شبیه سازی کامپیوتری کاربرد پمپهای حرارتی در برجهای تقطیر

بهزاد پدرام - ریاض خراط

دانشکدهٔ مهندسی نفت دانشگاه صنعت نفت اهواز

چکیده

با توجه به هزینهٔ بالای تولید انرژی و گران بودن آن ، همواره سعی بر این بوده است که روشهایی 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 ذخیرهٔ انرژی ، استفاده از پمپهای حرارتی یا Heat Pumps می باشد. در این پروژه 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 برنامهٔ 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 مقایسهٔ 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 انجام شده، می توان نتیجه گرفت که استفاده از روش انبساط ناگهانی محصولات پایین برج (Bottom Flashing) در سیستم پمپ حرارتی نسبت به سایر روشها سریعتر به سوددهی می رسد 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 مقرون بصرفه تر خواهد بود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

مقدمه

پمپ حرارتی که اختراع یک نوع از آن معمولاً به لرد کلوین نسبت داده می شود از نظر ترمودینامیکی شبیه به خنک کننده ها می باشد. اغلب خانه ها، اغذیه فروشیها و ساختمانهای تجاری در جامعه صنعتی(Air Conditioning) دارای یخچال یا واحد تهویه هوا می باشد.

اختلاف اساسی بین پمپ حرارتی و یخچال در وظیفه ایست که آنها طبق نظر سازنده انجام می دهند، به بیان دیگر یخچال و دستگاه تهویه سرمای مفید را ایجاد می کنند در حالیکه پمپ حرارتی گرمای مفید را ایجاد می کند. یعنی در تعریف، پمپ حرارتی به سیستمی یا سیکلی اطلاق می شود که انرژی گرمایی را از یک منبع سردتر به منبع گرمتر براند.

مسئله آزاردهنده‌ای که در مورد قابلیت پمپ های 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 پمپ های حرارتی افزایش یافت زیرا نیاز عمده ای به کاربرد آنها احساس شد. طبق نظر آژانس بین المللی انرژی نتایج برنامه های R&D در مورد پمپ های حرارتی ، تا طی چند سال آینده سبب فراگیر شدن این صنعت عمومی خواهد شد(2). طبق یک بررسی انجام شده ، یک کاهش ۱۰ درصدی در مقدار مصرف انرژی در برجهای تقطیر معادل صدهزار بشکه نفت در روز ارزش دارد(3).

هدف این مطالعه بحث راجع به کاربرد پمپ حرارتی در برج تقطیر می باشد ضمن اینکه بهترین آرایش پمپ حرارتی در ارتباط با برجهای تقطیر معرفی گردد و درنهایت نوشتن 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.

پمپ های 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 می باشد. سیال ، مایع فراری می باشد که در درمای T1 و فشار P1، گرمای نهان Qe را از منبع دمای پایین گرفته و بخار می شود (نقطهٔ ۴ تا ۱) . سپس بخار حاصل شده بوسیلهٔ مصرف انرژی الکتریکی به یک فشار بالاتر کمپرس می شود (نقطهٔ ۱ تا ۲). و بعد از درون کندانسور عبور می کند وگرمای نهان Qc را در یک دمای بالاتر T2 ، و یک فشار ثابت P2 از دست می دهد (نقطهٔ ۲ تا۳). بعد از آن سیال انبساط پیدا می کند و به فشار اولیه اش P1 می‌رسد (نقطهٔ ۳ تا ۴) و نهایتاً سیال به تبخیر کننده برمی گردد و این سیکل تکرار می شود. شرایط عملکرد یک پمپ حرارتی در یک نمودار انتالپی – فشار در شکل ۲ نشان داده شده است، بطوریکه نقاط ۱تا۴این شکل به همان نقاط ۱تا۴

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

شکل قبلی بستگی دارند. در یک سیستم پمپ حرارتی ایده آل ، تبخیر شدن وکندانس شدن در فشار ثابت انجام می گیرد. انبساط از میان شیر انبساط در یک فرآیند انتالپی ثابت و کمپرس کردن دریک فرآیندانتروپی ثابت‌انجام می‌گیرد. ولی در شرایط واقعی جریان کار تا حدی تغییر مـی 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 می‌گیرد. بخار خروجی از تبخیر کننده در نقطهٔ 1′ نمایش داده شده است (بجای نقطهٔ 1). انتروپی در اثر کمپرس شدن افزایش پیدا می‌کند. در شرایط واقعی ، خروجی کمپرسور نقطهٔ 2′ می‌باشد (بجای نقطهٔ 2). سیال از درون شیر انبساط به صورت سیال تک فازی عبور می‌کند. سیال در کندانسور قبل از رسیدن به شیر انبساط سرد (فوق سرد) می شود. که در شرایط واقعی این حالت در نقطهٔ 3′ می‌باشد (بجای نقطهٔ 3) . در طول تغییر مکان نقطهٔ 3 به 3′ ، شرایط واقعی بعد از عبور از شیر در نقطهٔ 4′ می باشد. البته خطوط متصل شده بین نقاط 3′ - 2′ , 4′ - 1′ ، 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 وسیعترین کاربرد را در واحدهای جداسازی مربوط به صنایع شیمیایی و پتروشیمیایی را دارند یکی از مزیت‌های این روش استفاده از انرژی به عنوان عامل جداسازی بدون استفاده از یک حلال 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 غیرمستقیم
(Indirect Methods)

