام ندهم، کاملاً متوجه آن نمی شوم و نمی توانم مراحل انجامش را به به خاطر بسپارم. اما هنگامی که شخصاً در اجرای کار مشارکت کنم، جزئیات آن را تا پایان عمرم به خاطر خواهم سپرد. مثل این است که بخواهید روش راندن دوچرخه را یاد بگیرید. به همین علت من همیشه تلاش می کنم کارهایی مانند تمیزکردن تجهیزات فرآیندی را یک بار هم که شده، شخصاً و با دستان خودم انجام دهم. من کوشیدم مهندسان جوانی را که در پالایشگاه گود هوپ تحت نظر من کار می کردند با این فلسفه آشنا کنم و آنان نیز با اشتیاق آن را پذیرفتند.

^۱ Nut Blasting: ذره پاشی

^۲ Pecan: نوعی گردوی پوست نازک و زیتون مانند، گردوی آمریکایی، گردوی گرمسیری



آموختن قواعد مهندسی فرآیند

چکیده:

مهندسی فرآیند بسیار پیچیده‌تر از آن است که بتوان صرفاً از طریق آموزش دانشگاهی آن را آموخت. یادگیری از طریق تجربیات روزمره نیز باید مورد توجه قرار گیرد تا به یک مهندس فرآیند ماهر تبدیل شویم. طیف گسترده‌ای از تجربیات و مشاهدات در حوزه تعمیرات خانه و اتفاقات کودکی نیز باید با دانش فرآیندی ما ادغام گردد تا عیب‌یابی و طراحی صحیح واحدهای بهره‌برداری پالایشگاه و پتروشیمی صورت گیرد و مشکلات عملیاتی برطرف گردند. استفاده از مدل‌سازی‌های کامپیوتری به توانایی حل مشکلات واحدها، کمک چندانی نمی‌کند.

کلمات کلیدی:

پمپ؛ اسید کربنیک؛ شار حرارتی؛ طغیان؛ ورودی؛ هوای محلول؛ تکنولوژی؛

من بیشتر آنچه را که برای نیل به هدفم در تبدیل شدن به یک مهندس فرآیند ماهر نیاز داشتم، در دانشگاه یا فارغ التحصیلی مدرسه، به دست نیاوردم. من در مدت ۱۶ سال کارم به عنوان یک مهندس طراح در شیکاگو، چیزی زیادی درباره مهندسی فرآیند نیاموختم. پایه و اساس دانش فرآیندی من طی دو اعتصاب طولانی مدت سال‌های ۱۹۷۴ و ۱۹۸۰، زمانی که به عنوان اپراتور در پالایشگاه نفت آمریکا تگزاس سیتی کار می‌کردم، شکل گرفت. این دو اعتصاب به مدت ۴ الی ۵ ماه به طول انجامیدند. به عنوان یک کارمند حقوق‌بگیر، به جای اپراتورهایی که مشغول اعتصاب بودند، استخدام شدم. دوازده ساعت در روز و کل هفت روز هفته را مشغول به کار بودم. سال ۱۹۷۴ در واحد آلکیلاسیون اسید سولفوریک و سال ۱۹۸۴ در واحد بازیابی گوگردی که پیش‌تر طراحی‌اش کرده بودم، کار می‌کردم. اگر این فرصت برای مشاهده کردن، عملیات و تعمیر پمپ‌ها، توربین‌ها، رآکتورها، مبدل‌های حرارتی و برج‌های تقطیر پیش نمی‌آمد، من امروزه نمی‌توانستم دید فرآیندی‌ام را تا این اندازه توسعه دهم.

منبع مهم دیگر دانش فرآیندی من، ناشی از تجربیات دوران کودکی است. من از دوران کودکی‌ام لذت می‌بردم و همچنان در برابر بزرگ شدن و بزرگسال بودن تاسف و مقاومت دارم. من به عنوان یک کودک، شدیداً شیفته چنین پدیده‌هایی بودم:

۱. پمپ حبابی^۱ فیلتردار، چگونه آب را در آکواریوم من، به گردش در می‌آورد؟
۲. وظیفه ونت‌های کوچک مخروطی شکلی که بر روی رادیاتور بخار آب ما قرار داشتند و خانه ما را در طبقه پنجم گرم می‌کردند، چه بود؟
۳. چرا وقتی مادرم روی لکه‌های زنگ‌زدگی موجود بر روی سرویس بهداشتی‌مان نوشابه می‌ریخت، لکه‌ها از بین می‌رفتند؟
۴. چرا قطره آب بر روی سطح بسیار داغ و صیقلی یک ماهیتابه، به خود می‌پیچید و تبخیر نمی‌شد؛ در حالی که قطره آب بر روی کولر یا یک ماهیتابه خط و خش دار، بلافاصله تبخیر و ناپدید می‌شد؟
۵. چرا هنگامی که باد می‌وزید، سطح آب در کاسه توالت ما نوسان می‌کرد؟
۶. چرا آبی که از شیر آشپزخانه بیرون می‌آمد در ابتدا کدر بود ولی، پس از گذشت ۵ دقیقه شفاف می‌شد؟
۷. چرا هنگامی که پدرم یک بطری پر از آبجو را به سرعت باز می‌کرد، آبجو با فشار از شیشه خارج می‌شد؟

^۱ پمپ حبابی: Air Lift Filter Pump

امروز می‌توانم مشاهدات دوران کودکی را با تکنولوژی فرآیندی پالایشگاه تطبیق دهم:

۱. پمپ حبابی^۱: شبیه به جریان ترموسیفون (سیفون حرارتی) در ریپولرها و ژنراتورهای بخار آب است؛
۲. دریچه ونت رادیاتور: یک ونت گاز غیرقابل تراکم که در زیر بافل جداکننده مسیر^۲ پایینی و بر روی کلاhek مجاری^۳ مبدل‌های پوسته و لوله بخار آب، نصب شده است.
۳. زدودن لکه‌های زنگ با نوشابه: این مثالی از خورده‌شدن آهن توسط اسید کربونیک ناشی از آلوده‌شدن بخار آب توسط CO₂ به دلیل تجزیه کربنات‌ها در آب خوراک بویلر^۴ است؛
۴. آب روی سطح یک ماهیتابه داغ: مانند تحدید شار آب در ریپولری با لوله‌های صاف و بخار آب پرفشار است؛
۵. سطح نامنظم آب در کاسه توالت: ناشی از مکشی^۵ است که باد هنگام وزش در بالای دودکش هیتز، ایجاد می‌کند. معمولاً ۰/۱ الی ۰/۲ اینچ آب است؛
۶. آب کدر شیر آشپزخانه: هوای حل‌شده در آب در فشار بالاتر و دمای پایین‌تر؛
۷. کف‌کردن بطری آبجو: کاهش ناگهانی فشار برج تقطیر منجر به طغیان و خروج ذرات مایع به همراه گاز از بالای برج^۶ می‌شود.

وظیفه مهندس فرآیند

من در سال ۱۹۸۰ از نفت آمریکا استعفا دادم و به عنوان مدیر خدمات فنی در پالایشگاه گود هوپ^۷، مشغول به کار شدم. من تعداد زیادی مهندس شیمی جوان، در گروهم داشتم. آنان پسران باهوشی بودند اما مانند من، چیز

^۱ Air lift pump: پمپ حبابی

^۲ Pass Partition Baffle: بافل جداکننده گذرها

^۳ Channel head: کلاhek مجاری

^۴ Boiler feed water (BFW): آب خوراک بویلر، آبی که نرم یا یون‌زدایی و سپس هوازدایی شده باشد.

^۵ Draft: مکش، درافت

^۶ Carry-over: خروج ذرات مایع به همراه گاز از بالای برج

^۷ Good Hope: گود هوپ

زیادی در دانشگاه نیاموخته بودند تا در کارشان به آن‌ها کمک کند (در سال ۱۹۸۰ تعداد کمی از زنان در رشته مهندسی شیمی تحصیل می‌کردند؛ اما اکنون آمار دانشجویان دختر و پسر این رشته مساوی است).

اولین چیزی که من برای این پسران، در آغاز کارشان توضیح دادم این بود که، کار اصلی ما حل مشکلات بهره‌برداری است. وظیفه ما هیچ یک از موارد زیر نبود:

- نوشتن گزارش
- شرکت در جلسات
- تعامل با فروشندگان
- انجام مطالعات بر روی تأثیرات محیط‌زیستی
- اجرای مدل‌های کامپیوتری
- فراهم کردن داده برای بخش برنامه‌ریزی
- ملاقات کردن با فروشندگان مواد شیمیایی
- ارزیابی فناوری‌های پالایشی جدید
- شرکت کردن در سمینارهای برگزار شده در نیواورلئان^۱

کار ما در واحد بهره‌برداری، حل مشکلاتی بود که اپراتورها به تنهایی، قادر به حل کردنشان نبودند.

شیوهٔ آموختن

من رانندگی را با نشستن پشت میز در دبیرستان یاد نگرفتم. پدرم در سال ۱۹۵۹ رانندگی را با اتومبیل شرکت جنرال‌موتورز^۲ قهوه‌ای رنگمان، به من آموخت. در واحد بهره‌برداری ما، اپراتورها واقعاً در شغلشان آموزش دیده

^۱ New Orleans: نیواورلئان

^۲ Oldsmobile: اتومبیل شرکت جنرال‌موتورز

بودند. آن‌ها کارشان را در کنار همکار باتجربه‌تر و مسن‌ترشان آغاز کردند و به مدت چند هفته کار او را تحت نظر گرفتند. سپس اپراتور باتجربه، عملکرد اپراتور جوان‌تر را به مدت یک هفته دیگر تحت نظر گرفت و اشتباهاتشان را اصلاح کرد.

روند یادگیری تمامی مهارت‌ها، یکسان است و اکثر افراد از این جهت که تنها در حین انجام کار، می‌توانم یاد بگیرم، شبیه من هستند. این همان مفهوم قدیمی شاگردی کردن^۱ است.

هنگامی که یک مهندس فرآیند جدید در پالایشگاه گود هوپ و در گروه من شروع به کار می‌کرد، من اولین مأموریتش را به او می‌دادم.

«رید^۲، بار حرارتی ریویولر در برج بوتان‌زدای بنزین واحد تقطیر نفت خام^۳ کم است. از آقای واکر^۴، سرپرست واحد بپرس تا مشکل را برای توضیح دهد. او محل قرارگیری ریویولر را نیز به تو نشان خواهد داد.»

رید بارت^۵ صبح روز بعد به دفتر من بازگشت و گفت: «آقای لیبرمن، آقای واکر ریویولر را به من نشان داد. او گفت مشکل این است که جریان بخار آب ۱۵۰ psig کافی، به ریویولر نمی‌رسد. قبلاً جریان بخار آب ۱۴۰۰۰ پوند بر ساعت بود اما اکنون مقدار آن تنها به ۹۰۰۰ پوند بر ساعت می‌رسد. او به من نشان داد که شیر کنترل ورودی بخار آب کاملاً باز است. من طرحی از ریویولر رسم کردم؛ اما نمی‌دانم چه کار دیگری، باید انجام دهم. ما در دانشگاه ایالتی لوئیزیانا^۶، چیزی در مورد ریویولرها نخواندیم. آیا لازم است سعی کنم که، برج بوتان‌زدا را با برنامه شبیه‌ساز اسپن مدل‌سازی کنم؟»

من پاسخ دادم: «رید اجازه بده ابزار و کیف اتصالات لوله^۷ام را بردارم. ما باید برویم و کار را از نزدیک و در سایت بررسی کنیم. برو دستکش و کلاه ایمنی‌ات را بیاور.»

سپس من و رید فشار و دما را در خط تخلیه^۳ اینچی میعان‌ات بخار آب و در انشعاب اصلی^۸ ۶ اینچی جمع‌آوری میعان‌ات اندازه گرفتیم و در حین اندازه‌گیری‌هایمان، علت کم‌بودن جریان بخار آب را برای رید توضیح دادم.

^۱ شاگردی کردن: Apprentice concept

^۲ رید: Reid

^۳ Crude unit: واحد تقطیر نفت خام

^۴ Walker: واکر

^۵ Reid Burt: رید بارت

^۶ مخفف "Louisiana State University"، دانشگاه ایالتی لوئیزیانا: LSU

^۷ Pipe fitting: رابط لوله‌ای

^۸ Header: هدر، مجرای اصلی، لوله اصلی، لوله مادر

«رید، آب در کلاhek مجاری ریپویلر، تجمع کرده است. مشکل ما انسداد بخار آب است. افت فشار بیش از حد در خط تخلیه میعانات، منجر می‌شود که بخشی از آب مجدداً به بخار تبدیل شود. بخار ایجاد شده جریان آبی را که از لوله‌های روی ریپویلر عبور می‌کند، محدود می‌سازد. این امر منجر به کاهش مساحت انتقال حرارت و بار حرارتی ریپویلر می‌شود.»

رید با این تمرین، روش اندازه‌گیری فشار و دما را به صورت عملی می‌آموزد. او همچنین مفهوم عملیاتی تجمع میعانات را نیز یاد می‌گیرد. من خطای طراحی را توضیح می‌دهم که در این مورد حذف پمپ میعانات گازی برای جلوگیری از تولید بیش از حد بخار در جریان میعانات خط لوله^۳ اینچی است.

تعامل با اپراتورها

تا قرن بیستم بخش اعظم دانش فنی، نه از طریق کتاب‌ها و موسسات آموزشی، بلکه از طریق سیستم کارآموزی، انتقال داده می‌شد. در مثالی که پیش‌تر ذکر کردم، جمله‌ای که گفتم: «اجازه بده ابزار و وسایلم را بردارم تا با هم ریپویلر را بررسی کنیم»، نمونه‌ای از همین روش آموزش قدیمی بود.

روشی دیگر برای یادگیری، که به همان اندازه ارزشمند است، تعامل با اپراتورهای کارخانه است به ویژه هنگامی که به کنترل کردن (سطح، دبی، دما و فشار) مربوط می‌شود. کار کردن با کارکنان عملیاتی، بهترین راه برای درک نحوه کنترل کار حلقه‌ها و شیرهای کنترلی و طیف وسیعی از نواقص مربوط به آن‌ها، به ویژه نحوه برخورد حلقه‌های کنترلی با مشکلات فرآیندی و ایجاد یک «حلقه بازخورد مثبت»^۱، است.

به عنوان مثال من هیچ تصویری در مورد چگونگی ارتباط ابزار اندازه‌گیری هوا به دیافراگم شیر کنترل نداشتیم؛ تا زمانی که اپراتور مسنی در واحد آلکیلاسیون تگزاس سیتی در سال ۱۹۷۵، عملکردش را برای من توضیح داد.

مثال دیگری در مورد یادگیری از اپراتورها، نیاز به «NPSH اولیه» برای پمپ‌های گریز از مرکز است؛ مفهومی که به طور مفصل در این کتاب درباره‌اش توضیح داده‌ام. همه اپراتورها لزوم افزایش آهسته جریان در خروجی یک پمپ گریز از مرکز را، برای جلوگیری از وقوع کاویتاسیون، می‌دانند. از این مشاهده، روش عددی‌ای را برای محاسبه NPSH مورد نیاز اولیه پمپ‌های گریز از مرکز، برای اهداف طراحی، ابداع کرده‌ام. این همان ارتفاع اضافی مورد نیاز وسل برای سرعت‌گرفتن مایع در خط ورودی پمپ و در زمان راه‌اندازی آن است.

^۱ حلقه بازخورد مثبت: Positive Feedback Loop

یادگرفتن از کارکنان تعمیرات

بسیاری از مردم، مانند من، در تجسم یک شی سه بعدی از روی کتاب مشکل دارند. من هنگامی که تجهیز را به طور عینی و واقعی ببینم، درک بسیار بهتری از آن خواهم داشت. یک مبدل حرارتی پوسته و لوله، نمونه‌ای خوب است. من هرگز کاملاً نفهمیدم چگونه یک کلاهک شناور^۱ در چنین مبدلی با استفاده از «تجهیز اسپیلیت رینگ»^۲ به صفحه لوله متصل می‌شود؛ تا زمانی که جان براندرت^۳، مدیر بخش تعمیرات در تگزاس سیتی، در هنگام انجام تعمیرات واحد FCU^۴، آن را به من نشان داد.

من چیزهای زیادی درباره فضای خالی میان پروانه و بدنه پمپ شنیده بودم و می‌دانستم که مفهومی مهم است. اما تا زمانی که متخصص تعمیرات یک فروشگاه آن را برایم توضیح نداد، کاملاً درکش نکرده بودم.

من طرز کار کمپرسورهای گریز از مرکز را با مشاهده روند تعمیر و بازسازی یک روتور سولار سنتر BHP ۱۰۰۰۰ در تعمیرگاهی در دالاس^۵ و در حال گوش دادن به تک‌سخن‌گویی دو ساعته تعمیرکاری یاد گرفتم که مشغول تمیز کردن و تراز کردن مجدد سه پروانه روتور بود. وقتی هفته بعد در ایستگاه فشرده‌سازی گاز طبیعی در لاریدوی تگزاس، کمپرسور را مجدداً به کار انداختم، درک بهتری از نحوه عملکرد این دستگاه داشتم.

بازرسی داخل برج

حوزه کاری اصلی من به عنوان یک مهندس طراحی فرآیند، تعمیر و نوسازی برج‌های تقطیر پالایشگاهی و طراحی ستون‌های تقطیر جریه‌جز (تفکیک‌کننده‌های) جدید است. من برج عریان‌ساز بخار آب^۶ سوخت جتی با قطر داخلی ۳۰" و یک برج تفکیک‌کننده کک‌سازی تأخیری ۲۶ فوتی را طراحی کرده‌ام. من جزئیات داخلی برج را روی برگه شطرنجی، در مقیاس ۱ اینچ بر فوت رسم می‌کنم. مهندسان طراحی فرآیند قدیمی می‌گویند: «دشوارترین قسمت کار، جزئیات آن است». من هنگام ترسیم این جزئیات، در ذهنم تصور می‌کنم که این ویژگی خاص در برجی که

^۱ Floating head: کلاهک شناور

^۲ Split Ring Assembly: تجهیز اسپیلیت رینگ

^۳ John Brundrett: جان براندرت

^۴ FCU مخفف «Fluid Catalytic Cracking Unit»، معنی واحد شکست کاتالیستی بسترسیال، واحد شکستن مولکول‌ها در کاتالیست سیال

^۵ Dallas: دالاس

^۶ Steam strippers: عریان‌سازهای بخار آب

آن را بررسی کردم چگونه به نظر می‌رسد؟ چه مشکلی در نصب و تاسیسات برج وجود دارد؟ آیا ابعادی که مشخص کرده‌اند با واقعیت همخوانی دارند؟ آیا چاره‌ای معقول برای گرفتگی اندیشیده‌ام؟

بدیهی‌ست که من قطر داخلی و تعداد سینی‌های برج را بر اساس خروجی^۱ مدل رایانه‌ای اسپن تعیین می‌کنم. اما این نتایج نگرشی را در مورد اینکه رسوبات نمک و سولفید آهن در کجا نیاز به بلندتر بودن فاصله آزاد مجاری ریزش^۲ مایع دارند یا چه زمانی به بست‌های مهار^۳ اضافی برای مجاری ریزش مایع نیاز است، فراهم نمی‌کنند.

من حین بازرسی داخل برج سعی می‌کنم بفهمم شرایط سینی‌های برج چه ارتباطی به مشکلات عملیاتی‌ای دارند که قبلاً و در هنگام کار با برج تجربه کرده‌ام. من با دیدن صفحه سینی^۴ و سرریزهای مایل ارتباطشان را با پایین بودن راندمان تفکیک دریافتم و آموختم که نتایج ارائه‌شده از شبیه‌سازی‌ها لزوماً نشان‌دهنده عملکرد واقعی برج تقطیر نیست.

یادگیری از آزمون‌های عملکردی

روش مورد علاقه من برای یادگیری قواعد اساسی فرآیند، پیروی از روش کاری سه مرحله‌ای است:

- **مرحله اول** – اندازه‌گیری یک متغیر فرآیندی؛ مانند فوت هد ایجادشده توسط پمپ
- **مرحله دوم** – محاسبه فوت هدی که پمپ باید قادر به تأمین آن باشد با استفاده از منحنی پمپ، دبی اندازه‌گیری‌شده و چگالی سیال؛
- **مرحله سوم** – تعیین علت هرگونه تفاوت.

من اغلب به مشتریانم می‌گویم: «من در حوزه فناوری تقطیر پالایشگاهی متخصص هستم». اما چگونه در این زمینه تخصص پیدا کرده‌ام؟

^۱ Output: خروجی

^۲ Downcomer: مجاری ریزش مایع، ناودانی، پائین‌ریز

^۳ Bracing brackets: بست‌های مهار

^۴ Tray Deck: صفحه یا کف سینی

- **گام اول** - من یک مدل کامپیوتری از برج تقطیر را با راندمان سینی ۸۰٪، اجرا می‌کنم.
 - **گام دوم** - با استفاده از داده‌های فرآیندی (یعنی میزان رفلکس، بار حرارتی ریویلر، آنالیز محصول)، راندمان سینی را در مدل کم‌تر می‌دهم تا با نتایج مشاهده‌شده از آنالیز آزمایشگاهی محصولات بالا و پایین برج مطابقت پیدا کند.
 - **گام سوم** - با بررسی دقیق و جزئی برج تلاش می‌کنم بفهمم چرا با وجود اینکه استاندارد صنعتی برای این فرآیند خاص ۸۰٪ است، راندمان سینی‌ای که من در مرحله دوم محاسبه کرده‌ام تنها ۳۰٪ است.
- در مورد مبدل‌های حرارتی، ضریب انتقال حرارت (U) را بر اساس دماها و دبی‌های مشاهده‌شده محاسبه می‌کنم. سپس U را در حالت تمیز، بر اساس برنامه رایانه‌ای^۱ (HTRI) محاسبه می‌کنم. می‌توان گفت:
- $$U \text{ مشاهده‌شده} = 40 \text{ btu/h/ft}^2/\text{°F}$$
- $$U \text{ تمیز} = \text{HTRI} = 90 \text{ btu/h/ft}^2/\text{°F}$$
- خواننده ممکن به این نتیجه برسد که این تفاوت ناشی از رسوب‌گرفتگی است. اما شاید اینگونه نباشد. سپس اندازه‌گیری میدانی‌ام را تکرار می‌کنم. U مشاهده‌شده تمیز برابر با ۶۰ است. حالا چطور؟
- سپس طراحی دسته لوله را برای مشکلات زیر بررسی می‌کنم:
- فاصله آزاد (لقی) بیش از حد در سمت پوسته؛
 - عدم وجود لوله‌های کمکی^۲ برای کاهش کنارگذری^۳ در سمت پوسته؛
 - نشستی تیغه جداکننده گذرها در کلاhek مجاری؛
 - بیش‌تر بودن ویسکوزیته لوله نسبت به چیزی که من در محاسباتم استفاده کرده‌ام؛
 - ۲۰٪ از لوله‌ها به علت نشستی مسدود^۴ شده‌اند اما بخش تعمیرات، این موضوع را گزارش نکرده است.

^۱ Heat Transfer Research Institute: موسسه تحقیقاتی انتقال حرارت

^۲ Dummy tubes: لوله‌های کمکی

^۳ Bypass: کنارگذر

^۴ Plug: مسدود شدن

نتیجه

مهندسی فرآیند بیشتر یک مهارت است تا یک علم. از این رو استادانی که کتاب‌های مرجع را می‌نویسند و در کلاس‌های مهندسی به تدریس می‌پردازند، اما فاقد تجربه میدانی در زمینه عیب‌یابی مشکلات فرآیندی هستند، در تحقق هدف خود، که آماده‌سازی مردان و زنان جوان برای حل مشکلات فرآیندی صنایع مختلف است، موفق نخواهند بود. اگر یک مهندس فرآیند قادر به درک نواقص تجهیزات فرآیندی، به ویژه مشکلات کنترل فرآیند نباشد، برای طراحی تجهیز جدید یا فعالیت به عنوان سرپرست یک کارخانه آماده نخواهد بود.

استفاده مدرن از فناوری رایانه، نه مضر و نه مفید است. این مسئله تا حد زیادی به تجربیات حاصل از یادگیری‌ای که من و شما باید داشته باشیم تا مبدل‌های حرارتی و تفکیک‌کننده‌ها را به طور موثری طراحی کرده و به کار بگیریم، بی‌ارتباط است.

گرچه سن من در حال بالا رفتن است، اما سرعت یادگیری‌ام در حوزه مهندسی فرآیند با گذر سال‌ها کاهش پیدا نکرده است. من با هر پروژه طراحی، عیب‌یابی و بازسازی، مطلبی جدید و هیجان‌انگیز را یاد می‌گیرم. من نیز به عنوان مدیر بخش مهندسی فرآیند، چیزی بسیار حائز اهمیت و سودمند را متوجه شدم؛ این که به مهندس جوانی که به من گزارش داده بود بگویم: «اجازه بده ابزارم را بیاورم تا با هم به کارخانه برویم و مشکل را بررسی کنیم. آن کیف اتصالات ۳/۴ اینچی را که در دفتر تامی گذاشتم و خلأسنج دیجیتال جدید را هم از پیش بایی بیاور.»



روش‌های تقریبی محاسبه فرآیند

توانایی انجام محاسبات تقریبی مربوط به فرآیندها در زمان عیب‌یابی مشکلات فرآیندی واحد می‌تواند تا حد زیادی حل مشکلات پیچیده را تسریع سازد. در این فصل روابط تخمینی برای محاسبات موارد زیر ارائه می‌شود.

- افت فشار خط لوله
- محتوای گرمایی (آنتالپی) جریان‌ها
- حجم گازها
- وزن مایعات
- وزن مولکولی هیدروکربن‌ها
- چگالی مایعات بر اساس دمای جریان آن‌ها

کلمات کلیدی:

حجم؛ چگالی؛ دما؛ فشار؛ افت خط لوله؛ وزن مولکولی؛

توانایی انجام محاسبات سریع و تقریبی، کمک بزرگی به من در جهت درک چگونگی کار تجهیزات فرآیندی کرده است. داده‌ها و روابط، نه به منظور دقت، بلکه برای سرعت و سادگی در نظر گرفته شده‌اند.

واحدها

V = سرعت، فوت بر ثانیه

D_v = چگالی بخار، lb/ft^3

D_L = چگالی مایع، lb/ft^3

D_p = افت فشار، psi

D_H = افت فشار، اینچ مایع

P_A = فشار مطلق، psia

$T_A = 460 + ^\circ\text{F}$ (رانکین) یا $T_A = 273 + ^\circ\text{C}$ (کلوین)

L = گرمای نهان، btu/lb

SP = گرمای ویژه، $\text{btu/lb/}^\circ\text{F}$

DT = اختلاف دما، $^\circ\text{F}$

A = مساحت، ft^2

ID = قطر داخلی لوله، اینچ

H = تغییر ارتفاع، ft

(GPM/in) = گالن آمریکایی بر دقیقه بر اینچ

btu = واحد حرارتی انگلیسی

MW = پوند بر مول

من از «°C» استفاده نمی‌کنم. این علامت نشان‌دهنده درجه سانتی‌گراد کمونیستی است. من همیشه از °F استفاده می‌کنم که نشان‌دهنده درجه آزادی است. برای کسانی که فراموش کرده‌اند:

$$0^{\circ}\text{C} = 273\text{ K (کلوین)}$$

$$0^{\circ}\text{F} = 495^{\circ}\text{R (رانکین)}$$

همچنین داریم:

$$\bullet \text{ دما در فضا} = 3^{\circ}\text{K}$$

$$\bullet \text{ دمای شعله آدیاباتیک برای گاز با مقدار اندکی هوای اضافی} = 3400^{\circ}\text{F} ;$$

$$\bullet \text{ حداکثر چگالی آب در دمای } 4^{\circ}\text{C} \text{ است و پس از انجماد سبک‌تر می‌شود؛}$$

$$\bullet \text{ دمای خروجی موتور جت (یعنی توربین گاز) معمولاً } 1000^{\circ}\text{F} \text{ است و با افزایش راندمان کاهش می‌یابد.}$$

افت فشار

(برای تعریف عبارات به بخش قبل مراجعه کنید).

$$0.6(V)^2 = D_H = \text{از میان حفره}$$

$$0.3(V)^2 = D_H = \text{از میان نازل}$$

$$\frac{D_V}{ID} \cdot \frac{V^2}{400} = DP = (\text{جریان بخار}) \text{ صد فوت لوله}$$

$$\frac{D_L}{ID} \cdot \frac{V^2}{400} = DL = (\text{جریان مایع}) \text{ صد فوت لوله}$$

$$\frac{D_H \cdot D_L}{1800} = DP = \text{تغییر ارتفاع}$$

$$0.4(\text{GPM/in.})^{0.67} = D_H = \text{ارتفاع سرریز مایع}$$

(ارتفاع سرریز مایع مثل ارتفاع آبی است که از یک سد سرریز می‌شود)

گرما

- (بخار آب - (L) فشار اتمسفر) = گرمای نهان بر پوند - 1000
- (بخار آب - (L) 500psig) = گرمای نهان بر پوند - 800
- (L) الکل = 400
- (L) نفتا = گرمای نهان بر پوند - 120
- (L) نفت گاز = گرمای نهان بر پوند - 90
- SP بخار هیدروکربن = $0.6 \text{ BTU/lb/}^{\circ}\text{F}$
- SP هیدروکربن مایع (100°F) = $0.5 \text{ BTU/lb/}^{\circ}\text{F}$
- SP هیدروکربن مایع (600°F) = $0.7 \text{ BTU/lb/}^{\circ}\text{F}$
- SP بخار آب = $0.5 \text{ BTU/lb/}^{\circ}\text{F}$
- SP آب = $1 \text{ BTU/lb/}^{\circ}\text{F}$
- یک اسب بخار 500 btu
- $3100 \text{ btu} = 1 \text{ KWH}$
- احتراق یک پوند هیدروکربن = 18000 btu
- احتراق یک پوند هیدروژن = 40000 btu
- $1 \text{ btu} = 770 \text{ ft_lbs}$

وزن‌های مولکولی رایج

هیدروژن = 2

گاز طبیعی = 20

گاز کراکینگ‌شده = 30

گاز طبیعی مایع‌شده (LPG) = 50

نفتای سبک = 80

نفتای سنگین = 120

نفت سفید و جت = 160

دیزل = 200

نفت گاز و روغن‌ها = 280

هوا و نیتروژن = 29

بخار آب = 18

گوگرد = 32

آمونیاک = 17

حجم و وزن‌ها

افزایش حجم - (هیدروکربن مایع) $100^{\circ}\text{F} = +5\%$

افزایش حجم - (آب) $100^{\circ}\text{F} = +2\%$

تغییرات D_v متناسب با $TA_{(1)} \div TA_{(2)}$ (حجم بخار در مقایسه با دما)

تغییرات D_v متناسب با $PA_{(1)} \div PA_{(2)}$ (حجم بخار در مقایسه با فشار)

یک مول گاز در دمای 60°F و فشار اتمسفری 379 ft^3

تبدیل BSD به پوند بر ساعت

BSD گاز نفتی مایع‌شده (LPG) = 8 پوند بر ساعت

BSD نفتا = 10 پوند بر ساعت

BSD سوخت جت = 11 پوند بر ساعت

BSD دیزل = 12 پوند بر ساعت

BSD نفت گاز = 13 پوند بر ساعت

BSD آب داغ = 14 پوند بر ساعت

BSD آسفالت = 15 پوند بر ساعت

حوزه اصلی فعالیت من، عیب‌یابی مشکلات فرآیندی در پالایشگاه است. من نمی‌توانم هنگامی که در تلاش برای کشف مشکل از نردبان بالا می‌روم یا به زیر کولرهای هوایی پره‌ای-پروانه‌ای می‌خزم از قلم و کاغذ برای انجام محاسبات استفاده کنم. بنابراین من باید روابط بالا را برای محاسبه هدفمند در سایت به ذهنم بسپارم.

چگونه یک ارائه فنی داشته باشید

چکیده:

- هرگز ارائه خود را از رو نخوانید.
- به صورت نشسته صحبت نکنید.
- پشت تریبون صحبت نکنید.
- با مخاطبان خود تعامل برقرار کنید.
- از شرکت کنندگان سوال بپرسید.
- به رئوس مطالب مراجعه نکنید.
- به ارائه پاورپوینت تکیه نکنید.
- بررسی کنید که تصاویر و شکل‌ها به راحتی دیده شوند.
- ارائه خود را با طنز ترکیب کنید.
- برای هر شرکت کننده یک برچسب نام داشته باشید.
- هر تصویر باید فقط یک ایده را بیان کند.

کلمات کلیدی:

ارائه؛ واکنش؛ ریویزر؛ شرکت کنندگان؛ جلوه‌های بصری؛ پاورپوینت؛ برچسب نام؛ طرح کلی

شما ممکن است از دونالد ترامپ^۱ خوشتان نیاید، اما زمانی که شروع به صحبت کردن می‌کند، احتمالاً به او گوش خواهید داد. از سوی دیگر، به زمان‌هایی فکر کنید که در هنگام سخنرانی پروفیسور پترسون^۲ در مورد انرژی آزاد گیبس، آنتروپی و آنتالپی شروع به چرت‌زدن کرده‌اید.

هدف اصلی یک ارائه فنی این است که حضار به آن گوش کنند. شرکت‌کننده‌ها برای گوش کردن به صحبت‌های شما بلیت تهیه نکرده‌اند. آن‌ها برای شرکت در سمینار مبلغی را دریافت کرده‌اند و احتمالاً اکثرشان چندان مشتاق نیستند. از نظر روحی و روانی، گوش کردن به یک ارائه پیچیده فنی، از ارائه کردن آن دشوارتر است. به عنوان کسی که از ۱۸ سالگی و در طول ۵۸ سال گذشته هزاران ارائه فنی را ایراد و گوش کرده‌ام، این موضوع را به خوبی می‌دانم.

در اینجا چند دستورالعمل ارائه شده است که به شما کمک می‌کند از تبدیل شدن به سخنران و متکلم‌وحده اجتناب کنید.

قوانین نورم:

۱. هرگز ارائه خود را از روی نوشته نخوانید.
۲. هرگز در حالت نشسته صحبت نکنید.
۳. پشت تریبون صحبت نکنید. به اطراف حرکت کنید.
۴. با مخاطبان خود تعامل داشته باشید. اگر پرسشی مطرح نشد، شخصی را از میان حضار انتخاب کرده و از او سوال بپرسید.
۵. به رئیس مطالب رجوع نکنید. اگر به لیستی از رئیس مطالب نیاز پیدا کردید، یعنی شما آمادگی لازم برای ارائه را ندارید.
۶. هرگز ستون‌هایی پر از داده را در پاورپوینت بکار نبرید.
۷. پیش از ارائه، اطمینان حاصل کنید که تصاویر و شکل‌ها از انتهای سالن ارائه نیز، به راحتی قابل مشاهده باشند.

^۱ Donald Trump: ترامپ

^۲ Peterson: پترسون

۸. پیش از ارائه، اطمینان حاصل کنید که صدای شما از تمامی بخش‌های سالن ارائه به راحتی قابل شنیدن باشد. یاد بگیرید چگونه بلند صحبت کنید.

۹. ارائه باید شامل موارد زیر باشد:

• ۳۰ درصد شوخی‌های عامیانه، داستان‌های جذاب و خاطره‌های شخصی نظیر مشکلات با دوست‌دخترهای قبلی؛

• ۷۰ درصد محتوای فنی.

۱۰. همزمان که صحبت می‌کنید، از تصاویر مرتبط نیز استفاده کنید. به عنوان مثال، تصاویر پروانه‌های پمپ و نازل‌های مشعل.

۱۱. روبروی هر شرکت‌کننده، برچسبی حاوی اسم کوچک او قرار دهید.

۱۲. مهم‌ترین قانون این است که هر تصویری که ارائه می‌کنید، باید فقط و فقط نمایانگر یک ایده باشد.

جلوه‌های بصری

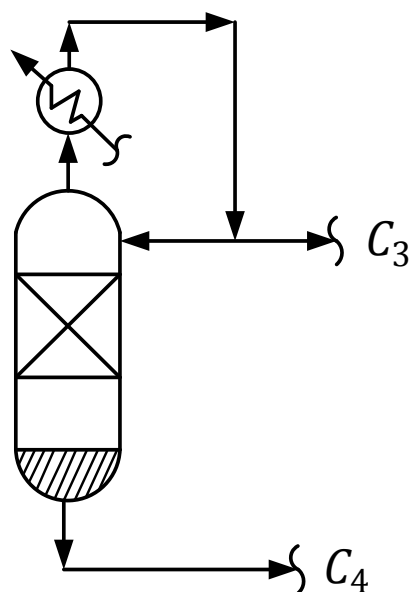
سال گذشته در جلسه ارائه پاورپوینت مربوط به ترک ناشی از خوردگی تنشی در نیواورلئان^۱ شرکت کردم که توسط متخصصی در این حوزه ارائه شد. اگرچه علاقه زیادی به این موضوع دارم، اما بعد از ۲۰ دقیقه احساس کردم می‌خواهم سخنران را بکشم. هر کدام از صفحات پاورپوینت او حاوی ستون‌هایی پر از داده، یا طرح‌هایی پیچیده، یا نمودارهایی با منحنی‌های متعدد بود. بدون هیچ پرسش و پاسخی، ارائه خود را به طور یکنواختی خواند. خوشبختانه بعد از ۳۰ دقیقه خوابم برد، اما وقتی بیدار شدم او کماکان در حال صحبت کردن بود.

