

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

هشت	چکیده
نه	پیشگفتار

فصل اول - مقدمه

۱	۱-۱. برجهای خنک کن
۴	۲-۱. کمیت‌های مهم در طراحی برجهای خنک کن
۶	۳-۱. روشهای طراحی برجهای خنک کن
۹	۴-۱. انتخاب روش مناسب جهت طراحی با کامپیوتر
۱۱	۵-۱. بکارگیری کامپیوتر در طراحی برجهای خنک کن

فصل دوم - برجهای خنک کن مرطوب جریان مخالف

۱۳	۱-۲. اصول طراحی حرارتی
۱۳	۲-۱-۱. تعیین ملزومات برج
۱۴	۲-۱-۲. اهمیت نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا
۱۵	۳-۱-۳. فرآیندهای انتقال گرما و جرم
۱۹	۲-۲. تئوری طراحی حرارتی
۱۹	۱-۲-۲. رابطه مرکب
۲۰	۲-۲-۲. مشخصه هسته خنک کننده
۲۲	۳-۲-۲. موازنه انتالپی
۲۳	۴-۲-۲. تعیین نسبت دبی جرمی آب به هوا
۲۷	۳-۲. هسته خنک کننده
۲۷	۱-۳-۲. انتخاب نوع هسته خنک کننده

- ۲-۳-۲) . مشخصه انتقال حرارت ۲۹
- ۳-۳-۲) . افت فشار ۳۲
- ۴-۲) . حالت هوای خروجی از هسته خنک کننده ۳۳
- ۵-۲) . انحراف جریان مخالف از حالت یکنواخت ۳۵

فصل سوم - طراحی برجهای خنک کن با جریان طبیعی

- ۱-۳) . معرفی برجهای خنک کن با جریان طبیعی ۳۷
- ۲-۳) . مشخصه حرارتی برج و طراحی آن ۴۰
- ۱-۲-۳) . طراحی حرارتی ۴۰
- ۲-۲-۳) . افت فشارها ۴۲
- ۳-۲-۳) . تغییر چگالی هوا ۴۵
- ۴-۲-۳) . تغییر شرایط طرح ۴۷

فصل چهارم - طراحی برجهای خنک کن مرطوب با جریان اجباری

- ۱-۴) . معرفی برجهای خنک کن با جریان اجباری ۵۱
- ۲-۴) . مشخصه حرارتی و طراحی برج ۵۲
- ۳-۴) . محاسبه آب مصرفی در برج ۵۴
- ۴-۴) . تغییر شرایط طرح ۵۵
- ۱-۴-۴) . تغییر دمای حباب تر محیط ۵۵
- ۲-۴-۴) . تغییر دمای آب ورودی ۵۶
- ۳-۴-۴) . تغییر نسبت دبی آب به دبی هوا ۵۶
- ۴-۴-۴) . تغییر تعداد فنها در برجهای سلولی ۵۷

فصل پنجم - برنامه‌های کامپیوتری

۵۹	.....	NTOWER	برنامه کامپیوتری	(۱-۵)
۶۳	.....	NTOWER	زیربرنامه‌های برنامه	(۲-۵)
۶۷	.....	MTOWER	برنامه کامپیوتری	(۳-۵)
۶۸	.....	MTOWER	زیربرنامه‌های برنامه	(۴-۵)
۷۰	.....		پیشنهاد برای بهبود برنامه‌های کامپیوتری	(۵-۵)

فصل ششم - بررسی نتایج

۷۵	.....		مشخص حرارتی برج	(۱-۶)
۷۶	.....		نقش نوع هسته خنک کننده در تعیین نقطه طرح مناسب	(۲-۶)
۷۷	.....		اثر تغییر نسبت دبی جرمی روی عملکرد برج	(۳-۶)
۷۷	.....		اثر تغییر دمای حباب تر روی عملکرد برج	(۴-۶)
۷۸	.....		اثر تغییر دمای آب ورودی روی عملکرد برج	(۵-۶)
۷۸	.....		اثر ارتفاع هسته خنک کننده در میزان آب مصرفی	(۶-۶)
۷۹	.....		اثر ارتفاع هسته خنک کننده در افت فشار دبی هوا	(۷-۶)

پیوست‌ها

۹۱	.....	NTOWER	لیست برنامه کامپیوتری	پیوست الف :
۹۹	.....	MTOWER	لیست برنامه کامپیوتری	پیوست ب :
۱۰۷	.....		مراجع	
I	.....		چکیده انگلیسی	

چکیده

طراحی یک برج که بتواند ملزومات یک واحد صنعتی را برآورده بکند و نیز تحلیل ترموهیدرولیکی یک برج طراحی شده برای استفاده در واحد صنعتی، مستلزم انجام محاسبات تکراری و طولانی زیادی می باشد. به این منظور در پایان نامه حاضر کلیه این محاسبات در یک نرم افزار گردآوری شده است. این نرم افزار از دو قسمت اصلی تشکیل شده است:

۱ - قسمت طراحی: در این قسمت از برنامه شرایط لازم که باید برج بوجود بیاورد بعنوان داده های نرم افزار به آن وارد می شود و طبق داده های محول شده نرم افزار طراحی ترموهیدرولیکی برج را انجام می دهد. داده ها در این قسمت عبارتند از: دمای آب ورودی به برج، دمای آب خروجی از برج، دبی آب ورودی به برج، دمای حباب تر و حباب خشک محیط و نوع هسته خنک کننده که می خواهیم در برج به کار ببریم همراه با ابعاد و مشخصه های ترموهیدرولیکی آن. خروجی های نرم افزار عبارتند از: نسبت دبی جرمی آب به دبی هوا که به آن نقطه طرح می گویند و طراحی براساس آن انجام می شود، دبی هوای لازم و میزان افت فشار برای بدست آوردن مشخصات هیدرولیکی فن مورد نیاز در برج های خنک کن با جریان اجباری و ارتفاع بدنه برج خنک کن با جریان طبیعی.

۲ - قسمت تحلیل: در این قسمت تغییرات شرایط محیطی و یا شرایط طرح به عنوان داده وارد نرم افزار می شوند. سپس نرم افزار تغییرات بوجود آمده در دمای آب خروجی از برج را محاسبه می کند. در حقیقت در این قسمت انحراف از شرایط طرح محاسبه می شود. بنابراین به کمک این نرم افزار می توان مشخصه های مفیدی برحسب پارامترهای مختلف طراحی بدست آورد.