۳- روشهای پمپ حرارتی
(Heat Pump Methods)

همچنانکه از واژه تأثیرات چندتایی بر می‌آید 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

بخار بالای برج

iii) پمپ حرارتی با استفاده از تبخیر ناگهانی مایع پایین برج

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

- بهبود شرایط عملیاتی (مانندگرم کردن خوراک ورودی به برج توسط محصولات)
- کاهش جریان برگشتی بوسیله افزایش تعداد سینی های برج
- کم کردن اختلاف دما در دو مبدل حرارتی
- نصب پکینگهایی (Packing) با راندمان بالاتر
- انتگراسیون حرارتی

تئوری کار و ساختار نرم افزار

هدف این مطالعه ساخت یک نرم افزار کامپیوتری است که انواع آرایش های 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 کامپیوتری ، یک برج تقطیر با تعداد سینیهای ۵۰ عدد در نظر گرفته شده که خوراک ورودی به این برج ترکیبی متشکل از مواد موجود در جدول ۱ را دارد.

حداکثر خوراک ورودی به برج سی هزار (۳۰۰۰۰) بشکه در روز می باشد. هدف بدست آوردن کمترین شدت جریان حجمی خوراک با بیشترین سوددهی و شرایط عملیاتی می باشد. هزینه های کلی مبدل حرارتی ، خطوط لوله، نصب و راه اندازی و در صورت لزوم اصلاح سینی ها را می توان درتمام حالات ثابت در نظر گرفت . بنابراین در تحلیل و بررسی هزینهٔ کلی باید هزینهٔ کمپرسور ، پمپ و مبدل حرارتی ستون تفکیک کننده در نظرگرفته شود.

با استفاده از نرم افزار کامپیوتری 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 پمپ‌حرارتی ،(فشرده سازی بخار بالای برج){1 VRC}

۳- استفاده از یک برج تقطیر همراه با دو پمپ‌حرارتی ، (فشرده سازی بخار بالای برج){2 VRC}

۴- استفاده از یک برج تقطیر همراه با یک پمپ‌حرارتی ، (انبساط ناگهانی مایع پایین برج) {1 BFC}

۵- استفاده از یک برج تقطیر همراه بایک پمپ حرارتی، (سیکل بسته) {CC}

برای نمونه ابتدا یک فلوچارت یک سیستم برج تقطیر را همراه با یک پمپ حرارتی (فشرده سازی بخار بالای برج) نمایش داده (شکل ۸) و سپس نمودارهای حاصل از نرم افزار کامپیوتری در حالت مذکور ارائه می شود (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)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

مقایسه بین حالت برجهای تقطیر همراه با پمپ حرارتی با حالت برج تقطیر معمولی

همانطور که در نمودارهای ۱۰ ملاحظه می‌شود، در ابتدا هزینهٔ یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (فشرده سازی بخار بالای برج) از هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی بیشتر می‌باشد ولی بعد از گذشت ۵/۳ سال این هزینه ها با هم برابر شده و بعد از آن هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی بیشتر می شود. و همانطور که در نمودار ۱۱ مشاهده می شود در ابتدا هزینهٔ یک برج تقطیر همراه با دو پمپ حرارتی (فشرده‌سازی بخار بالای برج) از هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی بیشتر می باشد ولی بعد از گذشت ۴ سال این هزینه ها با هم برابر شده و بعد از آن هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی بیشتر می شود. همچنین در نمودار ۱۲ مشاهده می‌شود که در ابتدا یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (انبساط ناگهانی مایع پایین برج) از هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی بیشتر می باشد ولی بعد از گذشت ۳/۶ سال این هزینه ها با هم برابر شده و بعد از آن هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی بیشتر می شود. نمودار شمارهٔ ۱۳ نیز مقایسهٔ هزینهٔ یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (سیکل بسته) با هزینهٔ یک برج تقطیر معمولی می باشد. نکتهٔ جالب دیگر این است که در ابتدا هزینهٔ یک برج تقطیر همراه با دو پمپ حرارتی (فشرده 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)

تأثیر کاربرد پمپ حرارتی در رابطه با محیط زیست

همانطور که دیده می شود استفاده از پمپ حرارتی مقرون به صرفه خواهد بود و باعث کم کردن مصرف انرژی و کم کردن هزینه 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 می دهد (مقدار انتشار گازهای حاصل از احتراق بستگی به نوع سوخت مورد استفاده دارد). گازهای حاصل از احتراق که ایجاد آلودگی می کنند عبارتند از: دی اکسیدکربن CO_2 ، اکسیدهای نیتروژن NOx و اکسیدهای گوگرد SOx . 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 ۲ ارائه شده است و به نظر می رسد که تقریباً ۶۰٪ گازهای حاصل از احتراق را می توان با استفاده از پمپهای حرارتی در مقایسه با سیستمهای معمولی کاهش داد(4).