در شکل زیر مثالی از یک شکل مناسب نشان داده شده است که مشخص می‌کند چگونه رفلاکس، جداسازی I-C₅ (ایزوپنتان‌ها) و N-C₅ (نرمال پنتان‌ها) با استفاده از^۲ بهبود می‌بخشد. این تصویر با دست روی یک فلیپ‌چارت^۳ با اندازه ۲۴ در ۳۶ اینچ در رنگ‌های قرمز، آبی و سبز روشن کشیده شده است. همیشه باید حروف را با رنگ مشکی نوشت. تشخیص رنگ‌ها از هر فاصله‌ای دشوار است. به عدد «۴۱» در گوشه بالا سمت راست توجه کنید. این عدد نشانگر شماره صفحه در جزوه ارائه است.

^۱ نیواورلئان: New Orleans

^۲ رفلاکس: Reflux

^۳ فلیپ‌چارت یا پایه مدیریتی شامل یک برد پایه‌دار است که دسته‌ای کاغذ ساین بزرگ به آن متصل می‌شود. Flipchart



جریان برگشتی، جداسازی
را بهبود می بخشد

آماده‌سازی جزوه

«سلام- من نورم لیبرمن^۱ هستم، سخنران شما»، این چیزی است که برای خوش‌آمدگویی به هر شخص جدیدی که می‌نشینند می‌گویم و سپس جزوهٔ سمینارش را به او می‌دهم که تشکیل شده است از:

- تمام تصاویری که ارائه خواهم داد (مانند تصویر «۴۱»).
- اطلاعات فنی مرتبط، مانند جداول تعادل بخار-مایع، جداول آنتالپی بخار آب و منحنی‌های فشاربخار هیدروکربن، که حاوی اطلاعات و داده‌های بسیار زیادی هستند و نمایش آن‌ها در حین صحبت کردن ممکن نیست.
- مطالب تبلیغاتی شرکت من.
- مقالات مرتبطی که در مجلات فنی به چاپ رسانده‌ام.

^۱ Norm Lieberman: نورم لیبرمن

جزوه‌ها را همیشه به صورت دفتری سیمی با جلد پلاستیکی شفاف در اختیار شرکت‌کنندگان قرار می‌دهم تا از دورانداختن آن منصرف شوند. اگرچه این کار باعث افزایش هزینه می‌شود، اما این هزینه را به نحوی از مشتریانم دریافت می‌کنم.

مقدمهٔ ارائه شما

هرگز ارائه را با معرفی خود یا تعریف کردن یک جوک شروع نکنید. من سمینارهای خود را معمولاً به این صورت شروع می‌کنم:

«من یک فرد الکلی هستم. از این رو تمایل دارم تا یک ویسکی با خلوص ۱۲۰ تولید کنم که حاوی ۶۰٪ الکل و ۴۰٪ آب است. اگر با شراب (۱۳٪ الکل – ۸۷٪ آب) شروع کرده و آن را تبخیر کنم، بخار تشکیل شده حاوی ۲۸٪ الکل و ۷۲٪ آب خواهد بود. جولی^۱، چرا غلظت الکل در فاز بخار در مقایسه با شراب افزایش می‌یابد؟»

«آقا، به این دلیل که فشاربخار الکل از آب بیشتر است. الکل ماده‌ای فرارتر بوده و نقطه جوش کمتری دارد.»

«درواقع جولی، ما می‌توانیم جواب صحیح تو را با ارجاع به صفحه ۹ جزوه‌ای که در اختیار داریم (فشار بخار در مقایسه با دما، برای الکل و آب) به صورت کمی نیز اثبات کنیم. بیا ببینیم همه با هم این محاسبه را انجام دهیم. به هر حال، جولی، خیلی از به کار بردن لفظ «آقا» برای اشاره به خودم استقبال نمی‌کنم. این باعث می‌شود تا فردی پیر به نظر برسم؛ که نیستیم. لطفاً «نورم» صدایم کن.»

تشریح محاسبات

همه‌ی ما تصویر وحشتناک پرفسور پترسون را در ذهن داریم که در حال انجام محاسبات پیچیده روی یک تخته‌سیاه با گچ سفید در کلاسی کم‌نور است. زمانی که وارد اتاق ارائه می‌شوم، اولین کاری که انجام می‌دهم، بررسی وضعیت نورپردازی اتاق است. من نیاز به سالنی پر نور دارم که در آن تمام حضار هوشیار بوده و محاسبات فنی برایشان به راحتی قابل مشاهده باشد. البته برای تعویض لامپ‌های مهتابی باید یک ساعت قبل از شرکت‌کنندگان در محل حاضر شوم.

می‌خواهم بگویم: «جولی، لطفاً محاسبات مربوط به فشاربخار الکل-آب را به طور خلاصه برای کلاس توضیح بده.» سپس به او یک ماژیک مشکی (نه قرمز و آبی) می‌دهم. «جولی، زمان را در نظر بگیر. محاسبات را بزرگ بنویس

^۱ جولی: Julie

و در حین نوشتن نیز توضیحات مربوط به محاسبات را بیان کن.» شرکت‌کنندگان احتمالاً یکدیگر را می‌شناسند و توضیح مسئله توسط یک همکار می‌تواند توجه و علاقه آن‌ها را بیش از پیش جلب کند.

چینش فیزیکی

به عنوان یک ارائه‌دهنده، شما مسئول هستید. پیش از حضار در اتاق ارائه حاضر شوید. اگر در حال ارائه به گروهی از اپراتورهای ارشد واحد بهره‌برداری هستید، مطمئن شوید که مقدار زیادی قهوه برای پذیرایی وجود دارد. آیا صندلی کافی برای راحتی همه وجود دارد؟ آیا همه می‌توانند تصاویر موجود در ارائه شما را از جایی که نشسته‌اند ببینند؟ آیا دمای اتاق مناسب است؟ آیا صدای پس‌زمینه‌ای از فن‌های تهویه مطبوع، ماشین‌های چمن‌زنی، سایت‌های ساخت‌وساز، یا برگزاری جلسات درس‌النه‌های مجاور به گوش می‌رسد؟ بهتر است ارائه خود را به تعویق بیندازید تا اینکه در اثر عواملی که خارج از کنترل شما هستند، دچار مشکل شوید. آیا می‌توانید برچسب نام همه افراد (مورد شماره ۱۰ بالا) را از جایی که صحبت می‌کنید، ببینید؟ دوباره نور را بررسی کنید. نور کم برای مخاطبان خوب است، اما شما برای صحبت کردن به روشنی نیاز دارید. برای یک اتاق بزرگ، از یکی از شرکت‌کنندگانی که زودتر حاضر شده می‌پرسیم: «جولی، می‌توانی صدای من را از آنجا خوب بشنوی؟»

فرضیات

برای اپراتورهای باتجربه واحد بهره‌برداری، فرض می‌کنم که با نحوه عملکرد پمپ، مبدل حرارتی یا برج تقطیر آشنا هستند، اما اصول فنی اولیه را نمی‌دانند. برای مهندسان، فرض می‌کنم که با اصول فنی اولیه آشنایی جزئی دارند، اما لزوماً نمی‌دانند اجزای فرآیند از چه چیزی تشکیل شده است. در مورد مدیریت بهره‌برداری، فرض می‌کنم که آن‌ها هیچ چیزی نمی‌دانند و دامنه توجه محدودی دارند.

به طور کلی، ارائه فنی برای گروهی از اپراتورهای باتجربه واحد بهره‌برداری در ارتباط با واحد فرآیندی محل کارشان، نسبتاً آسان است.

سطح صلاحیت فنی مهندسين فرآیند، مدیریت عملیات و اپراتورهای بهره‌برداری تفاوت‌چندانی با هم ندارد. من مایل‌م تفاوت‌ها را نادیده بگیرم و با توجه به انتظاراتم از درک آن‌ها از دانش فنی، در ارائه با همه یکسان رفتار کنم.

ارائه معادلات

برای گوینده، ارائه معادلات دشوار است. بسیاری از شرکت‌کنندگان به طور معمول به محض ظاهر شدن یک معادله، توجه خود را معطوف آن می‌کنند. این واکنشی است به تجربیات آن‌ها در دانشگاه.

باید معادلات را نیز ارائه کنم. اما من سعی می‌کنم هر عبارت را با ترسیم تصویری ذهنی-کلامی از معنای آن‌ها توضیح دهم. به عنوان مثال:

$$(100) \cdot \frac{(DP) \cdot (28)}{(SG)(NT)(TS)} = \text{درصد طغیان فواره ای}^1$$

- DP افت فشار بر حسب psi است که می‌توانید با اندازه‌گیری فشار توسط فشارسنج عقربه‌ای در بالا و پایین برج، آن را اندازه‌گیری کنید.
- TS فاصله بین سینی‌هاست که در طراحی وسل^۲ نشان داده شده است. معمولاً، ۱۸، ۲۴ یا ۳۰ اینچ می‌باشد.
- NT تعداد سینی‌ها است.
- SG جرم ویژه مایع داغ روی سینی‌هاست. معمولاً برای آب ۱/۰۰ یا برای بنزین ۰/۷۲ است.
- ضریب «۲۸» واحد psi را به اینچ آب تبدیل می‌کند.

تعریف هر اصطلاح به صورت شفاهی و به دنبال آن آوردن مثالی گویا، به شرکت‌کنندگان این امکان را می‌دهد که به جای داشتن برداشتی سطحی، تجسم درستی از معادله در دنیای واقعی داشته باشند. همانطور که صحبت می‌کنم، به طرح بزرگی از یک سینی تقطیر اشاره خواهم کرد که بطور مثال فاصله بین سینی‌ها (TS) را نشان می‌دهد.

۳۰٪ زمان شوخ‌طبعی

من از سال ۱۹۸۳، ۲۵۰۰۰ ساعت را صرف تدریس سمینارهای فنی کرده‌ام. با آزمون و خطا دریافتم که مردم باید هر ۲۰ تا ۳۰ دقیقه به ذهن خود استراحت دهند. بنابراین، من یک‌سری داستان با ماهیت نیمه‌فنی دارم که یکی از آن‌ها را با شما به اشتراک خواهم گذاشت.

^۱ Jet flood: طغیان فواره‌ای

^۲ Vessel: وسل، ظرف فرآیندی

با تشریح تفاوت بین انبساط آنتروپی ثابت^۱ و انبساط آنتالپی ثابت^۲ شروع می‌کنم. «بگذارید به شما بگویم، انبساط آنتالپی ثابت بخار آب با فشار ۴۰۰ psi از یک لوله ۴ اینچی به بخار آب با فشار ۱۰ psi، با جریان یافتن به داخل یک لوله ۱۶ اینچی، سبب تغییر در سرعت جریان بخار آب نمی‌شود. از آنجا که سرعت بخار آب یا انرژی جنبشی آن پره توربین را می‌چرخاند، توانایی بخار آب با فشار ۴۰۰ psi برای انجام کار کاهش یافته است؛ اما میزان گرما یا آنتالپی آن ثابت مانده است.»

«این مانند ملاقات با یک دختر در رستورانی گران قیمت است، که او در آنجا گران قیمت‌ترین غذا را سفارش می‌دهد؛ مثلاً مارچوبه^۳ زمانی که فصلش نیست. زمانی که او را به خانه‌اش می‌بری»، می‌گوید: «خیلی خوش گذشت. شب بخیر.»

چه چیزی عاید شما شده است؟ شما زمان و پول زیادی را هدر داده‌اید.

"انبساط آنتروپی ثابت بخار آب با فشار ۴۰۰ psi، به بخار آب این اجازه را می‌دهد تا از لوله ۴ اینچی توسط یک نازل نیم اینچی به بخار آب با فشار ۱۰ psi (یعنی تا ۱۱۰۰۰ فوت بر ثانیه) منبسط شود. تقریباً تمام این افزایش قابل توجه انرژی جنبشی، از گرما یا آنتالپی بخار آب ناشی می‌شود. اکنون می‌توان از سرعت بالای بخار برای چرخاندن پره توربین استفاده کرد. یعنی انبساط آنتروپی ثابت توانایی بخار را برای انجام کار حفظ می‌کند.

«این مانند ملاقات با یک دختر در رستورانی گران قیمت است، که او در آنجا گران قیمت‌ترین غذا را سفارش می‌دهد؛ مثلاً مارچوبه زمانی که فصلش نیست. وقتی او را به خانه‌اش می‌بری»، می‌گوید: «خیلی خوش گذشت، مایل هستی برای یک فنجان قهوه بیایی طبقه بالا؟»

«اکنون شما چیزی را بدست آورده‌اید! کمی شکر به پایین دادن قهوه کمک می‌کند.»

کومار^۴، شرکت کننده‌ای هندی در یکی از سمینارهای من، می‌گوید که این داستان در مقایسه با یک سال حضور در کلاس‌های دانشگاهی پرفسور پترسون، مطالب بیشتری را از ترمودینامیک به او آموخته است.

سؤال پرسیدن

هرگز از سؤال طفره نروید. اگر پاسخ را بدانم، ارائه خود را قطع می‌کنم تا با جزئیات کامل پاسخ دهم. سؤالات بهترین معیاری هستند که نشان می‌دهند ارائه شما به خوبی پیش می‌رود. اگر پاسخ را ندانم، پرسش را در طول

^۱ Isoentropic: تغییر فرآیندی که توانایی سیستم برای انجام کار کاهش نیافته باشد. یک فرآیند بازگشت پذیر

^۲ Isoenthalpic: ایزو آنتالپی، آنتالپی ثابت. انبساط بخار آب که در بر گیرنده هیچ افتی در انرژی بخار آب نمی‌باشد.

^۳ Asparagus: مارچوبه

^۴ Kumar: کومار

زمان استراحت تحلیل خواهیم کرد و سپس در قسمت بعدی جلسه، جواب را ارائه می‌دهم. یا می‌توانید چنین چیزی بگویید؛ «جولی، سوال خوبی پرسیدی، من هم مثل تو ۴۵ سال است که شک دارم و هنوز این مسئله را درک نمی‌کنم»، کاری که من معمولاً انجام می‌دهم. .

پرسیدن سؤال از شرکت‌کنندگان، دو هدف را دنبال می‌کند:

- حضار را هشیار و علاقه‌مند نگه می‌دارد.

- به سخنران اجازه می‌دهد تا سطح درک شرکت‌کنندگان را بسنجد.

در هر صورت، پرسیدن سؤال خطرناک است. پنج درصد یا بیشتر از شرکت‌کنندگان، اگر جواب سوال را ندانند، با خصومت واکنش نشان خواهند داد. من این را در فرم‌های ارزیابی کلاس که به عنوان بازخورد از شرکت‌کنندگان دریافت می‌کنم، بارها دیده‌ام. به نظر نمی‌رسد این موضوع با سن، جنسیت، نژاد یا ملیت مرتبط باشد. با این حال دریافته‌ام که احتمال بروز چنین برخوردی از طرف یک اپراتور، مدیر یا مهندس واقعاً باهوش، بسیار کمتر از فردی با صلاحیت بسیار پایین است. بنابراین اگر گروه خود را می‌شناسید، پیشنهاد می‌کنم سؤالاتتان را تنها از افراد آگاه بپرسید.

نظرات جنسیت‌زده

من یک دماسنج مادون‌قرمز برای اندازه‌گیری دمای پوستهٔ وس‌ها دارم. برای نشان دادن کاربرد آن، یک خانم و آقا را که در کنار هم نشسته‌اند انتخاب می‌کنم. دمای پوست مرد ممکن است ۹۷ درجه فارنهایت و دمای پوست خانم ممکن است ۹۶ درجه فارنهایت باشد.

سپس توضیح می‌دهم که خانم‌ها به طور کلی از کرم صورت استفاده می‌کنند که به عنوان مانعی برای انتقال حرارت عمل می‌کند و دمای خارجی پوست آن‌ها را کاهش می‌دهد. بنابراین باید هنگام بررسی دمای تجهیزات بهره‌برداری با استفاده از داده‌های مربوط به دمای پوسته، رسوب خارجی وسل را نیز در نظر بگیریم. این اظهارنظر برای انتقال مفهوم کاملاً مناسب است.

اما به نظر من در مورد زوج جوانی که همان ناهمخوانی دمای ۱ درجهٔ فارنهایتی را نشان می‌دهند، مبنی بر اینکه این امر نشان‌دهنده ناسازگاری آن‌ها از نظر حرارتی است، مناسب نخواهد بود.

تلفن‌های همراه

همیشه از همه شرکت‌کنندگان می‌خواهم که تلفن‌های همراه خود را دور از دید قرار دهند. اگر تلفن همراه قابل مشاهده باشد، وسوسه چک کردن ایمیل‌ها و پاسخ‌دادن به پیامک‌ها بسیار زیاد است. بهترین راه برای حل این مشکل آن است که هر بار تلفن همراه خود را بالا بیاورید و بگویید «ببینید عزیزان! من آن را در کیفم قرار می‌دهم و در اولین وقت استراحت پیام‌هایم را بررسی می‌کنم. لطفاً شما نیز همین کار را بکنید!»



اصول ایمنی یک پالایشگاه

چکیده:

برج تفکیک رافینیت در ابر پالایشگاه منفجر شد و ۱۵ نفر را کشت. علت انفجار، ترکیبی از موارد زیر بود:

۱. اپراتورها نمی‌دانستند که تجهیزات ابزار دقیق لول (ارتفاع سطح مایع) و جریان چگونه کار می‌کنند؛
۲. نصب اشتباه شیر اطمینان فشار روی خط بخار درست زیر سطح بالای برج؛
۳. شیر اطمینان به جای تخلیه به خط مشعل پالایشگاه، به طور غیرمستقیم به جو تخلیه می‌شد؛
۴. حلقه آب‌بند بین درام تخلیه شیر اطمینان و انشعاب اصلی جمع‌آوری تحت فشار.

کلمات کلیدی:

شیر اطمینان؛ نشانگر جریان؛ نشانگر سطح؛ دما؛ چگالی؛ خروج از حالت کالیبره؛ انفجار

اصول ایمنی یک پالایشگاه بر دو سؤال متکی است:

۱. آیا طراحی فرآیند ذاتاً خطرناک است؟

۲. آیا اپراتورهای شیفت نحوه عملکرد ابزار دقیق را می دانند؟

ایمنی در پالایشگاه، ماهیتی از نگرش و دیدگاه نیست؛ بلکه محصول دانش مهندسان فرآیند و اپراتورهای اتاق کنترل است.

موقعیت مکانی شیر اطمینان

با توجه به شکل ۴۱-۱، من دو موقعیت ممکن جهت نصب شیر اطمینان فشار برج را نشان داده‌ام. کدام یک درست است؟

انتخاب صحیح، موقعیت شماره ۱ است. در صورتی که برج طغیان کند، فشار هد مایع در خط بخار، باعث باز شدن شیر اطمینان در موقعیت شماره ۲ می شود. این اتفاق در اثر هد استاتیک مایع در خط بخار رخ داده و حتی اگر فشار برج زیاد نباشد نیز رخ می دهد. سپس حجم زیادی از مایع به سیستم انشعاب اصلی (هدر)^۱ شیر اطمینان جریان می یابد. همانطور که پیش تر بحث شد، می توان امیدوار بود که شیر اطمینان به خط مشعل واحد^۲ متصل است و نه به اتمسفر.

نمایش سطح مایعات (لول)

سطح مایعات به طور مستقیم اندازه گیری نمی شود. بلکه به طور غیرمستقیم توسط لول-ترول^۳ اندازه گیری می شود (شکل ۴۱-۲ را مشاهده کنید). اختلاف فشار DP بین P_1 و P_2 (psi) اندازه گیری و سپس با استفاده از معادله (۴۱-۱) به اینچ سطح (D_H) تبدیل می شود:

$$D_H = (DP) (28) \div (SG) \quad (1 - 41)$$

^۱ Header: هدر، انشعاب اصلی، لوله اصلی، لوله مادر

^۲ Flare: فلر، مشعل واحد

^۳ Level-Trol: لول-ترول، محفظه خارجی نشانگر ارتفاع سطح مایع (لول)

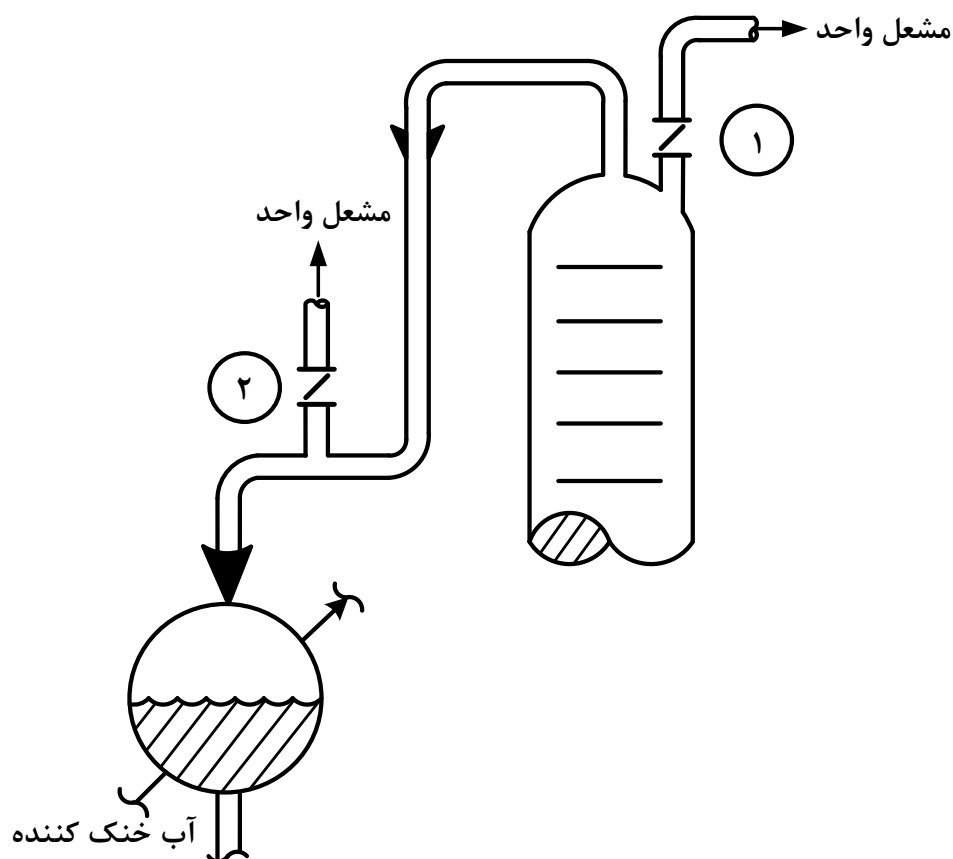
که در این جا:

$$SG = \text{جرم ویژه مایع}$$

SG مورد استفاده، «جرم ویژه کالیبراسیون نام دارد و معمولاً برای ماه‌ها یا سال‌ها تنظیم نمی‌شود؛ تا زمانی که تکنسین ابزار دقیق، لول-ترول را مجدداً کالیبره کند. همانطور که پیش‌تر گفتیم، اگر چگالی سیال در لول-ترول کمتر از حد معمول شود، سطح نشان داده شده در اتاق کنترل نسبت به سطح واقعی در وسل کاهش خواهد یافت.

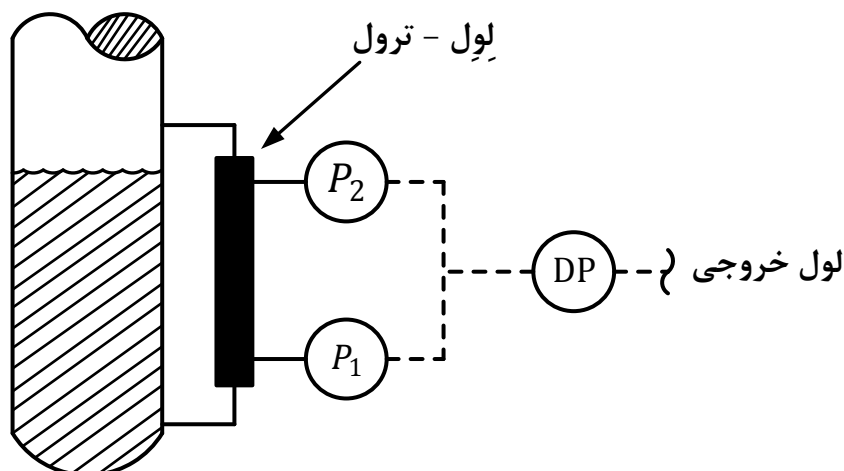
اندازه‌گیری جریان

دبی به طور غیرمستقیم و با استفاده از صفحه فلزی روزنه‌دار (اریفیس)^۱ اندازه‌گیری می‌شود. DP در عبور از صفحه اریفیس اندازه‌گیری و سپس با استفاده از معادله (۲-۴۱) به دبی تبدیل می‌شود (شکل ۲-۴۱ را مشاهده کنید).



شکل ۲-۴۱ موقعیت صحیح قرارگیری شیر اطمینان، شماره ۱ می‌باشد.

^۱ Orifice Plate: صفحه فلزی روزنه‌دار، صفحه اریفیس



شکل ۴۱-۲ سطح ارتفاع مایع (لول) توسط وزن مخصوص و اختلاف فشار، نمایان گر می شود.

$$\text{جریان} = (K \cdot \Delta P)^{1/2} \quad (2-41)$$

که در آن K ضریب اریفیس است.

موضوعی که بسیاری از اپراتورها نمی دانند، نحوه تصحیح جریان برای یک جریان سنجی ست که از حالت کالیبره خارج شده است. فرض کنید جریان سنج، دبی A را نشان می دهد. سپس جریان سنج، کنار گذر (بای پس) می شود. دبی مشاهده شده باید به صفر کاهش یابد اما فقط تا مقدار B کم می شود. برای محاسبه مقدار صحیح دبی از معادله زیر استفاده کنید:

$$\text{جریان تصحیح شده} = [(A^2 - B^2)]^{1/2} \quad (3-41)$$

در دهه ۱۹۶۰، زمانی که دبی بر روی یک ثبت کننده نوار کاغذی^۱ نشان داده می شد، ما این تصحیح را با یک مداد انجام می دادیم؛ زیرا نوار کاغذ قبلاً برای تابع ریشه دوم کالیبره شده بود. در نمایشگر دیجیتالی، این تصحیح باید توسط معادله (۳-۴۱) انجام شود.

شرکت نفت بریتانیا^۲ سال ۲۰۰۵ - انفجار برج تفکیک رافینیت - شهر تگزاس^۳

داستان زیر به حادثه ای مربوط می شود که اپراتورها درک درستی از نحوه عملکرد ادوات ابزار دقیق سطح ارتفاع مایعات (لول) و جریان نداشتند و مهندسان فرآیندی که به شیوه های درست طراحی پایبند نبودند.

^۱ ثبت کننده نوار کاغذی: Strip chart recorder

^۲ مخفف "The British Petroleum Company"، بی پی

^۳ شهر تگزاس: Texas City

در سال ۱۹۷۴ با گری المر^۱ در ساختمان نفت آموکو^۲ در شیکاگو^۳ منتظر آسانسور بودیم. گری گفت: اگر آموکو برای ساخت برج تفکیک زایلن در شهر تگزاس این چنین عجله دارد، باید به من اضافه کاری پرداخت کند. چطور است چند روز برای پرکردن تعدادی برگه ثبت داده^۴ به من کمک کنی؟

بنابراین تا حدودی در طراحی برج تفکیک زایلن مشارکت داشتم. پس از آن که واحد ایزومریزاسیون در شهر تگزاس ساخته شد، این برج به یک برج تفکیک رافینیت، که معروفترین برج تقطیر در آمریکاست تبدیل شد.

ممکن است این حادثه را به خاطر بیاورید. در سال ۲۰۰۵ شیر اطمینان برج در اثر سطح بالای ارتفاع (لول) مایع باز شد و ابری از بخارات نفتا در هوا تشکیل شد چرا که شیر اطمینان به خط مشعل واحد متصل نبود و به طور غیر مستقیم به جو تخلیه می گردید. بخارات نفتا توسط موتور کامیون مشتعل و سپس منفجر شد. ۱۵ نفر از پیمانکاران در یک کانکس فوت شدند و ۱۸۰ نفر هم مجروح گردیدند. شرکت بی پی^۵ با پرداخت ۱۰۰۰۰۰۰۰ دلار به ازای هر فوتی موافقت کرد. قیمت بنزین ۱۰ سنت افزایش یافت؛ زیرا این پالایشگاه بزرگترین تولید کننده بنزین در آمریکا بود.

دانش صنعتی می گوید، این اتفاق نتیجه آن بود که من و گری المر^۶ تخلیه شیر اطمینان را به اتمسفر متصل کردیم نه به خط مشعل پالایشگاه. داستان واقعی پیچیده تر از این حرفهاست.

پیش زمینه

من بین سالهای ۱۹۶۵ تا ۱۹۸۱ با سمت سرپرست و ناظر عملیات در شهر تگزاس^۷ و با سمت مهندس فرآیند در شیکاگو^۸ برای شرکت نفت آموکو^۹ کار کرده ام. من ۷٪ از تجهیزات فرآیندی موجود در شهر تگزاس را طراحی کردم (کک سازها، بازیابی گوگرد، تفکیک اسانس های نفتی^{۱۰}، سیستم آمین، تصفیه گازهای سوختی). در برج های تقطیر تحت نظارت من (برج بوتان زدا، برج تفکیک بوتان، برج پروپان زدا، برج تفکیک بوتان-پنتان) همه شیرهای اطمینان

^۱ Gary Elmer: گری المر

^۲ Amoco: آموکو

^۳ Chicago: شیکاگو

^۴ Data Sheet: برگه های ثبت داده

^۵ BP: مخفف شرکت نفت بریتانیا "The British Petroleum Company"، بی پی

^۶ Gary Elmer: گری المر

^۷ Texas City: شهر تگزاس

^۸ Chicago: شیکاگو

^۹ Amoco Oil: شرکت نفت آموکو

^{۱۰} Light Ends Fractionation: تفکیک اسانس های نفتی

در بالای برج‌ها قرار داشتند. همه آن‌ها به طور مستقیم به اتمسفر تخلیه می‌شدند. دلیل آن که مخالفتی با طراحی مذکور نداشتم این بود که زمانی که نظارت بر فرآیند را برعهده گرفته بودم نیز وضعیت به همین شکل بود. همچنین برج‌ها در سال ۱۹۵۸ در سرویس قرار گرفته بودند و هنوز هیچ اتفاقی نیفتاده بود. سؤالی که در تصور من نبود این بود که اگر برج در اثر سطح زیاد مایع طغیان کند، چه اتفاقی رخ خواهد داد؟

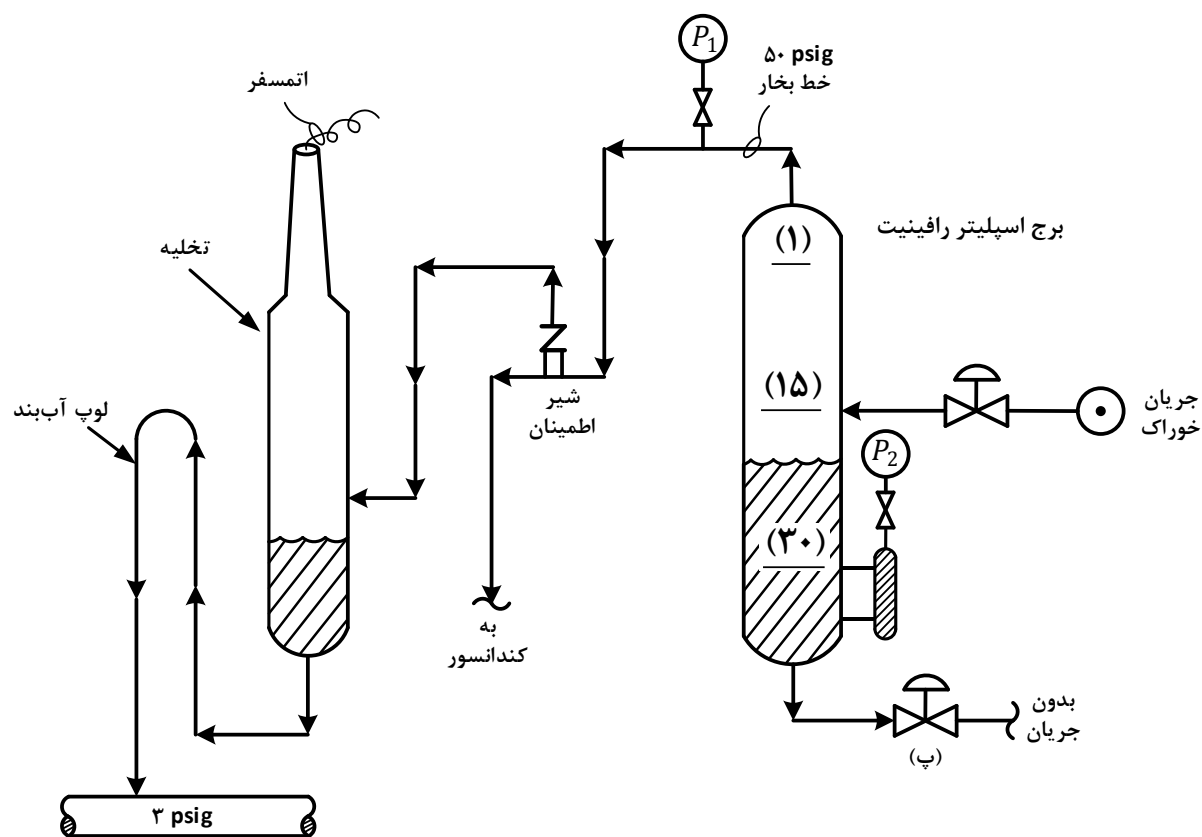
دلایل اصلی و بنیادین انفجار رافینیت

دلایل مستندشده برای انفجار برج تفکیک پس‌ماند به شرح زیر است:

۱. شیر اطمینان به خط مشعل کارخانه متصل نبود.

۲. سهیل‌انگاری اپراتور

با این حال تعدادی خطای دیگر نیز وجود دارد که به‌طور کامل توضیح داده نشدند (شکل ۳-۴۱ را مشاهده فرمائید):



شکل ۳-۴۱ برج تفکیک رافینیت - تگزاس سیتی.

۱. طراحی حلقه آب‌بند^۱ جهت تخلیه برج به سمت سیستم جمع‌آوری میعانات؛
۲. ارتفاع شیرهای اطمینان^۲ برج تکفکیک پس‌ماند نسبت به بالای برج؛
۳. عدم پشتیبانی فنی در طول عملیات راه‌اندازی؛
۴. اپراتورهایی که رابطه بین دمای پایین برج و ارتفاع سطح مایع (لول) مشاهده‌شده در پایین برج را نمی‌دانستند؛
۵. اپراتورهایی که مفهوم «Tapped Out»^۳ شدن لول-ترول را نمی‌دانستند؛
۶. اشکالات بررسی فشار هد مایع در قسمت پایین برج.

ارتفاع سطح سیالات (لول) چگونه اندازه‌گیری می‌شود

ما در واحدهای فرآیندی به‌طور مستقیم لول را اندازه‌گیری نمی‌کنیم؛ بلکه اختلاف فشار بین نقطه تپینگ فشار بالا (پائین مخزن) و تپینگ فشار پائین (بالای مخزن) را اندازه‌گیری می‌گیریم (شکل ۴۱-۲). برای تبدیل اختلاف فشار به ارتفاع سطح مایع (لول)، از جرم ویژه مایع استفاده می‌کنیم (معادله ۴۱-۲). در یک اختلاف فشار معین، ارتفاع سطحی که اپراتور روی پنل اتاق کنترل می‌بیند دو حالت را تجربه می‌کند:

$$\Delta P = \rho gh$$

• **پایین آمدن، بر اثر کاهش چگالی مایع**

• **بالا رفتن، بر اثر افزایش چگالی مایع**

حتی اگر ارتفاع واقعی مایع در برج هرگز تغییر نکرده باشد.