پیشگفتار

طراحی و ساخت قسمتهای مختلف یک واحد صنعتی به منظور ایجاد هماهنگی در عملکرد کلیه قسمتهای این واحد صنعتی ، از اهمیت خاصی برخوردار است . برجهای خنک کن از دیرباز یکی از مهمترین قسمتهای مکانیکی در یک واحد صنعتی بوده اند . این برجها در صنایع پتروشیمی و پالایشگاهها و همچنین در نیروگاهها کاربرد فراوان دارند . تکنولوژی پیچیده و پرهزینه ساخت و طراحی این برجها ، یکی از منابع درآمد سرشار شرکتهایی است که در این زمینه فعالیت می کنند . اهمیت تجارتي و صنعتی این تکنولوژی ، رقابت شدیدی را بین سازندگان این برجها بوجود آورده است .

در عصر حاضر به کارگیری ابزارهای پیشرفته و دقیق ، چشم انداز جدیدی را پیش روی انسان قرار داده است و مرزهای جدیدی از علم و صنعت توسط آنها گشوده شده اند . در این میان کامپیوتر یکی از قوی ترین ابزار در دست بشر می باشد . انجام محاسبات حجیم و طولانی توسط این ابزار در کمترین زمان ممکن صورت می گیرد . بنابراین برآن شدیم تا در طراحی برجهای خنک کن نیز این وسیله را به خدمت بگیریم . پایان نامه حاضر با توجه به نیاز صنایع به امر طراحی برجهای خنک کن و نیز بررسی عملکرد یک برج در یک واحد صنعتی ، تهیه و تنظیم شده است .

در این پایان نامه ابتدا به معرفی و دسته بندی برجهای خنک کن می پردازیم و سپس دسته بخصوصی از این برجها را تحت عنوان برجهای خنک کن مرطوب با جریان مخالف ، منظور کرده و بصورت مشروح به آنها می پردازیم . در فصلهای این پایان نامه روشهای طراحی برجهای خنک کن معرفی می شوند و از بین آنها مناسب ترین روش که با اهداف ما جهت تهیه برنامه کامپیوتری مطابقت داشته باشد ، انتخاب می شود . سپس کلیه مراحل محاسباتی و تئوری مربوط به مشخصات حرارتی و هیدرولیکی برجها که پایه و اساس طراحی برج و نیز تهیه برنامه کامپیوتری به همین منظور است ، شرح داده می شوند . این مطالب را برای دو دسته کلی از برجهای خنک مرطوب جریان مخالف که عبارتند از ؛ برجهای خنک کن با جریان طبیعی و برجهای خنک کن با جریان اجباری ، بررسی می کنیم . سپس ساختار برنامه کامپیوتری بطور اجمال معرفی می شود و در نهایت نتایجی را که توسط این برنامه کامپیوتری بدست آمده اند ارائه می کنیم .

فصل اول

مقدمه

۱-۱) برجهای خنک کن

برجهای خنک کن^۱ به منظور کم کردن دمای آب مصرفی در یک نیروگاه و یا یک واحد صنعتی به کار می‌روند. تکنولوژی ساخت و طراحی این برجها طی سالهای گذشته پیشرفت شایانی داشته است. متأسفانه قسمت اعظم تکنولوژی این برجها جنبه آزمایشی دارد و در نتیجه هزینه فراوانی را دربر می‌گیرد. همچنین به علت حجم زیاد این برجها، هزینه آزمایش کردن برج در اندازه حقیقی آن به مراتب بیشتر می‌باشد.

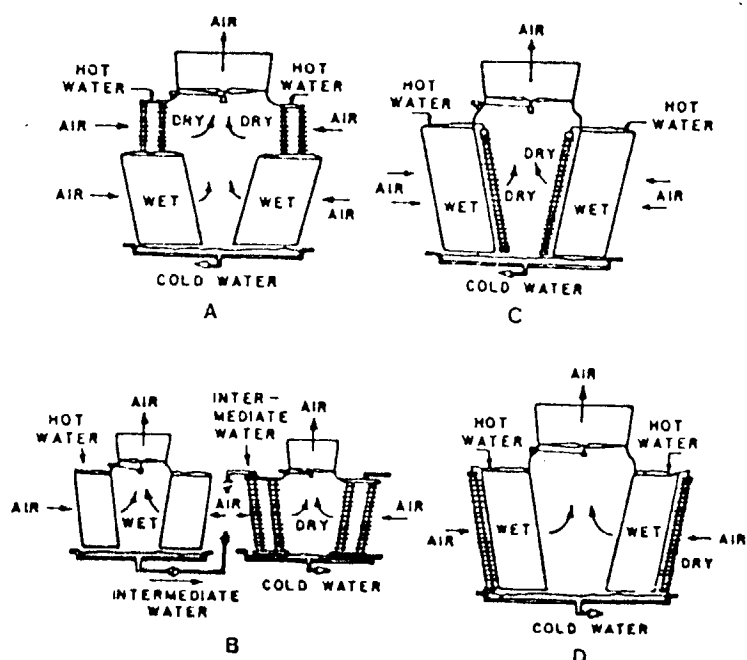
بطور کلی عامل خنک کننده در برجهای خنک کن، جریان هوا است. برجهای خنک کن را بر اساس سطح تبادل حرارت بین آب و هوا به سه دسته کلی تقسیم می‌کنند. دسته اول برجهای خنک کن خشک هستند. در این برجها هوا از روی لوله‌هایی که آب در آنها جریان دارد عبور می‌کند. بنابراین مکانیزم انتقال حرارت شبیه به مبدل‌های حرارتی معمولی است و از روشهای اختلاف دمای میانگین لگاریتمی (LMTD) یا تأثیر تعداد واحدهای انتقال حرارت (ϵ - NTU) می‌توان استفاده کرد. نقش برج در این شکل از انتقال حرارت تأمین جریان هوای لازم در قسمت مبدل حرارتی است.

دسته د. گری از برجهای خنک کن که کاربرد بیشتری دارند، برجهای خنک کن مرطوب هستند. این برجها از لحاظ ساختمان ظاهری شبیه به برجهای قبل هستند. اما در این نوع برجها به جای لوله‌های آب هسته‌های خنک کننده جایگزین می‌شوند. آب وارد شده به برج روی هسته‌های خنک کننده ریخته می‌شود و به سمت پایین جریان می‌یابد. هوا از روی سطح آب جاری گذشته و انتقال حرارت بین آب و هوا صورت می‌گیرد. در حقیقت در این نوع از برجها، تماس بین آب و هوا بصورت مستقیم می‌باشد. بنابراین انتقال حرارت به دو شکل محسوس و غیر محسوس انجام می‌گیرد. شکل محسوس انتقال حرارت ناشی از اختلاف دمای آب و هوا است که موجب اختلاف انتالپی بین دو جریان مذکور می‌شود و در نتیجه انتقال حرارت بین این دو جریان بوجود می‌آید. شکل غیر محسوس انتقال حرارت ناشی از فرآیند انتقال جرم و گرمای نهان ناشی از تبخیر آب است. این دو شکل از انتقال حرارت به طور مشروح در فصل بعد بررسی شده‌اند. بنابراین می‌توان گفت که ظرفیت خنک کنندگی این دسته از برجها نسبت به دسته قبل بیشتر است. البته به علت تبخیر آب در طی فرآیند، وجود یک منبع تأمین‌کننده آب مصرفی، در این برجها الزامی است. دسته سوم برجهایی هستند که بصورت ترکیبی از دو نوع قبل ساخته می‌شوند. یعنی قسمتی از انتقال حرارت بصورت تماس غیر مستقیم آب و هوا و قسمت دیگری بصورت تماس مستقیم آب و هوا، انجام می‌شود. نحوه قرار گرفتن هسته‌های خنک کننده و لوله‌های مبدل حرارتی، به صورتهای مختلف امکان پذیر است [۷]. ترتیب قرار گرفتن هسته‌های خنک کننده و لوله‌های مبدل حرارتی به شرایط مکانی و محیطی، ظرفیت برج، ابعاد برج و هزینه آن بستگی دارد. در شکل (۱-۱) چند ترکیب مختلف از برجهای ترکیبی تر - خشک دیده می‌شود.