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 استفادهٔ پمپهای حرارتی در برجهای تقطیر، دمای خروجی از ریبویلر عامل تعیین کننده در هزینهٔ کلی خواهد بود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

۳- برج تقطیری که با سیستم پمپ حرارتی از نوع انبساط ناگهانی مایع پایین برج باشد(Bottom Flashing) زودتر به جواب می‌رسد و مقرون به صرفه تر خواهد بود ولی در برج تقطیری که با سیستم دو پمپ حرارتی (Vapor Recompression) در مدت زمان طولانی تر بیشتر مقرون به صرفه خواهد بود.

۴- گذشته از مسائل مالی ، استفاده از پمپهای حرارتی در کاهش آلودگی محیط زیست نقش بسیار مهمی را ایفا می کنند.

منابع

1- Pedram B.,``Computer Simulation and Application of Heat Pumps in Distillation Towers'', M.S Thesis/Azad University, 1998.

2- D. A.Reay & D.B.A. Macmicheal, ``Heat Pumps'', Second Edition, Chapter 1&6.

3- T.J. Mix & J.S.Dwek & M.Weinberg, "Energy Conservation In Distillation", Chemical Engineering Progress, pp. 49-55, April 1978.

4- John J. Gelegenis & Nicholas G. Koumoutsos, "Condider Heat Pumps for CPI Applications", Chemical Engineering Progress, pp. 42-49,February 1996.

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

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

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

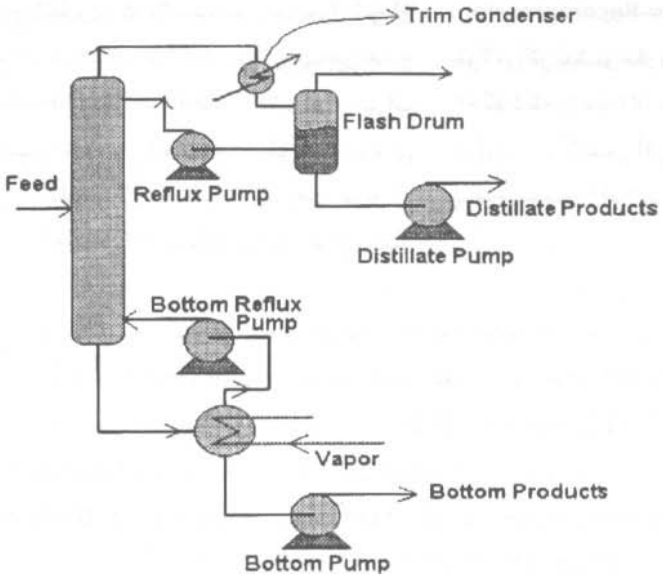
8- Albert Meili, "Using Water in Distillation System Heat Pump", Chemical Engineering Progress, pp. 49-57, May 1993.

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

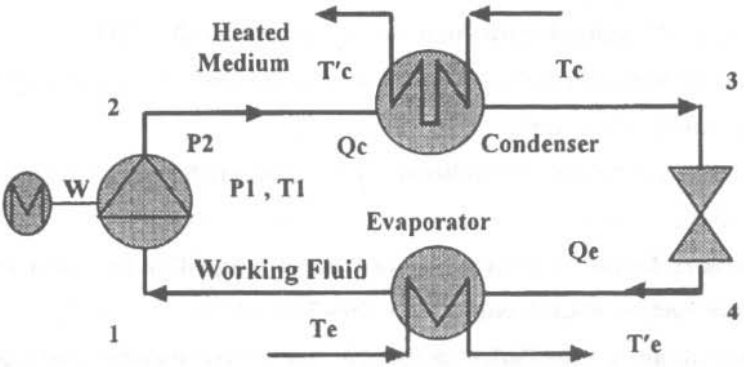
10- Z. Fonyo & N. Benko, "Enhancement of Process Integration by Heat Pumping", Heat Recovery System & CHP, vol. 20, pp. 585-590, 1996.