توجه کنید که با توجه به فرمول بالا شاید ابهامی ایجاد شود که در یک اختلاف فشار ثابت رابطه چگالی با ارتفاع سطح مایع رابطه عکس داشته باشد و مطلب بالا صحیح نیست. این مسئله را با نویسندگان محترم کتاب در میان گذاشتیم و ایشان ضمن تشکر بابت توجه و مطالعه دقیق کتاب، این موضوع را تایید کردند و در ادامه توضیح دادند که مقدار چگالی و وزن مخصوص سیال برج که در ابتدا و در کالیبره لول سنج مورد استفاده قرار گرفته است، در

^۱ Loop Seal: لوپ یا حلقه آب‌بند، برای ممانعت از بازگشت بخار از یک لوله به یک ناحیه کم فشارتر بکار می‌رود

^۲ Relief Valves: شیرهای اطمینان

^۳ Tapped out: خارج شدن از دامنه شیرهای سطح

مقایسه با مقدار چگالی و وزن مخصوص فعلی سیال داخل برج بیشتر است؛ بنابراین ارتفاع کمتری را به ما نشان می‌دهد.

در طول راه‌اندازی برج تفکیک رافینیت، چگالی مایع در قسمت پایین برج کمتر از حد معمول بود. بنابراین ارتفاع مایع (لول) نشان داده شده در اتاق کنترل کمتر از ارتفاع مایع (لول) واقعی سیال بود. متأسفانه، وقتی مایع فاصله بین تپینگ پایینی و تپینگ بالایی را پر می‌کند، صرف‌نظر از آن که ارتفاع سطح مایع تا چه حد بالاتر رفته، اختلاف فشار اندازه‌گیری‌شده در تپینگ‌ها ثابت باقی می‌ماند. به این اتفاق اصطلاحاً «Tapped Out» می‌گویند (به شکل ۴۱-۲ مراجعه نمایید). اگر جرم ویژه مایع ۱۰ درصد بیشتر از حد معمول باشد، ارتفاع سطح نشان داده شده روی پنل ۱۱۰ درصد خواهد بود. اما اگر جرم ویژه مایع ۱۰ درصد کمتر از حد نرمال باشد، ارتفاع سطح نشان داده شده روی پنل، ۹۰ درصد خواهد بود. بدین ترتیب اگر سطح ارتفاع مایع به میزان ۱۰ ft یا ۱۰۰ ft بالاتر از محل اتصال تپینگ ارتفاع سطح برود، عدد نشان داده شده همان ۹۰ درصد باقی خواهد ماند. اتفاقی که دقیقاً در شهر تگزاس رخ داد.

جرم ویژه در مقایسه با دما

اپراتورها گمان می‌کردند که ارتفاع سطح مایع داخل برج بالاست. با این حال آن‌ها هیت‌ر خوراک برج تفکیک را راه‌اندازی کردند که منجر به افزایش دمای پایین برج شد. این عمل باعث کاهش جرم ویژه مایع شده و سطح مشخص‌شده را کاهش داد. بنابراین باعث شد تا اپراتورها به این نتیجه اشتباه برسند که سطح پایین برج، که در ابتدا گمان کرده بودند بالاست، در واقع مشکلی ندارد.

اپراتورهای ساعتی که توسط شرکت نفت بریتانیا فسخ قرارداد شده بودند به موارد فوق شهادت دادند و آن را دلیل سرریز برج اذعان کردند. آن‌ها شهادت دادند دلیل این اتفاق سهل‌انگاری نبوده بلکه نشانگر سطح معیوب بوده است. اپراتورها در دعوای خود علیه شرکت نفت بریتانیا پیروز شدند (احتمالاً به این دلیل که اصل مطلب در طول رسیدگی توضیح داده نشده بود).

آیا فشار برج تفکیک بیش از حد بود

به هیچ عنوان به نظر نمی‌آید که فشار برج بیش از حد بوده باشد. اپراتورها نسبت به خروجی محصول پایین برج، خوراک بیشتری به برج تفکیک تزریق می‌کردند.

این گونه نبود که فشار برج بیش از حد باشد؛ بلکه به دلیل افزایش خوراک‌دهی به برج سرریز کرده بود. اگر شیر اطمینان فشار در بالای برج تفکیک قرار می‌گرفت (همانند دهه ۱۹۷۰ و برج‌هایی که در شهر تگزاس با آن‌ها کار می‌کردم)، پر شدن بیش از حد برج تفکیک، لزوماً باعث باز شدن شیر اطمینان فشار برج نمی‌شد. اما اگر شیر اطمینان فشار مانند مورد برج تفکیک رافینیت، چندین فوت پایین‌تر از بالای برج قرار گرفته باشد (مانند شکل ۴۱-۳)، فشار ناشی از ارتفاع مایع می‌تواند عاملی برای باز شدن شیر اطمینان فشار باشد.

مطمئناً، حجم زیادی مایع اشباع و نه فقط بخار، از شیر اطمینان خارج شده و به برج تخلیه فشار^۱ وارد شده بود.

نمایان گر جریان پایین برج معیوب بود

اپراتورها، شیر کنترل سطح خروجی محصول نرمال پائین برج را بسته بودند. اما چرا؟ آن‌ها فکر می‌کردند شیر کنترل نشتی دارد. شیر احتمالاً نشتی نداشت اما جریان‌سنج از حالت کالیبره خارج شده بود.

اکثر جریان‌سنج‌ها کالیبره نیستند. به عنوان مثال فرض کنید دبی نشان داده شده B/H ۸ است اما وقتی توسط ابزار دقیق بررسی می‌گردد، مشخص می‌شود که جریان‌سنج کالیبره نیست. دبی صفر، در واقع B/H ۴ است. جریان‌سنج‌ها دبی عبوری از روزنه صفحه اریفیس را به صورت تابعی از جذر افت فشار اندازه‌گیری شده، محاسبه می‌کنند. بنابراین دبی تصحیح‌شده (یعنی تصحیح جریان خوانده شده از تجهیز ابزار دقیقی که از حالت کالیبره خود خارج شده است)^۲ به صورت زیر می‌باشد (مراجعه به معادله ۴۱-۳)

$$8^2 - 4^2 = 64 - 16 = 48 \quad (4 - 41)$$

$$(48)^{1/2} = 7 \text{ B/H}$$

اما مقدار دبی، B/H ۱ بیشتر خوانده می‌شد. اگر شیر کنترل بسته شود و جریان واقعی به صفر برسد، اپراتورها جریان B/H ۴ را مشاهده خواهند کرد. ظاهراً اپراتورها در شهر تگزاس، کالیبره‌نبودن جریان‌سنج را با جریان خیلی زیاد، اشتباه گرفتند. از آنجایی که آن‌ها به طور مداوم خوراک وارد می‌کردند و سطح نشان داده شده در پنل اتاق کنترل‌شان افزایش نمی‌یافت (اما سطح واقعی افزایش می‌یافت)، آن‌ها تصمیم گرفتند شیر کنترل سطح پایین برج تفکیک را ببندند.

^۱ Blowdown Tower: برج تخلیه فشار

^۲ Off-zero: از کالیبره خارج شدن تجهیز ابزار دقیق

لوپ آب‌بند

حلقه آب‌بند دودکش تخلیه^۱ در شکل (۴۱-۳) نشان داده شده است. مایعات از دودکش تخلیه به جای آن که به سیستم فاضلاب باز بروند، به سیستم جمع‌آوری مایعات هیدروکربنی که اندکی تحت فشار است، (یعنی حدود psig ۳) جریان می‌یابند. برای جلوگیری از خروج مداوم بخارات هیدروکربنی از این سیستم جمع‌آوری به داخل دودکش تخلیه اتمسفری، یک حلقه آب‌بند وجود داشت. متأسفانه هنگامی که مایع داخل دودکش مخزن تخلیه فشار در بخش عمودی این حلقه به سمت بالا جریان پیدا می‌کرد، مایع فشار هد خود را به دلیل افزایش ارتفاع از دست می‌داد. از آنجا که این مایع، نفتایی بود که در نقطه حباب مایع اشباع بود، مقداری از آن تبخیر گردید و بخارات آزادشده جریان مایع را قطع نمود و در نتیجه انسداد بخار^۲ به وجود آمد.

انسداد بخار، جریان خروجی نفتا از دودکش تخلیه را متوقف کرد. سطح مایع درون دودکش تخلیه از نازل ورودی بالاتر رفت. بخاری که از طریق نازل ورودی، جریان می‌یافت؛ نفتا را به دودکش تخلیه هدایت کرده و نفتا مشتعل می‌گردد.

بی شک، وجود یک ونت در قسمت بالای حلقه آب‌بند، که یکی از ویژگی‌های مشترک حلقه‌های آب‌بند است و حتی در سیستم‌های لوله‌کشی آب هم استفاده می‌شود، می‌توانست از انسداد بخار جلوگیری کند.

سؤال نهایی

ما می‌توانیم امیدوار باشیم که شرکت نفت بریتانیا و شرکت ماراتون^۳ (اپراتور فعلی پالایشگاه) از این حادثه درس گرفته باشند. اما سؤال این است که آیا اگر من نیز حضور داشتم همین اشتباه را مرتکب می‌شدم؟ امیدوارم متوجه می‌شدم که جریان ورودی^۴ از جریان خروجی^۵ بیشتر بوده و سپس محاسبه می‌کردم که سطح سیال در برج تفکیک باید در حال افزایش باشد. اگر مهندس خدمات فنی واحد در فرآیند راه‌اندازی حضور داشت، باید براساس موازنه جرم مواد، با پرسنل عملیاتی همکاری و مشورت می‌کرد.

^۱ Blowdown Stack: دودکش تخلیه

^۲ Vapor Luck: انسداد بخار

^۳ Marathon: ماراتون

^۴ Input: ورودی

^۵ Output: خروجی

اما اقدام اساسی‌تر دیگری وجود دارد که من مطمئناً برای جلوگیری از این انفجار انجام می‌دادم. در سال ۱۹۸۴ من در راهاندازی پروپان‌زدای^۱ واحد آلکیلاسیون در پالایشگاه گود هوپ^۲ شرکت داشتم. هیچکس از ارتفاع سطح مایع مطمئن نبود. شیشه‌ی سطح‌نما (لول گیج) تا حد زیادی بی‌فایده بود. زیرا سیال فرآیندی آب سفید بود (نه زرد) و شیشه‌ها قدیمی و خراشیده بودند.

من یک فشارسنج (مطابق شکل ۳-۴۱) را در ونت بالایی شیشه‌ی سطح‌نما (P_2) قرار دادم و سپس فشار هد (P_1) را بررسی کردم. این مقدار، اختلاف فشار بین خط بخار بالا و بالای شیشه‌ی مایع‌نما است. برای تبدیل این اختلاف فشار به فوت:

$$(5 - 41) \quad \text{جرم ویژه بوتان} \div (23)(DP) = \text{فوت}$$

در گود هوپ، اندازه‌گیری نشان داد ما ۴۰ ft مایع بالاتر از سطح بالایی شیشه‌ی مایع‌نما، مایع داریم. به اصطلاح ما (Tapped-Out) شده بودیم. مایع تا زمانی که سطح نشان داده شده در اتاق کنترل از مقدار ثابت ۸۰٪ کاهش یافت و به طور نامنظم به ۷۰٪ رسید با پمپ خارج شد (پمپ داون)

در سال ۱۹۷۴ من این روش یافتن سطح در راهاندازی را به اپراتورهای خود در شهر تگزاس آموزش دادم. اما تا سال ۲۰۰۶ این گام ساده در سیل پیشرفت فناوری گم شد و این موضوع نهایتاً به زیان ایمنی پالایشگاه بود.

^۱ Depropanizer: پروپان‌زدا، جداساز پروپان، دیپروپانایزر

^۲ Good Hope: گود هوپ



خطرات H₂S، بخار آب، نیتروژن و آب داغ

چکیده:

بر اساس تجربه نویسنده، یکی از دلایل مرگومیر در واحدهای فرآیندی، مسمومیت با H₂S است که غلظت بالای ۱۲۰۰ ppm آن کشنده است. اتمسفرهای نیتروژنی که اکسیژن را در هوا جابجا می کنند، سه پرسنل قراردادی تعمیر و نگهداری را در نوسازی و تعمیر یک رآکتور کشت. زمانی که نویسنده در تعطیلات آخر هفته در یک پالایشگاه مشغول به کار بود، گودالی پر از آب داغ که از نشت میعانات بخار آب ایجاد شد، به تله‌ای کشنده تبدیل شد. اتصال ناخواسته سیستم هوای ابزار دقیق به منبع تجمع نیتروژن تقریباً منجر به تلفات در اتاق کنترل پالایشگاه شد.

کلمات کلیدی:

سولفید هیدروژن؛ نیتروژن؛ اکسیژن؛ بخار آب؛ میعانات؛ اجازه ورود؛ پایش؛ احتراق پذیر

ستوان جو پاتروچلی^۱ افسر موتورخانه یک ناو هواپیمابر پشتیبان در نبرد لیتة^۲ جنگ جهانی دوم در فیلیپین^۳ بود. ما با هم در شرکت نفت آموکو^۴ در تگزاس در بخش احیاء آمین و بازیابی گوگرد کار می کردیم.

در شیفت شب، برای هم داستان های جنگ را تعریف می کردیم. جو^۵ از جنگ های دریایی با ژاپنی ها تعریف می کرد. من داستان های تلفات و حوادثی را که شخصاً در واحدهای فرآیندی تجربه کرده بودم، تعریف می کردم.

«نورم، وقتی ناو زیر حمله انتحاری بود ماندن در پایین عرشه خیلی دشوار بود. افراد بالای عرشه حداقل می توانستند بجنگند. ما یک ناو هواپیمابر را در لیتة از دست دادیم.»

«بله جو، راجع به آن واقعه خوانده ام.»

«ولی کار در واحد گوگرد و آمین نیز با وجود H_2S و SO_2 و آهن داغ امن نیست. همین هفته پیش، کنی^۶ یکی از واگن های ذخیره گوگرد را بیش از حد پر کرد. ممکن بود کسی کشته شود.»

«جو، پالایشگاه ها واقعا مکان های خطرناکی هستند مگر این که مراقب باشی. چند داستان از پالایشگاه هایی که در آن ها کار می کردم و تلفات جانی و مالی داشتیم را برایت تعریف می کنم.»

«خیلی خب لیبرمن، ۹ ساعت تا اتمام شیفت وقت داریم؛ تو بگو و من گوش می کنم.»

آروبا^۷ - مناطق ساحلی

یک سرپرست تعمیرات (هم چنین یک افسر بازنشسته نیروی دریایی) در حال راهنمایی لوله کش ها برای تعویض یک قطعه اسپول^۸ برروی یک خط لوله پر از آمین در سازه ای مرتفع بود. این کار نیازمند استفاده از ماسک و کپسول اکسیژن (تجهیزات هوا) بود. او بنا به دلایلی تجهیزات هوایش را درآورد. او به دلیل تبخیر ناگهانی آمین آلوده و مسمومیت H_2S فوت کرد.

^۱ Joe Patrocelli: جو پاتروچلی

^۲ Leyte Gulf: خلیج لیتة

^۳ Philippines: فیلیپین

^۴ Amoco: آموکو

^۵ Joe: جو

^۶ Kenny: کنی

^۷ Aruba: آروبا

^۸ Spool: اسپول در پایپینگ پتروشیمی مجموعه ای از لوله هایی با طول های مختلف است که در دو انتهای لوله ها فلنج متصل شده، بنابراین فلنج ها می توانند بر یکدیگر منطبق شده و توسط پیچ مونتاژ شوند.

- **اقدامات اصلاحی** - کار با تجهیزات در بخش آمین آلوده مساوی با کار در بخش H_2S است و همیشه باید از ماسک و کپسول اکسیژن (تجهیزات هوا) استفاده شود.

شرکت نفت آمریکا^۱ - شهر تگزاس^۲

در واحد آلکیلاسیون، دو پایپ فیلتر مشغول رفع انسداد^۳ ریویلر پروپان زدا بودند. برج در فشار مشعل پالایشگاه نگه داشته شده بود. واحد تولید اسید سولفوریک (که از H_2S به عنوان خوراک استفاده می کرد)، به صورت اضطراری از سرویس خارج شد^۴ و H_2S آن ها به مشعل واحد فرستاده شد. H_2S به داخل برج پروپان زدا بازگشت و هر دو نفر پایپ فیلتر را کشت.

- **اقدامات اصلاحی** - انسداد تجهیزات فرآیندی از خط مشعل واحد، در هنگام انجام تعمیرات

پالایشگاه «X» - بای تاون^۵، تگزاس

یک اپراتور خانم برای راه اندازی مجدد پمپ آب یک درام جداساز^۶ خوراک گاز اسیدی فرستاده می شود. شیر درین بر روی خط ورودی پمپ، یک شیر دروازه ای^۷ معمولی ۳/۴ اینچی بود. اگر به جای این شیر، شیر ایمنی دستی^۸ بود (تا اگر اپراتور آن را باز نگه نمی داشت، توسط نیروی فنر، خودبه خود بسته می شد) این حادثه اتفاق نمی افتاد. همکاران او جسدش را یک ساعت بعد کنار پمپ پیدا کردند.

- **اقدامات اصلاحی** - شیرهای ایمنی دستی که توسط فنر باز و بسته می شوند، باید به صورت دستی باز نگه داشته شوند. زیرا هنگامی که باز و سپس رها شوند، بلافاصله محکم بسته می شوند.

^۱ American Oil: شرکت نفت آمریکا

^۲ Texas: تگزاس

^۳ Blinding off: رفع انسداد

^۴ Emergency Shut down: توقف اضطراری

^۵ Baytown: بای تاون

^۶ Knockout(K.O) Drum: درام جداساز، درام ته نشین کننده قطرات مایع از جریان گاز

^۷ gate valve: شیر دروازه ای

^۸ Dead man's valve: شیر ایمنی دستی که در حالت نرمال بسته است و اگر اپراتور آن را با فشاری باز نگه ندارد، خودبه خود بسته می شود

شرکت انرژی های تجدید پذیر افق سبز^۱ نورکو^۲، لوئیزیانا^۳

یک پیمانکار به خاطر نشت بخار آب در واحد بازیابی گوگرد داخل یک گودال ۶ فوتی آب داغ به دام افتاد و به خاطر سوختگی جان باخت. من هنگام این حادثه، در تعطیلات پایان هفته سرشیفت شرکت بودم. گودال برای تعمیر نشتی حفاری شده بود.

- **اقدامات اصلاحی** - سرپرستان هر واحد باید در واحدهای تحت سرپرستی خود بر روی پروژه های عمرانی کنترل کامل داشته باشند.

شرکت نفت آمریکا - تگزاس

دو مرد تعمیرکار به خاطر ورود به رآکتور هیدروکراکر کشته شدند. رآکتور با نیتروژن پرچ شده بود. ورود به فضایی حاوی نیتروژن خالص باعث تنگی نفس یا علائم دیگری نمی شود بلکه تنها مرگ را به دنبال دارد.

- **اقدامات اصلاحی** - ۱٪ کربن دی اکسید به نیتروژن اضافه کنید. این کار بلافاصله باعث تنگی نفس می شود. هم چنین اقدامات لازم برای ورود به فضای بسته را رعایت و یک دریچه هوا ایجاد کنید.

کرپوس کریستی^۴ - مناطق ساحلی

توربینی که یک پمپ آسفالت (۷۰۰ °F) می چرخاند، از سرعت مجاز خود فراتر رفت و باعث شد اتصالی کوچک از پمپ شکسته شود و یک کارگر پیمانکار فوت کرد. آسفالت بر روی لباس شخص پاشید و خودبه خود مشتعل شد. دمای خودسوزی^۵ آسفالت یا محصولات پایین برج خلأ، ۳۲۰ °F است. سیستمی که توربین را در سرعت های زیاد از سرویس خارج می کرد با یک تکه سیم غیرفعال شده بود؛ زیرا به دلیل خرابی کنترل گر سرعت گاورنر، مدام توربین را از سرویس خارج می کرد. من قبل از این حادثه متوجه قطع شدن سیستم تریپ^۶ پمپ شده بودم ولی از گزارش آن به مدیریت واحد غفلت کردم.

^۱ شرکت انرژی های تجدید پذیر افق سبز: Green Horizon Renewables (GHR) Energy

^۲ نورکو: Norco

^۳ لوئیزیانا: Louisiana

^۴ کرپوس کریستی: Corpus Christi

^۵ دمای خودسوزی: Auto-ignition temperature

^۶ از سرویس خارج شدن ناگهانی واحد به دلایل خاص: Trip

• **اقدامات اصلاحی** - توربین‌های بخار آب را فقط هنگامی راه‌اندازی کنید که هم سیستم تریپ در سرعت‌های بالا و هم کنترل‌گر سرعت گاورنر فعال باشند. سیستم تریپ نمی‌تواند گاورنر را پشتیبانی کند. زمانی که گاورنر کار نمی‌کند، اپراتورها دیر یا زود سیستم تریپ را غیرفعال می‌کنند.

پالایشگاه «X» - بومانت^۱

یک اپراتور به علت فوران آب در حال جوش از بالای درام کک باز، کشته شد. بررسی‌های من نشان داد که پاکسازی (پرچ) بخار آب تصادفاً به زیر درام باز شده بود. مشتری من فکر می‌کرد که وجود یک نقطه داغ موضعی^۲ در بستر کک، باعث این فوران شده است.

• **اقدامات اصلاحی** - درام‌های کک جدید تجهیزاتی سر باز هستند که باید از این خطر محافظت شوند. واحدهای فعلی باید با نصب یک شیر دلتا در بالای درام اصلاح شوند.

شرکت نفت آمریکا - تگزاس سیتی

یک بازرس مشغول بررسی سقف تانک اسید سولفوریک مصرف‌شده^۳ در واحد آلکیلایسیون بوده است. گزارش شده بود که سقف به دلیل خوردگی سست شده است. تنها چیزی که از جسد او پیدا شد، دندان‌هایش بود.

• **اقدامات اصلاحی** - بازرس قصد داشته با شجاعت خود همکارانش را تحت تاثیر قرار دهد. دلیل برخی از حادثه‌ها ناشی از اعتماد به نفس بیش از حد و کاذب است.

شرکت انرژی‌های تجدیدپذیر افق سبز نورکو، لوئیزیانا

زبان‌ه کشیدن شعله‌های یک کوره افقی به سمت دو اپراتور که قصد روشن کردن مشعل اصلی را داشتند، جریان پیدا می‌کند. شمعک‌ها مسدود شده بودند و آن‌ها از ترجی آغشته به نفت به جای منبع جرقه استفاده می‌کردند. هردوی آن‌ها دوستان من بودند.

^۱ Beaumont: بومانت

^۲ Localized hot spot: نقطه داغ موضعی

^۳ Spent sulfuric acid: اسید سولفوریک مصرف شده

اقدامات اصلاحی - این شمعک‌ها از گاز سوختی به جای گاز طبیعی استفاده می‌کردند و توسط رسوبات گوگرد مسدود می‌شوند. برای شمعک‌ها از گاز طبیعی به جای گاز سوختی پالایشگاه استفاده کنید.

آموکو - وایتینگ^۱، ایندیانا^۲

سه اپراتور به علت انفجار تانک اکسیدکننده آسفالت کشته شدند. جریان پرچ بخار آب و نیتروژن در خط تخلیه گاز خروجی به سمت زباله‌سوز اکسیدکننده، عمداً و در تلاش برای روشن کردن مجدد شمعک اکسیدکننده قطع شده بودند.

• **اقدامات اصلاحی** - این فرآیند بسیار خطرناک و غیرضروری است. مشخصات موردنیاز آسفالت را می‌توان با استفاده از عملکرد مناسب برج خلأ و بدون نیاز فرآیند قدیمی اکسیدکردن برآورده کرد.

پالایشگاه یونوکال^۳ (سیتگو کنونی) - شیکاگو

در هنگام عملیات تخلیه کک، قسمت پایین درام روی مسیر شیب‌دار جلوی درام فوران کرد و اپراتور بارکننده کک‌های کنده‌شده روی سطح شیب‌دار را کشت. خروجی ۶ اینچی پایین درام مسدود شده بود و ۱۰۰ فوت آب، پشت آن جمع شده بود که به صورت ناگهانی تخلیه گردید.

• **اقدامات اصلاحی** - در هنگام کندن کک، بارکنندگان کک هرگز مجاز به فعالیت در گودال‌های درام کک یا سطوح شیب‌دار درام‌های کک نیستند. همیشه نمی‌توان از انسداد و انفجار قسمت پایین درام جلوگیری کرد. ابتدا کک را جدا کنید و سپس بارکننده آن را خارج کند.

نفت تنکو^۴، نیواورلئان

تعداد زیادی از کارگران قراردادی در داخل یک برج تقطیر آروماتیک در هنگام انجام تعمیرات، کشته شدند. یک پیمانکار مسیر تهویه را به جای هوا به گاز طبیعی متصل کرده بود. انفجار باعث کشته شدن کارگران شد ولی آسیب کمی به برج وارد شد.

^۱ Whiting: وایتینگ

^۲ Indiana: ایندیانا

^۳ Unocal: یونوکال

^۴ Tenneco Oil: تنکو اویل

• **اقدامات اصلاحی - اتصالات در یوتیلیتی استیشن (ایستگاه خدمات جانبی) برای هوا، گاز، نیتروژن و بخار**
باید به صورت منحصربه‌فرد و غیرقابل اتصال به یکدیگر ساخته شوند.

پالایشگاه X - نورکو، لوئیزیانا

تمامی کارکنان واحد FCU^۱ به علت انفجار ابر پروپان به وسیله هوای آزاد که منجر به انفجار قسمت پایین برج تفکیک کاتالیستی در بالای اتاق کنترل شد، کشته شدند. یک پمپ تزریق آب بدون نازل اسپری نصب شده بود و آب باعث فرسایش و خوردگی زانویی ۶ اینچی در خط بخار بالای برج شده بود. من اخیراً از این واحد بازدید کردم و خاطرات غم‌انگیزی در مورد از دست دادن کارکنانش شنیدم.

• **اقدامات اصلاحی - تزریق آب شست‌شو به لوله باید از طریق یک نازل اسپری مخصوص در قسمت افقی لوله و دقیقاً در بالادست زانویی‌ها انجام شود و نه توسط یک قطعه لوله ۵/۰ اینچی.** از آب هوازدايي شده^۲ برای این کار استفاده کنید نه آب رودخانه می‌سی‌سی‌پی^۳ که با اکسیژن اشباع شده است.

پالایشگاه یونوکال^۴ (سیتگو کنونی) - شیکاگو^۵

بیست و شش پرسنل پالایشگاه در گروه مهار آتش بر اثر شکستگی یک جوش تعمیری در برج جداسازی گاز نفتی مایع (LPG) از آمین (مونو اتانول آمین^۶) کشته شدند. علی‌رغم آن که برج وارد سرویس شده و مملو از H₂S آمین آلوده بود اما جوش تعمیری تنش‌زدایی نشده بود. دلیل آن که جوش تعمیری تنش‌زدایی نشده بود این بود که محفظه، پس از جوش‌کاری تحت عملیات حرارتی قرار نگرفته بود.

• **اقدامات اصلاحی - تمامی وسل‌هایی که در تماس با آمین هستند باید پس از جوش‌کاری تحت تنش زدایی حرارتی قرار بگیرند.** هم‌چنین استفاده از مونو اتانول آمین در واحدهای FCU به دلیل تشکیل

^۱ مخفف «Fluid Catalytic Cracking Unit»، معنی واحد شکست کاتالیستی بسترسیال، واحد شکستن مولکول‌ها در کاتالیست سیال: FCU

^۲ de-aerated: هوازدايي شده

^۳ Mississippi: می‌سی‌سی‌پی

^۴ Unocal: یونوکال

^۵ Chicago: شیکاگو

^۶ MEA: مخفف "Mono Ethanol Amine" مونو اتانول آمین

نمک‌های مقاوم به حرارت، ذاتاً خطرناک است؛ مگر آن که آمین زدا دائماً در سرویس باشد که در مورد پالایشگاه یونوکال اینطور نبوده است.

یک تجربه شخصی نزدیک به مرگ

«جو^۱، من پارسال تا مرز مرگ رفتم. در یک برج تفکیک‌کننده واحد کک‌ساز، من لوله^۲ اسپری مسدود شده را بیرون کشیدم تا توزیع آب در انشعاب اصلی اسپری روغن شست‌شو بررسی کنم.

لوله حاوی نفت اشباع‌شده با H_2S بود. هشداردهنده^۲ H_2S من خاموش شده بود و من در دودکش ۲۴ اینچی سینی نازل تخلیه^۲ نفت‌گاز گیر کرده بودم. اگر دوستم^۲ مهندس جوان اهل دهلی، مرا از آن دودکش بیرون نکشیده بود من همانجا از هوش می‌رفتم و می‌مردم.»

«لیبرمن لعنتی، هیچوقت نباید لوله^۲ مسدود شده برج را اینطوری بیرون بکشی. این کار به طورخودکار تمام مجوزهای ورود صادرشده توسط عملیات را لغو می‌کند. واقعا خیلی خوش‌شانس بودی.»

«فقط این نبود جو، من نازل‌های اسپری را هم خودم باز کردم. آن‌ها مسدود شده بودند و آب نمی‌توانست لوله‌های روغن شست‌شو را از نفت‌گاز اشباع‌شده با H_2S تمیز کند.»

«نورم، هنگامی که اتصالات داخل یک برج را باز می‌کنی، تمامی مجوزهای ورود باطل می‌شوند. اگر می‌خواستی مجرای اصلی اسپری را چک کنی، باید این کار را بیرون از برج تفکیک‌کننده و روی زمین انجام می‌دادی.»

کار کردن برای ایمنی

«می‌دانی جو، من درباره ایمنی در واحدهای فرآیندی خیلی فکر کرده‌ام. نتیجه نهایی من اهمیت وجود اپراتورهای با تجربه و مهندسان طراحی حرفه‌ای به صورت همزمان است. خیلی اوقات، من افراد جوانی را می‌بینم که بر اساس توانایی‌های احتمالی‌شان مسئول واحدهای عملیاتی می‌شوند. در برخی پالایشگاه‌ها، ناظران عملیاتی مجرب بیش از حد زیر بار وظایف اداری قرار می‌گیرند. مشکل دیگری که به نظرم می‌آید، مهندسان پیمانکاری هستند که با تجربه کمی در فرآیندهای پالایشگاهی، طراحی واحدهای عملیاتی را بر عهده گرفته و مرتکب خطاهای اساسی

^۱ Joe: جو

^۲ Kumar: کومار

می‌شوند. هم‌چنین، بسیاری از مشکلات به دلیل دانش کم بازرسان پالایشگاه از علم مواد و نرخ خوردگی ایجاد می‌شوند.

فکر می‌کنم کلید اصلی ایمنی چیزی است که از مادرم یاد گرفتم. همیشه فرض کن حتی اگر احتمال کمی برای وقوع یک اتفاق بد وجود دارد، آن اتفاق حتماً رخ می‌دهد و فاجعه گریبان مرا خواهد گرفت.»

«بله نورم، دقیقاً مثل نیروهای انتحاری ارتش ژاپن. من یک بار هنگام حمله روی عرشه بودم. حس می‌کردم هرکدام از آن‌ها مستقیماً به سمت من شیرجه می‌روند. حدس می‌زنم کار در پالایشگاه مثل حضور در میدان جنگ است. همیشه باید مراقب باشی تا زنده بمانی.»



ایمنی - نگرش یا مهندسی؟

چکیده:

خطاهای طراحی اولیه ممکن است سال‌ها پس از راه‌اندازی واحد، ایمنی آن را به خطر بیندازد. یک واحد آلکیلاسیون اسید سولفوریک، مجهز به مبرد ایزوبوتان پروپانزدا منجر به ایجاد نقصی فاجعه‌بار در یک پالایشگاه بزرگ آمریکایی شد. علت این خرابی، اختلاط ناخواسته رطوبت و استرهای اسیدی در درام رفلکس پروپانزدا بود. طراحی اولیه مانع از وقوع این خطر در هنگام راه‌اندازی پروپانزدای واحد آلکیلاسیون نشد.

کلمات کلیدی:

پروپانزدا؛ اسید استر؛ اسید سولفوریک؛ ایزوبوتان؛ مبرد؛ پروپان؛

تصور غلطی در فرآیند و صنعت پالایش وجود دارد که کلید رسیدن به ایمنی موارد زیر است:

- آگاهی
- هشیاری
- نگرش

این‌ها مزخرفاتی است که همگی ما در جلسات مسخره‌ایمی شنیده‌ایم. هرکسی که تا به حال در پالایشگاه دیده‌ام، می‌خواهد تا تجهیزات بدون مرگ و میر و حادثه کار کنند. اما خیلی مواقع، این خواسته تحت تاثیر اشتباهات طراحی مهندسی می‌گیرد. انفجار پروپان سال ۱۹۷۶ در پالایشگاه نفت آمریکا در شهر تگزاس مثالی بارز برای عدم موفقیت تکنولوژی‌های کاربردی است.

آلکیل‌سیون اسید سولفوریک

واحد آلکیل‌سیون استراتکو^۱ (تحت لیسناس دوپونت^۲) در طول جنگ جهانی دوم توسط آقای استرانفورد^۳ و وارد گراهام^۴ توسعه داده شد. بوتیلن و ایزوبوتان با هم واکنش می‌دهند تا در دمای حدود ۵۰°F ایزواکتان تولید کنند. گرمای تولید شده در طول واکنش با استفاده از چرخه تبرید پساب با ترکیب معمول زیر از سیستم خارج می‌شود:

- ۸۰٪ ایزوبوتان
- ۱۰٪ نرمال بوتان
- ۱۰٪ پروپان

پروپان به طور پیوسته در یک برج پروپان‌زدا^۵ از چرخه تبرید خارج می‌شود. پروپان خروجی از بالای این برج شامل استر اسید (یک مولکول هیدروکربنی به همراه یک ترکیب گوگردی سمی (SO₃)) است. این استر اسید تا زمانی که همراه با آب نباشد، خورنده نیست. اما اگر ناگهان مرطوب شود، استر اسید به هیدروکربن و اسید سولفوریک

^۱ استراتکو: Stratco

^۲ دوپونت: Du pont

^۳ استنفورد: Stratford

^۴ وارد گراهام: Ward Graham

^۵ Depropanizer: پروپان‌زدا، جداساز پروپان، دیپروپانایزر

ضعیف تبدیل می‌شود. اسید سولفوریک قوی ($+90\%$) خورنده فولاد کربنی نیست. اسید سولفوریک ضعیف با غلظت ۱۰ الی ۲۰٪ موجب خوردگی در لوله‌های فولاد کربنی می‌شود. من شخصاً شاهد خوردگی محل جوش‌های یک لوله ۶ اینچی طی چند روز در تگزاس^۱ بوده‌ام.

مرطوب در مقایسه با خشک

بنا به گفته متخصص آلکیلاسیون، وارد گراهام (که در سال ۱۹۸۰ فوت کرد)، خوردگی در پروپان‌زدای واحد آلکیلاسیون می‌تواند به کلی متوقف شود، به شرطی که خوراک پروپان‌زدا خشک نگه داشته شود (عاری از ماندگی آب و ذرات حل نشده). در حالت عملیات عادی، روال همینطور است اما در هنگام راه‌اندازی پروپان‌زدا خیر.

من از آوریل سال ۱۹۷۴ تا اواسط ۱۹۷۶ مسئول عملیات واحد آلکیلاسیون شماره ۲ بودم. در طول این دوره، قسمت واکنش آلکیلاسیون بدون هیچ مشکلی کار می‌کرد. ما 0.6% از کل بنزین مصرفی در ایالات متحده را تولید می‌کردیم. اما پروپان‌زدای واحد چندین بار برای تعمیر نشتی کندانسور خنک‌کننده آبی بالاسری، از سرویس خارج شد. ادامه عملیات بدون پروپان‌زدا، برای چند روز مشکلی به وجود نمی‌آورد. پروپان در جریان مبرد ایزوبوتان گردش، انباشته می‌شد. بعد از چند روز، بخارات غیرقابل تراکم را از درام ته‌نشینی مبرد به شبکه سوخت، تخلیه می‌کردیم. گاز تخلیه شده 50% بوتان داشت. اما محصول LPG بالاسری پروپان‌زدا، حاوی 2% بوتان بود. پس مصرف ایزوبوتان در مواقعی که پروپان‌زدا خارج از سرویس بود، بالا می‌رفت. زمانی که پروپان‌زدا برای تعمیر لوله کندانسور از سرویس خارج می‌شد، این دستورالعمل عملیاتی نرمال، رایج بود. با این حال هنگام راه‌اندازی مجدد پروپان‌زدا، این شیوه پتانسیل ورود رطوبت خورنده به برج را داشت.

دستورالعمل راه‌اندازی برج پروپان‌زدا

نشتی در لوله کندانسورهای آبی بالاسری برج پروپان‌زدا نمی‌توانست باعث ورود آب به برج شود. زیرا برج در فشار 300 psig (20 Bar) کار می‌کرد و فشار آب خنک‌کننده 30 psig (2 Bar) بود. مشکل ورود رطوبت به برج، بعد از خارج کردن برج از سرویس برای تعمیر نشتی دسته لوله‌های کندانسور بالاسری اتفاق افتاد. رطوبت از راه‌های مختلفی می‌توانست به برج وارد شود:

^۱ تگزاس: Texas

۱. برج قبل از انسداد (کور کردن) سمت پوسته کندانسور برای پاکسازی از هیدروکربن‌ها بخارشویی شده بود. یا

۲. فشار برج تا زیر فشار آب سرد خروجی از برج خنک کننده^۱ چرخشی کاهش یافته بود. یا

۳. هنگام راه اندازی مجدد برج، بوتان مرطوب (حاوی ۲ تا ۵٪ پروپان) استفاده شد تا جریان رفلاکس در فشار عملیاتی عادی، یعنی ۳۰۰ psig (۲۰ Bar)، برقرار شود.