برجهای خنک کن خشک برای مناطقی که کمبود آب وجود دارد، بکار برده می‌شوند. زیرا در این مناطق مصرف آب به صرفه نیست. اما در مناطقی که منبع آب، مثل دریا یا رودخانه وجود دارد، با توجه به ظرفیت خنک کنندگی بیشتر، برجهای خنک کن مرطوب به کار برده می‌شوند. بین این دو نوع از شرایط، می‌توان از برجهای ترکیبی استفاده کرد.

در بحث حاضر، برجهای خنک کن مرطوب مورد نظر هستند و کلیه مطالب در مورد این دسته از برجها مورد بررسی قرار می‌گیرند. برجهای خنک کن مرطوب را براساس جهت جریان هوا و آب نسبت به

یکدیگر به دو دسته تقسیم می‌کنند. دسته اول برجهای خنک کن با جریان مخالف^۱ هستند. در این نوع از برجها جریان هوا و آب عکس یکدیگر هستند؛ یعنی جریان آب از بالا به پایین و جریان هوا از پایین به بالا است. در حقیقت جریان‌ها را می‌توان در یک راستا بررسی کرد. دسته دوم برجهای خنک کن با جریان متقاطع^۲ هستند. در این نوع برجها جریانهای آب و هوا نسبت به یکدیگر عمود هستند و بنابراین جریانها را با دو امتداد باید مشخص کرد. همین امر باعث می‌شود که تحلیل جریان کمی مشکل تر شود. این نوع از برجها توسط کلی [۱۲] بطور کامل بررسی شده‌اند. معمولاً برجهای کوچک را از این نوع می‌سازند.



شکل (۱-۱). چند ترکیب مختلف از برجهای ترکیبی. اقتباس از کرولی [۷].

تئوریهای حاکم بر برجهای خنک کن مرطوب برای هر دو نوع شبیه به هم هستند و جز در مواردی اندک که ناشی از جهت جریانهای آب و هوا است، هیچ اختلافی بین این دو نوع برج وجود ندارد. در این بحث فقط برجهای با جریان مخالف مورد بررسی قرار می‌گیرند.

برجهای خنک کن مرطوب از نظر نیروی بوجود آورنده جریان هوا به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول برجهای خنک کن با جریان طبیعی^۳ هستند. در این برجها نیروی غوطه‌وری ناشی از اختلاف

1 - Counter flow

2 - Cross flow

3 - Natural Draft Towers

چگالی هوای داخل برج و هوای محیط، جریان هوا را بوجود می‌آورد. خصوصیت بارز این برجها ارتفاع زیاد آنها است، زیرا هرچه مقدار ارتفاع بدنه مخروطی برج بلندتر باشد، نیروی غوطه‌وری آن بیشتر می‌شود. در ضمن این نوع از برجها، باتوجه به قیمت زیاد آنها، برای ظرفیت‌های خنک‌کنندگی زیاد به کار می‌روند. دسته دوم برجهای خنک‌کن با جریان اجباری^۱ هستند. در این برجها جریان هوا توسط یک یا چند فن بوجود می‌آید. خود این برجها براساس محل قرارگرفتن فن‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند؛ اگر فن در بالای برج قرار بگیرد و هوا را از داخل برج بمکد، نوع مکشی^۲ نامیده می‌شود. اگر فن در پایین برج قرار بگیرد و هوا را به داخل فضای برج براند، نوع رانشی^۳ نامیده می‌شود. برجهای خنک‌کن با جریان اجباری کاربرد بیشتری نسبت به برجهای خنک‌کن با جریان طبیعی دارند. زیرا اولاً اندازه این برجها می‌تواند کوچک و یا بزرگ باشد و ثانیاً توسط تغییر چرخش فن و یا تغییر زاویه‌های پره‌های فن می‌توان کنترل بیشتری روی عملکرد برج داشت. در شکل (۱-۲) چند نوع برج خنک‌کن مرطوب با جریان اجباری نمایش داده شده است.

(۱-۲) کمیت‌های مهم در طراحی برجهای خنک‌کن

کمیت‌های مهم در طراحی یک برج خنک‌کن وابسته به شرایط لازم جهت خنک‌کنندگی آب مصرفی در یک چرخه و نیز شرایط محیطی محل قرارگرفتن برج می‌باشند. دمای آب ورودی به برج، دمای آب خارج شونده از برج، دمای حباب تر محیط، دمای حباب خشک محیط و نیز دبی جرمی آب، کمیت‌هایی هستند که مشخصه برج^۴ $(\frac{Kav}{L})$ براساس آنها تعیین می‌شود. اختلاف بین دمای آب ورودی و دمای آب خروجی را بازده دمایی^۵ و اختلاف بین دمای آب خروجی و دمای حباب تر محیط را دمای تمایل^۶ می‌نامند. مشخصه برج خود یک کمیت مهم در طراحی حرارتی برج است. این کمیت معرف میزان انتقال حرارت لازم به ازای نسبت شار جرمی آب به هوای مشخص است. در شکل (۱-۳) مشخصه برج به ازای دماهای تمایل مختلف ترسیم شده است.