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل ۱ : نمایش یک سیکل پمپ حرارتی



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

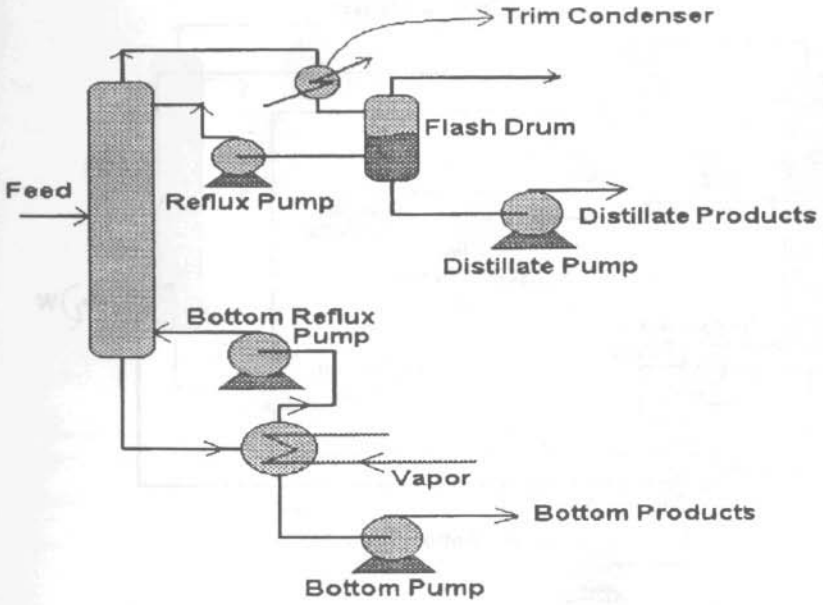
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

جدول ۱: ترکیبات خوراک

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

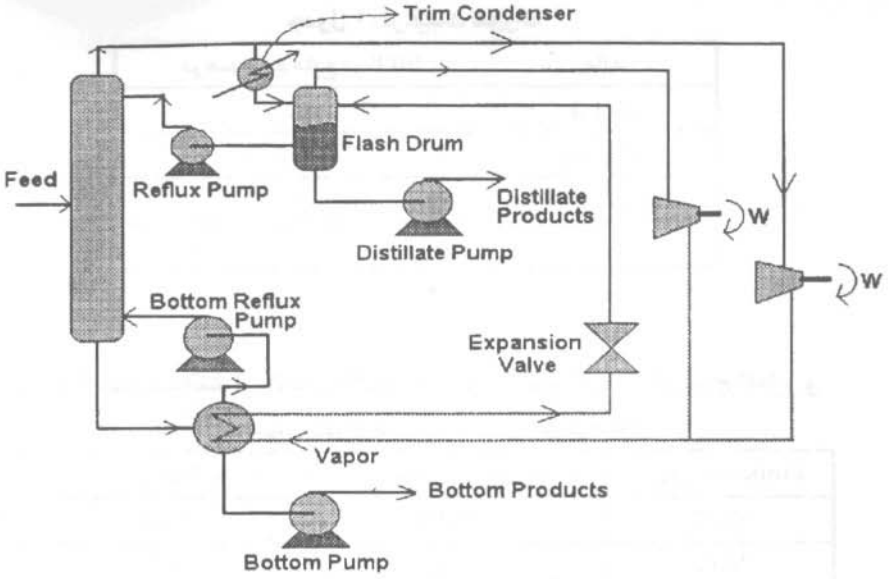
جدول ۲: مقایسهٔ انتشار گازهای آلاینده هوا در سیستمهای معمولی برج تقطیر و سیستمهای همراه با پمپ حرارتی (تن برسال)

Emission Type	Conventional System	Heat Pump System
CO2	19412	8036
SO2	414	171
SO3	9.06	3.75
NO3	64.7	26.8

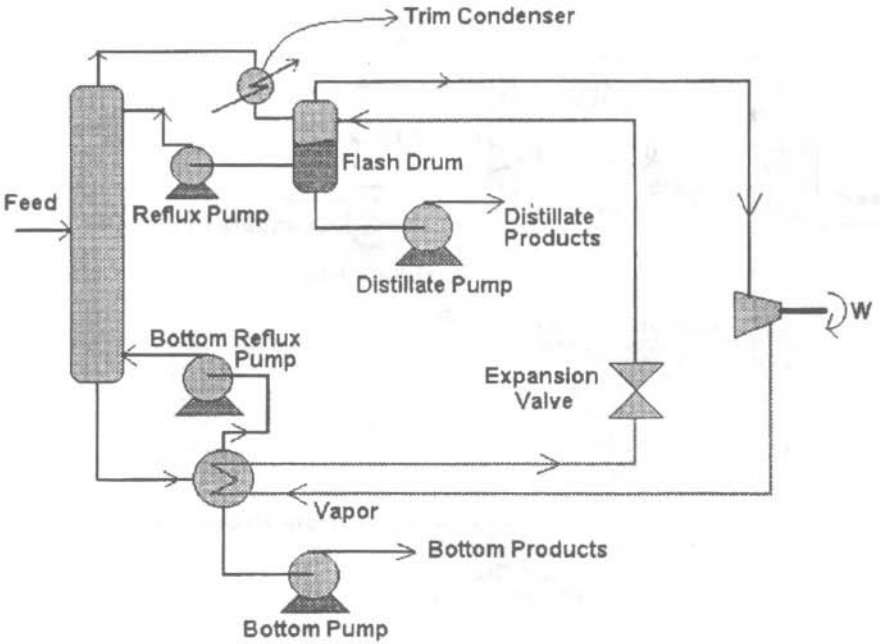


شکل ۳: نمودار جریان یک برج تقطیر بدون پمپ حرارتی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

