

شبیه سازی کامپیوتری کاربرد پمپهای حرارتی در برجهای تقطیر

بهزاد پدرام - ریاض خراط

دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعت نفت اهواز

چکیده

با توجه به هزینه بالای تولید انرژی و گران بودن آن، همواره سعی بر این بوده است که روشهای برای کاهش مصرف انرژی در صنعت و به خصوص پتروشیمی (آنهم در برجهای تقطیر که بالاترین مصرف انرژی را در کارخانه‌های شیمیایی و پتروشیمیایی دارند) ابداع گردد. یکی از بهترین روشهای ذخیره انرژی، استفاده از پمپهای حرارتی Heat Pumps می‌باشد. در این پژوهه سعی شده است که با معرفی پمپهای حرارتی و اجزاء آنها و کاربردهای مختلف پمپهای حرارتی در صنعت از جمله کاربرد آن در برجهای تقطیر، و با استفاده از یک برنامه کامپیوتری نشان داده شود که استفاده از یک سیستم پمپ حرارتی با آرایش‌های مختلف در یک برج تقطیر، چه میزان از اتلاف انرژی جلوگیری خواهد کرد و ضمن مقایسه آن روشها با هم بهترین آرایش ممکن جهت حداقل کردن مصرف انرژی معرفی گردد. در ضمن نمودارها و جداول مختلفی در این زمینه تهیه شده است که تأثیر پمپهای حرارتی را در برجهای تقطیر نشان خواهد داد.

بعد از بررسی های آنجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش انساط ناگهانی محصولات پایین برج (Bottom Flashing) در سیستم پمپ حرارتی نسبت به سایر روشها سریعتر به سوددهی می‌رسد ولی در زمانهای بالاتر، استفاده از سیستم پمپ حرارتی دوتایی فشرده سازی بخار بالای برج (Vapor Recompression) سوددهی بیشتری دارد که در نهایت سیستم دومی مفروض بصرفه تر خواهد بود.

شده، یک کاهش ۱۰ درصدی در مقدار مصرف انرژی در برجهای تقطیر معادل صد هزار بشکه نفت در روز ارزش دارد^(۳).

هدف این مطالعه بحث راجع به کاربرد پمپ حرارتی در برج تقطیر می‌باشد ضمن اینکه بهترین آرایش پمپ حرارتی در ارتباط با برجهای تقطیر معرفی گردد و درنهایت نوشتمن یک نرم افزار کامپیوتری که سیستمهای مختلف تقطیر (همراه با پمپ حرارتی و بدون آن) را شبیه سازی نماید و آنها را باهم مقایسه نماید.

پمپ‌های حرارتی

همانطوری که در شکل ۱ نشان داده شده است یک پمپ حرارتی مرکب از یک تبخیرکننده و یک کمپرسور و یک کندانسور و یک شیر انبساط می‌باشد. سیال، مایع فراری می‌باشد که در درمای T1 و فشار P1، گرمای نهان Qe را از منبع دمای پایین گرفته و بخار می‌شود (نقطه ۲ تا ۱). سپس بخار حاصل شده بوسیله مصرف انرژی الکتریکی به یک فشار بالاتر کمپرس می‌شود (نقطه ۱ تا ۲). و بعد از درون کندانسور عبور می‌کند و گرمای نهان QC را در یک دمای بالاتر T2، و یک فشار ثابت P2 از دست می‌دهد (نقطه ۲ تا ۳). بعد از آن سیال انبساط پیدا می‌کند و به فشار اولیه اش P1 می‌رسد (نقطه ۳ تا ۴) و نهایتاً سیال به تبخیر کننده بر می‌گردد و این سیکل تکرار می‌شود. شرایط عملکرد یک پمپ حرارتی در یک نمودار انتالپی-فسار در شکل ۲ نشان داده شده است، بطوریکه نقاط ۱ تا ۴ این شکل به همان نقاط ۱ تا ۴

پمپ حرارتی که اختراع یک نوع از آن معمولاً به لرد کلوین نسبت داده می‌شود از نظر ترمودینامیکی شبیه به خنک‌کننده‌ها می‌باشد. اغلب خانه‌ها، اگذیه فروشیها و ساختمانهای تجاری در جامعه صنعتی (Air Conditioning) دارای یخچال یا واحد تهویه هوایی می‌باشد.

اختلاف اساسی بین پمپ حرارتی و یخچال در وظیفه ایست که آنها طبق نظر سازنده انجام می‌دهند، به بیان دیگر یخچال و دستگاه تهویه سرمای مفید را آیجاد می‌کنند در حالیکه پمپ حرارتی گرمای مفید را آیجاد می‌کند. یعنی در تعريف، پمپ حرارتی به سیستمی یا سیکلی اطلاق می‌شود که انرژی گرمایی را از یک منبع سردرد به منبع گرمتر براند.

مسئله آزاردهنده‌ای که در مورد قابلیت پمپ‌های حرارتی وجود داشت این بود که در دهه ۶۰ در ایالات متحده و اروپا این دستگاهها دارای هزینه بالا و اشکالات اجزائی بودند که با گذشت زمان اینگونه ابهامات نیز در مورد پمپ‌های حرارتی از بین رفت و در حال حاضر قابلیتهای آنها بسیار افزایش یافته است و خرید این گونه تجهیزات یکی از عمده ترین پارامترهای هزینه ساز در سیستم خانگی می‌باشد. از سال ۱۹۷۳ که بحران انرژی مطرح شد پمپ‌های حرارتی افزایش یافت زیرا نیاز عمده ای به کاربرد آنها احساس شد. طبق نظر آژانس بین المللی انرژی نتایج برنامه‌های R&D در مورد پمپ‌های حرارتی، تا طی چند سال آینده سبب فراگیر شدن این صنعت عمومی خواهد شد^(۲). طبق یک بررسی انجام