1 - Mechanical Draft Towers

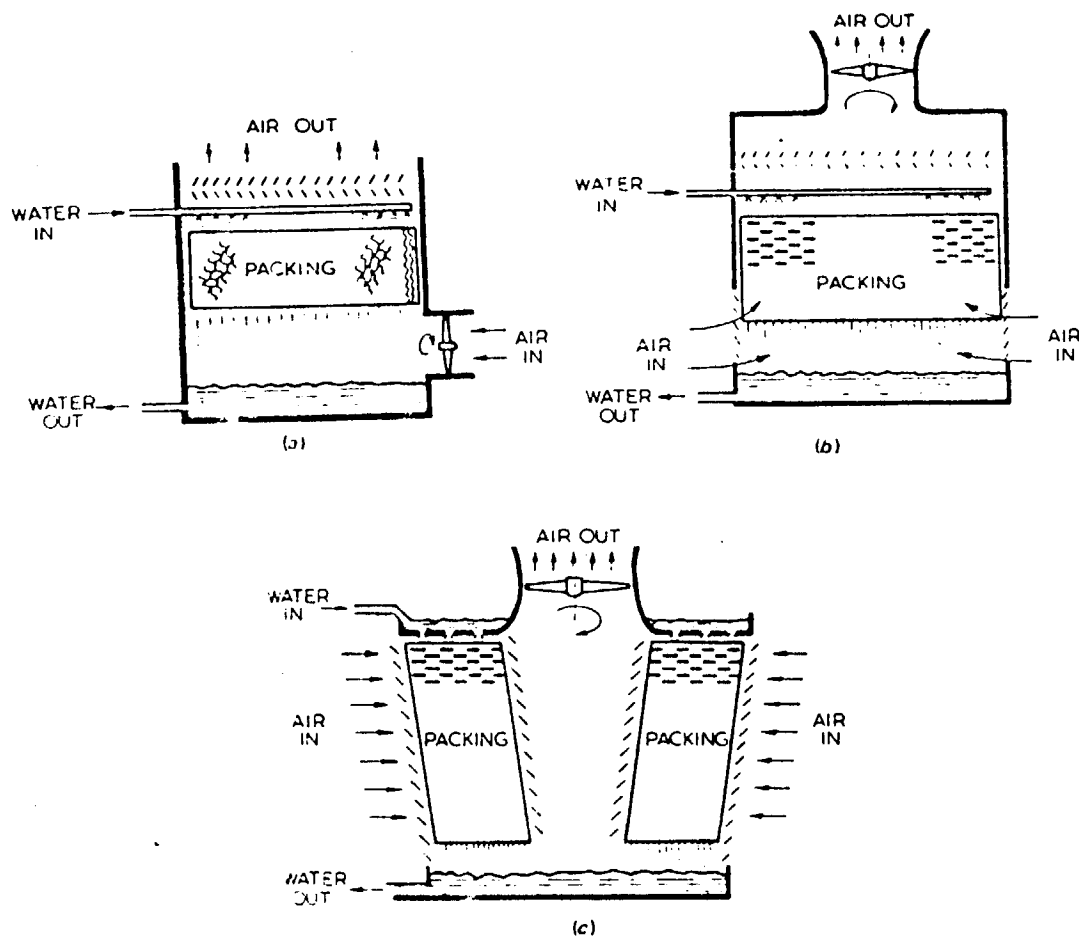
2 - Induced Draft

3 - Forced Draft

4 - Characteristic of Tower

5 - Range

6 - Approach Temperature



شکل (۱-۲). چند نوع خنک کن مرطوب با جریان اجباری.

کمیت مهم دیگر مشخصه حرارتی هسته خنک کننده^۱ است که این مشخصه نیز توان تبادل حرارتی هسته خنک کننده را به ازای نسبت شار جرمی آب به هوای مشخص نشان می دهد. در شکل (۱-۳) این مشخصه نیز برای یک نوع هسته خنک کننده نشان داده شده است. اما مهمترین کمیت نسبت شار جرمی آب به هوا است که کلیه محاسبات بعدی را ممکن می کند. این کمیت تعیین کننده میزان انتقال حرارت بین آب و هوا می باشد. بنابراین اولین قدم در طراحی یک برج، تعیین این نسبت می باشد. افت فشار نیز در طراحی برجهای خنک کن به منظور تعیین ابعاد و توان فن و یا تعیین ارتفاع برجهای خنک کن با جریان

طبیعی، دارای اهمیت است. افت فشار کل و نیز انتقال حرارت در هسته خنک کننده به ارتفاع آن وابسته است. پس ارتفاع هسته خنک کننده نیز یکی از کمیت‌های مهم در طراحی برج‌های خنک کن است. با توجه به اینکه مشخصه‌های حرارتی برج و هسته خنک کننده برحسب نسبت شار جرمی آب به هوا می‌باشند، بنابراین توان کلی برج متناسب با سطح مقطع هسته خنک کننده می‌باشد. در مورد کلیه کمیت‌های فوق و محدوده آنها از نظر طراحی، بصورت مفصل توضیح داده خواهد شد.

۱-۳) روش‌های طراحی برج‌های خنک کن مرطوب

روش قدیمی و سنتی طراحی برج‌های خنک کن با استفاده از رابطه مرکب [۱۸] می‌باشد. این روش در فصل‌های بعد بطور مفصل شرح داده خواهد شد. در این روش عامل محرک انتقال حرارت، اختلاف انتالپی بین هوای اشباع روی سطح آب و هوای جاری می‌باشد. انتقال حرارت در برج‌های خنک کن به دو شکل محسوس و غیر محسوس انجام می‌گیرد. صورت محسوس آن در اثر اختلاف دما بین آب و هوای جاری است و صورت غیر محسوس آن در اثر تبخیر آب، بصورت نهان موجب تغییر انتالپی آب می‌شود.

وب^۱ [۳۰] نشان داد که انتقال حرارت را در یک المان کوچک به سطح dA می‌توان با رابطه زیر بیان

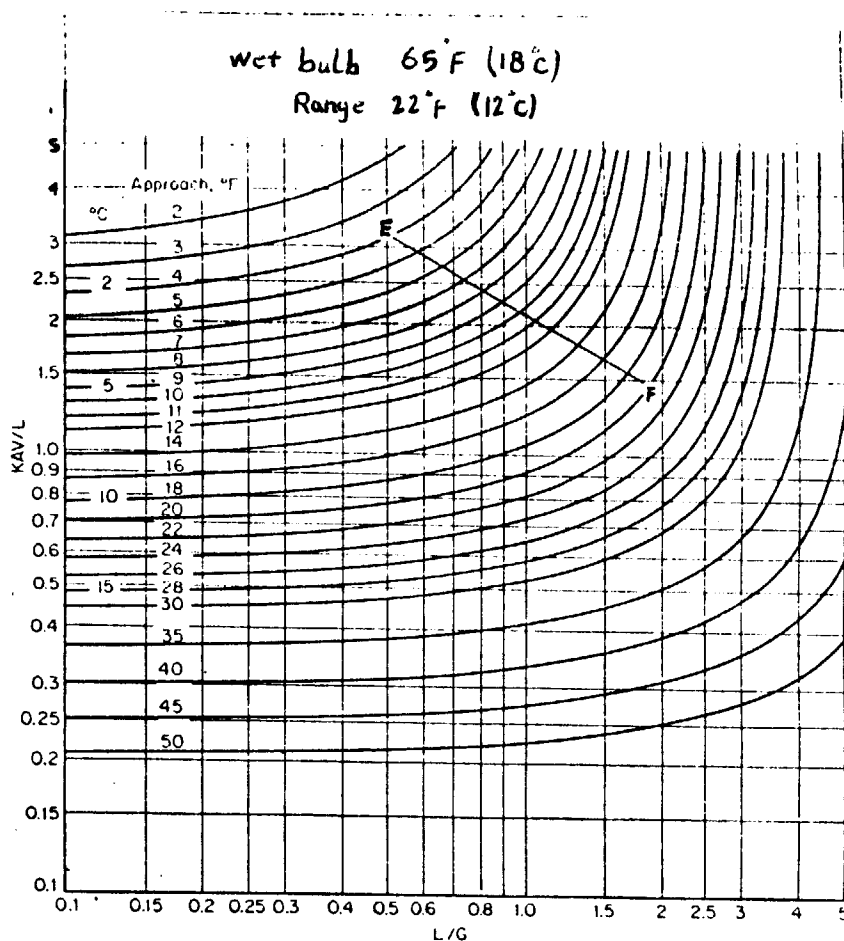
کرد:

$$dq = k_m (h_s - h_a) dA \quad (1-1)$$

که در آن h_a انتالپی هوای جاری، h_s انتالپی هوای اشباع مجاور آب و k_m ضریب انتقال جرم هستند. بنابراین کل انتقال حرارت را می‌توان با انتگرال‌گیری از رابطه (۱-۱) از ورودی تا خروجی هسته خنک کننده بدست آورد.

$$q = \int k_m (h_s - h_a) dA \quad (2-1)$$

ملاحظه می‌شود که این روش شبیه به روش محاسبه انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی است. فقط به جای اختلاف دما باید از اختلاف انتالپی استفاده کرد و در ضمن ضریب انتقال حرارت نیز توسط ضریب انتقال حرارت جایگزین شده است. برای هوا ضرایب انتقال حرارت و انتقال جرم تقریباً با هم برابرند. روش‌های مختلفی برای محاسبه انتگرال (۲-۱) پیشنهاد شده است.

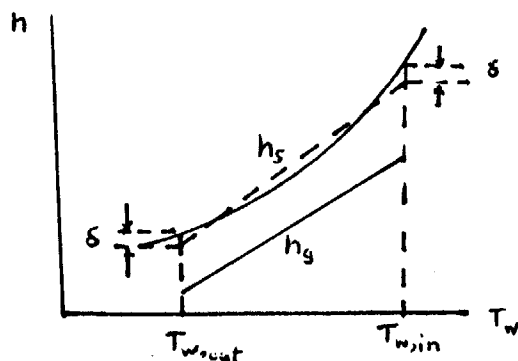


شکل (۱-۳). مشخصه‌های حرارتی برج در دماهای تمایل مختلف و مشخصه حرارتی هسته خنک‌کننده (EF)

برجهای خنک‌کن مرطوب را می‌توان نوعی مبدل حرارتی در نظر گرفت. البته برجهای خنک‌کن یک فرق اساسی با مبدلهای حرارتی ساده دارند و آن پدیده تبخیر شدن آب و یا به عبارتی پدیده انتقال جرم است. در مبدلهای حرارتی هیچ پدیده انتقال جرمی صورت نمی‌گیرد. بلکه فقط انتقال حرارت ناشی از اختلاف دما بین دو سیال بوجود می‌آید. در صورتیکه در برجهای خنک‌کن مرطوب علاوه بر انتقال حرارت ناشی از اختلاف دما بین آب و هوا، مقداری از انتقال حرارت بصورت نهان نیز بوجود می‌آید که ناشی از تبخیر آب است. با این حال شباهت برجهای خنک‌کن و مبدلهای حرارتی زیاد است. به همین دلیل روشهایی که در طراحی مبدلهای حرارتی به کار می‌روند می‌توانند با دقت نسبتاً مناسبی در طراحی برجهای

خنک کن به کار می روند .

برمن^۱ [۳] در سال ۱۹۶۱ روش اختلاف انتالپی میانگین لگاریتمی (LMED) را برای برجهای خنک کن پیشنهاد کرد . این روش شبیه به روش اختلاف دمای میانگین لگاریتمی [۲۳] (LMTD) برای مبدل‌های حرارتی است . در مبدل‌های حرارتی منحنی‌های انتالپی آب گرم و آب سرد بر حسب دما ، هر دو بصورت خط راست هستند . زیرا ظرفیت حرارتی آب سرد و گرم هر دو ثابت و برابر است . اما در برجهای خنک کن منحنی هوای اشباع بر حسب دما خط راست نیست و بنابراین استفاده از روش (LMTD) کمی خطا بوجود می آورد . برمن برای بالابردن دقت این روش یک ضریب تصحیح برای انحنای منحنی هوای اشباع معرفی کرد که بوسیله آن منحنی را می توان با یک خط راست ، مثل مبدل‌های حرارتی ، جایگزین کرد . شکل (۱-۴).



شکل (۱-۴) . انتالپی هوای اشباع h_s و انتالپی هوای جاری h_a و ضریب تصحیح δ .

روش دیگری که در مبدل‌های حرارتی بکار می رود روش (NTU - ϵ) است . اولین بار موفت^۲ [۱۹] در سال ۱۹۶۶ از این روش برای طراحی برجهای خنک کن استفاده کرد . البته او برای ϵ و NTU تعاریف جدیدی را پایه گذاری کرد که دارای ضعف بود . در روش موفت نیز انحنای هوای اشباع خطایی را در محاسبات بوجود می آورد . برای این روش نیز تصحیحاتی برای انحنای منحنی هوای اشباع در نظر گرفته شد . در روش موفت باید آب دارای نرخ ظرفیت^۳ می نیم باشد و اگر چنین نباشد ، نمی توان از روش (NTU - ϵ) استفاده کرد [۱۰] .

1 - Berman

2 - Moffatt

3 - Capacity Rate

جابر^۱ و وب [۱۰] در سال ۱۹۸۹ با تعریف جدیدی از نرخ ظرفیت توانستند کمبودهای روش موفت را جبران بکنند و روشی جامع تر ارائه بدهند. آنها همچنین با تقسیم کردن مراحل انتگرالگیری رابطه (۱-۲) نشان دادند که اگر روش (NTU - ϵ) یا (LMED - F) [۲۳] را در چند مرحله به جای یک مرحله انجام بدهند خطای کمتری در روش حاصل می شود. در روش آنها منحنی انتالپی هوای اشباع به چند قسمت تقسیم می شود و هر قسمت را توسط یک خط راست تقریب می زنند و از روش (NTU - ϵ) یا (LMED - F) در هر بخش از این منحنی استفاده می کنند. هر چقدر تعداد تقسیمات بیشتر باشد، دقت محاسبات نیز بیشتر می شود. مثل مبدل‌های حرارتی در هر یک از روشهای فوق یک کمیت باید بصورت آزمایشی یا تجربی معین بشود. در روش (NTU - ϵ) یا (LMED - F) نیز ضریب انتقال حرارت کلی (U) برای هسته خنک کننده باید به کمک آزمایش معین شود. البته ضریب انتقال حرارت کل و تعداد واحدهای انتقال حرارت با هم متناسب هستند. این دو کمیت معرف مشخصه هسته خنک کننده در برج خنک کن مرطوب هستند.