یک خطای طراحی

واحد آلکیلاسیون برای راه‌اندازی جداگانه پروپان‌زدا در زمانی که بقیه واحد در حال عملیات بود، طراحی نشده بود. با وجود این که ادامه عملیات، بدون پروپان‌زدا ممکن بود، این مسئله باید در مرحله طراحی پروژه در نظر گرفته می‌شد. بدین ترتیب هنگامی که جریان رفلاکس برج از آب اشباع شده باشد، ایزوبوتان مبرد که حاوی استر اسید است وارد برج می‌شود. آب اسیدی به همراه جریان رفلاکس در برج می‌چرخد و به دلیل وجود اسید سولفوریک ضعیف، خوردگی با سرعت زیاد صورت گرفت. این اتفاق به خرابی زانویی^۴ اینچی در ورودی مکش پمپ رفلاکس انجامید. من یک هفته بعد از خرابی زانویی از برج بالا رفتم تا آن را بررسی کنم. مانند این بود که کسی از روی شیپنت، زانویی را با دربازکن پوست کنده باشد. زانویی به ضخامت درب یک کنسرو سوپ بود.

تمامی محتویات درام رفلاکس با قطر داخلی ۴ فوت و ارتفاع حجمی^۲ ۱۵ فوت تخلیه شده بود. یک ابر سفید بزرگ از LPG فضای بالای واحد آلکیلاسون شماره ۲ تا واحد FCU^۳ شماره ۳ را پوشانده بود. ابر به خاطر کربن مونواکسید خروجی از بویلر^۴ واحد FCU مشتعل و سقف اتاق کنترل FCU منفجر شد. تمامی قسمت شرقی بزرگ‌ترین پالایشگاه دنیا تا چند ماه از سرویس خارج شد.

^۱ Cooling water supply: آب سرد خروجی از برج خنک کننده

^۲ Tangent to Tangent (T-T): تانژانت به تانژانت، فاصله بین دو خط جوش کلاهک‌های استوانه‌ای، ارتفاع حجمی مورد استفاده در عملیات

^۳ FCU مخفف «Fluid Catalytic Cracking Unit»، معنی واحد شکست کاتالیستی بستر سیال، واحد شکستن مولکول‌ها در کاتالیست سیال

^۴ Boiler: بویلر، دیگ بخار، جوشاننده

تغییرات طراحی اصلاحی

بعد از این حادثه، واحد با شستشوی بالادست پروپانزدا توسط کاستیک (۱۰٪ NaOH) اصلاح شد تا تمامی استرهای اسیدی از خوراک برج حذف شوند. این اقدام به نظر من یک تصمیم درست از سوی مدیریت نفت آمریکا بود. هر چند اگر قبل از شستشو با کاستیک از من مشورت می‌خواستند، مدل عملیاتی زیر را پیشنهاد می‌کردم:

- **قدم اول** – قبل از راه اندازی، برج را با بخار آب شستشو دهید.
 - **قدم دوم** – بوتان مخلوط را به مدت چند ساعت به‌عنوان خوراک وارد کنید تا لول درام رفلاکس و جریان رفلاکس، با استفاده از ریپویلر برج برای تبخیر رفلاکس، ثابت شود.
 - **قدم سوم** – وارد کردن خوراک مرطوب به برج را متوقف کنید و برای X ساعت برج را با جریان برگشتی کامل^۱ بهره‌برداری کنید
- برای X ساعت؟ منظورم تا زمانی است که خودم شخصاً بررسی کنم که چاهک تخلیه آب بر روی درام رفلاکس پروپانزدا کاملاً عاری از آب باشد. پس از آن یک شیفت دیگر صبر می‌کنم و سپس اجازه می‌دهم مبرد گردشی ایزوبوتان اسیدی مجدداً به واحد آلکیلاسیون وارد شود.

خلاصه

خطای اصلی، این بود که طراح فرض کرده بود شخصی با دید مهندسی خوب باید بداند که پروپانزدا باید قبل از ورود مجدد مبرد گردشی به برج، رطوبت‌زدایی شود؛ که به عقیده من توقع بیجایی بوده است. مخصوصاً که این الزام در دستورالعمل عملیاتی واحد نیز مشخص نشده بود.

تصمیم مدیریت مبنی بر شستشوی خوراک پروپانزدا با کاستیک ۱۰٪، که من ابتدا تصور می‌کردم ضروری نیست، تصمیم مهندسی بسیار درستی بود. تا هنگامی که واحد آلکیلاسیون در شرایط نرمال و حالت پایدار کار می‌کند، پروپانزدا در حالت خشک و بنابراین غیرخورنده باقی می‌ماند. هر چند، چند احتمال برای ورود رطوبت به برج وجود دارد. شستشو با کاستیک برای حذف استرهای اسیدی، راهکاری نسبتاً ارزان‌قیمت برای تقویت ایمنی واحد است.

^۱ Total reflux: جریان برگشتی کامل

نگرش من برای طراحی واحدهای ایمن، بسیار متأثر از این حادثه است. من سعی می‌کنم تا شرایط از سرویس خارج کردن ایمن، راه‌اندازی و خرابی تجهیزات را نیز در طراحی‌هایم در نظر بگیرم. مخصوصاً هنگامی که آب می‌تواند با ترکیبات اسیدی مخلوط شود.

در واقع من الان باهوش‌تر شده‌ام.



خطرات کنترل فرآیند نامناسب

چکیده:

کنترل نامناسب میعان‌ات بخار آب ناشی از عریان‌ساز هیدروفلئوریک اسید فشار بالا، باعث ایجاد وضعیت بسیار خطرناکی شد. دلیل اصلی، طراحی نامناسب برای کنترل بخار آب کم‌فشار (۲ بار) بود که برای جوشاندن مجدد یک جریان ورودی به ری‌ویلر برج عریان‌ساز هیدروفلئوریک اسید و LPG با فشار ۲۰ بار، در یک واحد آلکیلاسیون استفاده می‌شد. استفاده از لوله‌های فولاد کربنی به جای لوله‌های آلیاژی در ری‌ویلر، خطر کنترل نامناسب میعان‌ات بخار آب را افزایش داد.

کلمات کلیدی:

اسید هیدروفلئوریک ؛ کنترل؛ میعان‌ات؛ فشار بخار آب؛ عریان‌ساز؛ متالوژی لوله؛ تله بخار آب

من از مارها می ترسم اما دو چیزی که بیشتر از همه مرا به وحشت می اندازند عبارتند از:

- هیدروفلوئوریک اسید (HF) که در واحد آلکیلاسیون به عنوان کاتالیست برای تولید ایزواکتان بنزین استفاده می شود.

- ابری از LPG (پروپان)

HF از طریق پوست نفوذ کرده و استخوان را نابود می کند. ابرهای LPG (پروپان یا بوتان)، غبار سفیدی تشکیل می دهند که از هوا سنگین تر است، بر روی زمین حرکت می کند و به دنبال جرقه ای برای احتراق می گردد. در صورت احتراق ابر LPG، انفجاری به شعاع یک چهارم مایل تا نیم مایل به وجود می آید. من شخصاً مقصر تولید ۴ ابر بزرگ LPG در دهه ۱۹۷۰ در تگزاس بودم.

- یک مهره افشانکی^۱ ۳/۴ اینچی، هنگام بیرون کشیدن درپوش کنتکور واحد آلکیلاسیون با یک آچار لوله ۱۶ اینچی، توسط یک اپراتور شکسته شد.

- یک درین ۲ اینچی که با هیدرات ها (هیدوکربن های جامد و یخ) قسمتی از آن مسدود شده بود زمانی که اپراتور آن را بیش از اندازه باز کرده بود، فوران کرد.

- یک جوش تنش زادی نشده بر روی لوله فولاد کربنی ۸ اینچی به دلیل تماس با اسید سولفوریک ضعیف فوران کرد.

- یک زانویی^۲ ۴ اینچی در مسیر پروپان مایع به طور فجیعی فوران کرد. زانویی در زیر مخزن رفلکس پروپان زدای بسیار عظیمی قرار داشت که به اتمسفر تخلیه شد.

تنها در حادثه آخر، ابر بخار منبعی برای جرقه زدن پیدا کرد. در این انفجار، پالایشگاه شرقی نفت آمریکا ویران شد. هم چنین، حرفه کاری من در این شرکت نیز خیلی تحت تاثیر قرار گرفت.

برج دفع HF واحد آلکیلاسیون

حدود ۵٪ بنزین آمریکا در واحدهای آلکیلاسیون HF تولید می شود. محصول جانبی این واحدها پروپان پالایشگاهی است که از پایین برج عریان ساز HF تولید می شود (شکل ۴۴-۱). این برج دفع (عریان ساز) دو وظیفه دارد:

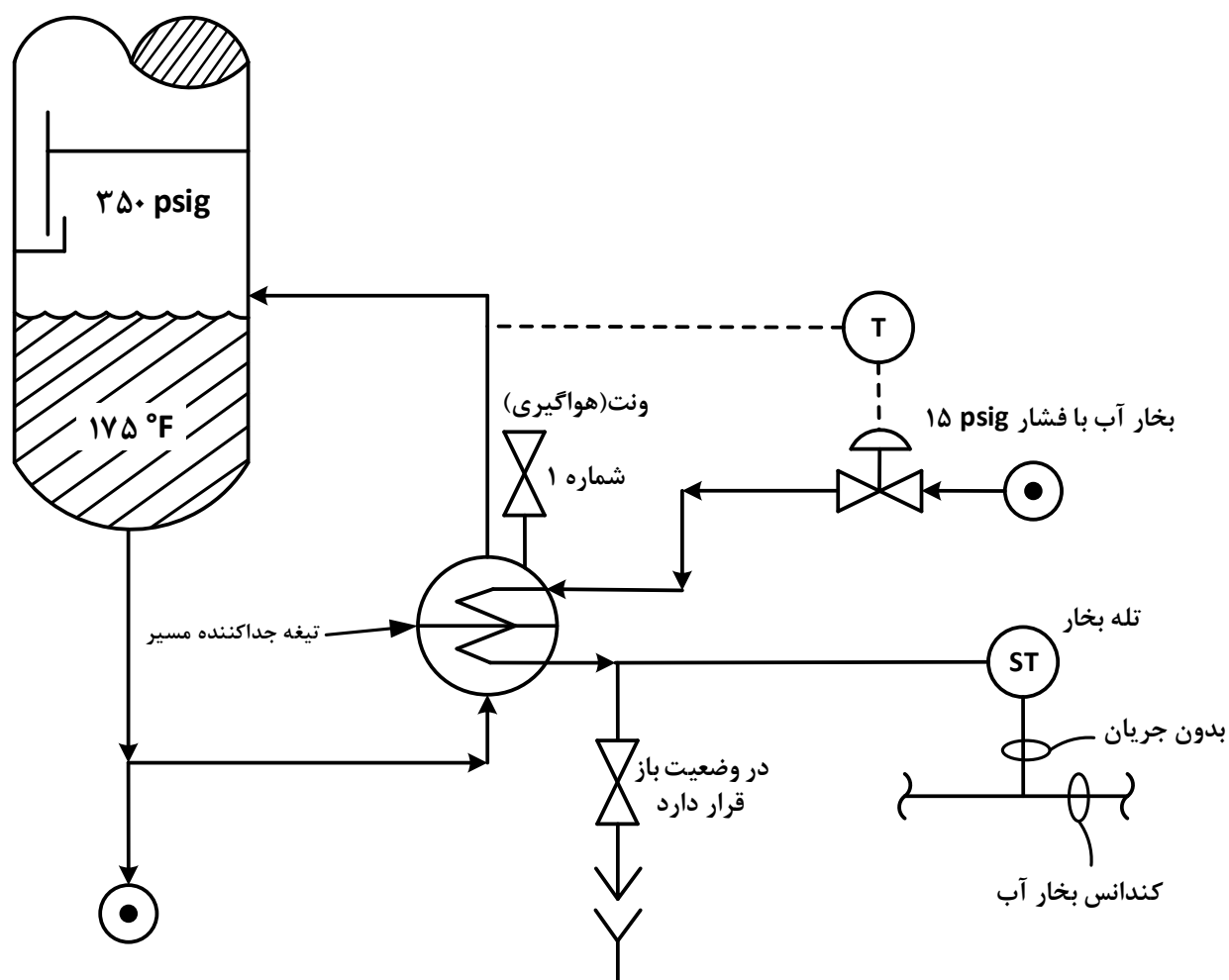
^۱ Nipple: پستانک، افشانک، نیپل

^۲ Elbow: لوله خمیده، زانویی

• **اول-** دفع اتان برای تولید LPG پالایشگاهی با استاندارد HD-5 (یعنی پروپان) و حداکثر ۲ درصد گاز اتان را در دل خود داشته باشد.

• **دوم-** دفع HF از پروپان و برگرداندن اسید HF به جریان بازیافتی ایزوبوتان واحد آلکیلایسیون.

سیستم کنترلی نشان داده شده در شکل ۱-۴۴ توسط تعداد زیادی پیمانکار که دفتر آن‌ها در آمریکا، جنوب خانه سابق من در شیکاگو^۱ است، برای یک پالایشگاه متوسط در نیوجرسی^۲ طراحی شده است. من در طراحی و عملیات تعداد زیادی واحد مشابه مشارکت داشته‌ام و هیچ وقت ایمنی ذاتی طراحی فرایند و کنترل فرایند را زیر سؤال نبرده‌ام.



شکل ۱-۴۴ میعانات بخار آب، به درین صفحه سینی منتقل شد.

^۱ شیکاگو: Chicago

^۲ نیوجرسی: New Jersey

اما چیزی وجود دارد که من و پیمانکار شیکاگویی باید زیر سؤال ببریم؛ ورودی بخار آب با فشار ۱۵ psig به ریبویلر. این فشار ۱۵ psig به طور غیرمستقیم حادثه‌ساز بوده است که در ادامه به شرح آن خواهیم پرداخت.

کربنات‌ها در آب خوراک بویلر^۱

حتی آب یون‌زدایی‌شده^۲ BFW مقدار کمی کربنات دارد؛ که هنگام تولید بخار آب در یک بویلر، به CO₂ تجزیه می‌شود. در داخل لوله‌های ریبویلر، بخار آب میعان پیدا می‌کند؛ اما CO₂ که گازی غیرقابل‌میعان است، تجمع می‌یابد. با گذشت زمان، اسید کربنیک خورنده تشکیل می‌شود که باعث ایجاد نشتی در لوله‌های فولاد کربنی می‌شود. تخلیه گازها از بالای کلاhek مجاری^۳ (شیر #۱ در شکل ۴۴-۱) باعث خروج CO₂ انباشته نمی‌شود و فقط بخار آب ورودی با فشار ۱۵ psig تخلیه می‌شود. تا وقتی که بخار آب با فشار ۱۵ psig مایع (آب) نشود، CO₂ از آن جدا نمی‌شود. این بدان معناست که شیر هواگیری باید زیر بافل جداکننده^۴ مسیر^۴ کلاhek مجاری، قرار بگیرد.

فشار کلاhek مجاری ریبویلر

خواننده شاید تعجب کند که چرا ساختار کنترلی شکل ۴۴-۱ برای بخار ۵۰ psig منطقی است ولی برای بخار ۱۵ psig، بسیار خطرناک است. چه تفاوتی وجود دارد؟

تفاوت آن، در فشار انشعاب اصلی (هدر)^۵ جمع‌آوری میعان است. معمولاً، این فشار از ۲۰ تا ۳۰ psig است. هنگام استفاده از بخار آب با فشار ۵۰ psig، مشکلی به وجود نخواهد آمد. فشار داخل کلاhek مجاری به قدری زیاد است که جریان به سمت خط میعان برقرار گردد. اما برای بخار آب با فشار ۱۵ psig، به دلیل تلفات در شیر کنترل ورودی، لوله‌های ریبویلر و نازل خروجی، فشار میعان احتمالاً ۱۰ psig است و یا کمتر.

در نتیجه به‌علت تجمع، بار حرارتی ریبویلر کاهش خواهد یافت که فقط با تخلیه میعان به درین سینی توسط اپراتور جبران می‌شود. این دقیقاً همان کاری بود که اپراتور برای ثابت نگه‌داشتن راندمان برج دفع HF در پالایشگاه نیوجرسی مجبور به انجامش شده بود.

^۱ آب خوراک بویلر، آبی که نرم یا یون‌زدایی و سپس هوازدایی شده باشد. (Boiler feed water (BFW))

^۲ آب یون‌زدایی شده، در صنعت به عنوان آب DM شناخته می‌شوند: (Demineralized Water (Deionized Water))

^۳ Channel head: کلاhek مجاری

^۴ Pass Partition Baffle: بافل جداکننده گذرها

^۵ Header: هدر، انشعاب اصلی، لوله اصلی، لوله مادر

عواقب نشتی در لوله‌ها

سمت پوستهٔ ریویلر در فشار ۳۵۰ psig کار می‌کند. در سمت لوله نیز فشار ۱۰ psig برقرار است. لوله‌ها در پروپان مایع غوطه‌ور هستند. تا زمانی که نشتی لوله‌ها به علت حملهٔ اسید کربنیک به لوله‌های فولاد کربنی توسعه پیدا کند، سطح تماس مبدل از سطح تماس موردنیاز بسیار بیشتر خواهد بود.

پروپان مایع، با فشار ۳۵۰ psig، به داخل لوله نشت پیدا می‌کند، تبخیر شده و باعث توقف جریان بخار آب با فشار ۱۵ psig می‌شود. با کاهش جریان بخار آب، بار حرارتی ریویلر نیز کاهش پیدا می‌کند. اسید فلئوریک دیگر به طور صحیح دفع نشده و به سمت پایین برج جریان می‌یابد.

شیر تخلیهٔ میعانات

اگر میعانات بخار آب به انشعاب اصلی (هدر) جمع‌آوری میعانات جریان می‌یافت، بخارات LPG و HF از دریچه ونت به اتمسفر که روی درام جمع‌آوری میعانات بخار آب قرار داشت، خارج می‌شدند. این خروجی در ارتفاع ۶۰ فوتی از زمین قرار دارد. این اتفاق در نوع خود به دلیل سنگین‌تر بودن پروپان از هوا، خطرناک است.

اما درحالی که میعانات بخار آب در ستونچه بتنی^۱ تخلیه می‌شدند، LPG مایع و اسید HF به بیرون فوران کردند و ابری از پروپان و HF را بر روی واحد آلکیلاسیون تشکیل می‌دادند. ابر بخارات اشتعال‌پذیر آتش نگرفت. اپراتورها، با استفاده از آلارم دهنده‌ها از وجود گازهای احتراق‌پذیر آگاه شدند و دستورالعمل‌های حفاظت در برابر HF را انجام دادند. آنان شیر درین میعانات را بستند و واحد را به دلیل امکان آسیب‌رسانی به کارکنان قبل از این که ابر بخارات سمی به محل‌های اطراف سرایت کند، از سرویس خارج کردند. پالایشگاه خیلی خوش‌شانس بود.

هرچند به یاد دارم که در دههٔ ۱۹۷۰ در تگزاس، من نیز سه بار از عواقب ابر LPG فرار کردم. اما شانس من بار چهارم و هنگامی که زانویی ۴ اینچی خط خروجی مخزن رفلکس خراب شد، خوب نبود. خداوند از ذهن‌های ضعیف محافظت می‌کند. اما این مسئله نیز حدی دارد. پس بهتر است عملکردمان را اصلاح کنیم زیرا حتی رحمت الهی نیز محدودیت دارد.

^۱ Concrete pad: ستونچه بتنی

اصلاح طراحی

برای اصلاح این وضعیت، من دو راه به پالایشگاه پیشنهاد دادم. هر دو روش خطرات ناشی از تخلیه میعان بخار آب به زمین را حذف می‌کرد (شکل ۴۴-۲ را ببینید).

هر دو گزینه شامل تغییر مکان ونت مواد غیرقابل تراکم (یعنی CO_2) در زیر بافل جداکننده مسیر در کلاhek مجاری بود.

آسان‌ترین روش جایگزینی بخار آب (با فشار ۱۵ psig) با بخار آب (با فشار ۲۵ psig) است. این کار اجازه می‌دهد تا فشار کلاhek مجاری بر فشار خط جمع‌آوری میعانات غلبه کند. این گزینه‌ای است که توسط پالایشگاه پذیرفته شد.

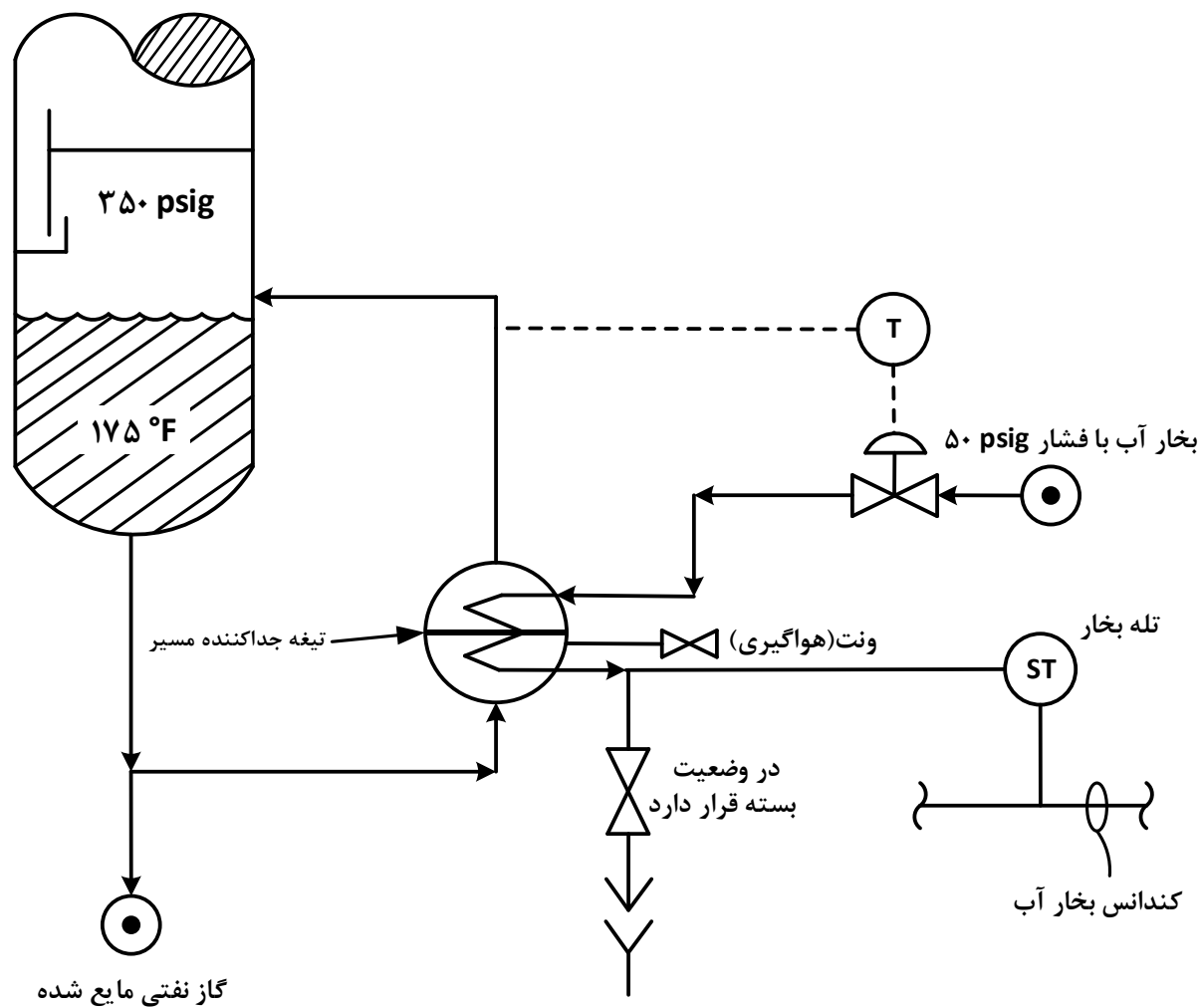
یک روش پیچیده‌تر، نصب پمپ میعانات و درام و در نهایت پمپ‌کردن میعانات است. این روش پر هزینه‌تر امکان ادامه کار با بخار آب کم‌ارزش ۱۵ psig را فراهم می‌کرد؛ اما به دلیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، توسط پالایشگاه رد شد.

تله بخار^۱

هر دو طرح قدیمی و جدید، از یک تله بخار استفاده می‌کردند و به اعمال فشار بر میعانات در خط جمع‌آوری میعانات متکی بودند. برای بخار آب‌های کم‌فشار، این بهترین راه برای جلوگیری از تبخیر آبی (یعنی انسداد بخار) در پایین‌دست تله بخار است که توسط پمپ‌کردن میعانات و نه با تکیه بر فشار کلاhek مجاری، صورت می‌گیرد. هم‌چنین ثابت شده که تله‌های بخار غیر قابل اطمینان هستند. هرچند اگر بازیابی میعانات لازم نباشد، من از یک تله بخار استفاده می‌کنم و میعانات را به فاضلاب درین می‌کنم؛ اما فقط برای سیستم‌هایی که خطر آفرین نیستند.

یادآور می‌شوم که میعانات بخار نمی‌تواند به سادگی و بدون نگهداشت مقداری از فشار برگشتی تخلیه شود. تخلیه مستقیم میعانات به اتمسفر، به دلیل از بین رفتن آب‌بندی کندانس، راندمان انتقال حرارت ریویولر به مقدار چشمگیری کاهش می‌دهد.

^۱ تله بخار، برای تخلیه آب از سیستم بخار آب استفاده می‌شود: Steam Trap



شکل ۴۴-۲ میعانات بخار آب، به خط جمع آوری میعانات جریان می یابد.



ایمنی فرآیندی پالایشگاه

چکیده:

برای بهبود ایمنی واحد فرآیندی، نیاز به برنامه‌ریزی قبلی برای نحوه واکنش پرسنل واحد در شرایط اضطراری است. برای مثال:

- برای جلوگیری از انفجار محفظه احتراق هیتر در زمان پارگی لوله هیتر احتراقی لازم است از بخار خفه‌کن استفاده شود.
- هنگامی که کمپرسور گریز از مرکز در حین عملیات دچار سرچ می‌شود، سرچ‌ها به یاتاقان‌های محوری کمپرسور آسیب رسانده و جابجایی محوری روتور را افزایش می‌دهند.
- یک هوازداي خوراک بویلر که در حلقه بازخورد مثبت گیر کرده است، باعث می‌شود در نهایت آب داغ از دریچه بالایی تخلیه شود.

کلمات کلیدی:

بازخورد مثبت؛ بخار آب؛ ناحیه انفجار؛ کمپرسور؛ بخار خفه‌کن؛ انفجار؛ احتراق‌پذیر

اصلی‌ترین هزینه بلندمدت عملیاتی در یک پالایشگاه یا هر واحد فرآیندی، ایمنی است. منظور من حوادث مرگباری که گاهی اتفاق می‌افتند، نیست. منظورم حوادثی مانند حوادث زیر است:

۱. شرکت نفت بریتانیا^۱، انفجار تفکیک‌کننده پسماند شهر تگزاس^۲ - ۱۵ کشته

۲. برج جذب آمین - LPG یونوکال^۳ (سیتگو کنونی) - ۲۰ کشته

۳. آتش‌سوزی و انفجار اکسیدکننده آسفالت آموکو^۴ - ۳ کشته

۴. بی‌پی، سکوی حفاری شناور دیپ واتر هاریزون^۵ - ۱۱ کشته

۵. یونیون کاربید^۶ - بوپال^۷ - ۱۰۰۰۰ کشته

این‌ها حوادث چند میلیارد خسارت برجا می‌گذارند و همه حوادثی که شخصاً شاهدشان بوده‌ام نتیجه خطاهای طراحی یا عملیاتی اپراتورها و مهندسان فرآیند بوده و کاملاً اجتناب‌پذیر هستند.

حادثه بوپال نتیجه تلاش برای جلوگیری از کاهش تولید به علت طراحی حاشیه‌ای آب‌بند مکانیکی پمپ است. این حادثه شرکت یونیون کاربید را نابود کرد و ۱۰۰۰۰ نفر را کشت.

حادثه نزدیک خانه من در نیواورلئان^۸ اتفاق افتاد، ۲۰ میلیارد دلار برای شرکت نفت انگلیس هزینه داشت و ۱۱ نفر کشته بر جای گذاشت و ۵ میلیون بشکه نفت وارد خلیج مکزیک شد.

اکثر اوقات، من به عنوان یک متخصص فقط نظاره‌گر این فجایع هستم. وجه مشترک این حوادث آن است که در نقطه‌ای حساس از فرآیند تصمیم‌گیری، یک مدیر میان‌رده، مسیر اشتباهی را انتخاب می‌کند. زیرا توانایی درک نحوه عملکرد تجهیزات را ندارد و نمی‌تواند عواقب نهایی تصمیمی را که گرفته است، پیش‌بینی کند.

^۱ مخفف "The British Petroleum Company"، شرکت نفت بریتانیا BP:

^۲ شهر تگزاس: Texas City

^۳ یونوکال: Unocal

^۴ آموکو: Amoco

^۵ Deep Water Horizon: نام سکوی حفاری شناور است که در خلیج مکزیک پس از اتمام عملیات حفاری و در حین انجام تست‌های دیپ‌واتر هاریزون، به دنبال آن منفجر شد.

^۶ یونیون کاربید: Union Carbide

^۷ بوپال: Bhopal

^۸ نیواورلئان: New Orleans

من این اشتباه را ۴ بار در واحد آلکیلاسیون شهر تگزاس انجام دادم. سه بار اول مشکلی پیش نیامد. اما بار چهارم، قانون میانگین غالب شد و نتیجه، انفجار ابر بخار بوتان بود. اما این اتفاق مربوط به سال ۱۹۷۶ بود و الان من باهوش تر شده‌ام.

عملیات واحد آلکیلاسیون با سولفوریک اسید.

از سال ۱۹۷۴ تا ۱۹۷۶، من سرپرست و ناظر فرآیند بزرگترین واحد آلکیلاسیون جهان با ظرفیت تولید ۲۶۰۰۰ بشکه بنزین در روز بودم. بین این سال‌ها، ۴ حادثه اتفاق افتاد. همه در برج پروپان‌زدای مبرد ایزوبوتان، که باعث به‌وجود آمدن یک تجربه ایمنی برای مهندسان و ناظران جوان شد.

من قبل از ترفیع گرفتن در سال ۱۹۷۴، به مدت ۱۰ سال برای نفت آمریکا به عنوان مهندس طراح فرآیند در واحد آلکیلاسیون سولفوریک اسید تگزاس^۱ کار می‌کردم. برج پروپان‌زدای واحد آلکیلاسیون، جریانی بازیافتی از ایزوبوتان را فرآوری می‌کرد که حاوی چند صد ppm SO₃ به شکل استرهای خشک سولفوریک اسید بود. جریانات برج خورنده نبودند؛ مگر در حالت راه‌اندازی. در هنگام راه‌اندازی، واکنش آب با اسید استر که باعث تشکیل اسید سولفوریک ضعیف می‌شد، شدیداً برای فولاد کربنی خورنده است.

به‌طرز عجیبی اسید سولفوریک قوی (۹۰٪)، فولاد کربنی را نمی‌خورد؛ اما اسید ضعیف ۱۰٪ می‌تواند در طول چند شیفت لوله‌های فولاد کربنی را نابود کند.

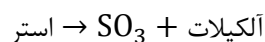
طراحی واحد آلکیلاسیون

واحد آلکیلاسیون شرکت نفت آمریکا در شهر تگزاس و در سال ۱۹۵۸ شروع به کار کرد. واحدی با سیکل تبرید داخلی که از اسید سولفوریک به عنوان کاتالیست استفاده می‌کرد. عبارت سیکل داخلی بدین معناست که رآکتور تا دمای ۵۰ الی ۶۰ درجه فارنهایت توسط تبخیر واکنش‌دهنده اصلی، یعنی ایزوبوتان، خنک می‌شود.

ایزوبوتان مبرد، متراکم شده و پس از عبور از برج پروپان‌زدا مجدداً به رآکتور برگشت داده می‌شد. پروپان موجود در خوراک واحد به تدریج در جریان برگشتی مبرد ایزوبوتان تجمع کرده و دائماً توسط برج پروپان‌زدا حذف می‌شود و LPG به عنوان محصول جانبی واحد تولید می‌شود (شکل ۴۵-۱).

^۱ تگزاس: Texas

خوراک برج پروپان‌زدا، حاوی چند صد ppm اسید سولفوریک به فرم استرهای اسیدی است. استرها با گرم‌شدن در ریپویلر برج، به SO_3 و آلکیلات تجزیه می‌شوند.



SO_3 تا زمانی که خشک باشد، خورنده نیست. از آنجا سیکل تبرید واحد آلکیلاسیون در تماس با اسید سولفوریک قوی (یعنی ۹۰-۹۸٪) قرار دارد که شدیداً جاذب رطوبت است، خوراک برج معمولاً عاری از آب است.

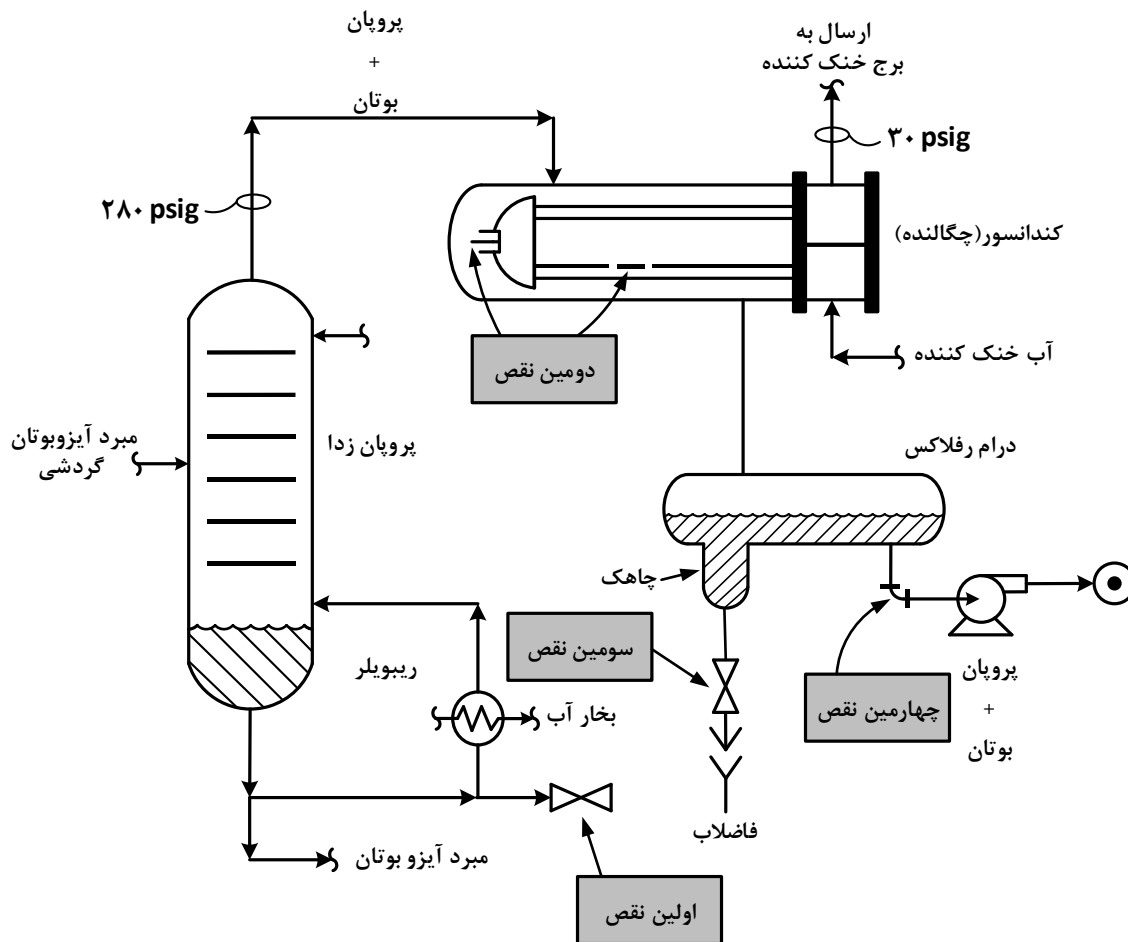
هرچند، اگر برج برای تعمیرات از سرویس خارج شود و برای راه‌اندازی آن از بخار بوتان استفاده شود، برج تا مدتی حاوی رطوبت خواهد بود.