خارجی می باشد. برجهای تقطیر از لحاظ مصرف بالای انرژی بخوبی شناخته شده اند و در بسیاری از حالات ممکن است این روش به خاطر مصرف بالای انرژی غیر اقتصادی باشد. انرژی برای رسیدن به درجه حرارت بالاتر مصرف و برای رسیدن به درجه حرارت پایین تر دریافت می شود(4) برای کم کردن مصرف انرژی برجهای تقطیر، روشهای مختلف بازیافت انرژی ابداع گشته اند که به سه گروه اصلی زیر طبقه بندی می شوند:

۱- روشهای تأثیر چندتایی

(Multiple Effect Methods)

۲- روشهای غیر مستقیم

(Indirect Methods)

۳- روشهای پمپ حرارتی

(Heat Pump Methods)

همچنانکه از واژه تأثیرات چندتایی بر می آید این روش تعدادی از تکنیک ها را با هم ترکیب می کند برای مثال نصب کندانسور در یک ستون تقطیر با فشار بالا می تواند به عنوان ریبویلر در یک ستون تقطیر ثانویه در حال کار با فشار پایین تر بکار رود.

روشهای غیر مستقیم روی ایده مجتمع سازی طرح ستون تقطیر با واحدهای دیگر در فرآیند که نیاز به سردسازی و گرم کردن دارند پایه ریزی می شوند.

اما بهترین روش شناخته شده، روشهای استفاده از پمپ حرارتی می باشد که به سه صورت زیر بکار می روند: (6)

(i) پمپ حرارتی با استفاده از یک سیال خارجی (ii) پمپ حرارتی با استفاده از فشرده سازی

شکل قبلی بستگی دارند. در یک سیستم پمپ حرارتی ایده آل، تبخیر شدن و کندانس شدن در فشار ثابت انجام می گیرد. انبساط از میان شیر انبساط در یک فرآیند انتالپی ثابت و کمپرس کردن در یک فرآیندانتروپی ثابت انجام می گیرد. ولی در شرایط واقعی جریان کار تا حدی تغییر می کند. برای حفاظت کمپرسور، از ورود قطرات کوچک مایع به درون آن باید جلوگیری کرد. این کار توسط اندکی گرم کردن (فوق گرم کردن) بخارهای ورودی به کمپرسور انجام می گیرد. بخار خروجی از تبخیر کننده در نقطه' ۱ نمایش داده شده است (بجای نقطه' ۱). انتروپی در اثر کمپرس شدن افزایش پیدا می کند. در شرایط واقعی، خروجی کمپرسور نقطه' ۲ می باشد (بجای نقطه' ۲). سیال از درون شیر انبساط به صورت سیال تک فازی عبور می کند. سیال در کندانسور قبل از رسیدن به شیر انبساط سرد (فوق سرد) می شود. که در شرایط واقعی این حالت در نقطه' ۳ می باشد (بجای نقطه' ۳). در طول تغییر مکان نقطه' ۳ به' ۳، شرایط واقعی بعد از عبور از شیر در نقطه' ۴ می باشد. البته خطوط متصل شده بین نقاط' ۳ - ۲' - ۱' ، نمی توانند خطوط افقی باشند (به علت افت فشار در خطوط) ولی ما در اینجا فرض کرده ایم که در نمودار ۲ افت فشار نداریم (4).

برجهای تقطیر و سیعترین کاربرد را در واحدهای جداسازی مربوط به صنایع شیمیایی و پتروشیمیایی را دارند یکی از مزیت های این روش استفاده از انرژی به عنوان عامل جداسازی بدون استفاده از یک حلal

بخار بالای برج

(iii) پمپ حرارتی با استفاده از تبخیر ناگهانی
مابع پایین برج

بجز سه روش اصلی بالا، روش‌های
ساده‌تری وجود دارد که باعث کاهش مصرف
انرژی در برجهای تقطیر می‌شوند که در زیر
 فقط نام برده می‌شوند: (7)

● بهبود شرایط عملیاتی (مانندگرم کردن
خوراک ورودی به برج توسط محصولات)

● کاهش جریان برگشتی بوسیله افزایش تعداد
سینی‌های برج

● کم کردن اختلاف دما در دو مبدل حرارتی

● نصب پکینگهای (Packing) با راندمان بالاتر
● انترگراسیون حرارتی

تئوری کار و ساختار نرم افزار

هدف این مطالعه ساخت یک نرم افزار
کامپیوتراست که انواع آرایش‌های پمپ
حرارتی را در یک برج تقطیر برای مخلوطی از
هیدروکربنها شبیه سازی نماید و سپس نتایج
آنها را با یک برج تقطیر معمولی مقایسه نماید.
در شبیه سازی کامپیوترا، یک برج تقطیر با
تعداد سینی‌های ۵۰ عدد در نظر گرفته شده که
خوراک ورودی به این برج ترکیبی مشکل از
مواد موجود در جدول ۱ را دارد.

حداکثر خوراک ورودی به برج سی هزار
(۳۰۰۰۰) بشکه در روز می‌باشد. هدف بدست
آوردن کمترین شدت جریان حجمی خوراک با
بیشترین سوددهی و شرایط عملیاتی می‌باشد.
هزینه‌های کلی مبدل حرارتی، خطوط لوله،
نصب و راه اندازی و در صورت لزوم اصلاح

سینی‌ها را می‌توان در تمام حالات ثابت در نظر
گرفت. بنابراین در تحلیل و بررسی هزینه کلی
باید هزینه کمپرسور، پمپ و مبدل حرارتی
ستون تفکیک کننده در نظر گرفته شود.

با استفاده از نرم افزار کامپیوترا مثال
ارائه شده ۵ روش ذیل را بررسی کرده و
شرایط عملیاتی و قیمت کل آنها را در مدت ۶
سال بدست آورده و سپس نتایج باهم مقایسه
می‌شود. این روشها عبارتند از:

۱- استفاده از یک برج تقطیر معمولی بدون
سیستم پمپ حرارتی (NO HP)

۲- استفاده از یک برج تقطیر همراه با یک
پمپ حرارتی؛ (فسرده سازی بخار بالای
برج) (1 VRC) ...