روشهای فوق از دونظر دارای اهمیت هستند؛ یکی اینکه هماهنگی بین برجهای خنک کن و مبدل‌های حرارتی بوجود می آورند و دیگر اینکه نیاز به محاسبات عددی زیاد را مرتفع می کنند. این امر مستلزم تهیه نمودارهای تجربی و یا روابط تجربی برای مشخصه‌های هسته خنک کننده است. امروزه باتوجه به کاربرد دستگاههای الکترونیکی می توان روش سنتی طراحی برجهای خنک کن را به راحتی انجام داد و از هرگونه تقریب که در روشهای قبل بیان شد دوری کرد. با این حال محاسبات افت فشار دربرجها همگی یکسان هستند و یک روش برای محاسبه افت فشار کل در فصلهای بعد شرح داده می شود.

در بخش بعدی مطالب بیشتری در مورد روش طراحی سنتی برجهای خنک کن مورد بررسی قرار می گیرد و مناسب ترین روش را برای طراحی برج به کمک کامپیوتر انتخاب می کنیم.

۱-۴) انتخاب روش مناسب جهت طراحی با کامپیوتر

در طراحی یک برج خنک کن عوامل مختلفی دخیل هستند. روش طراحی وابسته به محدودیتهای موردنظر در رابطه با کمیت‌های مهم معرفی شده در بند ۱-۲، است. برای طراحی یک برج ممکن است که ارتفاع هسته خنک کننده، سطح مقطع هسته خنک کننده، ارتفاع برج، سرعت هوا در درون هسته خنک

کننده و برج، دبی هوا و یا سرعت آب از لحاظ طراحی دارای محدودیت باشند. حدود مقادیر طراحی برای هریک از کمیتها در بخشهای آینده ذکر شده‌اند. اما بطور کلی دو نوع محدودیت در رابطه با کمیتها مهم هستند. در نوع اول نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا محدود کننده است [۸ و ۵]. در این حالت هدف از طراحی برج محاسبه ارتفاع هسته خنک کننده به منظور دستیابی به بازده دمایی خواسته شده در شرایط داده شده است. همچنین با مشخص شدن ارتفاع هسته خنک کننده و معین بودن نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوای توان محاسبات مربوط به افت فشار را در برج برای معین کردن فن لازم در برجهای با جریان اجباری و یا ارتفاع بدنه برج در برجهای با جریان طبیعی، انجام داد. برای بدست آوردن ارتفاع هسته خنک کننده باید مشخصه حرارتی برج را با مقدار نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا که بعنوان داده مسئله است، بدست آورد. همانطور که قبلاً گفته شد مشخصه حرارتی هسته خنک کننده متناسب با ارتفاع آن است. این مشخصه حرارتی باید با مقدار مشخصه حرارتی برج برابر باشد. پس با معین کردن مشخصه حرارتی هسته خنک کننده می توان ارتفاع آنرا بدست آورد.

در نوع دوم ارتفاع هسته خنک کننده دارای محدودیت است [۲۵ و ۲۲]. در این حالت هدف از طراحی برج بدست آوردن نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا به منظور دستیابی به بازده دمایی خواسته شده در شرایط داده شده است. برای مشخص کردن نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا باید مشخصه حرارتی برج طبق شرایط داده شده برحسب نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا ترسیم بشود. همچنین مشخصه حرارتی هسته خنک کننده نیز برحسب نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا ترسیم بشود. نقطه تقاطع این دو مشخصه معین کننده نقطه طراحی برج خواهد بود. پس از مشخص کردن نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا را محاسبات افت فشار در برج مثل مسئله طراحی از نوع اول خواهد بود و این قسمت از طراحی در هر دو نوع مشترک است.

بنابه دلایل زیر نوع دوم طراحی ترجیح داده می شود؛ اول اینکه هسته های خنک کننده بصورت استاندارد ساخته می شوند. بنابراین دارای ارتفاعهای معینی هستند. این هسته های خنک کننده را بصورت چند طبقه در برجها به کار می برند. بنابراین در نقطه طرح، ارتفاع هسته خنک کننده باید ضریب صحیحی از ارتفاع یک طبقه از هسته خنک کننده باشد. در طراحی نوع اول ما هیچ کنترلی روی ارتفاع هسته خنک کننده

نداریم، بلکه این شرایط داده شده هستند که ارتفاع را معین می‌کنند. پس ممکن است ارتفاع هسته خنک کننده بصورت کسری از طبقات بدست بیاید که نیاز به تصحیح به روش حدس و خطا دارد. اما در طراحی نوع دوم چنین مشکلی پیش نمی‌آید.

دوم اینکه چون در این پایان‌نامه می‌خواهیم به کمک یک برنامه کامپیوتری اثر تغییرات شرایط ورودی و محیطی را روی برج بررسی کنیم، بنابراین با یک برج معین که دارای ارتفاع هسته خنک کننده ثابت است روبرو هستیم. ضمناً روشهای تکراری (که بعداً به آنها می‌پردازیم) در برنامه کامپیوتری به گونه‌ای هستند که به کمک روش نوع دوم بهتر عمل می‌کنند و دارای حجم کمتر و سرعت بیشتری هستند. بخصوص در رابطه با برجهای خنک کن با جریان طبیعی، تحت تأثیر شرایط محیطی هیچ کنترلی روی نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا نداریم و باید در شرایط جدید این نسبت را برای ارتفاع معلوم هسته خنک کننده بدست آوریم که این دقیقاً مسأله طراحی از نوع دوم است.

سوم اینکه با این روش به سادگی می‌توان با برنامه کامپیوتری تهیه شده اثر ارتفاع هسته‌های خنک کننده را روی بازده دمایی یک برج با ابعاد معین بررسی کرد. مثلاً اگر بخواهیم راندمان حرارتی یک برج از پیش ساخته شده را تغییر بدهیم، با این روش به سادگی می‌توان نحوه تغییرات راندمان حرارتی برج را برحسب تغییر ارتفاع هسته خنک کننده آن بدست آورد. بنابراین مسأله طراحی از نوع دوم را انتخاب می‌کنیم.