ماهیت اسید سولفوریک

اسید سولفوریک تازه با خلوص ۹۸ درصد وزنی خریداری می‌شود. این اسید برای فولاد کربنی کاملاً غیرخورنده است. حتی در غلظت‌های نسبتاً بالا تا ۸۸٪ نیز نرخ خوردگی بسیار کم است.

هرچند اگر با آب رقیق شود و غلظتش کاهش یابد، اسید سولفوریک ضعیف مناطق جوشکاری‌شده تحت‌تاثیر گرما در لوله‌های فولاد کربنی را تنها در عرض چند روز یا حتی چند ساعت می‌خورد و نتایج فاجعه‌باری بر جای می‌گذارد. این موضوع را بر اساس مشاهدات شخصیم در هنگام سرریز اسید سولفوریک به مخزن تصفیه پساب در یکی از صبح‌های یکشنبه سال ۱۹۷۵ نقل می‌کنم.

انحلال مقدار کمی SO_3 در آب، سبب تشکیل اسید سولفوریک ضعیف خورنده می‌شود. بنابراین نیاز است تا زمانی که خوراک عادی، یعنی مبرد ایزوبوتان برگشتی اسیدی، وارد برج پروپان‌زدای واحد آلکیلاسیون می‌شود، برج خشک نگه داشته شود.



شکل ۴۵-۱ برج پروپان زدا واحد آلکیلایون با پایه اسید سولفوریک، تعدادی از نقص های واحد، سبب انفجار ابر بخار LPG شد.

تصحیح دستورالعمل راه اندازی واحد

بهترین راه برای جلوگیری از تشکیل اسید سولفوریک ضعیف در برج پروپان زدا عبارت است از:

۱. به هیچ عنوان برای راه اندازی از ایزوبوتان حاصل از حلقه بازیابی مبرد استفاده نکنید. حتی اگر این دستورالعملی بود که در دستورالعمل های عملیاتی نوشته شده بود.
۲. از بوتان مخلوط پالایشگاهی به عنوان خوراک برج استفاده کنید.
۳. جریان خوراک را قطع کنید و برج را در حالت رفلکس (برگشت) کامل قرار دهید. تا زمانی که هیچ آبی در شیر تخلیه چاهک خروجی آب مخزن رفلکس بالاسری، دیده نشود.
۴. نقاط فرو رفته ریپویلر و مخزن رفلکس را چک کنید تا آبی وجود نداشته باشد.

۵. انتظار می‌رود مراحل بالا ۲ تا ۳ روز طول بکشند و سپس پرسنل باید تایید کنند که هر سه زهکش کاملاً خشک و آزاد هستند.

متأسفانه در سال ۱۹۷۴، من از این روش بی‌خبر بودم و تنها بر قضاوت و تجربه پرسنل واحد آلکیلاسیون و پشتیبانی تخصصی شرکت نفت آمریکا تکیه کردم.

واحد آلکیلاسیون شماره ۲ _ تگزاس

در سال ۱۹۷۴ پالایشگاه نفت تگزاس روزانه BSD ۲۴۰۰۰۰ بنزین (۳٪ بنزین مصرفی آمریکا) تولید می‌کرد. حدود ۱۰٪ این مقدار، در واحد آلکیلاسیون من تولید می‌شود.

آموزش من برای این مسئولیت شامل ۱۰ سال سابقه در یک شرکت طراحی فرآیند در شیکاگو^۱ و ۴ ساعت گفتگو با پائول استلی^۲ بود؛ شخصی که جایگزین او شدم.

حادثه اول

یک روز، من نگران شدم که مسیر تخلیه ریویلر برج مسدود شده است. به لوله‌کش واحد (مک کوچولو^۳) گفتم که زهکش (درین) واقع بر روی انشعاب ۳/۴ اینچی خط خوراک ریویلر را که چند فوت بالای زمین قرار داشت، تمیز کند. برای این کار باید ابتدا درپوش نرینه ۳/۴ اینچی باز شود. باز کردن این درپوش مشکل بود و لوله‌کش با آچاری ۱۸ اینچی سعی در باز کردنش داشت. انشعاب ۳/۴ اینچی که با جوشکاری به خط اصلی متصل شده بود، شکست.

ابر بزرگی از بخار ایزوبوتان به سرعت بر روی کل واحد تشکیل شد. هوا در مه هیدروکربن در حال گسترش، شدیداً سرد شد.

خوشبختانه، در واحد آلکیلاسیون سولفوریک اسید، هیچ کوره یا توربین گازی وجود ندارد. هم‌چنین در این زمان هیچ کار گرمی (جوشکاری یا برش کاری) در واحد انجام نمی‌شد. لوله‌کش قدیمی (مک بزرگ^۴) یک تکه چوب را تراشیده، به شکل درپوش در آورد و این درپوش چوبی را با چکش در داخل انشعاب ۳/۴ اینچی شکسته، جای

^۱ شیکاگو: Chicago

^۲ پائول استلی: Paul Stelly

^۳ مک کوچولو: Little Mac

^۴ مک بزرگ: Big Mac

داد. در طول ۳۰ دقیقه ابر سرد ایزوبوتان ناپدید شد و حادثه بدون تلفات پایان یافت. درپوش چوبی را با رزین اپوکسی و پشم شیشه پوشاندیم که به نظر من روشی منطقی برای تعمیر بود.

حادثه دوم

کندانسور بالاسری برج پروپانزدا شامل یک مبدل افقی است. آب در سمت لوله‌ها و بخارات پروپان در سمت پوسته جریان دارند. دسته لوله اصلی از جنس برنج دریایی بود. اما نصب دست لوله جدید هزینه زیادی را به همراه داشت زیرا نشتی لوله‌ها اتفاق رایجی بود. یک بار ۱۵٪ لوله‌ها مسدود شدند. استاندارد شرکت، تعویض یا جایگزینی لوله‌ها بود. پس من دسته لوله‌ای از جنس کربن فولادی سفارش دادم که ارزان‌تر از برنج دریایی بود.

آب سرد کندانسورهای پروپانزدا، از یک برج خنک‌کننده^۱ مرحله‌ای در واحد آلکیلاسیون می‌آمد. یک روز، وقتی داشتم برج خنک‌کننده را از دور نگاه می‌کردم، متوجه شدم که چند تا از آبفشان‌ها به طرز صحیح توزیع نمی‌شوند و فوران می‌کنند. من به همراه فازی گریفیت^۱ از برج خنک‌کننده بالا رفتیم و از نزدیک به برج‌ها نگاه کردیم، می‌توانستیم بالا آمدن مه غلیظ سفید را از روی توزیع‌کننده‌ها ببینیم.

ابر بزرگ قابل انفجاری از ایزوبوتان که با هوا مخلوط شده بود.

فازی، برخلاف سن زیادش با سرعت به اتاق کنترل رفت تا واحد را از سرویس خارج کند و برج پروپانزدا را فشارزدایی کند. بازرسی نشان داد که:

- فقط یک از لوله‌های فولاد کربنی کندانسور بوتان دچار نشتی شده است.
- بخار پرفشار پروپان (۲۷۰ psig و حاوی SO_3) به داخل پروپان نشت کرده و داخل لوله‌ها جریان یافته است.
- جت آب اسیدی به همراه بخار پروپان، با سرعت زیاد به کلاhek شناور^۲ برخورد کرده بود.
- سوراخی به اندازه مشت من، در بدنه فولاد کربنی کلاhek شناور ایجاد شده که به سیال پوسته (پروپان با فشار ۲۷۰ psig) اجازه داده بود تا به خط آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده^۳ (۳۰ psig) وارد شود.

^۱ فازی گریفیت: Fuzzy Griffith

^۲ کلاhek شناور: Floating head

^۳ آب گرم برگشتی به برج خنک‌کننده: Cooling water return

بعد از آن که واحد به صورت ایمن از سرویس خارج شد، متوجه شدم که چرا در چند ماه گذشته ایزوبوتان جبرانی موردنیاز من تا ۴۰۰۰ BSD افزایش یافته بود. هم‌چنین، چرا تولید پروپان در همان دوره زمانی تقریباً به صفر رسیده بود.

حادثه سوم

تجربه به من نشان داده بود که خوردگی در برج پروپان‌زدای واحد آلکیلاسیون به‌دلیل ورود آب به برج است. بر اساس فرضیه من، رندی رامیرز^۱، یک اپراتور جوان، چاهک مخزن رفلاکس را برای وجود آب بررسی کرد. درین (زهکش)، یک شیر ۲ اینچی بود که مستقیماً بالای فاضلاب قرار داشت و مستقیماً به محل جمع‌آوری فاضلاب می‌ریخت.

رندی بعداً به من گفت که بخشی از زهکش ۲ اینچی گرفتگی دارد و باید دو یا سه بار آن را می‌چرخانده تا سیال جریان پیدا کند. اما زهکش با نیروی زیادی به بیرون فوران کرده است. پروپان مایع با فشار ۲۷۰ psig از شیر ۲ اینچی نیمه باز نشت کرده و از فاضلاب بیرون آمده است. رندی گفت که ترسیده و سریع فرار کرده است.

اولین چیزی که راجع به این فاجعه احتمالی فهمیدم این بود که کل واحد آلکیلاسیون از یک ابر غلیظ سفید پر شده بود. ابر ایزوبوتان به صورت خودبه‌خودی سرد شده و اطراف اتاق کنترل نیز را سرد کرده بود و از واحد آلکیلاسیون به سایر نقاط پالایشگاه نفوذ می‌کرد.

من هشدار آتش واحد را روشن کردم. زمانی که ماشین آتش‌نشانی رسید، فازی‌گریفیت با رندی صحبت کرده و در حال بستن شیر تخلیه ۲ اینچی چاهک پروپان‌زدا بود. نسیم خلیج گلوپستن^۲ ابر سرد ایزوبوتان را ناپدید کرد.

حادثه چهارم و آخر

با علم به این که اسید سولفوریک ضعیف عامل اصلی خوردگی لوله‌های کندانسور بالاسری برج پروپان‌زداست، من یک برنامه بازرسی را شروع کردم تا کاهش ضخامت لوله فولاد کربنی را تحت نظر بگیرم. بازرس، جو هنسلی^۳، هر ماه نرخ خوردگی را به من گزارش می‌داد. به طور معمول، نرخ آن حدود چند میلی‌متر در ماه بود (ضخامت لوله ۲۵۰ میلی‌متر بود). این نرخ، نشان‌دهنده خوردگی قابل‌توجه اما غیرخطرناک بود. خوردگی‌های بیشتر از ۱۰۰

^۱ رندی رامیرز: Randy Ramirez

^۲ گلوپستن: Galveston Bay

^۳ هنسلی: Joe Hensley

میلی‌متر در سال باید هشدار داشته باشند. خوردگی‌های کمتر از ۲۰ میلی‌متر در سال نیازمند مراقبت و بازرسی پیوسته هستند.

اشتباهی که من کردم این بود که جو، لوله ۶ اینچی مخزن رفلاکس که خروجی پروپان مایع بود را بررسی نمی‌کرد. زانویی واقع در پایین نازل خروجی مخزن رفلاکس فقط با استفاده از یک نردبان ۲۰ فوتی قابل‌دسترس بود که در واحد آلکیلایون من موجود نبود.

در یک بعدازظهر شنبه ژوئن ۱۹۷۶، زانویی نشستی کرد. مانند این بود که شخصی در کنسرو سوپ را پاره کرده باشد. حفره‌ای به عرض ۳ اینچ و طول ۱۲ اینچ، در زانویی ۶ اینچی ایجاد شده بود که اجازه می‌داد مخزن رفلاکس پروپان زدا با قطر داخلی ۶ فوت و ارتفاع حجمی ۲۰^۱ فوت در عرض چند دقیقه کاملاً خالی شود.

ابر^۲ LPG حاصل از واحد آلکیلایون به سمت واحد FCU^۳ شماره ۳ (بزرگترین واحد کراکینگ کاتالیستی بستر سیال جهان) حرکت کرده بود. دن‌ویلسون، مسئول شیفت واحد FCU، ابر سفید پروپان را دیده بود که نزدیک می‌شود و به کارمندان خود دستور داده بود زیر میزها پناه بگیرند.

یک لحظه بعد، ابر منفجر شد. منبع انفجار احتمالاً بویلر حرارت پسماند^۴ واحد FCU بوده است. نردبان‌ها از برج اصلی واحد FCU جدا شدند و سقف اتاق کنترل واحد FCU نیز ریزش کرد. برج خنک‌کننده واحد کک‌سازی تأخیری، در فاصله ¼ مایلی نیز آسیب دید.

هیچکس به خاطر انفجار کشته نشد. شرکت نفت آمریکا من را از سرپرستی عملیات به دفتر مهندسی شیکاگو^۵ منتقل کرد. من در پست جدیدم، مسئول برگزاری چندین جلسه مهم در شیکاگو بودم و با شخصیت‌های مهم دیگر مثل خودم رفت‌وآمد می‌کردم.

درسی که آموختم

الگوی تکراری نشت بوتان باید به من هشدار می‌داد که ایرادی اساسی، در واحد آلکیلایون من وجود دارد. حالا که به گذشته نگاه می‌کنم می‌فهمم، این مشکل به خاطر اپراتور من بود که، آب را در هنگام راه‌اندازی عملیات، از تمام نقاط فرو رفته پروپان‌زدا، به دقت تخلیه نکرده بود.

^۱ تانژانت به تانژانت، فاصله بین دو خط جوش کلاهک‌های استوانه‌ای، ارتفاع حجمی مورد استفاده در عملیات: Tangent to Tangent(T-T)

^۲ مخفف "Liquified petroleum Gas" گاز نفتی مایع شده: LPG

^۳ مخفف "Fluid Catalytic Cracking" شکافت کاتالیستی سیال: FCU

^۴ ویست هیت بویلر، بویلر حرارت پسماند: waste heat boiler

^۵ شیکاگو: Chicago

در نگاهی کلی‌تر، من هرکدام از حوادث مرتبط را به عنوان واقعه‌ای مجزا می‌دیدم که یک بار کنترل شده است و بهتر است فراموش شود. البته هر حادثه فقط یک جرقه تا فاجعه فاصله داشت.

بعد از آخرین حادثه، شرکت نفت آمریکا سیستم شست‌شو با کاستیک را اضافه کرد تا هرگونه استرهای اسیدی را از خوراک پروپان‌زدا حذف کند. پالایشگاه الان در اختیار شرکت نفت ماراتن^۱ است و واحد آلکیلاسیون شماره ۲ مدتی طولانی است که از سرویس خارج شده است. اما درسی که گرفتم، «امید برای بهترین‌ها، اما نقشه برای بدترین‌ها»، هنوز همراه من است.

سخن آخر

من اتاق کنترل قدیمی خود را هفته پیش بازدید کردم. واحد از بین رفته است. اما توالی شخصی که من در سال ۱۹۷۴ برای جولیا تینامان^۲، اولین اپراتور زن در شهر تگزاس، ساختم هنوز باقی است.

ملاحظات ایمنی

هرچه مواد سنگین‌تر باشند، دمای احتراق خودبه‌خودی نیز پایین‌تر است. بنزین در دمای 480°C خودبه‌خود مشتعل می‌شود. آسفالت وقتی بر روی سطحی حفره‌دار مانند لباس‌تان بریزد در دمای 300°C خودبه‌خود آتش می‌گیرد.

به همین دلیل است که نشت آب‌بند در پمپ‌های نفت گاز خلأ سنگین خطرناک است. نمونه‌گیری از نفتا در دمای 350°F نسبت به نمونه‌گیری از پسماند خلأ در همین دما، ایمن‌تر است.

ملاحظات ایمنی

آب‌بند مکانیکی دوگانه که بر روی پمپ‌های سانتریفیوژی نصب می‌شود، یک وسیله ایمنی است و هدفش کاهش آلاینده‌های محیط‌زیستی نیست. اگر هشدارهای فشار بالا و سطح بالا در مخزن خروجی کار نمی‌کنند، استفاده از آب‌بند مکانیکی دوگانه مزیت اصلی خود را از دست داده است.

^۱ Marathon Oil: نفت ماراتن

^۲ Julia Tienaman: جولیا تینامان

هشدار یا سیستم خروج از سرویسی که به صورت معمول کار نمی‌کند، در مواقع اضطراری نیز کار نخواهد کرد.



جلوگیری از مرگ و فاجعه

چکیده:

خلاصه ای از فجایع ایمنی در صنعت فرآیند و هیدروکربن:

- واحد تولید حشره کش بوپال - کارخانه یونیون کارباید، هند
- برج تفکیک رافینیت - شرکت نفت بریتانیا، شهر تگزاس
- فوران چاه سکوی حفاری دیپ واتر هاریزون - شرکت نفت بریتانیا، لوئیزیانا
- برج جذب گاز نفتی مایع شده (LPG) - شرکت یونیکال، شیکاگو
- برج پروپان زدای واحد کراکینگ کاتالیستی بستر سیال - شرکت نفت شل، نورکو، لوئیزیانا

برای جلوگیری از وقوع اینگونه حوادث چه اقداماتی لازم است؟

کلمات کلیدی:

گاز نفتی مایع شده ؛ بوپال؛ برج جذب؛ برج پروپان زدا؛ شهر تگزاس؛ بخارات اسیدی؛ خوردگی؛ آب شست شوی

«لیبرمن جلسه ایمنی شروع شده است. بزن بریم.»

«من نمیام. بدون من برو هاروی^۱.»

«می دونی نورم^۲، تو واقعاً نگرش ضعیفی نسبت به ایمنی داری. عدم حساسیت تو برای شرکت بد است.»

"هاروی، ایمنی یک مبحث نگرشی یا اخلاقی نیست. ایمنی، استفاده از اصول فنی اولیه در هنگام اخذ تصمیمات حیاتیست.

این چیزی نیست که بخش ایمنی به ما آموزش دهد. ما باید SMART (باهوش) باشیم:

• Safty ایمن،

• Minded متفکر،

• Alert هشیار،

• Responsible مسئولیت پذیر،

• Thoughtful با ملاحظه»

«نورم، باهوش بودن (SMART) کلید ایمنی است. این شعار جدید ماست.»

«خوب، نگرش من این است که کلید جلوگیری از مرگ و فاجعه در واحدهای فرآیندی، به کار بردن عقل سلیم و اصول فنی اولیه، در زمان تصمیم گیری های حیاتی است. هاروی اجازه بده تا از تجربیات زیادم در صنعت نفت و گاز، چند نمونه برای بیان کنم.»

«اوه، بله حتما. اما کوتاه بگو نورم. در جلسه ایمنی در حال سرو میگوی کبابی هستند. مطمئن هستی نمی خواهی بیایی؟ معارفه با آقای اوربورن^۳ را از دست خواهی داد. می دانم که او دنبالت می گردد!»

^۱ هاروی: Harvey

^۲ نورم: Norm

^۳ اوربورن: Overbourne

شرکت نفت بریتانیا^۱ - فوران سکوی نفتی شناور دیپواتر هاریزون^۲

در ۲۰ آوریل ۲۰۱۰، ۱۱ نفر کشته شدند و شرکت نفت بریتانیا^۳ حدود ۲۵ میلیارد دلار را در ۲۰ مایلی خانه من بر اثر فوران ناگهانی یک چاه دریایی از دست داد. علت اساسی این حادثه ضعف سیمان کاری دیواره چاه یا عمق بسیار زیاد آب و یا بیرون زدن نفت از سازند نبود. این‌ها فقط مشکلات ذاتی پروژه بود. علت واقعی فوران در شکل ۱-۴۶ نشان داده شده است.

یکپارچگی و پیوستگی سیمان در جداره چاه تکمیل شده می‌بایست بررسی می‌شد تا ببینیم آیا می‌تواند فشار برگشتی سازند را در زمان لوله‌گذاری تحمل کند یا خیر؟ تلاش‌ها برای بررسی اینکه آیا می‌توان با هواگیری خط اصلی (نقطه P₁) فشار چاه را کاهش داد، ناموفق بود. به نظر می‌رسید زمانی که قرار بود جریان قطع شود، گاز طبیعی با فشار بالا (۴۰۰۰ psig)، به داخل چاه نشت می‌کرد. این بدان معناست که میلیون‌ها دلار باید هزینه شود و ماه‌ها برای ترمیم نشتی احتمالی یا مقاوم‌سازی چاه صرف شود. مثلاً جداره چاه را دوباره سیمان کاری کنند.

بنابراین چند نفر فرد متخصص دور هم جمع شدند و گفتند بیایید تلاش کنیم و ببینیم که آیا می‌توانیم فشار چاه را از طریق خط کوچکی که «چاه مهار»^۴ نامیده می‌شود، تخلیه کنیم؟ (شکل ۱-۴۶ را ببینید) آن‌ها این کار را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که یکپارچگی و مقاومت چاه خوب است. بنابراین جریان را در چاه برقرار کردند و چاه فوران کرد و آتش گرفت.

این داستان را برای برادرزاده ۱۲ ساله‌ام تعریف کردم. او گفت عمو نورم، اگر هر دو چاه در یک مکان شروع و به یک نقطه ختم می‌شد و چاه بزرگ‌تر فوران گاز داشت اما چاه کوچک خیر، آیا این بدان معنا نیست که چاه کوچک با چیزی از چاه مسدود شده است اما چاه بزرگ آنقدر بزرگ بوده که نمی‌توانست مسدود شود؟

این حرف از زبان دختری است که فکر می‌کرد بلغارستان^۵ در حومه هیستون^۶ است.

ما در تجارت نفت و گاز باید بر اساس اطلاعات موجود تصمیم بگیریم. من در لحظه تصمیم‌گیری همیشه از خودم می‌پرسم: اگر تصمیم من اشتباه باشد، بدترین اتفاق چیست؟ اغلب احتیاط، بهتر از شجاعت است.

^۱ مخفف "The British Petroleum Company"، شرکت نفت بریتانیا بی‌بی: BP

^۲ Deep Water Horizon: دیپواتر هاریزون، نام سکوی حفاری شناوری است که در خلیج مکزیک پس از اتمام عملیات حفاری و در حین انجام تست‌های نهایی با یک فوران غیرقابل کنترل دچار حادثه گشته و به دنبال آن منفجر شد.

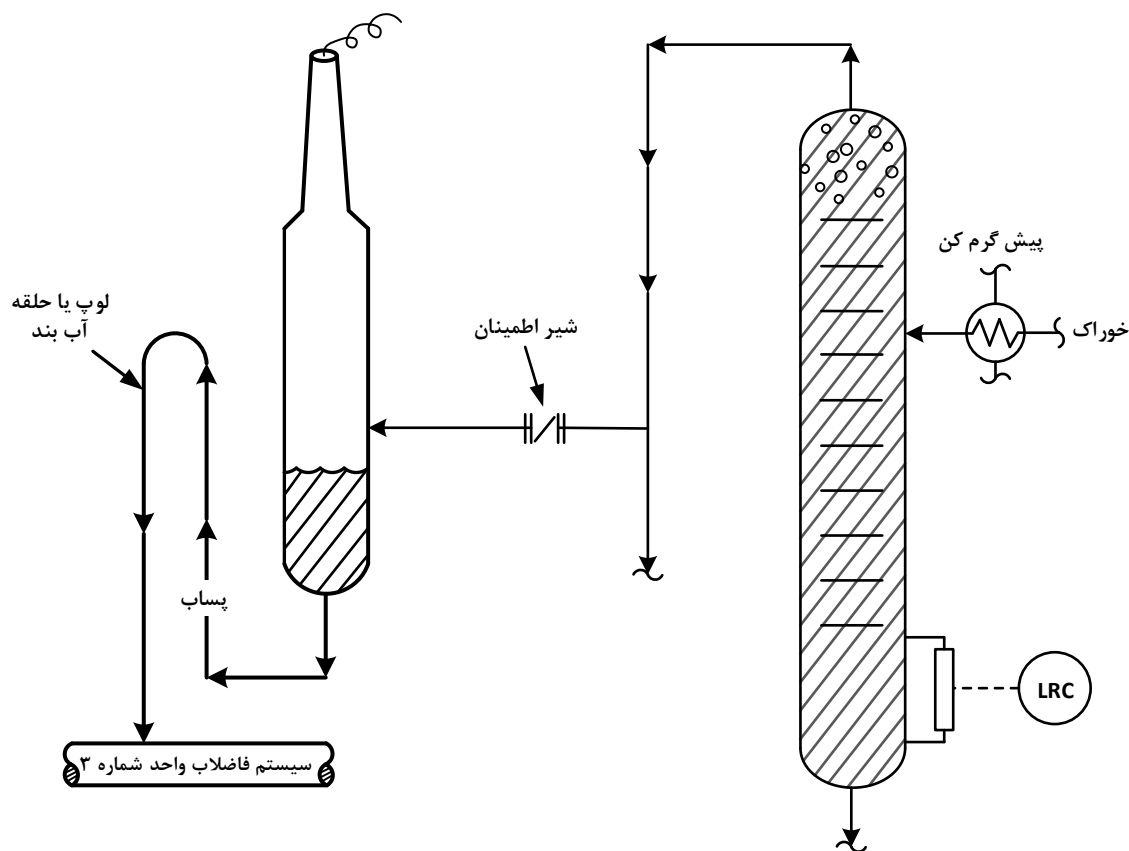
^۳ The British Petroleum Company: شرکت نفت بریتانیا

^۴ Kill Line: خط مهار

^۵ Bulgaria: بلغارستان

^۶ Houston: هیوستون

- شیر اطمینان به جای آن که به سیستم مشعل واحد^۱ باز شود، به ونت اتمسفری (یعنی دودکش مخزن تخلیه فشار) باز شد.
- مایعات از ونت اتمسفری (یعنی مخزن تخلیه فشاری که در شکل ۴۶-۲ مشاهده می کنید) از طریق حلقه آببند تخلیه می شدند که توسط بخار مسدود شده بود.



شکل ۴۶-۲ برج تفکیک رافینیت پالایشگاه B.P شهر تگزاس، ۱۶ کشته برجای گذاشت.

اما علت واقعی مشکل این بود که اپراتورها متوجه نشدند که نشان گر سطح آن ها چگونه کار می کند. برخی از اپراتورها فکر کردند ممکن است که سطح ارتفاع مایع، بسیار بالا و برج پر باشد. اما هنگامی که دمای خوراک را افزایش دادند، در قسمت پایین برج و در اتاق فرمان، کاهش سطح را مشاهده کردند. سپس به این نتیجه

^۱ Flare، مشعل واحد

رسیدند که نشان‌گر سطح درست کار می‌کند و به وارد کردن خوراک به برج تفکیک ادامه دادند. سپس برج سرریز کرد و فشار، شیر اطمینان را باز کرد. وزن بنزین سرریز شده از برج تفکیک، باعث فشار آوردن به شیر اطمینان شده بود.

دو عامل که اپراتورها از قلم انداختند به شرح زیر بود:

۱. بنزین داغ، چگالی کم‌تری دارد.
 ۲. نشان‌گر سطح با کاهش چگالی بنزین، کاهش سطح را نشان می‌دهد. حتی اگر سطح واقعی بیش از ۱۰۰٪ باشد.
- این موضوع را زمانی فهمیدم که پدرم به من یاد داد، روغن موتور ماشینم را چک کنم. هنگامی که موتور داغ بود، سطح روغن ۱ تا ۲ اینچ روی میله اندازه‌گیری بالاتر می‌رفت.

پالایشگاه یونوکال^۱ (سیتگو کنونی) - شیکاگو - خرابی برج استخراج آمین-LPG^۲)

زمانی که برج جداسازی سولفید هیدروژن به وسیله MEA^۳ از پروپان و بوتان گاز مایع، دچار مشکل شد، ۱۷ نفر داوطلب تیم اطفاء حریق و یک نفر اپراتور در پالایشگاه شیکاگو یونوکال کشته شدند و واحد آلکیلایسیون نابود شد. وسل در امتداد یک جوش تعمیری جانبی پاره شده بود.

کاملاً درست است که یونوکال در انجام اقدامات ایمنی برای جلوگیری از انفجار سهل‌انگاری کرده بود:

- استفاده از MEA به جای DEA^۴ و MDEA^۵ که کمتر خورنده هستند.
- عدم موفقیت در راه‌اندازی ریکلایمر (بازیابی) MEA برای حذف نمک‌های پایدار حرارتی^۶ از آمین گردشی. نمک‌های پایدار حرارتی منجر به خوردگی شدند؛
- بارگذاری بیش از حد گازهای اسیدی محلول MEA که خوردگی را تسریع می‌کنند؛

^۱ Unocal: یونوکال

^۲ مخفف "Liquefied Petroleum Gas" گاز مایع: LPG

^۳ مخفف "Mono Ethanol Amine" مونو اتانول آمین: MEA

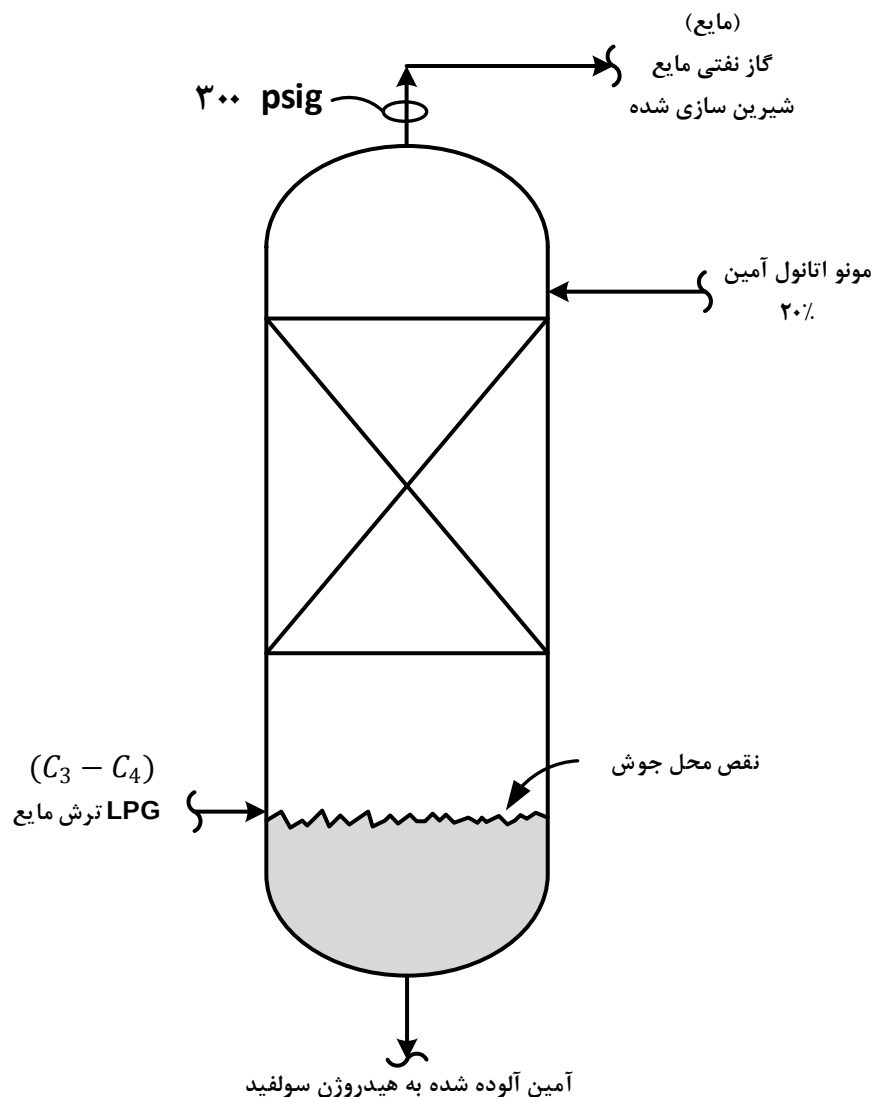
^۴ مخفف "Diethanolamine" دی اتانول آمین: DEA

^۵ مخفف "Methyl diethanolamine" متیل دی اتانول آمین: MDEA

^۶ Heat stable salts: نمک‌های پایدار حرارتی

- عدم موفقیت در بازرسی مناسب وسل برای وجود شکاف در جوش‌های تعمیری در هنگام انجام تعمیرات (شکل ۳-۴۶).

اما دلیل اصلی حادثه، تصمیم اشتباهی بود که قبل از ساختن وسل رخ داد. طراح در شماتیک وسل مشخص نکرده بود که برج استخراج باید پس از جوشکاری برای تنش‌زدایی در مناطق جوش‌خورده تحت عملیات حرارتی قرار بگیرد.



شکل ۳-۴۶ عدم تنش‌زدایی محلی جوشکاری شده، منجر به مرگ و فاجعه می‌شود- (۱۸ نفر کشته شدند)- یونوکال.

بنابراین هنگامی که سال‌ها بعد یک جوشکاری تعمیری انجام شد، محل جوش تحت عملیات حرارتی قرار نگرفت.

چیزی که پیمانکار طراحی مهندسی از قلم انداخته بود این بود که:

- هیدروتریتر (شیرین سازی) آمین و استخراج H_2S ، فرآیندی بالقوه خورنده است.
- MEA خورنده تر از DEA یا MDEA است.
- یکی از محصولات خوردگی فولاد، سولفید آهن (HS^-) است.
- محصول دیگر خوردگی، یون هیدروژن (H^+) است.

یون هیدروژن در جوش ها نفوذ می کند و به صورت هیدروژن مولکولی در جوش هایی که تنش زدایی نشده اند، تجمع پیدا می کند. نه پیمانکار مهندسی و نه شرکت یونوکال (سیتگو کنونی) مسئول این انفجار شناخته نشدند. اما مشتری من، شرکت مهندسی نوتر^۱ که جوش تعمیری را انجام داده بود، کاملاً ناعادلانه مقصر شناخته شد.

انفجار نورکو^۲ شرکت نفت شل^۳

بر اثر انفجار یک واحد شکست کاتالیستی بستر سیال در پالایشگاه نورکو متعلق به شرکت نفت شل، شش اپراتور کشته شدند. واحد FCU ویران شد و هزاران خانه آسیب دیدند. منشأ حادثه، انفجار ابر پروپان در هوای آزاد بود که از لوله ۸ اینچی حاوی بخار در بالای برج پروپان زدای واحد FCU نشت کرده بود. من یک سال پس از انفجار، زانویی ترک خورده را در آزمایشگاه بازرسی کردم. واضح بود که چه اتفاقی افتاده است (شکل ۴۶-۴).

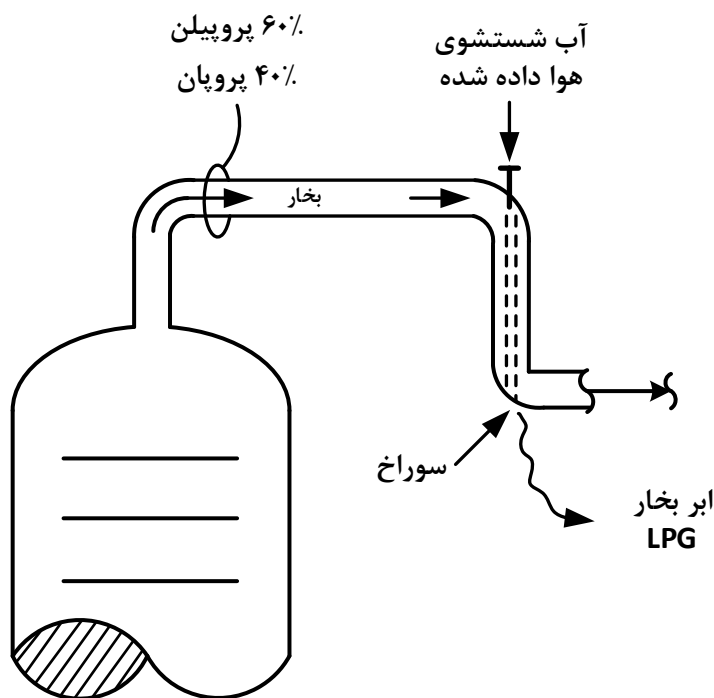
آب شستشوی تزریق شده به خط بخار ۸ اینچی بالاسری، یک شیار در شعاع بیرونی زانویی ایجاد کرده بود. نازل آب شستشو نباید مستقیماً به سمت زانویی، که ۲ فوت پایین تر واقع شده بود، قرار می گرفت.

نازل مورد استفاده، باید نازل اسپری یا یک نازل پراکن گر باشد و نه فقط بخشی از یک لوله ۴ / ۳ اینچی که با زاویه ۴۵ درجه بریده شده است. همچنین جریان آب شستشو باید به سمت لوله ای افقی در فاصله ۱۰ الی ۲۰ فوت بالاتر از زانویی اول هدایت می شد.

^۱ شرکت مهندسی نوتر: Nooter Engineering

^۲ نورکو: Norco

^۳ شل: Shell



شکل ۴۶-۴ برخورد آب اسیدی با زانویی سبب ایجاد فرسودگی و نقص لوله می‌شود-شش نفر فوت کردند-شل.