۳- استفاده از یک برج تقطیر همراه با دو
پمپ حرارتی، (فسرده سازی بخار بالای
برج) (2 VRC) ...

۴- استفاده از یک برج تقطیر همراه با یک
پمپ حرارتی، (انبساط ناگهانی مایع پایین
برج) (1 BFC) ...

۵- استفاده از یک برج تقطیر همراه با یک پمپ
حرارتی، (سیکل بسته) (CC) ...

برای نمونه ابتدا یک فلوچارت یک سیستم
برج تقطیر را همراه با یک پمپ حرارتی (فسرده
سازی بخار بالای برج) نمایش داده (شکل ۸) و
سپس نمودارهای حاصل از نرم افزار
کامپیوترا در حالت مذکور ارائه می‌شود
(شکل‌های ۹-الف و ۹-ب) و سپس نتایج بدست
آمده از چهار روش پمپ حرارتی با روش بدون
پمپ حرارتی مقایسه خواهد شد.
(نمودارهای ۱۰ الی ۱۴) ...

مقایسه بین حالت برجهای تقطیر همراه با پمپ حرارتی با حالت برج تقطیر معمولی همانطور که در نمودارهای ۱۰ ملاحظه می‌شود، در ابتداء هزینهٔ یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (فسرده سازی بخار بالای برج) از هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی بیشتر می‌باشد ولی بعد از گذشت ۵/۳ سال این هزینهٔ ها با هم برابر شده و بعد از آن هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی بیشتر می‌شود. و همانطور که در نمودار ۱۱ مشاهده می‌شود در ابتداء هزینهٔ یک برج تقطیر همراه با دو پمپ حرارتی (فسرده سازی بخار بالای برج) از هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی بیشتر می‌باشد ولی بعد از ۴ سال این هزینهٔ ها با هم برابر شده و بعد از آن هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی بیشتر می‌شود. همچنین در نمودار ۱۲ مشاهده می‌شود که در ابتداء یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (انبساط ناگهانی مایع پایین برج) از هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی بیشتر می‌شود که در ابتداء یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (فسرده سازی بخار بالای برج) از هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی بیشتر می‌شود. نمودار شمارهٔ ۱۳ نیز مقایسه هزینهٔ یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (سیکل بسته) با هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی می‌باشد. نکتهٔ جالب دیگر این است که در ابتداء هزینهٔ یک برج تقطیر همراه با دو پمپ حرارتی (فسرده سازی بخار بالای برج) از هزینهٔ یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (انبساط ناگهانی مایع پایین برج) بیشتر است ولی بعد از گذشت ۶ سال، هزینهٔ آن کمتر می‌شود. (نمودار شمارهٔ ۱۴)

نتیجه گیری

- ۱- استفاده از پمپهای حرارتی نه تنها در برجهای تقطیر از لحاظ اقتصادی سودمند و مفید خواهد بود بلکه در سیستمهای دیگر، همچنانکه بررسی شد نیز مفید خواهد بود.
- ۲- در استفاده پمپهای حرارتی در برجهای تقطیر، دمای خروجی از ریبویلر عامل تعیین کننده در هزینهٔ کلی خواهد بود.

تأثیر کاربرد پمپ حرارتی در رابطه با محیط زیست همانطور که دیده می‌شود استفاده از پمپ حرارتی مقرن به صرفهٔ خواهد بود و باعث کم کردن مصرف انرژی و کم کردن هزینهٔ ها می‌شود. از طرفی بازیابی حرارتی، باعث کم شدن مصرف سوخت در سیستم شده و در نتیجه نقش مهمی در کم کردن انتشار گازهای حاصل از احتراق انجام می‌دهد (مقدار انتشار گازهای حاصل از احتراق بستگی به نوع سوخت مورد استفاده دارد). گازهای حاصل از احتراق که ایجاد آلودگی می‌کنند عبارتند از: دی اکسید کربن CO₂، اکسیدهای نیتروژن NO_x و اکسیدهای گوگرد SO_x. میزان کاهش آلودگی توسط پمپهای حرارتی در شرایط بهینهٔ کارکرد پمپ محاسبه شده است و با سیستمهای معمولی مقایسه شده است. میزان گازهای حاصل از احتراق در جدول ۱۲ ارائه شده است و به نظر می‌رسد که تقریباً ۶۰٪ گازهای حاصل از احتراق را می‌توان با استفاده از پمپهای حرارتی در مقایسه با سیستمهای معمولی کاهش داد(4).

منابع

- ۱- Pedram B., "Computer Simulation and Application of Heat Pumps in Distillation Towers", M.S Thesis/Azad University, 1998.
- ۲- D. A. Reay & D.B.A. Macmicheal, "Heat Pumps", Second Edition, Chapter 1&6.
- ۳- T.J. Mix & J.S. Dwek & M. Weinberg, "Energy Conservation In Distillation", Chemical Engineering Progress, pp. 49-55, April 1978.
- ۴- John J. Gelegenis & Nicholas G. Koumoutsos, "Consider Heat Pumps for CPI Applications", Chemical Engineering Progress, pp. 42-49, February 1996.

۵- Omar Annakou & Peter Mizsey, "Rigorous Investigation of Heat Pump Assisted Distillation", Heat Recovery System & CHP, vol. 15, No. 3, pp. 241-247, 1995.

۶- Bjorn. U. Gren & K. Strom, "A Study of a Heat Pump Distillation Column System", Chemical Engineering Processing, No. 29, pp. 133-143, 1987.

۷- Albert Meili & Alexander Stuecheli, "Distillation Columns with Direct Vapor Recompression", Chemical Engineering, No. 16, pp. 133-143, 1987.

۸- Albert Meili, "Using Water in Distillation System Heat Pump", Chemical Engineering Progress, pp. 49-57, May 1993.