۱-۵) به کارگیری کامپیوتر در طراحی برجهای خنک کن

طراحی یک برج خنک کن که شامل طراحی حرارتی و محاسبات افت فشار در آن می‌باشد، مستلزم محاسبات عددی زیاد می‌باشد. بخصوص برای بررسی عملکرد یک برج طراحی شده و معین تحت تأثیر تغییر شرایط طرح انجام این محاسبات چندین بار باید تکرار بشود. البته محاسبات عددی از قبیل محاسبه رابطه (۱-۲) را می‌توان توسط نمودارهای منتشر شده توسط نویسندگان مختلف، انجام داد. اما لازمه این امر داشتن تمامی این نمودارها می‌باشد که اولاً تعداد آنها بسیار زیاد است و ثانیاً امکان دسترسی به آنها در زمان کوتاه مشکل است. ضمناً حتی با داشتن این نمودارها انجام روشهای تکراری برای بررسی عملکرد برج تحت تأثیر تغییر شرایط طرح بسیار وقت گیر و خسته کننده است. بنابراین لزوم تهیه یک برنامه کامپیوتری که تمامی محاسبات عددی و روشهای تکراری را در کوتاهترین زمان انجام بدهد، مشهود است.

چندین برج می‌توان طراحی کرد که همه آنها مشخصات حرارتی لازم برای نصب در یک واحد صنعتی را داشته باشند. اما بین آنها مناسبترین را باید انتخاب کرد. مناسب بودن برج به شرایط مختلفی بستگی دارد. بعنوان مثال هزینه ساخت، دوام، حساسیت کم در برابر تغییر شرایط طرح و کم حجم بودن برج می‌توانند نوع طرح مناسب را مشخص بکنند. بنابراین با داشتن یک برنامه کامپیوتری می‌توان با کمترین وقت، بیشترین اطلاعات را در مورد چندین طرح مختلف بدست آورد و با مقایسه آنها، مناسبترین طرح را انتخاب کرد. همه این مراحل توسط برنامه کامپیوتری حداکثر یک یا دو روز زمان لازم دارد. در صورتیکه بدون برنامه کامپیوتری ممکن است ماهها وقت صرف چنین کاری بشود. درضمن نیاز به جمع‌آوری و نگهداری تعداد زیادی از نمودارها و مشخصه‌ها مرتفع می‌شود.

در انتهای این پایان‌نامه توسط برنامه کامپیوتری تهیه شده، چندین مشخصه حرارتی برج برای شرایط محیطی و کاری مختلف ترسیم شده‌اند که نیاز طراح را به این منحنی‌ها از بین می‌برند. در ضمن رفتار حرارتی چندین نوع هسته خنک‌کننده در یک برج طراحی شده در شرایط طرح یکسان، تحت تأثیر تغییر شرایط طرح، بررسی شده‌اند. این نتایج علاوه بر اینکه رفتار کیفی برج را بصورت کمی ارائه می‌دهند، مزایا و معایب هسته‌های خنک‌کننده مختلف را نسبت به یکدیگر نشان می‌دهند. این نتایج در فصل ششم مورد بررسی قرار می‌گیرند.

فصل دوم

برج‌های خنک‌کن مرطوب جریان مخالف

در این فصل به بررسی دسته خاصی از برج‌های خنک‌کن مرطوب می‌پردازیم. این دسته از برج‌ها، برج‌های خنک‌کن مرطوب جریان مخالف هستند. در قسمتهای مختلف این فصل ابتدا اصول طراحی حرارتی یک برج و ملزومات قراردادی آن معرفی می‌شوند. سپس فرآیندهای انتقال گرما و جرم را بررسی می‌کنیم. بعد از آن تئوری طراحی حرارتی مرکل^(۱) را شرح می‌دهیم و رابطه هسته خنک‌کننده را معرفی می‌کنیم. باتوجه به رابطه تساوی انتالپی نقطه طرح را مشخص می‌کنیم. سپس نوع هسته خنک‌کننده و مشخصه‌های حرارتی و افت فشار آن را شرح می‌دهیم و در نهایت عوامل مؤثر در غیریکنواخت بودن جریان را بیان می‌کنیم.

۱-۲) اصول طراحی حرارتی

۱-۱-۲) تعیین ملزومات برج

یک برج خنک‌کن برای پایین آوردن دمای آب گرم یک نیروگاه یا یک واحد صنعتی بکار می‌رود.

بنابراین مهمترین پارامترها در مورد آب، دمای ورودی و دمای خروجی خواسته شده برای گردش پیدا کردن در چرخه خنک کن واحد صنعتی است. در یک برج خنک کن این مقادیر مهم هستند؛

$\dot{M}_w$	دبی جرمی آب
$T_{w,in}$	دمای آب ورودی به برج
$T_{w,out}$	دمای آب خروجی از برج
T_{WB}	دمای حباب تر هوای اطراف برج
T_{DB}	دمای حباب خشک هوای اطراف برج
Pa	فشار هوای اطراف برج

معمولاً فشار هوا را یک اتمسفر در نظر می‌گیرند. دمای حباب خشک در طراحی برجهای مرطوب با جریان طبیعی مهم است. زیرا در این برجها برای محاسبه نیروی غوطه‌وری، احتیاج به محاسبه چگالی هوای ورودی و خروجی در هسته خنک کننده می‌باشد. اختلاف دمای ورودی و خروجی آب را بازده دمایی^(۱) می‌نامند. همچنین اختلاف دمای آب خروجی و دمای حباب تر هوای ورودی را دمای تمایل^(۲) می‌نامند.

۲-۱-۲) اهمیت نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا

در طراحی برجهای مرطوب با جریان اجباری برای تعیین قدرت و ابعاد فن باید میزان دبی هوای ورودی به برج معین بشود. در طراحی برجهای مرطوب با جریان طبیعی، برای تعیین ارتفاع برج باید دبی جرمی هوای ورودی مشخص بشود. بنابراین با معلوم بودن شار جرمی آب، نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا دارای اهمیت اساسی است. زیرا بقیه محاسبات مربوط به طراحی یک برج مرطوب، وابستگی زیادی به این پارامتر دارد. بنابراین تعیین این نسبت اولین قدم در طراحی یک برج می‌باشد. در برجهای جریان مخالف این نسبت از حل همزمان سه رابطه زیر بدست می‌آید [۲۵].

$$۱ - \text{رابطه مرکب [۱۸ و ۲۰]}$$

$$۲ - \text{یک رابطه برای هسته خنک کننده}$$

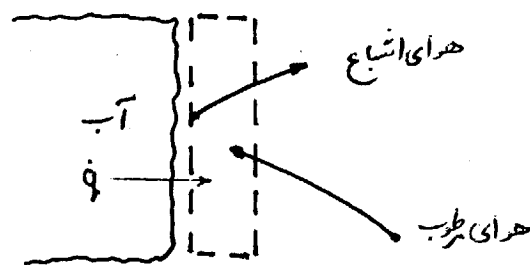
$$۳ - \text{رابطه موازنه انتالپی^(۳)}$$

در مورد سه رابطه بالا در بخشهای بعد توضیح می دهیم .