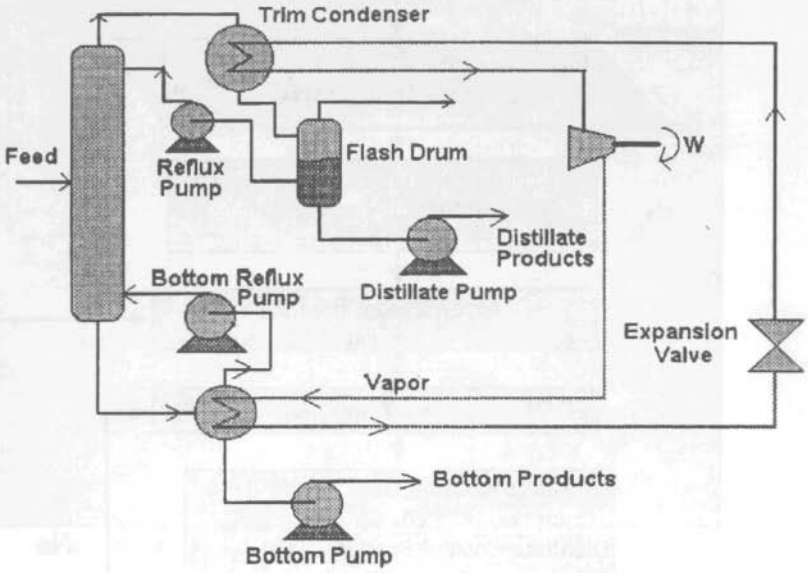


شکل ۴ : نمودار جریان یک برج تقطیر با یک پمپ حرارتی (فشرده سازی بخار بالای برج)

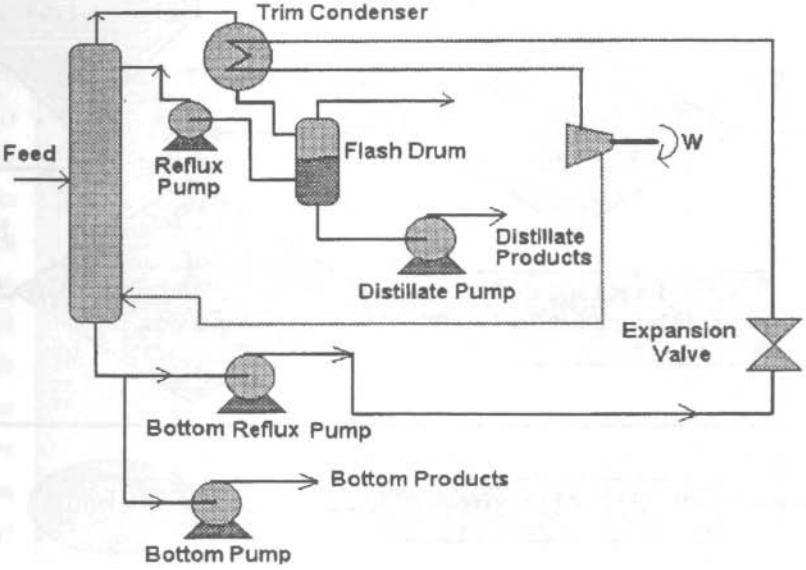


شکل ۵ : نمودار جریان یک برج تقطیر با دو پمپ حرارتی (فشرده سازی بخار بالای برج)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