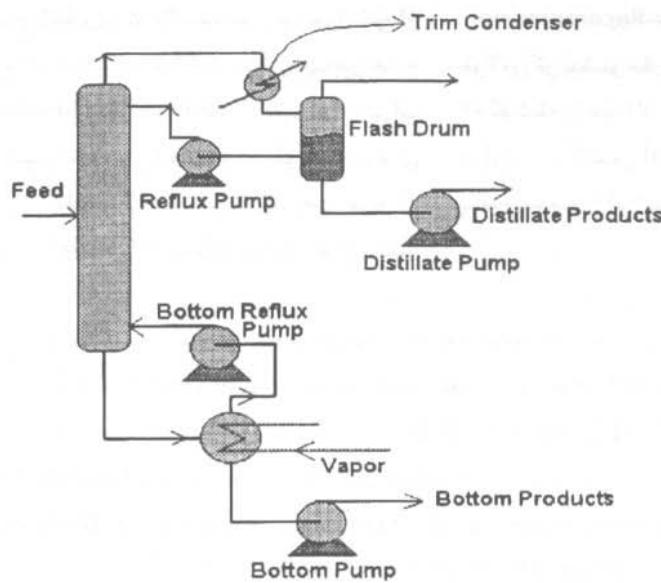
۹- R.M. Lazzarin, "Heat Pumps in Industry", Heat Recovery System & CHP, vol. 15, No. 3, pp. 305-317, 1995

۱۰- Z. Fonyo & N. Benko, "Enhancement of Process Integration by Heat Pumping", Heat Recovery System & CHP, vol. 20, pp. 585-590, 1996.

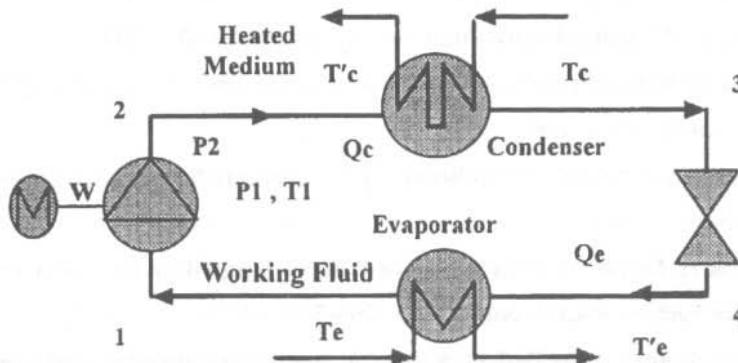
۱۱- Vincenzo Tufano, "On the Performance of Absorption Heat Pump-Transformers", Heat Recovery System & CHP, vol. 15, No. 4, pp. 327-332, 1995.

۳- برج تقطیری که با سیستم پمپ حرارتی از طولانی تر بیشتر مقرنون به صرفه خواهد بود.
۴- گذشته از مسائل مالی ، استفاده از پمپهای حرارتی در کاهش آلودگی محیط زیست نقش بسیار مهمی را ایفا می کند.

نوع انبساط ناگهانی مایع پایین برج باشد(Bottom Flashing) زودتر به جواب می رسد و مقرنون به صرفه تر خواهد بود ولی در برج تقطیری که با سیستم دو پمپ حرارتی از نوع فشرده سازی بخار بالای برج باشد



شکل ۱: نمایش یک سیکل پمپ حرارتی



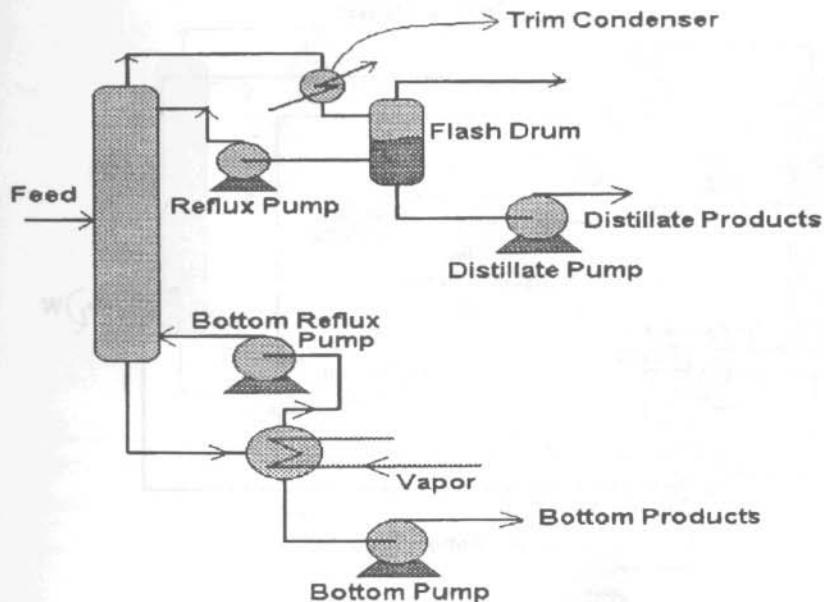
شکل ۲: نمایش یک سیکل پمپ حرارتی روی نمودار فشار - انتالپی