اما مشکل اصلی این بود که آب شست‌شو، صرفاً آب رودخانه می‌سی‌سی‌پی بود که هواگیری هم نشده بود. این موضوع باعث کالیتاسیون شد؛ زیرا سرعت بالای آب موجب ایجاد حباب‌های اکسیژن در نقطهٔ اصابت می‌شود. شرکت شل باید از آب هوازایی شده یعنی آب خوراک بویلر واحد هوازایی، به‌عنوان آب شست‌شو استفاده می‌کرد.

ظاهراً نصب تزریق‌کنندهٔ ۳/۴ اینچی آب شست‌شو، یک پروژهٔ بهینه‌سازی بوده که توسط بخش مهندسی شرکت شل مورد بررسی قرار نگرفته بود. تصور شده بود که این فقط یک پروژهٔ خطوط لوله کوچک و بی‌اهمیت است که توسط یک پیمانکار خطوط لوله انجام خواهد شد.

من، کارشناس وکلایی بودم که به نمایندگی از صاحبان خانه‌هایی که خسارت‌های بسیار جزئی متحمل شده بودند، از شرکت شل شکایت کردند. این پرونده توسط شرکت شل با پرداخت مبلغ ۳۰۰۰۰۰۰۰ دلار حل و فصل شد. خانواده‌های اپراتورهای متوفی سهمی از این مبلغ دریافت نکردند. آن‌ها تحت پوشش بیمهٔ بیماری و از کارافتادگی کارگران^۱ (که هزینه‌ی آن توسط کارفرما پرداخت می‌شود) قرار گرفتند که چنین اقداماتی را از سوی کارمندان منع می‌کند. اما وکلایی که نمایندگان صاحبان خانه‌ها بودند، برای کار خود ۱۲۰۰۰۰۰۰ دلار دریافت کردند.

^۱ بیمه بیماری و از کارافتادگی کارگران (که هزینه آن توسط کارفرما پرداخت می‌شود): workers' compensation

فاجعه یونیون کاربید^۱ - بوپال^۲

در فاجعه واحد حشره‌کش‌سازی یونیون کاربید بیش از ۱۰۰۰۰ نفر در بوپال هند کشته شدند. در اثر این حادثه، شرکت شیمیایی بزرگ و معروف بوپال ورشکست شد. فاجعه بوپال بدترین حادثه‌ای است که تا به حال در صنعت فرآیند اتفاق افتاده است.

علت این حادثه نقص آب‌بند مکانیکی^۳ پمپ متیل ایزوسیانات عنوان شده است. پمپ با حداقل NPSH (هد ورودی مثبت خالص)^۴ در دسترس طراحی شده بود که باعث کاویتاسیون مداوم در ورودی پروانه پمپ و متعاقباً سبب خرابی آب‌بند و نشتی مکرر آن می‌شد (شکل ۴۶-۵ را ببینید).

نشت متیل ایزوسیانات تحریک‌کننده بود اما کشنده نبود. اپراتورهای کارخانه برای جلوگیری از این مشکل نسبتاً جزئی، راه‌حلی هوشمندانه ابداع کردند:

- پمپ خاموش از سرویس خارج شد.
- شیر کنارگذر^۵ اطراف پمپ باز بود (شکل ۴۶-۵ را ببینید).
- وصل ایزوسیانات با استفاده از محل انشعاب پرچ نیتروژن واحد، تا چند بار فشارگیری شد.
- در اثر عملکرد وصل ایزوسیانات با فشار بالاتر از حد معمول، هشدار فشار وصل به‌طور دوره‌ای فعال می‌شد. برای جلوگیری از مزاحمت هشداردهنده، هشدار فشار وصل غیرفعال شد.
- در طول جنگ جهانی اول (۱۹۱۴-۱۹۱۸)، آلمانی‌ها گازهای سمی را معرفی کردند. خطرناک‌ترین و وحشتناک‌ترین آن‌ها فُسژن است. برای تولید فُسژن:

• **مرحله اول:** متیل ایزوسیانات بگیرد.

• **مرحله دوم:** آب اضافه کنید؛

• **مرحله سوم:** به مدت ۵ دقیقه به آرامی مخلوط کنید.

^۱ Union Carbide: یونیون کاربید

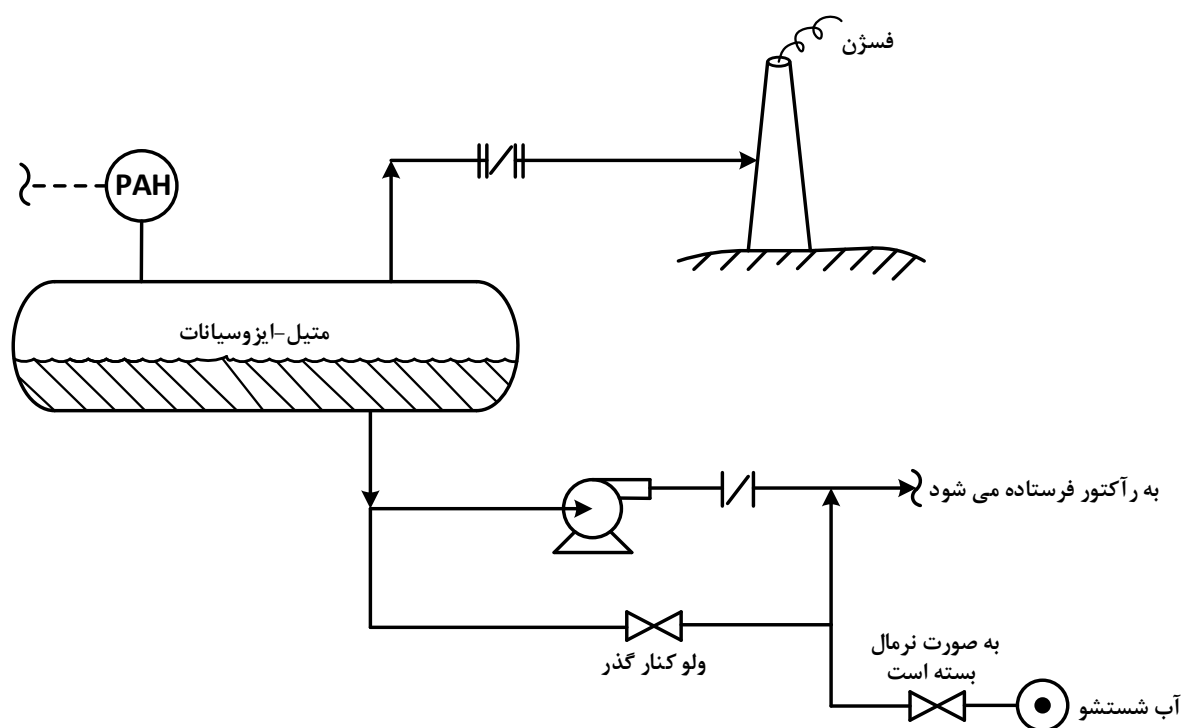
^۲ Bhopal: بوپال

^۳ Mechanical seal: آب بند مکانیکی

^۴ NPSH: مخفف "Net Positive Suction Head" هد مکش مثبت خالص

^۵ By Pass: کنارگذر، کمکی، بای‌پس

در کارخانه بوپال، آب شستشو (شکل ۴۶-۵) به طور دوره‌ای برای شستشوی خط خوراک رآکتور استفاده می‌شد. با روشن شدن پمپ متیل ایزوسیانات و بسته شدن شیر کنارگذر، آب هرگز نمی‌توانست به داخل وسل برگردد. با این حال، با خارج شدن پمپ از سرویس و باز کردن شیر کنارگذر، آب می‌توانست به داخل وسل برگردد. یک روز عصر این اتفاق افتاد.



شکل ۴۶-۵ بوپال، هند، ۱۰۰۰۰+ نفر کشته شدند، یونیون کارباید.

نتیجه، تشکیل سریع بخارات فسژن بود که باعث افزایش بیش از حد فشار وسل شد. شیر اطمینان باز شد و گاز کشته‌شده فسژن بر روی شهر بوپال هند نشست. تزریق آب حتی با مرگ مردم ادامه یافت.

اما چرا؟

چون هشدار مربوط به فشار بالا به دلیل فعالیت وسل در فشاری بالاتر از حد نرمال با نیتروژن، غیرفعال شده بود. بنابراین اپراتور اتاق کنترل از مشکل فشار بیش از حد وسل، آگاه نشد.

علت واقعی حادثه بوپال نقص آب‌بند مکانیکی پمپ نبود؛ نقص در یک تجهیز یا مشکلی در طراحی نیز نبود. این حادثه، نتیجه گوش نکردن به توصیه مادرم بود:

«نورمن گوش کن، به بهترین‌ها امیدوار باش، اما برای بدترین‌ها برنامه‌ریزی کن.»

«مامان یعنی چی؟»

«نورمن تو باید عواقب کارهای خود را بررسی کنی. قبل از این که تغییری ایجاد کنی، به همه چیز فکر کن. تو دیگر بچه نیستی. اتفاقات بد زمانی برای مردم رخ می‌دهند که در ابتدای کار به عواقبش فکر نمی‌کنند. تنها رعایت تمام قوانین به اندازه کافی خوب نیست. سعی کن مثل عمویت، هرب^۱، باشی او یک مهندس است!»

شهر تگزاس، آموکو - مرگ توسط نیتروژن

سه نفر از کارگران تعمیرات پیمانکار، بر اثر خفگی با نیتروژن در یک رآکتور هیدروکراکر (شکست هیدروژنی) جان خود را از دست دادند. رآکتورها قبل از صدور مجوز ورود، با نیتروژن پرچ و پاک‌سازی شده بودند. دو رآکتور مشابه از نظر قابلیت تنفس بررسی و آزمایش شده بودند. تنها رآکتور سوم پر از نیتروژن بود. این سه کارگر به اشتباه وارد رآکتور سوم شده، خفه شدند و جان باختند. این اتفاق در حدود سال ۱۹۷۰ رخ داد.

یک فرد، تنها به دلیل وجود ۰/۵٪ کربن دی‌اکسید در هوا، دچار ناراحتی تنفسی شده و در تنفس خود احساس مشکل می‌کند. در صورت عدم وجود کربن دی‌اکسید و صرف‌نظر از کمبود اکسیژن، فرد هیچ گونه ناراحتی تنفسی را تجربه و احساس نخواهد کرد.

من یکبار در سال ۱۹۸۲، نیتروژن واحد را به سیستم هوای ابزار دقیق متصل کردم. تقریباً نزدیک بود همه را در اتاق کنترل بکشم. تجهیزات ابزار دقیق ما که با هوا کار می‌کرد، توسط نیتروژن منتشرشده از پانل‌های ابزار دقیق آلوده شد. خوشبختانه هشدار کمبود اکسیژن به صدا درآمد و من متوجه خطای خودم شدم. خداوند مراقب افراد ضعیف است (پالایشگاه گود هوپ^۲، نورکو^۳، لوئیزیانا^۴).

^۱ Herb: هرب

^۲ Good Hope: گود هوپ

^۳ Norco: نورکو

^۴ Louisiana: لوئیزیانا

خلاصه

«هاروی^۱ گفت: لیبرمن^۲، هدف این داستان‌ها چیست؟ آن‌ها واقعاً غم‌انگیز هستند، اما به نظر می‌رسد که ارتباطی با هم ندارند. حوادث همیشه اتفاق می‌افتند! بهترین راه برای به حداقل رساندن اتفاقات، این است که همه کارکنان نگرش مثبتی نسبت به آموختن موارد ایمنی داشته باشند.»

«نه هاروی. بهترین راه برای جلوگیری از اتفاقات این است که بدانیم چه زمانی باید:

- جوش مخازن و خطوط لوله‌ها را تنش‌زدایی کنیم.
- بدانیم که چه زمانی تجهیزات و خطوط لوله به درستی تخلیه فشار شده‌اند.
- فهمیدن این‌که چگونه اندازه‌گیری ارتفاع سطح با تغییر چگالی تغییر می‌کند.
- عدم استفاده از آب شست‌شوی اشباع‌شده با هوا بدون نازل اسپری تا مستقیماً به خطوط لوله برخورد نکند.

- کدام هشدارها هرگز نباید غیرفعال شوند.»

«یعنی هاروی، برای درک نحوه کار تجهیزات فرآیندی و پیش‌بینی مشکلاتی که ممکن است به وجود بیایند، نباید درس‌های آموخته‌شده از تجربیات گذشته را نادیده گرفت.»

کسانی که تاریخ را مطالعه نمی‌کنند، محکوم به تکرار آن هستند.

^۱ هاروی: Harvey

^۲ لیبرمن: Lieberman



نقش مهندسی ما در عصر گرمایش جهانی

چکیده:

افزایش CO₂ در جو زمین، نتیجه به کارگیری اصول مهندسی فرآیند در توسعه فنی فعالیت‌های انسانی است. مهندس فرآیند برای کاهش انتشار CO₂ در یک پالایشگاه و کارخانه شیمیایی چه زمینه‌هایی را می‌تواند بهبود بخشد؟ اگر بخش فنی جمعیت بشر نتواند نقش فعالی در مبارزه با انتشار روزافزون متان و دی‌اکسید کربن داشته باشد، نتیجه نهایی توسعه تاریخی نوع بشر چه خواهد بود؟

کلمات کلیدی:

متان؛ کربن دی‌اکسید؛ گرمایش جهانی؛ پایداری انرژی؛ فتوسنتز؛ گازهای گلخانه‌ای؛ مهندسی فرآیند؛

به عنوان یک مهندس فرآیند پالایشگاه، حرفه‌ام، مرا با مدیریت فنی و عملیاتی مرتبط می‌کند. عوامل زیر میزان موفقیت پروژه‌های صرفه‌جویی در انرژی را تعیین می‌کنند:

- آموزش دادن اپراتورها برای فعالیت در واحدهای فرآیندی به شیوه‌ای کارآمد از لحاظ مصرف انرژی؛
 - توربین‌های بازیافت برق؛
 - پیش‌گرم‌کن‌های هوا؛
 - کنترل فرکانس برای پمپ‌های موتور الکتریکی؛
 - بازیابی میعانات بخار آب؛
 - بیشینه‌سازی بازیابی گرما از محصول؛
 - بازیابی جریان‌های پسماند گازی، با ارزش حرارتی پایین؛
- هنگامی که با تصمیم‌گیرندگان این عوامل درباره اهدافشان برای عملیات بحث می‌کنم، متوجه می‌شوم که نگرانی‌های اصلی آن‌ها به شرح زیر است [1]:
- بیشینه‌سازی راندمان کوتاه‌مدت سرمایه‌گذاری؛
 - ایمنی و عملکرد واحد؛
 - بیشینه‌سازی بازیابی نفت گاز سنگین از پسماند برج خلأ؛
 - بیشینه‌سازی نرخ نفت خام؛
 - اجتناب از مشکلاتی در زمینه روابط کاری
 - کمینه‌سازی هزینه‌های تعمیرات.
- من متوجه عدم علاقه آن‌ها به اهداف بلندمدت شده‌ام:
- حفظ منابع انرژی؛
 - تغییرات اقلیمی؛

- ترکیبات اتمسفر؛
- گرمایش جهانی؛
- افزایش سطح آب دریاها؛
- درجه اسیدی شدن اقیانوس‌ها؛
- کاهش تنوع زیستی.

افرادی که پالایشگاه‌های نفت را مدیریت و هدایت می‌کنند، معمولاً مهندسان شیمی در اوایل دهه ۴۰ تا اواخر ۵۰ سالگی، متأهل و دارای فرزندان بالغ هستند. بسیاری از آن‌ها اطلاعی از میزان CO₂ در جو زمین، در گذشته و حال، میزان افزایش جهانی دمای محیط، سرعت افزایش سطح دریاها یا روند اسیدی شدن اقیانوس‌ها ندارند. اگر همکاران مسن‌تری که به صورت فنی آموزش دیده‌اند، این روندها را نمی‌دانند و اهمیتی به آن نمی‌دهند، چه انتظاری می‌توان داشت که مهندسان و اپراتورهای جوان‌تر بفهمند؟

توضیح به پرسنل مدیریتی پالایشگاه

برای توضیح ماهیت جدی مشکل، که اساساً یک عدم‌پذیرش به‌موقع گزینه‌های انرژی پایدار است، من ارائه کوتاهی آماده کرده‌ام که مورد استقبال پرسنل مدیریت پالایشگاه قرار نگرفت. مطالب ارائه مذکور، آنقدر سنگین نیست که مخاطبان من، باورش نکنند. ممکن است آن‌ها به سادگی به شنیدن «حقایق ناخوشایند» علاقه‌ای نداشته باشند. برای شروع توضیح خواهم داد که وقتی زمین در ۴۲۰۰۰۰۰۰۰ سال پیش خلق شد؛ میزان CO₂ در جو، حدود ۲۵۰۰۰۰ ppm (۲۵٪) بود. بخش اعظم جو حاوی نیتروژن بوده و اکنون نیز همینطور است.

شروع حیات

به محض این که زمین به قدر کافی خنک شد تا آب آزاد به وجود آید، حیات شکل گرفت. مولکول‌های طبیعی که در فضای بین سیارات تشکیل شدند، ظاهراً به راحتی ساختارهای مولکولی پیچیده‌ای را تشکیل می‌دهند و می‌توانند خودشان را به طور خودجوش و بدون دخالت، تکثیر و بازتولید کنند. تنها چیزی که مورد نیاز بود، آب مایع، کربن، گوگرد، نیتروژن، فسفر، کلسیم و سایر عناصر متداول بود. آهن، متان، سولفید هیدروژن و سایر عناصر شیمیایی رایج را می‌توان در واکنش‌های گرمازا به عنوان منبع انرژی به کار گرفت. یکی دیگر از منابع نسبتاً کم انرژی، اکسیداسیون با استفاده از پراکسید هیدروژن است که از برخورد تابش خورشید با مولکول‌های آب تولید می‌شود.

باکتری‌هایی که از این منابع جزئی انرژی استفاده می‌کردند، بدون تغییر در ترکیب اتمسفر تا حد زیادی تکثیر شده و سیاره‌ها را پر کردند. این شروع زمانی است که حیات در زمین ما به مدت حدود ۲ میلیارد سال تکامل یافت.

فتوسنتز:

آنچه که زمین را در جهان خاص ما منحصر به فرد ساخته، حیات نیست؛ بلکه فتوسنتز است. زیرا حیات با توجه به محیط شیمیایی مناسب، نسبتاً سریع و خودبه‌خود شروع می‌شود. در حقیقت حیات در سیاره ما تقریباً بلافاصله پس از سرد شدن زمین تکامل یافت.

فتوسنتز:



چندین میلیارد سال برای رشد و تکامل لازم است. فتوسنتز، از توانایی باکتری‌های خاصی برای استفاده از پراکسید هیدروژن به عنوان منبع انرژی جهت تبدیل CO_2 به گلوکز تکامل یافته است. کاتالیزوری که به پیشبرد معادله ۱-۴۷ کمک کرد، کلروفیل بود. باکتری‌هایی که از کلروفیل برای تولید گلوکز از CO_2 محیط استفاده می‌کنند، مزیت زیست‌محیطی فوق‌العاده‌ای نسبت به باکتری‌هایی داشتند که به یون‌های نسبتاً کمیاب آهن، وانادیوم، نیکل و یون‌های سولفید به عنوان منبع انرژی متکی بودند.

چه اتفاقی برای اکسیژن افتاد

باکتری‌های اولیه به اکسیژن آزاد به عنوان یک محصول زائد کشنده و خطرناک واکنش نشان دادند. هنوز هم همینطور است. اکسیژن آزاد هرگز در غلظت‌های زیاد در جهان وجود نداشته است؛ چرا که بیش از حد واکنش‌پذیر است. قبل از ظهور فتوسنتز، غلظت اکسیژن در اتمسفر زمین حدود ۳۰۰۰ ppm (معادل فشار جزئی ۲ میلی متر جیوه) بود و در حال حاضر ۲۱۰۰۰۰ ppm (معادل فشار جزئی ۱۶۰ میلی متر جیوه) بود. غلظت اولیه پایین، نتیجه تعامل میان تابش خورشیدی با مولکول‌های آب برای تولید پراکسید و هیدروژن در جو بود.

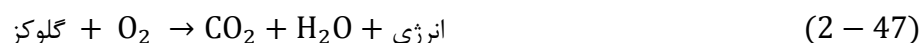
اکسیژن یک سم خطرناک برای زندگیست. او با رشته‌های DNA^۱ واکنش می‌دهد. اکسیداسیون DNA، عامل اصلی مرگ‌ومیر (که گاهی اوقات پیری نامیده می‌شود) در انسان است. در ابتدا باکتری‌ها با اکسیداسیون محصولات زائد خود، از مرگ محافظت می‌شدند. اکسیژن مازاد در آب دریا حل می‌شود و در آنجا با نمک‌های آهن موجود

^۱ دئوکسی ریبو نوکلئیک اسید: DNA

در دریا واکنش می‌دهد و به عنوان اکسیدهای آهن مایل به قرمز رسوب می‌کنند. بنابراین، رنگ قرمز بسیاری از خاک‌ها به همین دلیل است. اما پس از یک میلیارد سال یا بیشتر، محتوای آهن اقیانوس‌ها تقریباً به‌طور کامل به صورت اکسید رسوب کرد و بنابراین O_2 آزاد شروع به تجمع در هوا کرد.

نتایج افزایش اکسیژن در جو

باکتری‌ها هم عاشق اکسیژن آزاد بودند و هم از آن متنفر بودند. اکسیژن، ماده‌ای فوق‌العاده برای واکنش اکسیداسیون به خصوص در زیر بود:



واکنش مذکور، مقدار زیادی انرژی مفید تولید کرد. اما اکسیژن به DNA باکتری‌ها نیز آسیب رساند و منجر به مرگشان شد. بنابراین باکتری‌ها بعد از رایزنی‌های قابل توجه تصمیم گرفتند تا از خود در برابر اثرات مرگبار اکسیداسیون محافظت کنند. به شکل زیر:

- جمع شدن در کنار هم به منظور تشکیل گروه‌هایی جهت کاهش سطح مشترکشان و سپس
- ساختن دیواره‌های سلولی در اطراف گروه‌های خود با غشاهای نیمه‌تراوا و سپس
- جمع شدن سلول‌ها در کنار هم برای ساخت جانورانی مانند اسفنج‌ها و گیاهانی مانند جلبک‌های سبز و سپس
- تشکیل سلول‌ها به نحوی که هر سلول عملکرد خاصی داشت و از همسایگانش در برابر فشار جزئی اکسیژن اضافی محافظت می‌کرد و سپس
- ایجاد سرخس، علف، درختان، کرم، ماهی، قورباغه‌ها، تمساح‌ها، خرس‌ها، میمون‌ها و من.

با ادامه یافتن خلقت از حدود یک میلیارد سال پیش، متان موجود در جو اکسید شده و به CO_2 و H_2O تبدیل شد. متان (CH_4)، یک گاز گلخانه‌ای و بسیار قوی‌تر از CO_2 است (۲۳ تا ۴۰ برابر بیشتر). بنابراین اکسیداسیون متان گرمایش جهانی را تا حدودی کاهش داد. با این حال، عامل موثرتر، تبدیل CO_2 به گلوکز بود (معادله ۴۷-۲).

بیشتر این گلوکز توسط باکتری‌ها، درختان و انسان‌ها به عنوان یک منبع انرژی، از طریق واکنش آن با O_2 و آزاد کردن انرژی تابشی خورشید که توسط فتوسنتز ذخیره شده بود، به مصرف می‌رسید (معادله ۴۷-۱). اما برخی از

مولکول‌های آلی حاصل از گلوکز، که قبلاً دفن شده بودند، می‌توانستند با اکسیژن واکنش نشان دهند. بدین ترتیب مواد زیر را به وجود آوردند

- گاز طبیعی
- شیل نفتی^۱
- نفت
- زغال سنگ
- ماسه قیری
- هیدرات‌های دریایی (CH_4 منجمد + H_2O)
- پیت^۲ (زغال سنگ نارس)

غلظت کنونی CO_2 در اتمسفر

گیاهان سبز، در ایجاد مولکول‌های کربن آلی، با استفاده از انرژی تابشی خورشید، H_2O و CO_2 بسیار کارآمد بودند. زمین، در دفن لجن‌های آلی حاصل به قدری پویا بود که ۹۹/۹٪ مولکول‌های کربن ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) موجود در جو، در زیر پوسته زمین ناپدید شدند. حذف CH_4 و CO_2 از جو باعث شد تا گرمای بیشتری از خورشید به فضا تابش شود. زمین سرد شد و یخ زد. سطح سفید و بازتابنده زمین گرمای بیشتری را به فضا بازتاب می‌کرد. سیاره کوچک ما در یک حلقه بازخورد مثبت گرفتار شده بود. زمین کاملاً یخ می‌زد. اما یک عامل آن را نجات داد: تشعشع.

در حال حاضر، U-235 تنها ۰/۷ درصد وزنی از کل مقدار اورانیوم موجود در پوسته زمین را به خود اختصاص داده است (مابقی U-238 است)؛ اما صدها میلیون سال پیش، در هسته زمین (همراه با توریم رادیواکتیو) در غلظت‌های بالاتری وجود داشت. هم U-235 و هم توریم، به عناصر پایدارتری تجزیه شدند و با انجام این واکنش، گرما آزاد کردند. این گرما باعث فعالیت آتشفشانی شده و منجر به انتشار گاز CO_2 در جو می‌شد. انتشار ناگهانی مقدار زیادی CO_2 ، حلقه بازخورد مثبتی را که توسط گیاهانی آغاز شده بود (جذب CO_2 از هوا و تولید گلوکز)، شکست. گلوکز به لجن آلی تجزیه شد و سپس توسط رسوباتی که توسط باران از زمین شسته می‌شوند، مدفون می‌شد. خوشبختانه،

سنگ نفت‌زا یا سنگ کروژن: یک سنگ رسوبی دانه ریز و غنی از مواد آلی حاوی کروژن است و از آن می‌توان هیدروکربن مایعی به نام نفت شیل (Shale)^۱ (نفت ماسه) استخراج کرد. نفت شیل یک جایگزین برای نفت خام معمولی است.

پیت، نخستین مرحله تشکیل زغال‌سنگ: Peat^۲

قدرت فتوسنتز برای جذب CO₂ از هوا و فعالیت آتشفشانی برای آزادسازی CO₂ از هیدروکربن‌های مدفون و همچنین توانایی رسوبات برای پوشاندن لجن‌های آلی، کمابیش به تعادل رسیدند. تعادلی طبیعی حاصل شده بود.

کاهش انتشار گرما توسط ۲۳۵-U

با گذشت زمان و کاهش غلظت تورיום و U-235 در داخل زمین، فعالیت‌های آتشفشانی نیز به تدریج کاهش یافت. توانایی سیاره برای بازیافت دی‌اکسید کربن از هیدروکربن‌های مدفون، کاهش یافت. تا سال ۱۹۴۲ (سالی که من متولد شدم)، غلظت CO₂ در جو به حدود ۲۸۰ ppm یا ۰/۱٪ غلظت آن پیش از فتوسنتز در چندین میلیارد سال پیش، کاهش یافت. رشد درختان به دلیل کمبود CO₂ در دسترس موجود در جو سرکوب شد. به نظر می‌رسید که زمین به سمت عصر یخبندانی جدید می‌رود. به عنوان مثال سکونتگاه نورس^۱ در گرینلند^۲ (که به احشام شیرده وابسته بود و ۱۰۰۰ سال پس از میلاد مسیح شروع به شکوفایی کرده بود)، تا سال ۱۴۰۰ پس از میلاد به دلیل سرد شدن سیاره‌مان عمدتاً از سطح کره زمین محو شد.

حدود ۲۰۰ سال پیش، توماس نیوکامن^۳ در کورنوال^۴، موتور بخار آب را اختراع کرد که از زغال‌سنگ به عنوان سوخت استفاده می‌کرد. دی‌اکسید کربن موجود در جو به آرامی از ۲۸۰ به ۳۰۰ ppm (۲۰ ppm بیشتر) افزایش یافت. تا دهه ۱۹۷۰ و زمانی که غلظت CO₂ در جو به سرعت از ۳۰۰ ppm به سطح فعلی یعنی ۴۲۰ ppm رسید؛ با نرخ ثابت تکان‌دهنده ۰/۵ درصد یا ۲/۵ ppm در سال.

فعالیت انسان در اکسیداسیون کربن مدفون، اثرات فتوسنتز را که منجر به سرکوب رشد گیاه می‌شود، خنثی می‌کند. در واقع، افزایش CO₂ در جو از ۳۰۰ به ۴۰۰ ppm، سرعت رشد درختان در نیمکره شمالی را حدود ۱۰ تا ۲۰٪ تسریع کرده است؛ نشانه‌ای امیدوارکننده که به طور قابل توجهی عدم پیشرفت واقعی خود بشر را خنثی می‌کند.

توزیع کننده CO₂

CO₂ آزاد شده از احتراق گاز طبیعی، زغال‌سنگ و نفت به طور کامل در هوا تجمع نمی‌یابد. حدود ۴۰٪ آن در اقیانوس‌ها حل می‌شود [2]. افزایش CO₂ در اقیانوس‌ها به دلیل فعالیت‌های بشر بسیار ناچیز است و به طور کلی نمی‌تواند تأثیری روی اقیانوس‌ها بگذارد. اما این کربن دی‌اکسید به خوبی در اقیانوس‌ها مخلوط نمی‌شود؛ بلکه چند

^۱ Norse: نورس

^۲ Greenland: گرینلند

^۳ Thomas Newcomen: توماس نیوکامن

^۴ Cornwall: کورنوال

صد فوت بالاتر به آرامی با ۹۵٪ از آب‌های عمیق‌تر اقیانوس مخلوط می‌شود. بنابراین، افزایش CO₂ آزاد شده توسط احتراق سوخت‌های فسیلی در لایه‌های بالایی اقیانوس جمع می‌شود. CO₂ در آب حل شده و اسید کربنیک (H₂CO₃) تولید می‌کند. این اسید کربنیک به طور قابل ملاحظه‌ای درجه اسیدی اقیانوس‌ها را افزایش می‌دهد (pH از ۸/۰ به ۷/۸ می‌رسد). با کاهش pH آب، حلالیت اجزای اسیدی مانند CO₂ در آب نیز کاهش می‌یابد بنابراین سرعت جذب CO₂ از اتمسفر در اقیانوس‌ها به آرامی و با گذشت زمان، کاهش می‌یابد.

البته اتمسفر به دلیل اثرات ترکیبی دی‌اکسید کربن، متان و فریون در حال گرم شدن است. حدود ۸۰٪ گرمایش، مربوط به CO₂ است. کاهش انتشار SO₂ (SO₂ منعکس کننده نور خورشید است) به جو، به دلیل ساخت واحدهای بازیابی گوگرد در پالایشگاه‌های نفت، گرمایش جهانی را تسریع کرده است. تاکنون، دمای محیط در نیم قرن گذشته، حدود ۲ درجه فارنهایت افزایش یافته است. دمای آب دریاها نیز در حال افزایش است. همانطور که در طول توفند سندی^۱ در شهر من یعنی نیویورک^۲ مشاهده شد، آب با گرم شدن انبساط پیدا می‌کند (۱٪ به ازای هر ۴۰ درجه فارنهایت). بنابراین سطح دریاها بالا می‌رود.

پروژه‌های بقاء انرژی

بخش بزرگی از فعالیت تجاری من به عنوان مشاور مهندسی طراحی فرآیند، در حوزه پروژه‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی بود. این موضوع قبلاً یک «موضوع داغ» در پالایش نفت بود. در ایالات متحده افزایش هزینه‌های انرژی تابعی از قیمت گاز طبیعی است. این امر نه تنها هزینه سوخت هیترهای فرآیندی را تعیین می‌کند، بلکه هزینه بخار آب و به طور غیرمستقیم، هزینه برق را نیز تعیین می‌کند. گاز طبیعی در ایالات متحده آن قدر ارزان و فراوان شده است (قیمت آن در چند سال گذشته به میزان دو سوم کاهش یافته است)، که مشتریان من دیگر پروژه‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی را به‌تنهایی اهداف ارزشمندی در نظر نمی‌گیرند.

این موضوع، تاثیر واقعی شکست هیدرولیکی^۳ است که نرخ تولید گاز طبیعی و نفت خام را افزایش می‌دهد. تصور نادرست گسترده‌ای در مورد عامل کنترل کننده میزان انتشار CO₂ وجود دارد. این امر، تابعی از مصرف سوخت‌های فسیلی نیست؛ بلکه تابعی از میزان تولید سوخت‌های فسیلی است. تمام نفت و گازی که تولید می‌شود، در نهایت اکسیده شده و به CO₂ و H₂O تبدیل می‌شود.

^۱ توفند سندی، Hurricane Sandy

^۲ نیویورک: New York

^۳ شکست هیدرولیکی: Fracking

پتانسیل تولید CO₂

در سال ۲۰۰۸ ایده «تولید حداکثری نفت»^۱ رایج بود. سهام نفت به قیمت ۱۴۷ دلار در هر بشکه فروخته شد. از این موضوع کاملاً مطمئنم؛ زیرا من هم تعدادی خریداری کردم. در حال حاضر، قیمت نفت (همینطور گاز طبیعی) به یک سوم حداکثر قیمت خود کاهش یافته است که عمدتاً به دلیل افزایش نرخ تولید است؛ زیرا فناوری‌های مدرن، مانند حفاری جهت‌دار و استخراج نفت از طریق تزریق مواد شیمیایی بهبودیافته، وارد صنعت شده‌اند. پروژه‌هایی که من در آن‌ها شرکت کرده‌ام و همچنین می‌توانند میزان تولید هیدروکربن را افزایش دهند، به شرح زیر هستند:

- استفاده از رقیق‌کننده نفتا که برای تولید نفت خام فوق سنگین در ونزوئلا^۲.

- تبدیل گاز طبیعی موزامبیک^۳ در خلیج ماسل^۴ در آفریقای جنوبی به بنزین و گازوئیل.

- جداسازی نفت‌گاز از ماسه نفتی در شمال آلبرتا^۵، کانادا.

- تزریق CO₂ به سازندهای میدان گاز در وایومینگ^۶.

کاملاً آشکار است تولید نفت در سال ۲۰۰۸ به اوج خود نرسید. در واقع، تاکنون کمتر از ۱ درصد از هیدروکربن‌های قابل استفاده توسط بشر به عنوان سوخت‌های فسیلی، استخراج شده است. این تخمین بر اساس سطح پیشین CO₂ در جو است که توسط طبیعت جدا شده است؛ عمدتاً نه به صورت نفت، گاز و زغال سنگ، بلکه اکثراً به اشکال زیر:

- هیدرات‌های منجمد گاز طبیعی در رسوبات دریایی؛

- نفت شیل توزیع شده در سراسر جهان؛

- ماسه نفتی، عمدتاً در شمال کانادا.

خوشبختانه، در مورد سیاره ما به عنوان بخشی از کل کیهان، غلظت‌های بالاتر از چند درصد CO₂ برای بشر کشنده، اما برای زندگی گیاهان کاملاً مفید است. همچنین برای باکتری‌هایی که با ابداع فتوسنتز مشکل را آغاز کردند نیز کاملاً قابل تحمل است.

^۱ Peak Oil: پیک اویل، نقطه اوج (تولید) نفت

^۲ Venezuela: ونزوئلا

^۳ Mozambique: موزامبیک

^۴ Mussel Bay: خلیج ماسل

^۵ Northern Alberta: آلبرتا

^۶ Wyoming: وایومینگ

چرخه بازخورد مثبت

مشکل نهایی، در واقع CO_2 نیست؛ بلکه CH_4 است. خطر واقعی، گرمایش جو نیست؛ بلکه گرمایش اقیانوس‌ها است. مشکل از دو عامل زیر ناشی می‌شود:

- آب‌های سطحی گرم اقیانوس‌ها روی لایه‌های سردتر و متراکم‌تر شناور می‌شوند.
- افزایش رواناب‌های شیرین که حاصل از ذوب یخچال‌های طبیعی هستند، باعث کاهش شوری و در نتیجه تراکم آب‌های نسبتاً کم‌عمق در فلات‌های قاره‌ای می‌شود.

این دو عامل باعث افزایش تصعید هیدرات‌ها در فلات‌های قاره‌ای اقیانوس‌های جهان می‌شوند و این بدان معناست که هیدرات‌های منجمد، آزاد شدن متان را تسریع می‌بخشند. از آنجا که یک مول CH_4 (به‌عنوان عامل گرمایش جهانی) نسبت به یک مول CO_2 ، ۲۳ الی ۴۰ برابر اثر دارد، یک چرخه بازخورد مثبت گلخانه‌ای فاجعه‌بار ایجاد می‌شود.

سیاره ما قبلاً هم این مشکل را تجربه کرده است؛ یعنی تبخیر سریع هیدرات‌ها به متان. غلظت عظیم اکسیژن واکنش‌پذیر در جو با سرعت نسبتاً زیادی CH_4 را اکسید و به H_2O و CO_2 تبدیل می‌کند که موجب افزایش فتوسنتز می‌شود (معادله ۴۷-۱). احتمالاً غلظت‌های CO_2 و CH_4 موجود در جو، با گذشت زمان دوباره متعادل می‌شود.