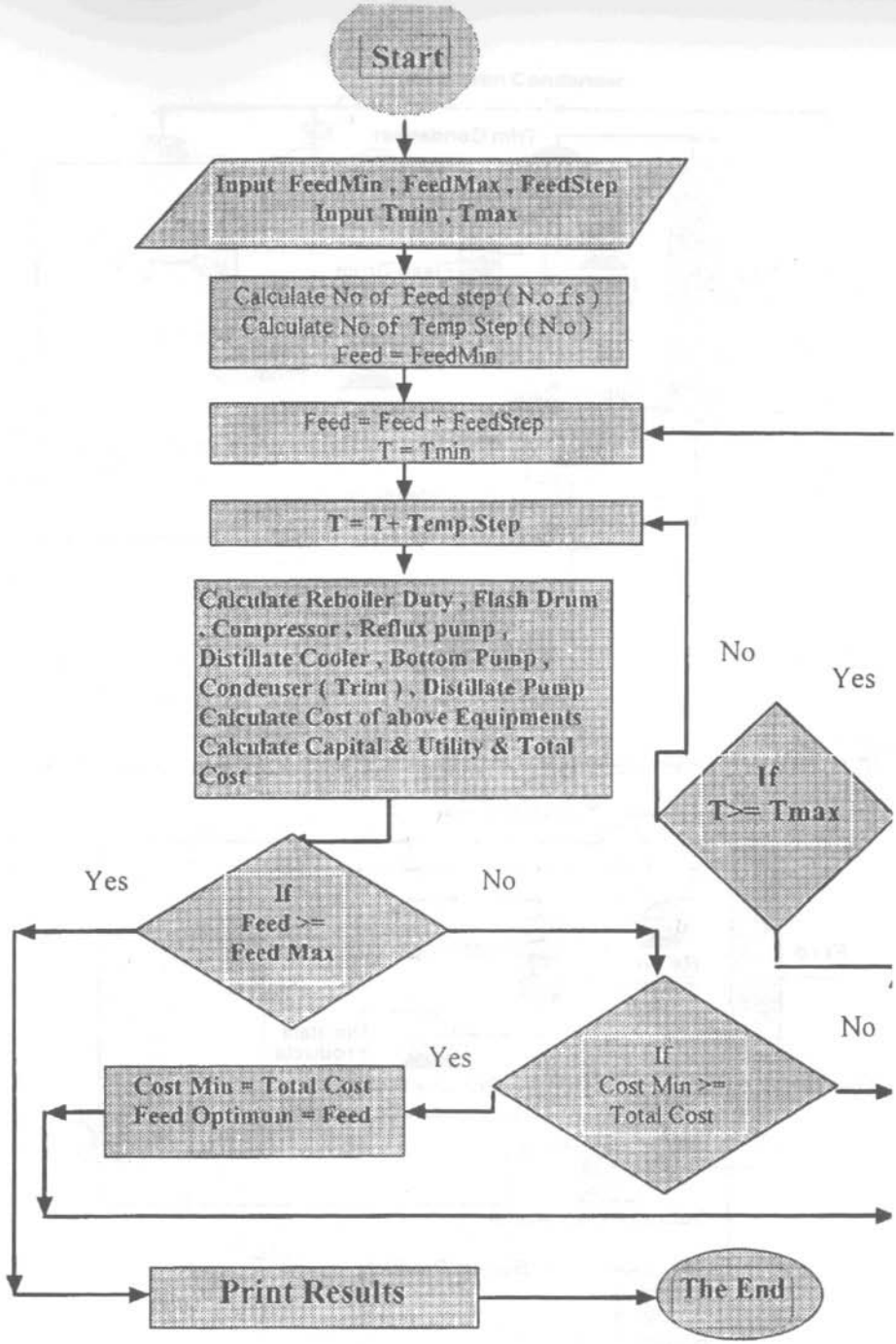


شکل ۶: نمودار جریان یک برج تقطیر با یک پمپ حرارتی (تبخیر ناگهانی مایع پایین برج)



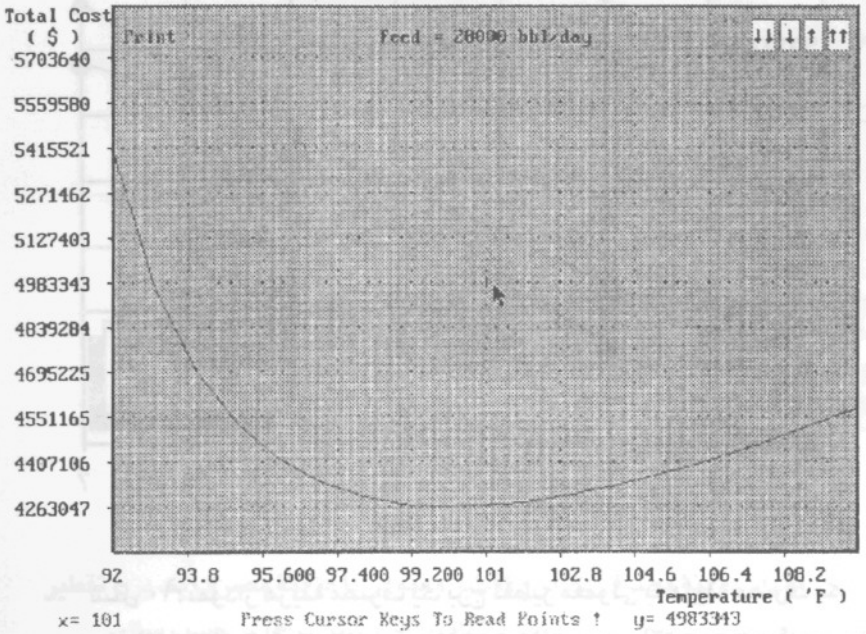
شکل ۷: نمودار جریان یک برج تقطیر با یک پمپ حرارتی (سیکل بسته)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