جدول ۱: ترکیبات خوراک

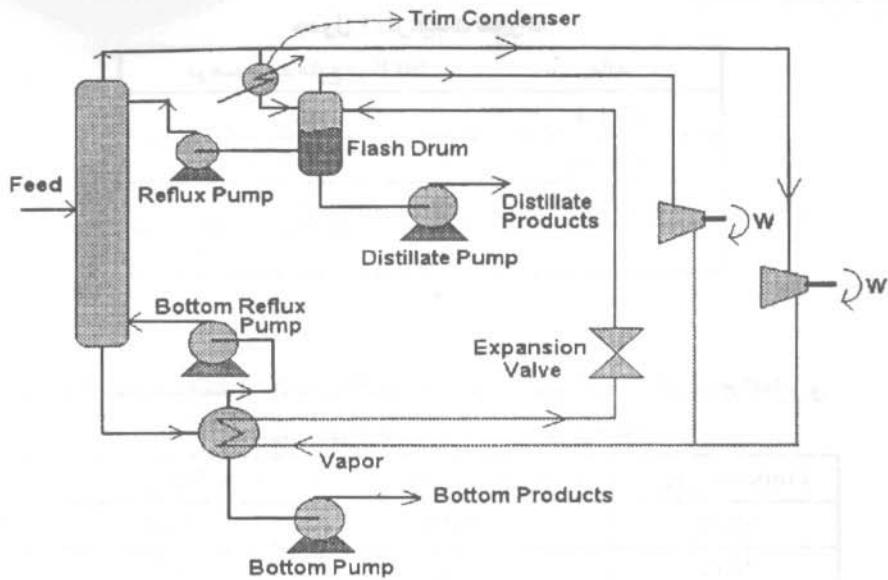
ماده	درصد حجم مایع در 60°F
پروپان	2.5
ایزو بوتان	21.5
نرمال بوتان	76
کل	100

جدول ۲: مقایسه انتشار گازهای آلاینده هوا در سیستمهاي معمولی برج تقطیر و سیستمهاي همراه با پمپ حرارتی (تن بر سال)

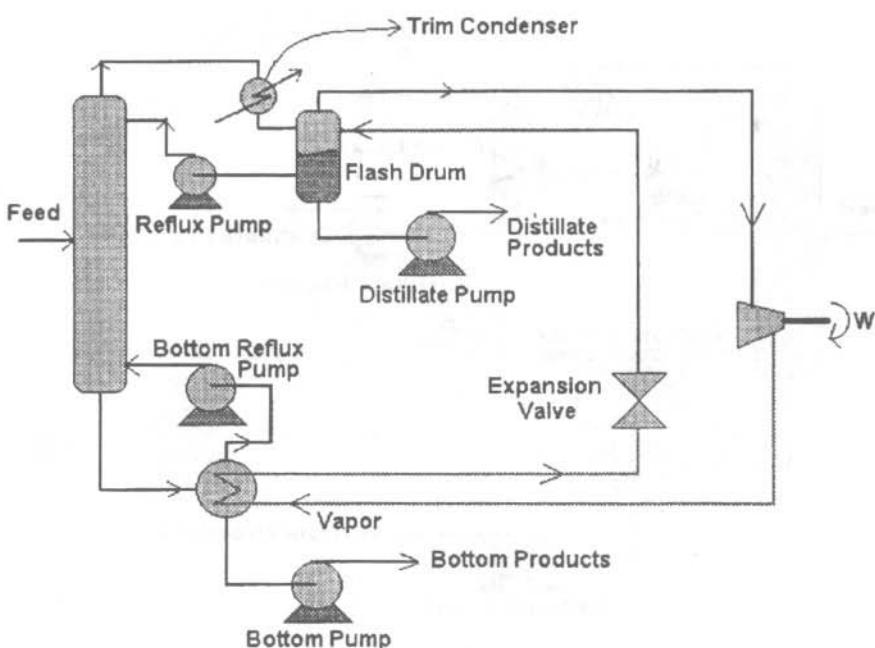
Emission Type	Conventional System	Heat Pump System
CO ₂	19412	8036
SO ₂	414	171
SO ₃	9.06	3.75
NO ₃	64.7	26.8



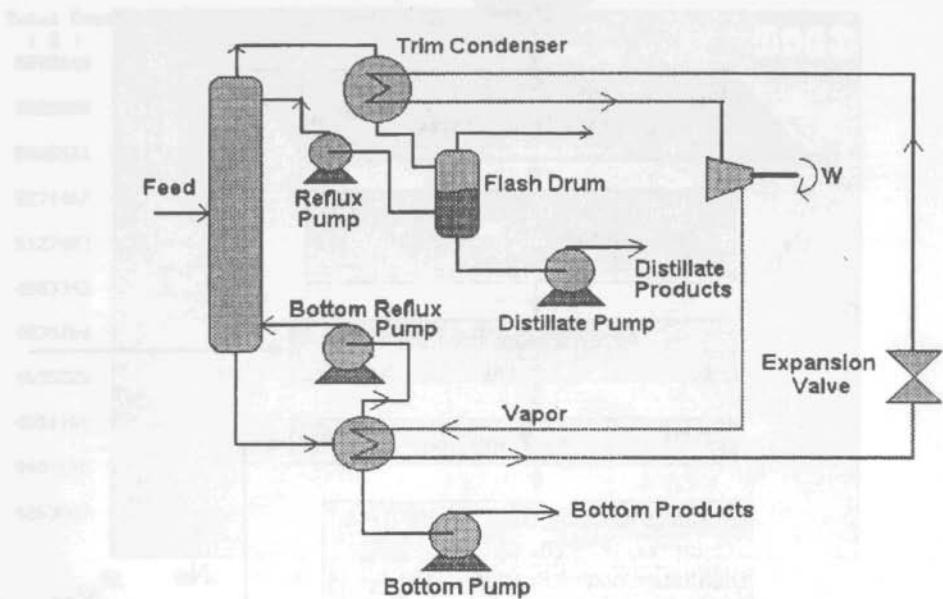
شکل ۳: نمودار جريان يك برج تقطير بدون پمپ حرارتی