مشکل زمان

آب‌های سطحی اقیانوس‌ها با pH بیشتر و دمای بالاتر، در نهایت با ۹۰٪ آب اقیانوس‌ها مخلوط می‌شوند که تحت تأثیر فعالیت‌های بشر در سوزاندن سوخت‌های فسیلی قرار نگرفته‌اند. زندگی گیاهی موجب متوقف شدن CO_2 مازاد موجود در جو می‌شود. هیدرات‌ها بازسازی خواهند شد و زمین ما چرخه‌های سرمایش و گرمایش تدریجی و طبیعی خود را از سر خواهد گرفت. می‌توانستم مشاهده کنم که عملیاتی مطلوب و پایا، مجدداً آغاز شده است. چرخه بازخورد مثبت از بین خواهد رفت و تعادل دوباره برقرار خواهد شد. به احتمال زیاد، تنها چند هزار سال طول خواهد کشید.

آیا بشر می‌تواند در انتظار این دوره بی‌ثمیری و بی‌ثباتی در سیاره‌مان بماند؟ مانند تمام اختلالات و خرابی‌های یک واحد فرآیندی، یا سرانجام پایداری به واحد باز می‌گردد یا واحد از کنترل خارج می‌شود و پیامدهای فاجعه‌بار و شاید مرگ‌باری خواهد داشت.

اما یک چیز را به طور قطع می‌توانم بگویم. زمان به نفع ما نیست. نتایج مخرب تعلل در توسعه منابع انرژی جایگزین و پایدار، هم‌اکنون نیز آشکار است. اثرات افزایش CO₂ در جو، نه تنها با چشم بلکه با محاسبات هم قابل درک است.

منابع:

[1] Personal correspondence with Mr. Karthik Rajasekaran, Metairie, Louisiana.

[2] E. Kolbert, *The 6th Extinction*, Picador Publications, 2014.



ممانعت از انتشار CO₂

چکیده:

ممکن است با انجام برخی اصلاحات در فرآیند، انتشار گاز CO₂ کاهش پیدا کند:

- هوای اضافی هیتز
- بهینه‌سازی اندازه‌های پروانه پمپ
- عدم به کارگیری غیرضروری پمپ‌های یدک
- استفاده از موتور محرکه‌های دور-متغیر^۱
- کنترل ورودی کمپرسورهای گریز از مرکز با شیر کنترل فشار ورودی^۲ که در دور ثابت کار می‌کنند
- استفاده از دهانه تخلیه بار سرسیلندر^۳ برای کمپرسورهای رفت و برگشتی موتوری
- بهینه‌سازی راندمان تفکیک سینی

کلمات کلیدی:

محرکه‌های موتوری؛ کمپرسور گریز از مرکز؛ کمپرسور رفت و برگشتی؛ سرعت متغیر؛ تفکیک؛ بند نرده‌ای؛ تراز سینی؛ اکسیژن اضافی

^۱ اینورتر، تجهیز است که برای کنترل سرعت سیال فرآیند و صرفه‌جویی در مصرف انرژی در مقایسه با سایر تکنیک- VSD(Variable Speed Drive): های کنترل جریان استفاده می‌شود.

^۲ Throttle valve: شیر گلویی، شیر هایی هستند که برای عبور سیال از یک جهت باعث کاهش فشار می شود و اگر سیال بخواهد از جهت مخالف جریان یابد فشار بدون تغییر باقی می ماند.

^۳ Head-end unloader pocket: دهانه تخلیه بار سرسیلندر

ایده من در انرژی پایدار از بحثی با مادرم نشأت می‌گیرد.

«مامان من ۱۲ دلار برای خرید کفش جدید نیاز دارم.»

مادرم کفش‌های فرسوده را بررسی کرد. «نورمن، این ۸۰ سنت را بگیر و کفش‌ها را به کفشی آقای فدریکو^۱ ببر.»

«ولی مامان من کفش جدید می‌خواهم.»

مادرم برایم توضیح داد: «نورمن ما آدم‌های فقیری هستیم و توانایی خرید کفش جدید نداریم. باید با چیزهایی که داریم سر کنیم.»

تأمین انرژی برای سیاره‌مان نیز به همین ترتیب است. ما بر روی یک ذره کوچک خاکی در کیهان اقامت داریم. اگر مادر من بر زمین حکمرانی می‌کرد دستور می‌داد: «مردم، ما بر روی یک سیاره فقیر زندگی می‌کنیم. ما توانایی دسترسی به تکنولوژی‌های پیچیده، گران‌قیمت و جدید را نداریم. ما باید انرژی را با استفاده از تکنولوژی‌ها و ابزارهای فرآیندی که امروز داریم تهیه کنیم. فرزندان زمین، زمان بر علیه ماست.»

از سال ۱۹۷۵ تا کنون دما در نواحی خشکی زمین بیش از ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. در ۲۰ سال آینده، دمای زمین ۱ درجه دیگر گرم می‌شود. دو درجه خیلی زیاد است. گرمای اضافه باعث رشد سریع گیاهان شده و شرایط زندگی را برای بسیاری از گونه‌های سیاره ما بهبود می‌بخشد. گرمایش جهانی، هم‌چنین باعث افزایش طوفان‌های سهمگین، خشک‌شدن مناطق وسیعی از زمین و افزایش سطح دریاها می‌شود.

بیشتر هیدروکربن‌ها برای حمل‌ونقل، واحدهای فرآیندی، تولید الکتریسیته و گرما مصرف می‌شوند. دامنه بهبود در این صنایع، کوچک است. راندمان خودروها بیشتر شده است؛ اما افزایش تعداد وسایل نقلیه اثر آن را خنثی می‌کند. تولید کود و پلاستیک بعید است که کاهش یابد.

فرصت بزرگ، در زمینه تولید برق است. یک سوم کربن جهان برای تولید برق مصرف می‌شود. حال چه جایگزین‌هایی برای نیروگاه‌های برق با سوخت زغال سنگ وجود دارد؟

• **هسته‌ای** - مشکل نیروگاه‌های هسته‌ای، بحث فنی نیست. ایمنی، ذخیره‌سازی سوخت هسته‌ای و

سمیت پلوتونیوم همگی مشکلاتی با راه‌حل‌های شناخته‌شده هستند. خطر اصلی، احتمال خطای مردم،

مهندسان، اپراتورها و مدیرهاست. بروز خطا در نیروگاه‌های هسته‌ای عواقب غیرقابل‌قبولی را در ژاپن،

^۱ فدریکو: Federiko

روسیه و آمریکا به وجود آورده است. بنابراین توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ۲۰ سال آینده بسیار دشوار است.

• **باد و خورشید** - الکتریسیته تولیدی به وسیله توربین‌های بادی در ساحل و سلول‌های خورشیدی در برخی مناطق خاص در آمریکا، تنها حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد گران‌تر از الکتریسیته تولیدی به وسیله نیروگاه زغال‌سنگ است و برای حذف آلاینده‌های سمی (به جز CO₂) از گاز دودکش^۱ طراحی شده‌اند. مشکل اصلی این است که باد و انرژی خورشیدی، به شبکه برق پشتیبان در شب‌ها و مواقعی که منبع انرژی در دسترس نباشد، احتیاج دارند. از آنجایی که بیشتر هزینه تولید برق از زغال‌سنگ مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری است و نه سوخت؛ این مشکل، هزینه تولید برق از باد در مناطق ساحلی و پل‌های خورشیدی را، دو برابر می‌کند.

• **ذخیره انرژی** - انرژی می‌تواند از طریق تولید هیدروژن، هوای فشرده، ذخیره آب، توربین‌ها، باتری‌ها و ... ذخیره شود. اما هیچکدام از موارد ذکر شده در مقیاس بزرگ توجیه اقتصادی ندارند.

• **گاز طبیعی** - آلاینده‌های CO₂ در آمریکا با ارزان شدن گاز طبیعی در حال کاهش هستند. بر مبنای BTU، گاز طبیعی هم اکنون ۲۵ تا ۳۰ درصد نفت خام قیمت دارد. از آنجا که گاز طبیعی به ازای هر kWh برق تولیدی، فقط نصف زغال‌سنگ آلاینده CO₂ تولید می‌کند؛ افزایش استفاده از آن در ایالات متحده انتشار CO₂ را تا چند درصد کاهش داده است. باید یادآور شویم هنگامی که از گاز طبیعی در نیروگاه سیکل ترکیبی برای تولید برق استفاده می‌شود:

○ گاز در یک مولد توربینی^۲ سوزانده می‌شود.

○ گازهای داغ دودکش (۱۱۰۰ °F) برای تولید بخار آب استفاده می‌شوند که پس از آن در یک توربین بخار برای تولید برق بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

هزینه تولید برق از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در مقایسه با یک نیروگاه جدید زغال سنگ، تنها ۶۰٪ است. خارج از آمریکا (اروپا، چین و ژاپن)، قیمت گاز طبیعی به نفت خام نزدیک‌تر است.

^۱ Flue gas: گاز دودکش

^۲ Turbo generator: مولد توربینی

• نیروگاه‌های آبی، زمین‌گرمایشی، جزر و مدی - این روش‌ها، روش‌های فوق‌العاده‌ای برای تولید برق بدون آلاینده‌گی CO₂ هستند. اما این روش‌ها فقط در مناطق محدودی مانند ایسلند یا برخی مناطق ساحلی امکان‌پذیر هستند.

• اتانول، سوخت ارگانیک^۱، هیدروژن، جلبک‌ها، ترکه‌های علف امواج اقیانوس، هم‌جوشی - هیچ‌کدام از این موارد در کوتاه‌مدت شدنی نیستند. تولید اتانول از ذرت در واقع فقط یک کلاه‌برداری مضحک است.

پس راه‌حل چیست؟ خوشبختانه یک عامل وجود دارد که مشکل را کم‌رنگ‌تر می‌کند. درخت‌ها! نرخ رشد درخت‌ها تا ۲۰٪ افزایش یافته است. که دلیل اصلی آن افزایش CO₂ در جو در قرن اخیر است (از ۲۸۰ به ۴۱۰ ppm). اگر ما بتوانیم آلاینده‌های CO₂ را در حد معمول کنترل کنیم و به جنگل‌های دنیا شانس برای بازیابی بدهیم، شاید در ۵۰ تا ۱۰۰ سال آینده بتوانیم مقدار CO₂ در اتمسفر را بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ ppm نگه داریم. که متأسفانه زیاد است اما کشنده نخواهد بود.

پس بیاید همگی از داخل اداره‌هایمان خارج شویم، ملاقات‌ها را لغو کنیم و از دستورالعمل‌های مطرح‌شده در ادامه استفاده کنیم و واحدهایمان را بهینه‌تر کنیم. در اینجا چندین ایده برگرفته از تجربه‌های عملیاتی و عیب‌یابی در پالایشگاه‌ها را بیان می‌کنم و از قانون طلایی در جمع‌آوری این مطالب استفاده کرده‌ام.

«اگر خودم انجامش نداده باشم، انجام دادنش را به بقیه توصیه نمی‌کنم.»

• پمپ‌های توربینی^۲

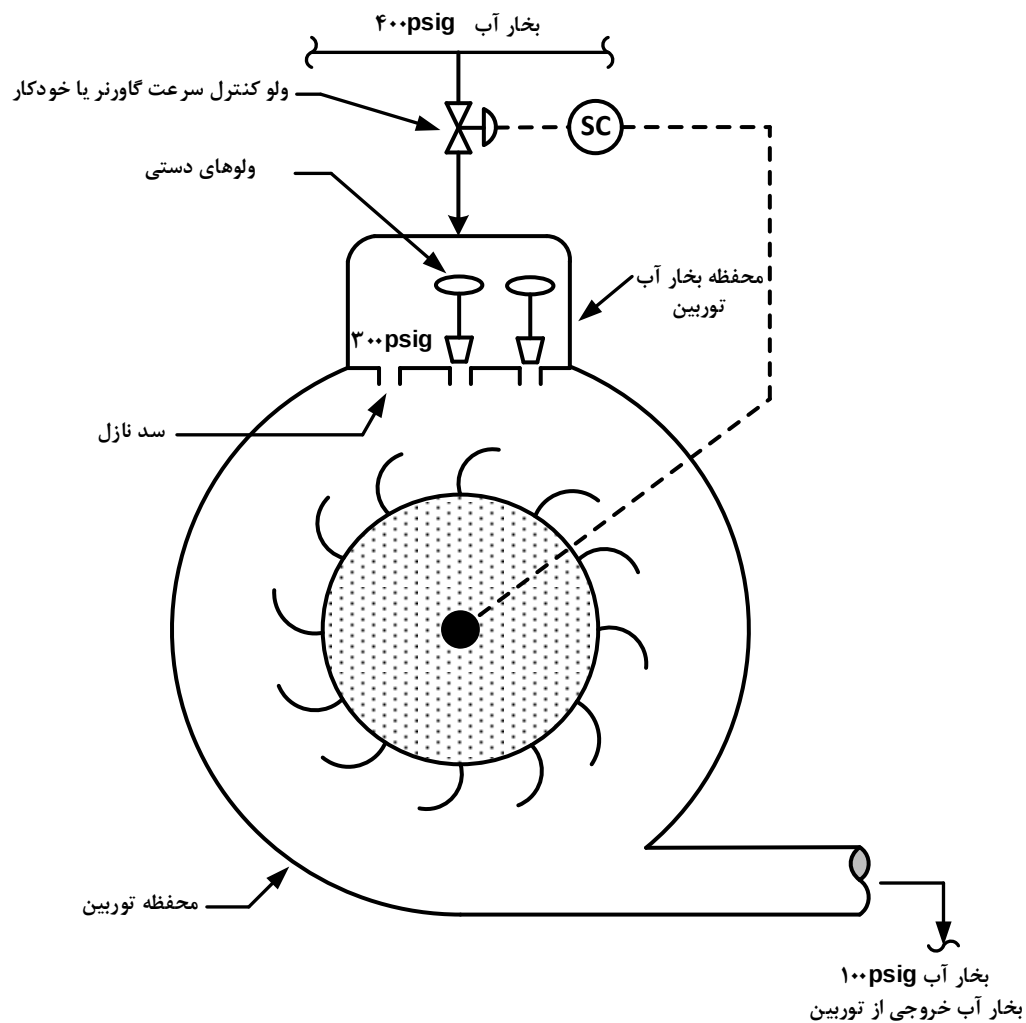
○ کاهش سرعت توربین بر روی گاورنر تا جایی که شیر کنترل پایین دستی در موقعیتی عمدتاً باز اما همچنان قابل کنترل قرار گیرد (به شکل ۴۸-۱ مراجعه شود).

○ بستن شیرهای دستی تا زمانی که شیر گاورنر کاملاً باز شود.

○ تنظیم اتصالات شیر کنترل سرعت گاورنر، تا زمانی که افت فشار بین خط ورودی بخار آب و فشار محفظه بخار آب توربین فقط چند درصد بیشتر از فشار ورودی بخار آب محرکه توربین باشد.

^۱ سوخت ارگانیک: Bio-Diesel

^۲ پمپ‌های توربینی، پمپ‌هایی که نیروی محرکه آن‌ها توربین بخار آب است. Steam Turbine-Driven Pumps

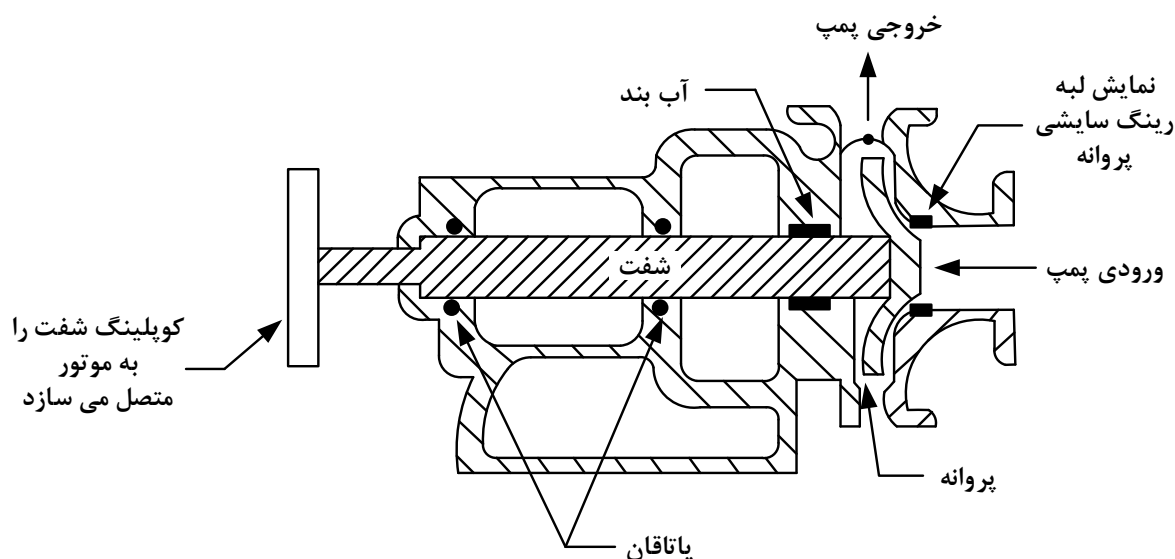


شکل ۴۸-۱ استفاده از شیرهای دستی در توربین‌های بخار . (psi=#)

• پمپ‌های گریز از مرکز موتوری (نیرو محرکه موتور الکتریکی)

- تعویض و نوک‌کردن رینگ سایشی پروانه؛ به‌طوری که فاصله آزاد رینگ سایشی و پروانه به مقدار طراحی‌شده بازگردد (شکل ۴۸-۲).
- تعویض اجزای داخلی محفظه پمپ به طوری که فاصله پره پروانه تا محفظه داخلی کاهش یافته و به مقدار طراحی‌شده بازگردد.
- کاهش قطر پروانه به طوری که شیر کنترل فرآیند پایین‌دست در زمان عملیات در موقعیتی عمدتاً باز اما همچنان قابل کنترل قرار گیرد.

- بررسی شود که پمپ‌ها در جهت صحیح دوران می‌کنند، این جهت بر روی محفظهٔ پمپ با فلش نشان داده شده است.
- تمیز کردن صافی پشت موتور باعث خنک‌تر شدن و بهینه‌شدن موتور می‌شود.
- اگر پمپ‌ها مطابق با منحنی عملکرد خود کار می‌کنند (هنگامی که با افزایش دور، فشار خروجی تغییر چندانی نمی‌کند) پمپ‌های یدکی را راه‌اندازی نکنید.

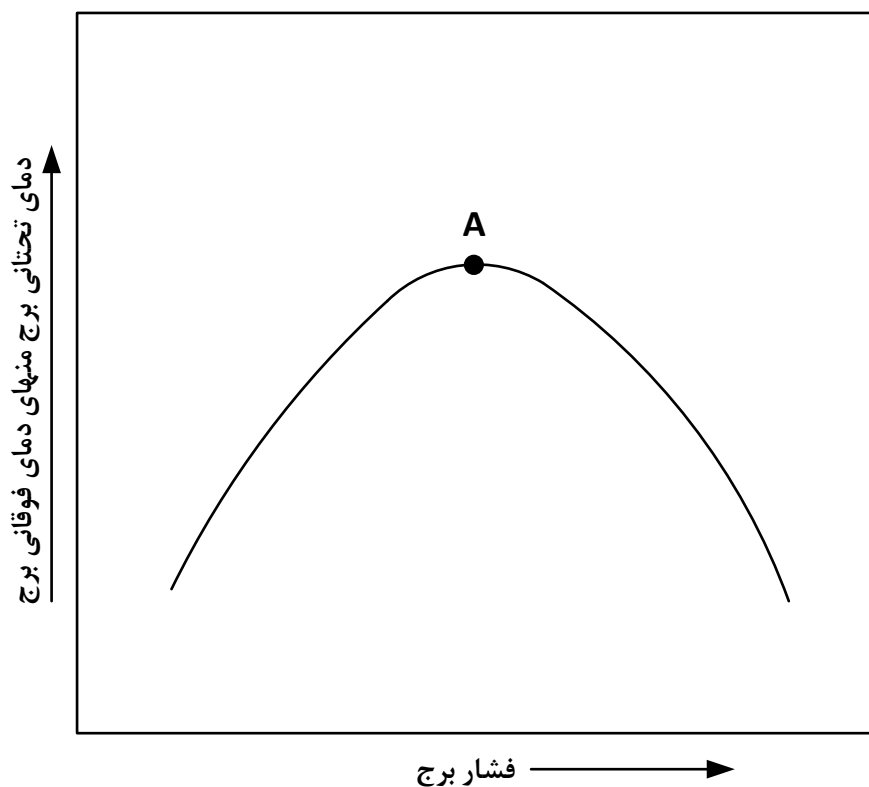


شکل ۴۸-۲ یک پمپ گریز از مرکز.

• فشار برج تقطیر

- برج‌ها در حداقل فشار عملیاتی کار کنند، به شرط این که برج طغیان نکند و امکان میعان محصولات بالای برج فراهم باشد. کاهش فشار برج، اختلاف فراریت نسبی بین اجزای سبک و سنگین را افزایش می‌دهد.
- در نرخ رفلکس ثابت، کاهش فشار برج باعث بیشینه‌سازی اختلاف دمای بالا و پایین برج می‌شود (شکل ۴۸-۳).

- برخی برج‌ها در در فشار کمتر، جداسازی بهتری انجام می‌دهند؛ زیرا سرعت بخار افزایش پیدا می‌کند و پدیده شرشر کردن^۱ و چکه کردن^۲ کمتر اتفاق می‌افتد.
- بهبود راندمانی جداسازی منجر به کاهش نرخ رفلاکس بالای برج نیز می‌شود. از آنجا که رفلاکس از ریپویلر نشأت می‌گیرد، این امر باعث کاهش گرمای ورودی به ریپویلر و متعاقباً صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود.



شکل ۴۸-۳ نقطه A فشار بهینه برج را نشان می‌دهد.

^۱ Dumping: شرشر کردن، هرگاه شدت گاز فوق‌العاده کم باشد، کل مایع روی سینی از منافذ به پایین می‌ریزد و مایعی به محل ریزش نمی‌رسد (ناودان‌ها).
به این پدیده دامپینگ می‌گویند.

^۲ Weeping: در صورتی که شدت گاز خیلی کم باشد، قسمت اعظم مایع ممکن است از منافذ سینی به پایین چکه کند و لذا جریان کاملی از مایع در سراسر سینی وجود نخواهد داشت. پدیده چکه کردن، اصولاً در سینی‌های دریچه‌ای بوجود نمی‌آید، حتی اگر دبی گاز خیلی کم شود، دریچه‌ها بسته شده و مانع از ریزش مایع به پایین می‌گردد. ولی در سینی‌های مشبک اگر قطر سوراخ‌ها بزرگتر از حد لازم انتخاب گردد، پدیده ویپینگ بیشتر صورت خواهد گرفت.

راندمان سینی برج تقطیر

صفحه سینی‌ها و بندها باید تراز باشند. ناترازی کف سینی باعث تشدید پدیدهٔ چکه کردن می‌شود. هنگامی که بخار از نقطه بالای صفحهٔ سینی جریان پیدا می‌کند و مایع از نقطه فرو رفته صفحه سینی، چکه می‌کند، در نهایت آبراهه‌شدن^۱ مایع و بخار رخ می‌دهد (شکل ۴۸-۴). این اتفاق باعث کاهش سطح تماس موثر سینی می‌شود که نتیجهٔ آن رفلاکس بیشتر و افزایش بار حرارتی ریپویلر است. یکی از راه‌های جلوگیری از این مشکل، استفاده از سینی‌های کلاهکی^۲ قدیمی است. سینی‌های کلاهکی در صورتی که از نظر مکانیکی دست نخورده باشند، امکان نشتی ندارند.

بندها حتماً باید تراز باشند. اگر ارتفاع سرریز مایع از ناترازی بند کمتر باشد، سبب آبراهه شدن مایع از بینی سینی شده و قسمت‌های زیادی از سینی خشک می‌ماند. قسمت‌های خشک و راکد سینی به راندمانی تفکیک کمکی نمی‌کند. بخار به راحتی از بین لایه‌های راکد مایع می‌گذرد؛ بدون اینکه تغییری در ترکیبش ایجاد شود. هرچند بهتر است که بندها تراز باشند؛ اما من پیشنهاد می‌کنم هنگامی که دبی عبوری از روی بند کم است، از بندهای نرده‌ای^۳ استفاده شود. زیرا بندهای نرده‌ای مایع را به صورت یکنواخت و با سرریز بیشتری از روی بند عبور می‌دهند. این عمل تا حد زیادی مناطق راکد بلااستفاده روی سینی را کم می‌کند.

مطالب زیادی توسط تولیدکنندگان در مورد طراحی‌های جدید سینی‌ها وجود دارد که راندمان جداسازی سینی را افزایش می‌دهند اما بیشتر این مطالب بیهوده هستند. پاسخ اصلی برای افزایش راندمان سینی استفاده از سینی‌های کلاهکی یا بندهای نرده‌ای، هم‌چنین تراز کردن بند و صفحه سینی است.

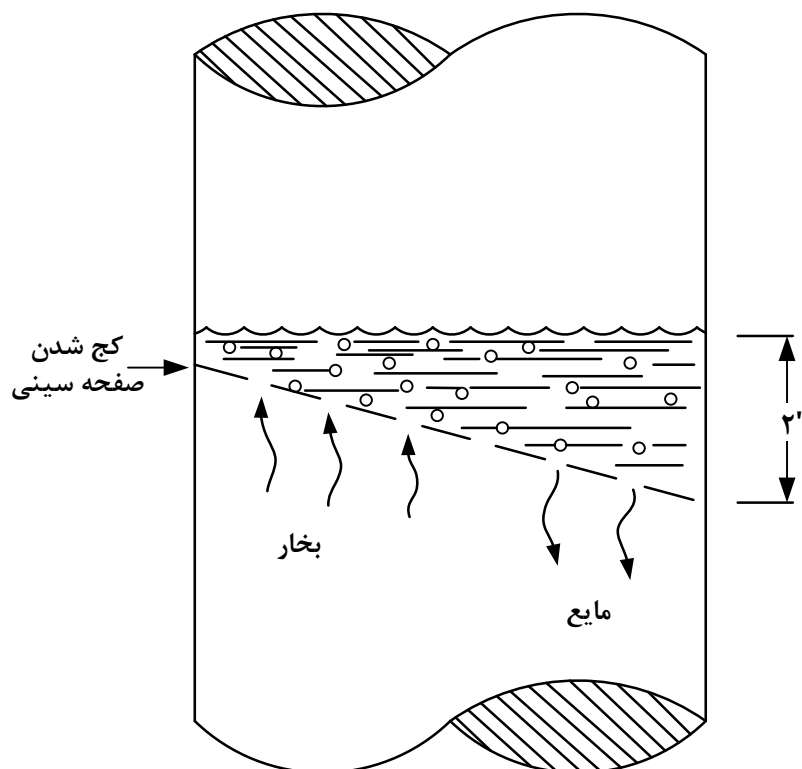
طراحی مبدل حرارتی

به نظر می‌رسد جدیدترین و بهترین فناوری موجود در زمینه مبدل‌های حرارتی، استفاده از بافل‌های نگهدارندهٔ لولهٔ مارپیچی باشد (شکل ۴۸-۵). این بافل‌ها باعث ایجاد چرخش یک جریان مارپیچی در سمت پوسته می‌شوند. هرچند اگر بخواهیم مبدل‌های جدیدی بخریم، انتخاب مبدلی بزرگ‌تر برای افزایش بازیابی گرما، مقرون به صرفه‌تر است؛ اما برای اصلاح یک مبدل موجود، استفاده از بافل‌های نگهدارندهٔ لولهٔ مارپیچی جهت افزایش بازیابی حرارت بهتر خواهد بود.

^۱ Channeling: آبراهه‌سازی

^۲ Bubble Cap Trays: سینی‌های کلاهکی

^۳ Picket weir: بند نرده‌ای



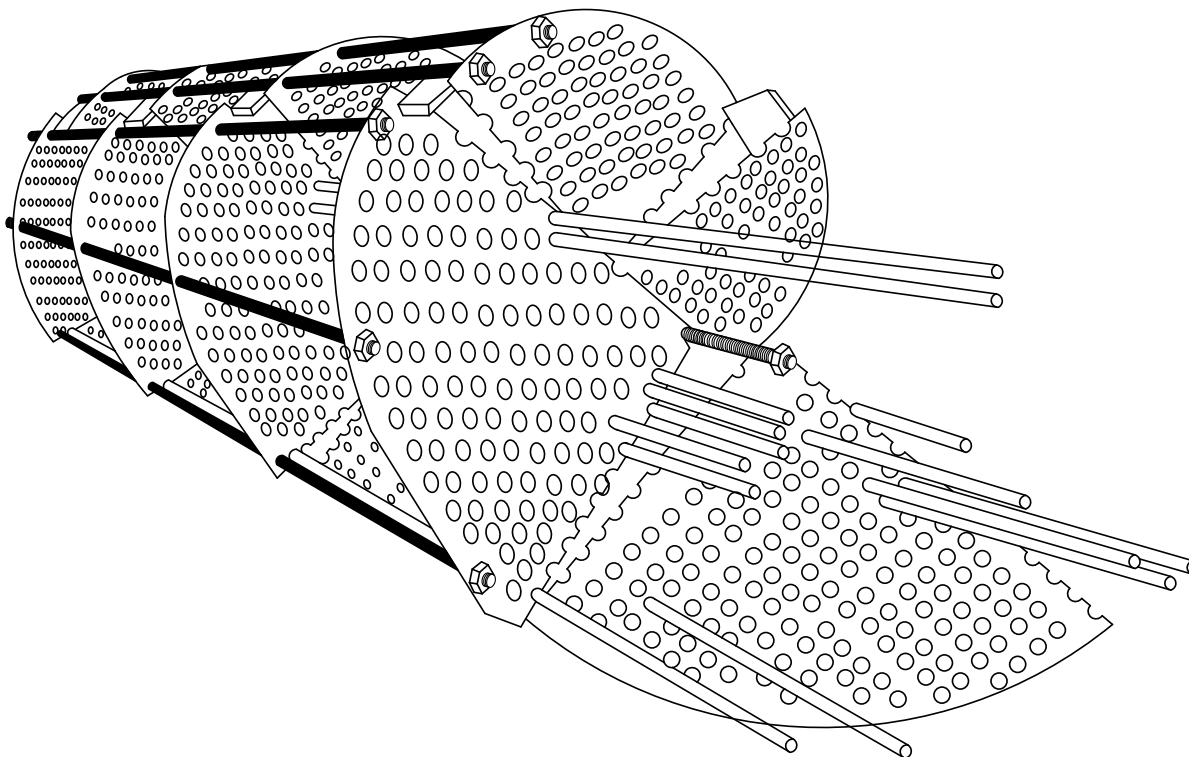
شکل ۴-۴۸ سینی‌های ناتراز سبب کاهش راندمان سینی می‌شود.

اگر مقاومت کنترل‌کننده انتقال حرارت در سمت لوله‌ها باشد (که معمولاً نیز هست)، بافل‌های حلزونی کمک زیادی به افزایش بازیابی حرارتی نمی‌کنند. اگر مقاومت اصلی انتقال حرارت در سمت لوله باشد، آنگاه الحاق لوله‌ها به فرم فنر (که توسط بعضی از مشتری‌های من استفاده شده‌اند)، موفقیت‌آمیز خواهند بود. من به‌شخصه هیچ‌وقت از این فنرهای داخلی که باعث ایجاد آشفته‌گی در داخل لوله‌های مبدل می‌شود، استفاده نکرده‌ام. در کل، استفاده از بافل‌های حلزونی برای افزایش راندمانی انتقال حرارت در فرآیند و صنعت پالایشی، رایج‌تر از الحاق لوله و استفاده از لوله‌های پیچ خورده است.

در مبدل‌های پوسته و لوله، بهترین راه برای حفظ بازیابی گرما در سطحی مناسب (برای مایعات)، افزایش سرعت است. برای مثال:

- **سمت پوسته** - سرعت عرضی جریان سیال بین ۳ تا ۵ فوت بر ثانیه حفظ شود.
- **قسمت لوله** - سرعت خطی سیال بین ۶ تا ۱۲ فوت بر ثانیه حفظ شود. سرعت‌های بالاتر از ۱۲ فوت بر ثانیه سبب استهلاک می‌شود.

سرعت‌های بسیار پایین نیز باعث ایجاد جریان آرام و افزایش مقاومت لایه (فیلم) انتقال حرارت و رسوب‌گذاری می‌شوند.



شکل ۴۸-۵ شماتیکی که بافل‌های مارپیچی نگهدارنده لوله را در رابطه با به آرایش لوله‌ها، نشان می‌دهد.

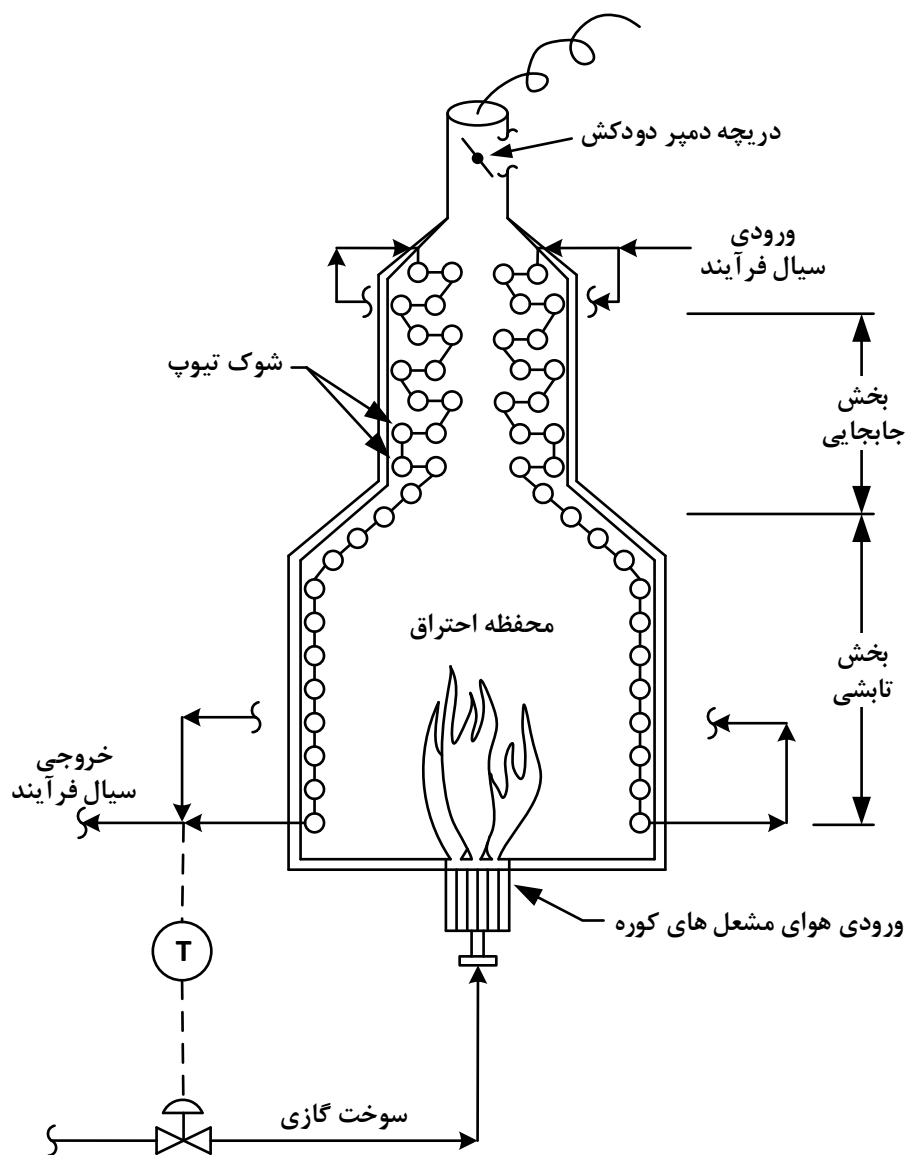
هیترهای احتراقی - اکسیژن اضافی

تنظیم اکسیژن اضافی مهم است. اگر هیتر با نرخ ثابت سوخت در حال بهره‌برداری است، هوای اضافی باید طوری تنظیم شود تا دمای سیال فرآیندی خروجی از هیتر به حداکثر مقدار خود برسد (شکل ۴۸-۶).

اگر کوره مجهز به سیستم کنترل دمای خودکار باشد (که معمولاً اینطور است)، هوای اضافی باید طوری تنظیم شود که نرخ گاز سوختی ضمن حفظ دمای مورد نظر در خروجی هیتر، به حداقل مقدار خود برسد.