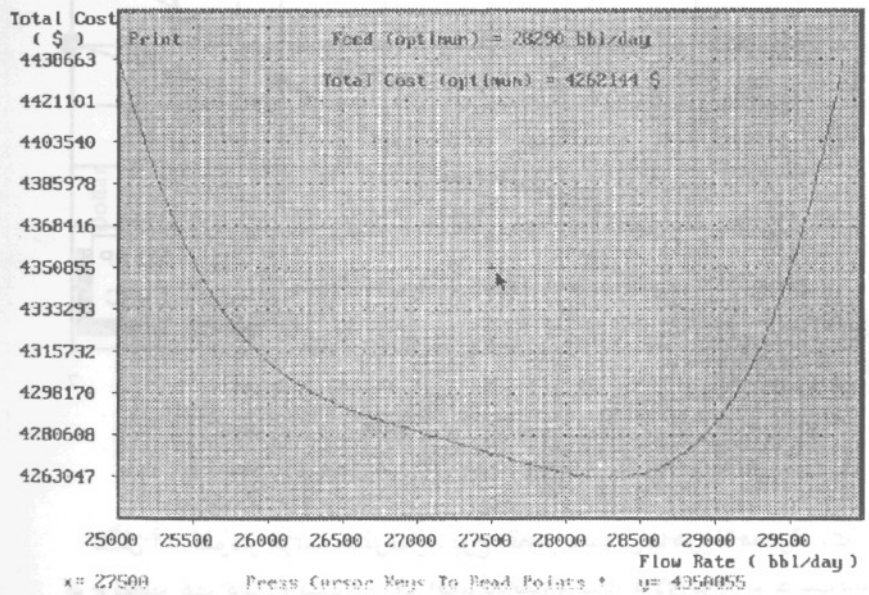


شکل ۸: فلوچارت یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی
(فشرده سازی بخار بالای برج VRC 1)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

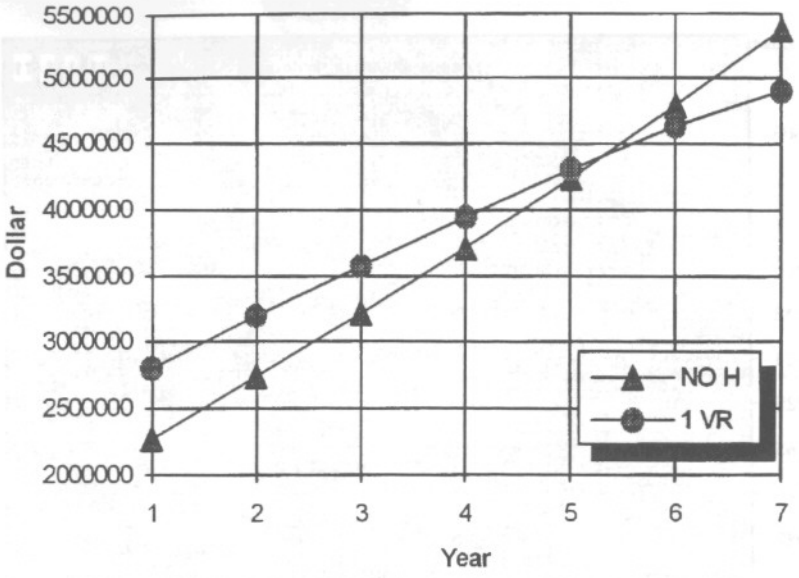


شکل ۹- الف : نمودار قیمت کلی بر حسب دما برای حالت دوم (1 VRC)

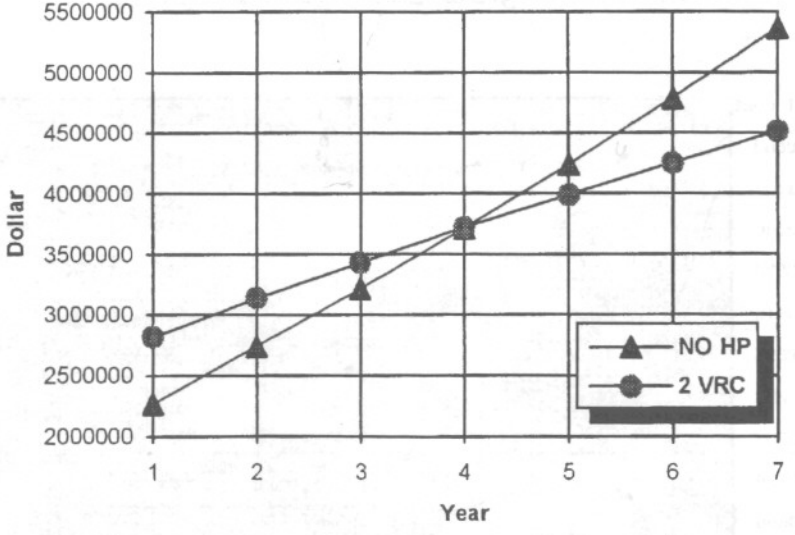


شکل ۹- ب : نمودار قیمت کلی بر حسب فلوریت خوراک برای روش دوم (1 VRC)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