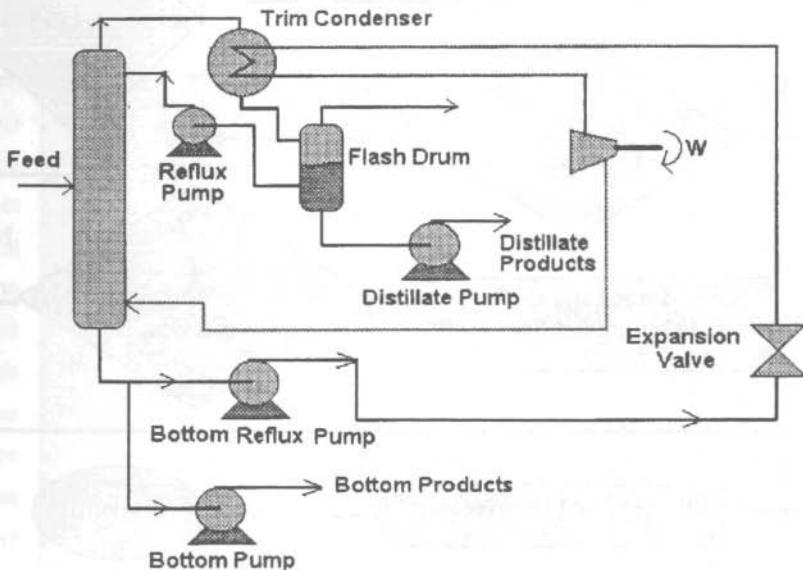
شکل ۴: نمودار جریان یک برج تقطیر با یک پمپ حرارتی (فسرده سازی بخار بالای برج)



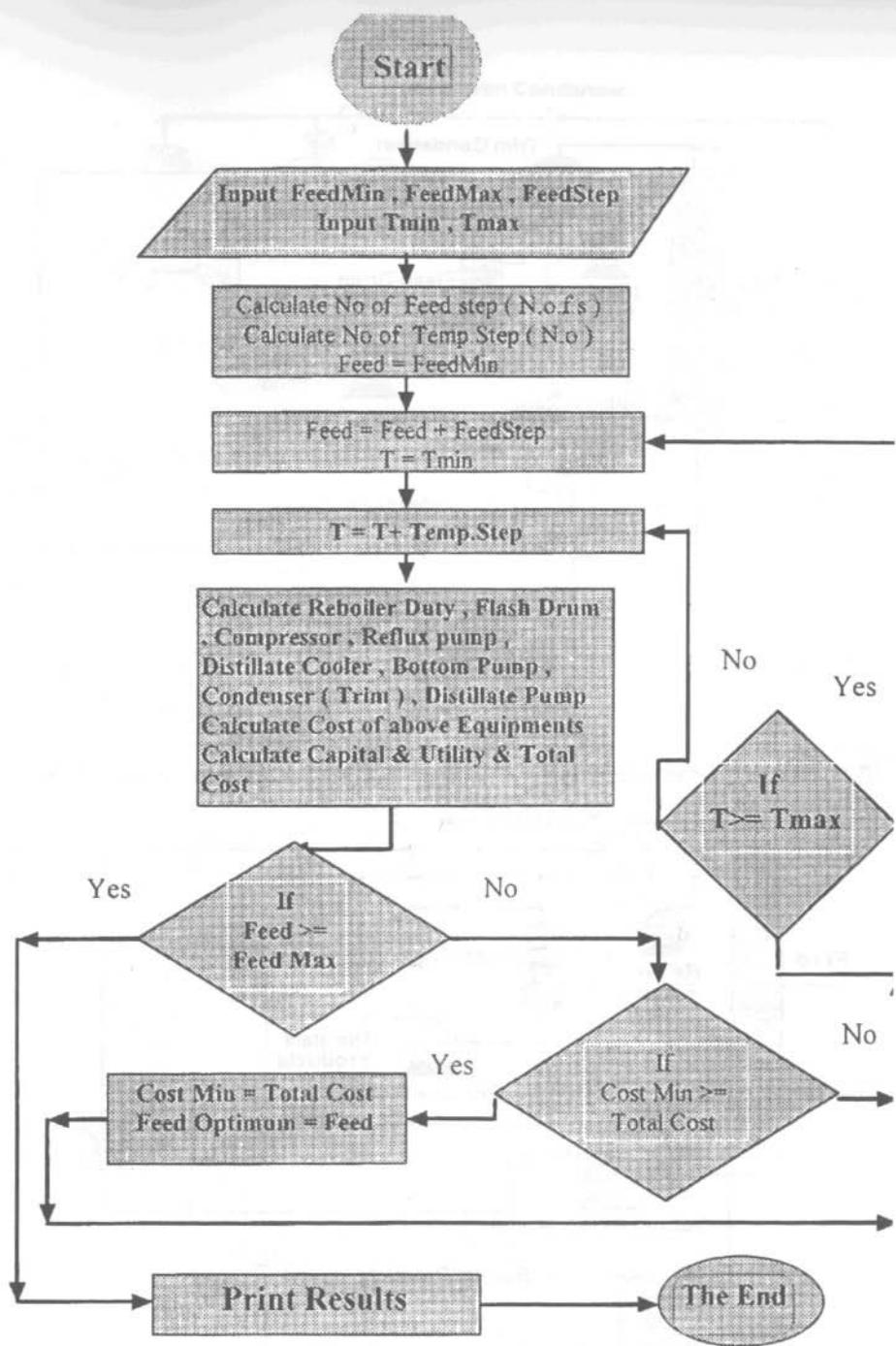
شکل ۵: نمودار جریان یک برج تقطیر با دو پمپ حرارتی (فسرده سازی بخار بالای برج)