این نکته را در نظر بگیرید که من هیچ نیازی به آنالایزر (سنسورهای دقیق اندازه‌گیری مستمر) اکسیژن یا تنظیم غلظت اکسیژن اضافی در محفظه احتراق یا دودکش نمی‌بینم. برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، نیازی به استفاده از

آنالایزرهای اکسیژن اضافی نیست. هنگامی که من اکسیژن اضافی را با استفاده از دمپر دودکش یا ورودی‌های هوای^۱ مشعل تنظیم می‌کنم، از آنالایزر اکسیژن استفاده نمی‌کنم و نیازی هم به آن ندارم.



شکل ۴۸-۶ یک نوع متداول از هیتر فرآیندی احتراق گازی با مکش طبیعی.

نشت هوای سرگردان^۲ - ناحیه تشعشعی

مکش هوا به داخل محفظه احتراق باعث افزایش هوای احتراق ورودی می‌شود. هوای سرگردانی که به داخل نشت پیدا کرده، به خوبی با سوخت مخلوط نمی‌شود. این اختلال در اختلاط بهینه سوخت و هوا سبب می‌شود تا O_2

^۱ Air register: ورودی هوا

^۲ Tramp Air: هوای سرگردان، هوایی که به صورت اتفاقی وارد محفظه احتراق می‌شود؛ اما نه از طریق شعله‌ها

بیشتری برای احتراق کامل نیاز داشته باشیم. رایج‌ترین منبع نشت هوای سرگردان به ناحیهٔ تشعشعی، مربوط به ورودی‌های معیوب هوای ثانویه به مشعل‌هاست که در سرویس نیستند. افتادن درگاه‌های بازرسی نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل بالقوهٔ کاهش راندمان اختلاط سوخت و هوا باشد.

هوای احتراق بیشتر، به معنای افزایش گاز دودکش است که عامل اصلی اتلاف حرارتی در یک هیتر را به خود اختصاص می‌دهد.

نشت هوای سرگردان به ناحیهٔ جابجایی

هوای سرد محیط باعث کاهش بازیابی حرارت در ناحیهٔ جابجایی کوره می‌شود. این اتفاق به دلیل موارد زیر رخ می‌دهد:

- مکش بیش از حد کوره؛

- نشت هوای سرگردان به ناحیهٔ جابجایی.

مقدار منطقی مکش در بخش پایینی ناحیهٔ جابجایی، حدود ۰/۰۵ اینچ آب است. اما این عدد فقط در مناطقی قابل قبول است که باد در قسمت بالایی دودکش نمی‌وزد. من در برخی مناطق شاهد آن بوده‌ام که وزش باد متوسط، مکش را تا حدود ۰/۲ اینچ آب افزایش می‌دهد. مشکل اینجاست! اگر شما با حداقل مکش (۰/۰۵ اینچ آب) در حال عملیات باشید و وزش باد متوقف شود، فشار نسبی محفظهٔ احتراق، مثبت خواهد شد. گاز دودکش داغ که حاوی مقادیر زیادی SO_2 (گاز سمی) است، می‌تواند از قسمت‌های بالای محفظه احتراق به بیرون نشت کند. این اتفاق یکبار برای من در اروپا در یک نیروگاه ساحلی رخ داد و تجربهٔ وحشتناکی بود.

شاید حداقل مکش ایمن در مناطق بادخیز، ۰/۱۵-۰/۲۰ اینچ آب باشد.

کاهش مکش معمولاً با ایجاد خفگی در دمپر دودکش صورت می‌گیرد. من اخیراً در پالایشگاه CVR در کانزاس^۱ کار می‌کردم و مصرف سوخت را در هیتر مکش طبیعی نفت خام آن‌ها، حدود ۲٪ کاهش دادم. مسلماً مقدار زیادی نیست اما فقط چند ساعت طول کشید. بستن بیش از حد دمپر می‌تواند باعث ایجاد فشار مثبت شود که خطرناک است.

^۱ کانزاس: Kansas

پیدا کردن نشتی‌های هوای سرگردان به هیتر

من دو راه برای پیدا کردن نشتی هوای سرگردان، در بخش جابجایی یک هیتر مکش طبیعی، دارم. هنگامی که هیتر روشن است، از یک پارچه ابریشمی استفاده می‌کنم تا ببینم کدام موقعیت در ناحیه جابجایی هیتر پارچه را جذب می‌کنند. در هنگام انجام تعمیرات، یک تایلر کهنه را آتش زده یا بمب‌های رنگی را داخل محفظه احتراق انداخته و دمپر دود کش را می‌بندم. سپس نشتی‌های ناحیه جابجایی نمایان می‌شوند. تعمیر نشتی‌ها آسان است و با استفاده از یک رول آلومینیم یا گل‌های عایق انجام می‌شود. انتظار بهبود چشمگیر راندمان را نداشته باشید. راندمان فقط ۱ تا ۲٪ افزایش خواهد یافت.

البته تمام محفظه‌های جابجایی نشتی ندارند. در بازرسی‌ای که از یک هیتر جدید داشتم، درصد اکسیژن در بالا و پایین دسته لوله‌های ناحیه جابجایی، ۲٪ بود. اما برای هیترهای قدیمی میزان اکسیژن در بالای لوله‌های جابجایی به دلیل نشت هوای محیط، معمولاً ۱ تا ۴٪ بیشتر از گاز دودکش است که ناحیه تشعشعی را ترک می‌کند. تا وقتی که میزان اکسیژن را در بالا و پایین دسته لوله‌های ناحیه جابجایی اندازه‌گیری نکنید، هیچگاه نمی‌توانید میزان صرفه‌جویی انرژی به ازای تعمیر نشتی‌های ناحیه جابجایی را تشخیص دهید.

سیستم‌های خلأ

یک بار زمانی که داشتم در پالایشگاهی در کالیفرنیا ارائه می‌دادم و سعی داشتم تا ایده‌هایم را به‌عنوان یک متخصص زمینه انرژی بفروشم، متوجه شدم که کسی به حرفم گوش نمی‌دهد. بنابراین گفتم: «ببینید الان من رو به هر جای پالایشگاه ببرید در کمتر از ۲۰ دقیقه مصرف انرژی رو کاهش میدم.»

آقای هنری، مدیریت آموزش، من را به برج خلأ روغن روان‌کننده برد. من از اپراتور اتاق کنترل پرسیدم که آیا مشکلی در کنترل در برج دارید یا نه (شکل ۴۸-۷)؟

«بله لیبرمن، سیستم کنترل فشار خلأ بیش از حد باز است. شیر کنترل پس‌ریزش^۱ نمی‌تواند فشار برج را در حالتی که شیر زیاد باز است، تنظیم کند. شیر باید ۵۰٪ باز باشد نه ۹۰٪ تا بتوانیم کنترل خوبی داشته باشیم.»

^۱ برگشتی یا پس‌ریزش: Spillback

برای حل موضوع من بالای سه عدد جت بخار آب اولیه رفتیم و سمت بخار آب و فرآیند جت وسطی را مسدود کردم. مصرف بخار به یک سوم کاهش یافت (۱۲۰۰۰ lb/hr بخار با فشار ۴۵۰ psig) و شیر کنترل فشار پس‌ریزش تا مقدار بهینه ۳۰٪ بسته شد.

«ببینید آقای هنری! من الان ۱۲۰۰۰ lb/hr بخار برای شما صرفه جویی کردم.»

اما آقای هنری تحت تاثیر قرار نگرفت. «خب که چی آقای لیبرمن؟ هرکسی میتواند این کار را بکند، ما نیازی به یک متخصص نداریم تا شیر بخار آب اژکتور را برایمان ببندد.»

و همین! آقایان و خانم‌ها نکته همین است. هرکسی می‌تواند این اقدامات را انجام دهد تا در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند. اگر از دفتر خود بیرون بروند و از کامپیوترها فاصله بگیرند و با اپراتورهای واحدها کار کنند.

آسان‌ترین راه برای ۱۰-۳۰٪ صرفه‌جویی انرژی در اژکتورها، ایجاد افت فشار در بخار آب محرکه است. فشار بیش از حد بخار (یعنی بالاتر از مقدار طراحی، نسبت تراکمی که اژکتور می‌تواند ایجاد کند را کاهش می‌دهد. همچنین کاهش فشار بخار آب محرکه به صورت خطی با کاهش دبی بخار آب محرکه رابطه دارد. بنابراین اگر فشار بخار آب را از ۱۵۰ به ۱۲۰ psia کاهش دهیم، حدود ۲۰٪ در بخار آب مصرفی اژکتور صرفه‌جویی خواهیم کرد. بیشتر اژکتورهایی که من با آن‌ها سرو کار داشتم از گرفتگی کندانسورهای پائین دستی و یا خرابی نازل‌های بخار آب رنج می‌برند. برای این جت‌ها، مقدار فشار بخار آب بهینه معمولاً ۱۰-۵۰٪ کمتر از بخار آب محرکه‌ای است که سازنده پیشنهاد می‌دهد.

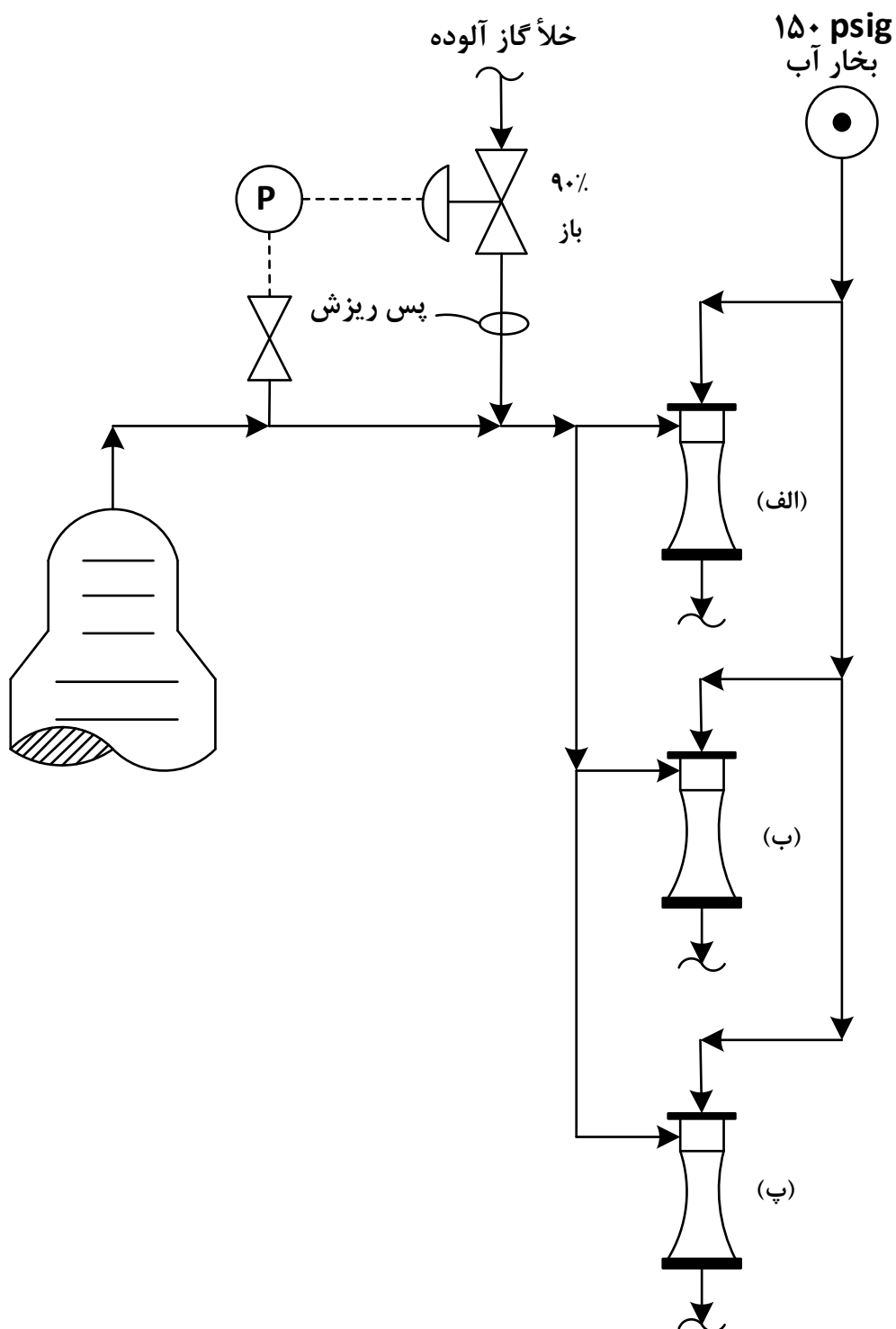
خنک‌کن‌های هوایی

کولرهای هوایی پره‌دار باید برای بدترین شرایط عملیاتی (گرم‌ترین روزهای تابستان) طراحی شوند. بنابراین در اغلب روزهای سال، بیشتر واحدها ظرفیت سرمایش اضافی دارند. برای کاهش این ظرفیت اضافی، بیشتر کولرها دارای شیارهایی در بالای دسته لوله هستند. این شیارها بسته می‌شوند تا از عبور هوای اضافی جلوگیری کنند. هرچند روش‌های بهینه‌تری برای کاهش دبی هوا وجود دارد. یکی از این روش‌ها کاهش زاویه گام تیغه^۱ فن^۱ است. من فقط یک بار این کار را در واحد ساسول^۲ در آفریقای جنوبی انجام دادم. من زاویه گام پره‌ها را از ۲۵-۲۰ درجه به ۱۵-۱۰ درجه کاهش دادم. من توانستم این کار را فقط تا دقت ۵ درجه انجام دهم. باید دو مهره روی هر تیغه

^۱ blade angle pitch: گام یا زاویه تیغه فن

^۲ Sasol: ساسول

باز شود. نتیجه اندک بود. فقط ۱۲٪ کاهش در بار الکتریکی مصرفی موتور AC مشاهده شد. اما فقط ۱ ساعت زمان نیاز داشت.



بنابراین نسبت تراکم کمپرسور، با افزایش وزن مولکولی گاز خوراک، افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه یا فشار خروجی افزایش پیدا می‌کند یا فشار ورودی کاهش می‌یابد. در هر دو حالت، اپراتور مجبور است سرعت کمپرسور را کم کند تا نسبت تراکم را حفظ کند.

فرض کنیم که کمپرسور با یک موتور محرکه دور-ثابت، سه فاز جریان AC کار می‌کند. حالا چه می‌شود؟

پاسخ عملیاتی رایج، بازکردن شیر کنترل پس‌ریزش^۱ است (شکل ۴۸-۸). این روش به خوبی جواب می‌دهد؛ اما گاز برگشتی باید دوباره فشرده شود که باعث هدررفت انرژی می‌شود. یک کار بهینه‌تر برای مقابله با افزایش وزن مولکولی، محدود کردن فشار ورودی کمپرسور است. شاید عجیب به نظر برسد اما کنترل فشار ورودی کمپرسور، راه‌کار بهینه‌تری نسبت به بازگرداندن گاز به ورودی کمپرسور، برای کنترل ΔP کمپرسور گریز از مرکز دور-ثابت است. خودتان امتحان کنید. شیر کنترل فشار برگشتی را در حد چند psi، محدود کنید. شیر پس‌ریزش، بسته خواهد شد. مشاهده خواهید کرد که بار آمپر موتور محرکه شما، کم خواهد شد. اما شیر برگشتی را بیش از حد محدود نکنید. زیرا ممکن است کمپرسور وارد سرج شود و روتور آسیب ببیند.

رابطه میان انرژی موردنیاز برای در سرویس قرار گرفتن کمپرسور دور-ثابت، عملکرد شیر کنترل فشار^۲ ورودی و شیر جریان برگشتی (پس‌ریزش) و سرج، موضوع پیچیده‌ای است. من این روابط را با جزئیات در کتابم (عیب‌یابی عملیات فرآیند، ویرایش چهارم، انتشارات پن ول) توضیح داده‌ام.

کمپرسورهای رفت و برگشتی

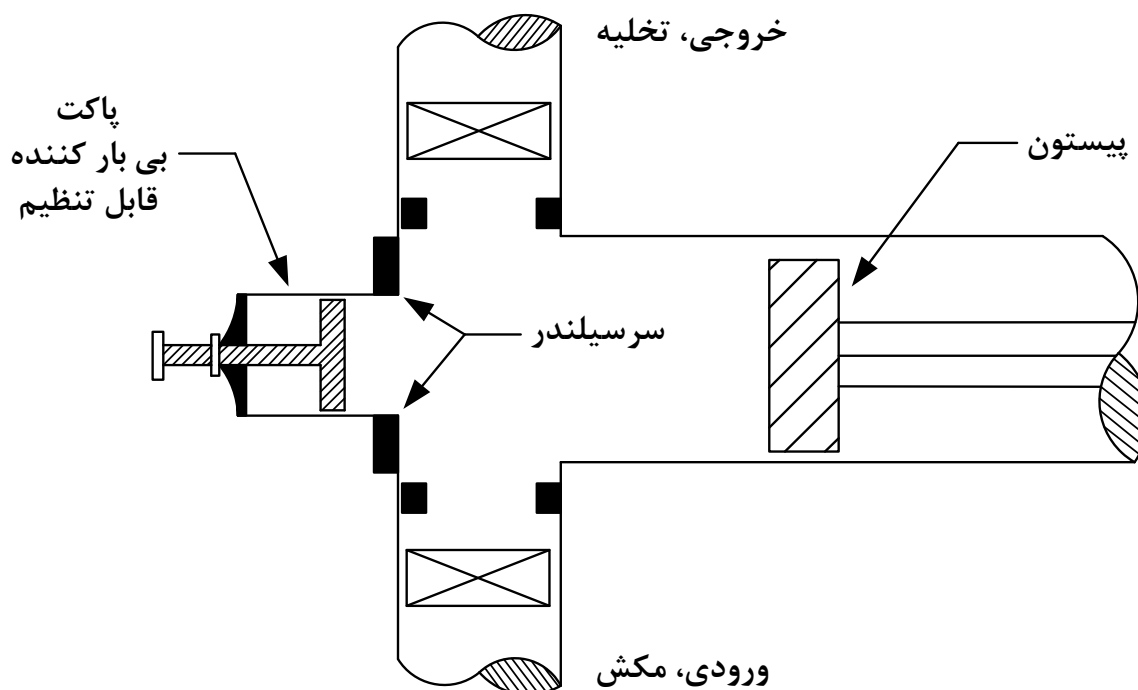
بهینه‌ترین روش برای کنترل جریان عبوری از یک کمپرسور رفت و برگشتی، بازکردن پاکت بی‌بارکننده سرسیلندر^۳ است. این قسمت، چرخه بزرگ، در انتهای هر سیلندر تراکم است. معمولاً این چرخه، به دلیل عدم استفاده، به راحتی قابل استفاده نیست و شما احتیاج به یک آچار مخصوص ولو(اف) بزرگ خواهید داشت. بازکردن کامل بی‌بارکننده سرسیلندر، دبی گاز را حداکثر تا ۲۵٪ کاهش می‌دهد (شکل ۴۸-۹). کاهش جریان خالص گاز از طریق بازکردن شیر برگشتی خروجی به ورودی کمپرسور رفت و برگشتی، سبب هدررفت انرژی تراکم می‌شود. استفاده از ناتوان‌ساز ولو (واقعاً سوپاپ سیلندر کمپرسور را از کار می‌اندازد) به اندازه بازکردن شیر پس‌ریزش، بد نیست؛ اما به اندازه

^۱ پس‌ریزش: Spill-Back

^۲ Throttle valve: شیر گلویی، شیرهایی هستند که برای عبور سیال از یک جهت باعث کاهش فشار می‌شود و اگر سیال بخواهد از جهت مخالف جریان یابد فشار بدون تغییر باقی می‌ماند.

^۳ پاکت بی‌بارکننده سرسیلندر: Head-end unloader pocket

استفاده از پاکت بی بار کننده سرسیلندر نیز، موثر نیست. باز کردن این پاکت، چند دقیقه زمان می برد و تا ۲۵ درصد در مصرف انرژی تراکم (که از طریق شیر برگشتی خروجی به ورودی هدر می رود)، صرفه جویی می کند.



شکل ۴۸-۹ یک پاکت بی بار کننده، بار آمپر موتور و ظرفیت حجمی را کاهش می دهد.

گسترش آینده بشر بر روی سیاره زمین

تصور می کنم که تمامی خواندگان من، به گرمایش جهانی اعتقاد دارند. این مشکل به سرعت دارد از کنترل خارج می شود. من به عنوان جمع بندی، ایده هایی را فهرست کردم که می توانید برای کاهش انتشار CO₂ استفاده کنید:

۱. تراز کردن صفحه سینی در برج
۲. استفاده از بندهای نرده ای
۳. بهینه سازی فشار در برج های تقطیر
۴. مبدل های حرارتی - سمت پوسته
۵. مبدل های حرارتی - سمت لوله
۶. هیترهای احتراقی

۷. توربین‌های بخار آب- استخراجی^۱

۸. توربین‌های بخار آب- میعانی

۹. پمپ‌های گریز از مرکز محرکه موتوری

۱۰. کمپرسورهای گریز از مرکز سرعت ثابت

۱۱. کمپرسورهای رفت و برگشتی سرعت ثابت

۱۲. بازیابی میعانات بخار آب

تراز بودن کف سینی‌ها

سینی‌های معمولی، شبکه‌ای و غربالی در نقاط فرو رفته سینی، نشتی دارند. از طرف دیگر، بخار از مسیری که کمترین مقاومت را دارد، عبور می‌کند و از نقاط بالایی سینی جریان پیدا می‌کند. نتیجه، آبراهه‌شدن بخار و مایع و کاهش راندمان تفکیک سینی است.

برای بهبود جداسازی، اپراتور نرخ رفلکس را افزایش می‌دهد که نیاز به گرمای بیشتری در ریبویلر دارد. در نتیجه این گرمای بیشتر از واحد بخار آب تأمین می‌شود که باعث هدررفت انرژی می‌شود.

تراز کردن سطح سینی‌های برج باعث عملکرد بهتر سینی‌ها و صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود. به‌خصوص در زمان‌هایی که ظرفیت برج کمتر است و یا زمانی که مسیر طول گذر بر روی سینی زیاد است.

استفاده از بندهای نرده‌ای

استفاده از بندهای نرده‌ای یا بندهای دندان‌دار^۲ در شرایط زیر لازم نیست:

- بندها تراز باشند؛
- اگر بار (لود) روی بند ۴-GMP ۶ به ازای هر اینچ طول بند باشد.

^۱ Topping steam turbine: توربین بخار آب استخراجی

^۲ Notched weirs: بندهای دندان‌دار

در غیر این صورت، استفاده از بندهای نرده‌ای برای افزایش بار بند به $10-GMP-4$ در هر اینچ، باعث افزایش راندمان تفکیک سینی می‌شود.

اما چرا؟

اگر ارتفاع سرریز مایع^۱ (ارتفاع مایع از بالای بند) در سمت چپ سینی، صفر یا خیلی کوچک باشد، تمام مایع به سمت راست سینی جریان پیدا می‌کند و مایع سمت چپ سینی راکد می‌شود.

مایعی که راکد باشد نمی‌تواند ترکیبات بخار بالارونده را تغییر دهد (انتقال جرم)؛ در نتیجه، راندمان سینی کاهش می‌یابد و کاهش راندمان فقط می‌تواند از طریق افزایش رفلاکس و بار حرارتی ریویلر جبران شود. کدام یک انرژی را تلف می‌کند.

بهینه‌سازی فشار در برج‌های تقطیر

کاهش فشار برج، اختلاف فشاربخار^۲ بین هیدروکربن‌ها را کاهش می‌دهد. در نتیجه کاهش فشار، فراریت نسبی را افزایش می‌دهد. هرچه فراریت نسبی بیشتر باشد، نرخ رفلاکس و بار حرارتی ریویلر کمتری برای جداسازی نیاز است. هر چند کاهش بیش از اندازه فشار برج، باعث افزایش ماندگی مایع^۳ و در نتیجه کاهش راندمان جداسازی می‌شود.

فشار بهینه برج را می‌توان با آزمایش و بررسی عملیات برج در فشارهای مختلف تعیین کرد. هیچ راهی برای محاسبه فشار بهینه یک برج در واحدی آماده وجود ندارد. فشار برج به عوامل زیر بستگی دارد:

- ترازبودن سطح سینی‌ها

- ترازبودن بندها

- میزان غیرایده‌آل بودن اجزای کلیدی

معمولاً در دبی‌های پایین‌تر، کاهش فشار عملیاتی، عملکرد برج را بهینه خواهد کرد.

مبدل‌های حرارتی – سمت پوسته

^۱ Crest Height: ارتفاع سرریز مایع

^۲ Vapor pressure: فشار بخار

^۳ Entrainment: ماندگی مایع

بهترین انتقال حرارت زمانی حاصل می‌شود که سیال ویسکوزتر (نفت خام سرد یا قیر) در سمت پوسته باشد. برای بهبود امکان تمیزکردن سمت پوسته در مبدل‌های قیر یا آسفالت، از موارد زیر بهره ببرید:

- لوله‌های ۱ اینچی
- فاصله ۱/۵ اینچی بین لوله‌ها
- آرایش مربعی دوران‌یافته
- لوله‌هایی از جنس فولاد ضدزنگ ۳۱۶

این موارد، یک فاصله نیم اینچی را به وجود می‌آورند که امکان شست‌شو با آب را در هنگام انجام تعمیرات، فراهم می‌کند. فضای بین لوله‌ها را که توسط بافل‌های جداکننده مسیر^۱ در سمت کلاhek مجاری ایجاد شده، به وسیله لوله‌های کمکی پر کنید. این کار، تنها در صورتی لازم است که در سمت پوسته، برش بافل نگهدارنده لوله^۲ عمود بر بافل‌های جداکننده مسیر باشد.

مطمئن شوید نوارهای آب‌بندی که باعث جلوگیری از کنارگذردن پوسته در امتداد فاصله ایجادشده توسط صفحه فداشونده (ضربه‌گیر)^۳ جریان ورودی در بالای پوسته می‌شود، وجود داشته باشند. زیرا این نوارهای آب بند معمولاً در زمان تعمیرات و هنگامی که دسته لوله‌ها را خارج می‌کنند، گم می‌شوند.

مبدل حرارتی – سمت لوله

سرعت جریان سمت لوله باید بین ۶ تا ۱۲ فوت برثانیه حفظ شود. بالاتر از ۱۲ ft/s فرسایش رخ می‌دهد.

در هنگام انجام تعمیرات، مطمئن شوید که بافل‌های جداکننده گذر کلاhek مجاری به صورت محکم به واشر صفحه لوله کلاhek مجاری چفت شده باشند. پوسته محافظ کلاhek مجاری را بردارید تا از این مسئله مطمئن شوید. حتی یک فاصله کوچک باعث یک جریان کنارگذر بزرگ می‌شود.

لوله‌هایی با آلیاژ قوی نسبت به لوله‌های فولاد کربنی، مقاومت بیشتری در برابر رسوب‌گذاری دارند. اما از لوله‌های فولاد ضدزنگ ۳۱۶ با بافل‌های نگهدارنده فولاد کربنی استفاده نکنید. زیرا باعث خوردگی گالوانیک بافل‌ها می‌شود.

^۱ Pass Partition Baffle: بافل جداکننده گذرها

^۲ Tube support baffle cut: برش بافل نگهدارنده تیوب

^۳ Impingement plate: صفحه فداشونده، صفحه ضربه‌گیر، صفحه تصادم

من هیچ وقت از پرکن لوله استفاده نکردم. این پرکن ها در ابتدا بسیار خوب هستند، اما تمیزکاری تیوب ها در هنگام انجام تعمیرات راه دشوار می سازد. لوله های پیچ خورده، تمیزکاری سمت پوسته را با مشکل مواجه می کنند. از طرفی بافل های حلزونی به خوبی کار می کنند اما گران هستند و در صورتی که مقاومت کنترل کننده انتقال حرارت در سمت پوسته باشد، موثر هستند.

هیت رهای احتراقی (کوره ها)

استفاده کردن از آنالایزر (تحلیل گر) O_2 اضافی به تنهایی، اتلاف زمان و هزینه است. امروزه اکسان^۱ از ترکیب زیر استفاده می کند:

۱. آنالایزر O_2 در ناحیه تشعشعی (نه در دودکش)

۲. آنالایزر احتراق (CH_4 , CO ، متانول و ...) در ناحیه تشعشعی

این دو آنالایزر به کامپیوتری که هوای احتراق را کنترل می کند، متصل هستند. من تجربه ای با این سیستم نسبتاً جدید ندارم. اما از چند تن از دانشجوهای اکسانم شنیده ام که خیلی خوب کار می کند.

همیشه نشت هوای سرگردان در ناحیه جابجایی راه، به حداقل برسانید؛ یا با کمینه سازی ورودی ($0.5/-0.10$ اینچ) در بالای لوله های سقف ناحیه تشعشعی یا با یافتن و تعمیر نشتی هوای سرگردان موجود در بخش های بیرونی ناحیه جابجایی.

تمام نواحی جابجایی پس از انجام تعمیرات اولیه واحد، نشتی دارند. افزایش قابل قبول O_2 بین خروجی محفظه تشعشعی و ورودی ناحیه جابجایی حدود 0.5% است. 2% افزایش اکسیژن، زیاد است و باعث هدررفت انرژی می شود؛ زیرا نشت هوای سرگردان، گاز دودکش را در ناحیه جابجایی سرد می کند.

توربین های بخار استخراجی^۲

خروجی توربین ها به اتمسفر یا به بخار آب کم فشار (هنگامی که بخار آب کم فشار بیش از حد باشد)، اکثر اوقات بهینه نیست. برای $30 - 50\%$ صرفه جویی در بخار آب محرکه:

^۱ Exxon: اکسان

^۲ Steam Turbines-Topping: توربین های بخار - استخراجی

- **گام اول** - سرعت توربین را تا زمانی که شیر کنترل فرآیند پمپ در موقعیت عمدتاً باز قرار گیرد، با استفاده از کنترل‌کننده سرعت گاورنر کم کنید (نه با استفاده از شیر دروازه‌ای^۱ ورودی بخار آب).
 - **گام دوم** - شیرهای اسب بخار را ببندید (معمولاً دو یا سه عدد در دسترس هستند). این کار را یکی یکی انجام دهید تا زمانی که شیر گاورنر در موقعیت کاملاً باز قرار بگیرد. در واقع شما نمی‌توانید موقعیت گاورنر را ببینید، اما اگر فشار محفظه بخار آب توربین بین ۱۰-۲۰ psi فشار خط ورودی بخار آب است، گاورنر معمولاً ۱۰۰٪ باز خواهد بود.
- اگر شما شیر اسب بخار در توربین خود ندارید:
- **گزینه اول** - محفظه بخار آب توربین را کامل باز کنید و یک یا چند پورت را مسدود کنید.
 - **گزینه دوم** - نازل‌های بخار آب کوچک‌تر ببندید. این کار ساده است و در یک شیفت توسط افراد ماشین‌کار انجام می‌شود.

توربین‌های بخار

توربین‌هایی که خروجی آن‌ها به کندانسورهای سطحی خلأ متصل هستند، با کاهش فشار در کندانسور سطحی، موقعیت بسیار خوبی برای صرفه‌جویی انرژی دارند. برای مثال بیایید در نظر بگیریم:

بخار آب محرکه: ۲۰۰ psig

فشار خروجی توربین: ۲۲ in. of Hg (۲۰۰ mm Hg)

اگر بتوانیم فشار بخار آب خروجی توربین را به ۱۰۰ mmHg کاهش دهیم، مصرف بخار آب ممکن است بین ۱۰-۱۵٪ کاهش یابد. پیشنهاد می‌کنم که خواننده به نمودار مولیر خود مراجعه کند و انبساط را آنتروپی‌ثابت در نظر بگیرد.

برای تعیین ابزار و روش‌های بهبود خلأ، به کتاب من یعنی «عیب‌یابی سیستم‌های خلأ، انتشارات ویلی»، مراجعه کنید.

^۱ Gate valve: ولو دروازه‌ای

اضافه کردن گرمای بیش از حد به بخار آب، مصرف بخار آب را برای رسیدن توربین به یک توان ثابت، تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

موتور محرکه پمپ‌های گریز از مرکز

کاهش ساینز پروانه پمپ، روشی تاریخی برای صرفه‌جویی در توان الکتریکی موتور نیرو محرکه است. ۱۰٪ کاهش قطر پروانه می‌تواند برق مصرفی موتور را ۲۷٪ کاهش دهد.

من دیگر از این روش استفاده نمی‌کنم؛ زیرا اتلاف انرژی پارازیتی را در شیر کنترل پایین‌دست از بین نمی‌برد. باید از محرکه‌هایی با دور متغیر استفاده کنیم و تمام شیر کنترل‌های خروجی پمپ را حذف کنیم. در پالایشگاه Co-op در مونت‌ورنون^۱ ایندیانا^۲، من دیدم که از سه پمپ سری، بدون هیچ شیر کنترلی برای پمپ کردن نفت خام استفاده می‌کنند.

شیرهای کنترل، معمولاً ۱۰ تا ۵۰٪ از انرژی خروجی محرکه موتوری پمپ را هدر می‌دهند. تمام پمپ‌ها را با ساینز کامل پروانه و محرکه موتوری فرکانس متغیر، طراحی کنید و شیرهای کنترل پایین‌دست را فراموش کنید. پمپ‌های توربینی نصب‌شده در دهه ۱۹۳۰ هیچ شیر کنترلی در خروجی پمپ‌ها نداشتند. ۱۰۰ سال پیش، آن‌ها متکی به کنترل سرعت بودند؛ همانند کاری که باید الان انجام دهیم.

کمپرسورهای گریز از مرکز دور ثابت

برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی در کمپرسوری با دور متغیر، به آسانی سرعت را کم می‌کنیم. در کمپرسوری با دور ثابت، برای کاهش ظرفیت کمپرسور، اپراتور دو گزینه دارد:

۱. باز کردن مسیر برگشت کمپرسور

۲. بستن شیر کنترل فشار ورودی کمپرسور

فرض کنیم که کمپرسور در محدوده نرمال خودش کار می‌کند (در قسمت تخت منحنی مشخصه): گزینه دوم آمپر موتور محرکه را کاهش و گزینه ۱ آمپر موتور محرکه را افزایش می‌دهد.

^۱ Mount Vernon: مونت ورنون

^۲ Indiana: ایندیانا

اما گزینه دوم ما را به سرج نزدیک تر می کند (که باعث خرابی روتور می شود). گزینه اول ما را از سرج دور می کند. کاهش فشار ورودی و ورودی با استفاده از شیر کنترل فشار ورودی توان را کم می کند؛ اما این کار باید با توجه به منحنی سرج کمپرسور انجام شود.

کمپرسورهای رفت و برگشتی

برای ماشینی با سرعت متغیر، دور کمپرسور را کاهش دهید (به منظور صرفه جویی انرژی در کاهش لود). برای کمپرسورهای نیرو محرکه موتوری، باز کردن شیر برگشت خروجی به ورودی (شیر پس ریزش)، هدر دادن انرژی است. استفاده از تخلیه کننده بار برای شیر نیز بی فایده است. می توانید این موضوع را خودتان مشاهده کنید. زمانی که تخلیه بار شیر برای کاهش ظرفیت، فعال می شود، درپوش سوپاپ تخلیه داغ می شود که نشانه اتلاف کار است. برای کنترل بهینه جریان در یک کمپرسور رفت و برگشتی با دور ثابت، پیشنهاد می شود که از دهانه قابل تنظیم تخلیه بار سرسیلندر استفاده کنید. این کار، جریان گاز را بدون هدررفت انرژی کاهش می دهد. اما تمامی کمپرسورهای رفت و برگشتی این ویژگی را ندارند. اما می توانند با نصب تخلیه کننده بار، ارتقا یابند. این تخلیه کننده بار به فلنج سرسیلندر کمپرسور رفت و برگشتی پیچ و مهره می شود.

بازیابی میعانات بخار آب

در بسیاری از واحدها، میعانات بخار آب به فاضلاب فرستاده می شود. این کار یعنی هدر دادن عظیم انرژی. دلیل آن، انسداد بخار است. ۵٪ میعانات فلش ها، به بخار آب تبدیل می شوند و پس از منبسط شده و جریان را خفه می کند. برای جلوگیری از این مشکل، به جای متراکم کردن میعانات در سیستم جمع آوری میعانات، آن ها را پمپ کنید. یک راه دیگر، تزریق آب سرد به میعانات گرم است تا از تشکیل بخار آب جلوگیری کنید. البته آب سرد باید ابتدا تصفیه شده و سختی آن گرفته شود و سپس با جریان میعانات بخار آب داغ مخلوط شود. تا مجدداً قابل استفاده باشند.

من سال ها قبل از این ایده در آروبا^۱ برای جلوگیری از تشکیل بخار آب در جریان آمین تصفیه شده، برج احیاء آمین استفاده کردم و نتایج بسیار خوبی داشت.

^۱ آروبا: Aruba