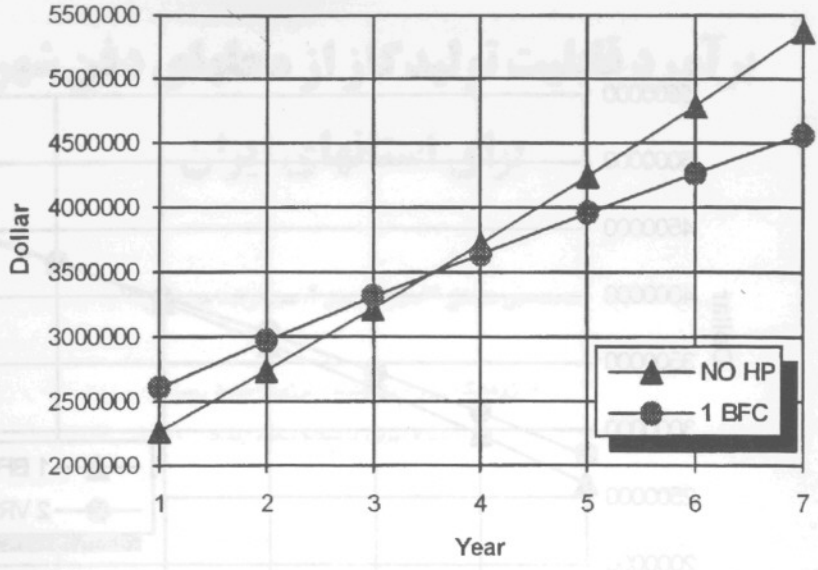


شکل ۱۰ : نمودار هزینهٔ مصرف یک برج تقطیر معمولی با هزینهٔ مصرف یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (فشرده سازی بخار بالای برج) بر حسب سال

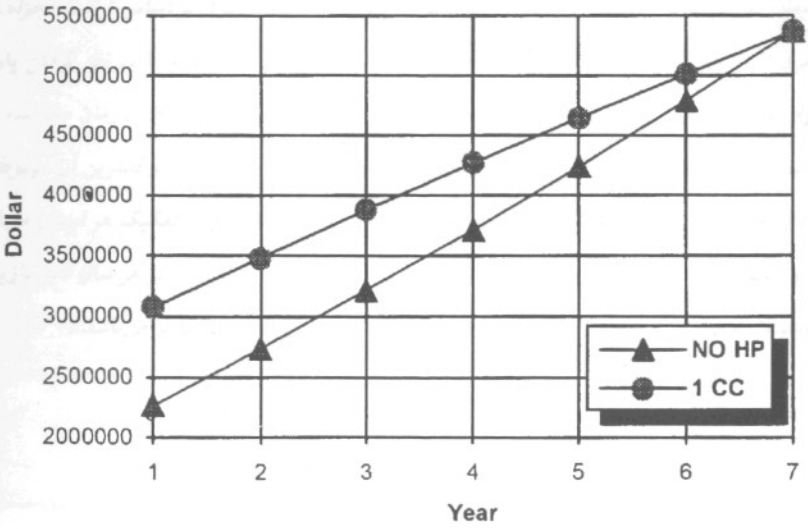


شکل ۱۱ : نمودار هزینهٔ مصرف یک برج تقطیر معمولی با هزینهٔ مصرف یک برج تقطیر همراه با دو پمپ حرارتی (فشرده سازی بخار بالای برج) بر حسب سال

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

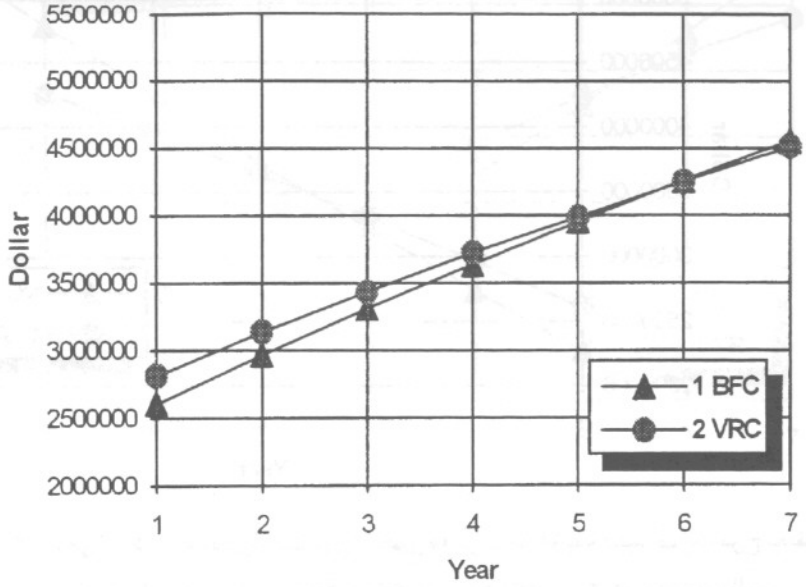


شکل ۱۲ : نمودار هزینهٔ مصرف یک برج تقطیر معمولی با هزینهٔ مصرف یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (تبخیر ناگهانی مایع پایین برج) بر حسب سال



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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل۱۴: نمودارهزینهٔ مصرف یک برج تقطیر همراه با دوپمپ حرارتی (فشرده‌سازی بخار بالای برج) با هزینهٔ مصرف یک برج تقطیر همراه با یک پمپ حرارتی (تبخیر ناگهانی مایع پایین برج) برحسب سال

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]