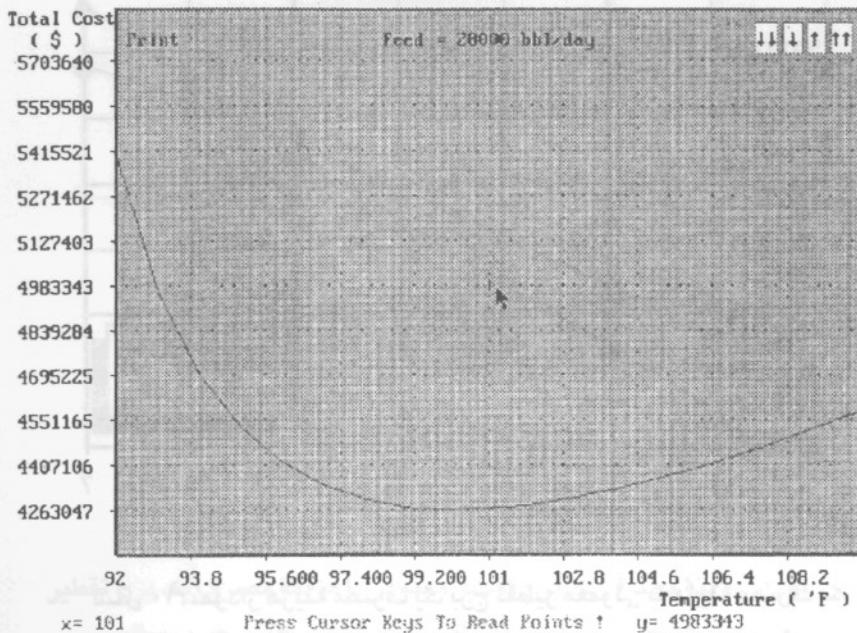
شکل ۶: نمودار جریان یک برج تقطیر با یک پمپ حرارتی (تبخیر ناگهانی مایع پایین برج)



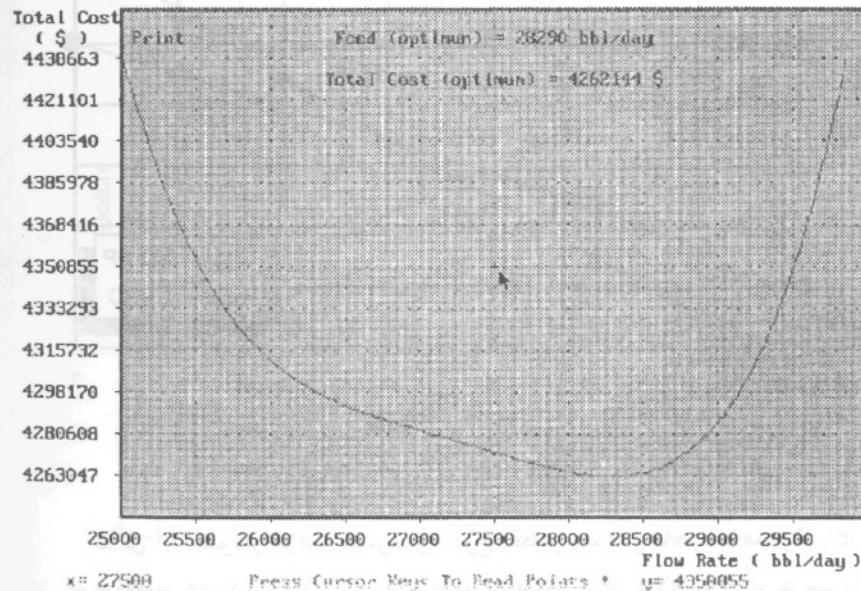
شکل ۷: نمودار جریان یک برج تقطیر با یک پمپ حرارتی (سیکل بسته)



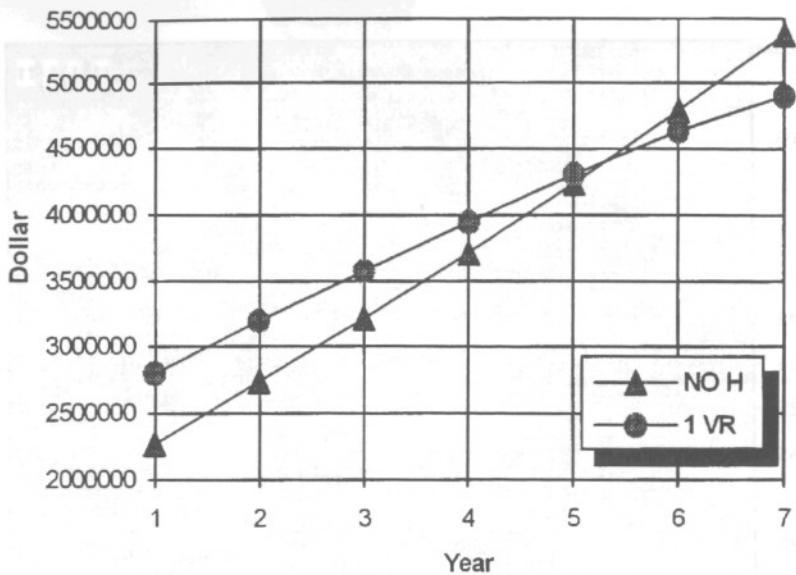
شکل ۸: فلوچارت یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی
(فشرده سازی بخار بالای برج (1 VRC)



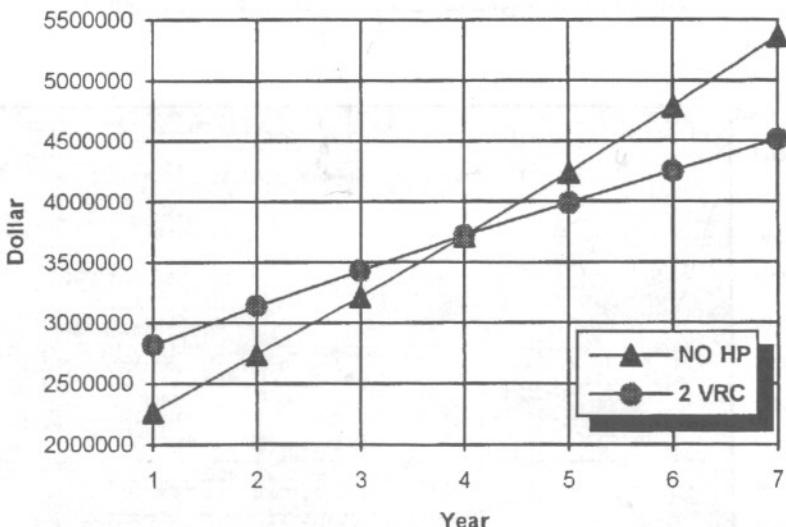
شکل ۹-الف: نمودار قیمت کلی بر حسب دما برای حالت دوم (1 VRC)



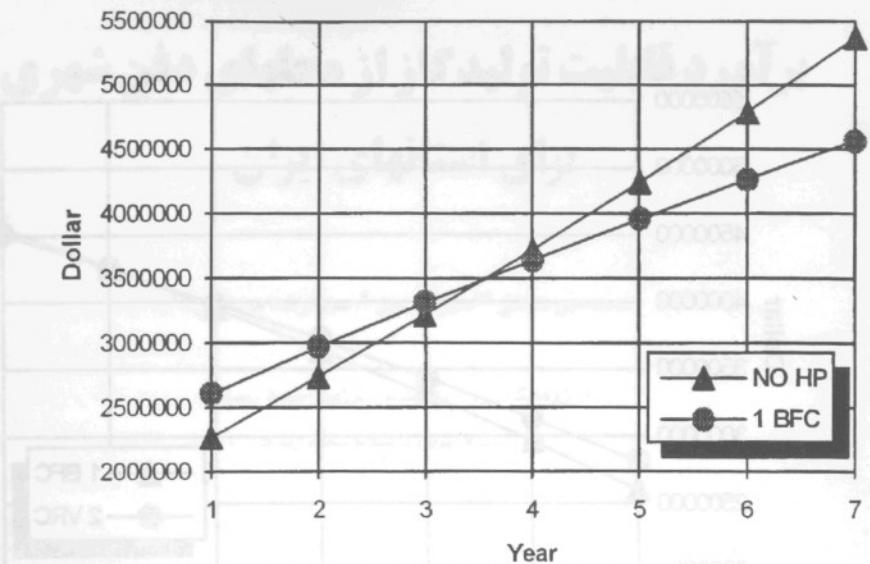
شکل ۹-ب: نمودار قیمت کلی بر حسب فلوریت خوارک برای روش دوم (1 VRC)



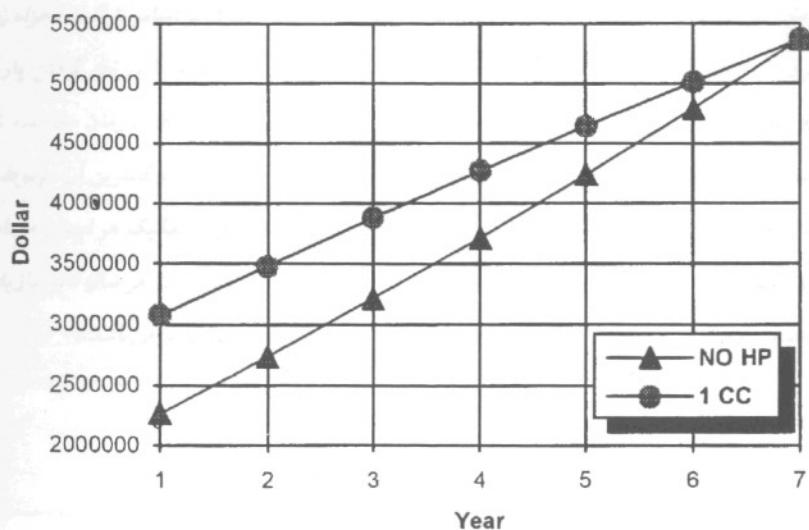
شکل ۱۰: نمودار هزینه مصرف یک برج تقطیر معمولی با هزینه مصرف یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (فشرده سازی بخار بالای برج) بر حسب سال



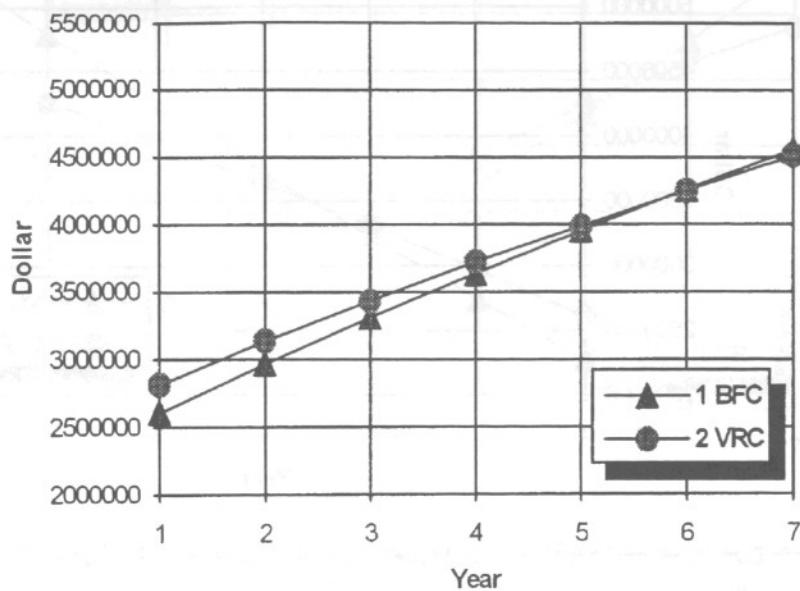
شکل ۱۱: نمودار هزینه مصرف یک برج تقطیر معمولی با هزینه مصرف یک برج تقطیر همراه با دو پمپ حرارتی (فشرده سازی بخار بالای برج) بر حسب سال



شکل ۱۲: نمودار هزینه مصرف یک برج تقطیر معمولی با هزینه مصرف یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (تبخیر ناگهانی مایع پایین برج) بر حسب سال



شکل ۱۳: نمودار هزینه مصرف یک برج تقطیر معمولی با هزینه مصرف یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (سیکل بسته) بر حسب سال



شکل ۱۴: نمودار هزینه مصرف یک برج تقطیر همراه با دو پمپ حرارتی (فسرده‌سازی بخار بالای برج) با هزینه مصرف یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (تبخیر ناگهانی مایع پایین برج) بر حسب سال