۲-۱-۳ - فرآیندهای انتقال گرما و جرم

در برجهای خنک کن ، افت دمای آب در اثر انتقال حرارت از آب به هوای درون برج و نیز از طریق تبخیر آب و ورود بخار آب ایجاد شده به هوای درون برج صورت می گیرد . زیرا تبخیر آب باعث می شود که مقداری انرژی از آن گرفته بشود و در نتیجه دمای آب کاهش یابد . در هوای خشک و گرم قسمت اعظم انتقال گرما بصورت نهان است ، زیرا اختلاف دما بین آب و هوا زیاد نیست . ولی در هوای سرد انتقال گرمای محسوس قابل ملاحظه می شود ، چون در این حالت اختلاف دما زیادتر است .

در برج خنک کن جریان هوا و آب در هسته خنک کننده با یکدیگر در تماس مستقیم هستند . بنابراین انتقال حرارت در این قسمت صورت می گیرد . شکل (۱-۲) قسمت کوچکی از سطح تماس آب و هوا را نشان می دهد .



شکل (۱-۲) . سطح تماس هوا و آب و حالت های آب و هوا .

در این شکل ابعاد سطح مایع و هوا بزرگ نشان داده شده است . تغییر انتالپی هوا برابر است با تغییر انتالپی آب (با صرف نظر کردن از مقدار آبی که بخار می شود و به خارج دمیده می شود) .

$$\dot{m}_g = dh_g = \dot{m}_w C_p dT_w \quad (1-2)$$

که در آن $\dot{m}_g$ و $\dot{m}_w$ به ترتیب شدت جریان جرم بروا حد سطح افقی ، عمود بر جهت جریان هوا (شار جرمی) برای هوا و آب می باشند . با نگاهی به نمودار سایکرومتریک^(۱) می توان دید که انتالپی هوا تقریباً فقط تابعی از درجه حرارت حباب تر می باشد . لذا می توان ادعا کرد که ظرفیت حرارتی یک برج خنک کن به اختلاف

درجه حرارت‌های حباب ترورودی و خروجی بستگی دارد و درجه حرارت حباب خشک فقط مصرف آب را تعیین می‌کند.

معادله (۲-۱) کلی است و در آن سطح تبادل حرارت و جرم ظاهر نشده است و لذا اندازه مبدل را تعیین نمی‌کند. بنابراین باید از فرمهای دیگری از معادله مذکور استفاده بشود. انتقال حرارت از یک سطح مرطوب به هوای اطراف همانطوریکه گفته شد، بصورت محسوس و نهان است. گرمای نهان منتقله هم به ضریب انتقال جرم از سطح به هوا بستگی دارد. چون مقدار تبخیر است که این گرما را مشخص می‌کند. اگر هوا بر روی لایه‌ای از آب جریان یابد، نرخ انتقال جرم (بخار) از مایع به هوا برابر است با [۵]:

$$\dot{m}_s = \gamma A(\omega_s - \omega_g) \quad (2-2)$$

که در آن γ ضریب انتقال جرم، ω_s رطوبت مطلق هوا در سطح آب (که رطوبت مطلق هوای اشباع در دمای سطح آب می‌باشد)، ω_g رطوبت مطلق هوای اطراف، A سطح تبادل حرارت و $\dot{m}_s$ دبی جرمی بخار انتقال یافته از آب به هوا هستند. اما تشابهی بین ضریب انتقال حرارت و ضریب انتقال جرم وجود دارد بصورت زیر:

$$\frac{h}{\gamma C_p} \approx \left(\frac{\alpha}{D}\right)^{1/2}$$

که در آن α ضریب پخش حرارت و D ضریب پخش رطوبت در هوا است و نسبت این دو، عدد لوئیس^(۱) نامیده می‌شود. برای هوا عدد لوئیس تقریباً برابر واحد است [۲۹]. در نتیجه رابطه زیر بین ضریب انتقال حرارت و ضریب انتقال جرم برای هوا و آب وجود دارد.

$$\gamma = \frac{h}{C_{p_m}} \quad (3-2)$$

با استفاده از معادله (۲-۱) انتقال حرارت به واحد سطح برابر است با [۱۴]

$$\frac{Q}{A} = h(T_s - T_g) + \gamma(\omega_s - \omega_g)h_{fg} \quad (4-2)$$

به جای ضریب جابجایی h از رابطه (۳-۲) بر حسب ضریب انتقال جرم γ قرار می‌دهیم.

$$\frac{Q}{A} = \gamma [C_{p_m} (T_s - T_g) + (\omega_s - \omega_g)h_{fg}] \quad (5-2)$$

اما انتالپی هوا طبق تعریف عبارتست از:

$$h_g = C_{p_g} T_g + \omega_g h_v \quad (6-2)$$

که در آن h_v انتالپی بخار آب موجود در هوا می باشد. از طرفی انتالپی بخار آب برابر است با

$$h_v = C_{p_g} (T_g - T_0) + h_{fg0} \quad (۷-۲)$$

که در آن T_0 درجه حرارت مرجع است که برابر با صفر درجه گرفته می شود تا با مبنای انتالپی هوا منطبق باشد.

در نتیجه:

$$\begin{aligned} h_g &= C_{p_g} T_g + \omega_g C_{p_v} T_g + \omega_g h_{fg0} \\ &= (C_{p_g} + \omega_g C_{p_v}) T_g + \omega_g h_{fg0} \end{aligned} \quad (۸-۲)$$

اگر از تغییرات گرمای نهان h_{fg} با درجه حرارت صرف نظر کنیم

$$h_g = C_{p_m} T_g + \omega_g h_{fg} \quad (۹-۲)$$

که در آن C_{p_m} گرمای ویژه متوسط است. با استفاده از معادله (۹-۲) معادله (۵-۲) بصورت زیر درمی آید:

$$\dot{q} = \frac{Q}{A} = \gamma (h_s - h_g) \quad (۱۰-۲)$$

که در آن h_s انتالپی هوای اشباع در دمای سطح آب و h_g انتالپی هوای مرطوب در جریان اصلی هوا است. ملاحظه می شود نیروی محرکه انتقال حرارت و جرم (همزمان) اختلاف انتالپی است. در حالیکه نیروی محرکه انتقال حرارت، اختلاف دما و نیروی محرکه انتقال جرم، اختلاف غلظت در یک مخلوط می باشد. پس در تحلیل برجهای خنک کن مرطوب فرضیات زیر اساسی هستند:

- ۱ - دمای هوای روی سطح تماس برابر دمای آب جاری است.
 - ۲ - هوا در سطح تماس، بصورت اشباع می باشد.
 - ۳ - مقدار انتقال حرارت $\dot{q}$ از رابطه (۱۰-۲) بدست می آید.
- γ دارای واحد شار جرمی است. به وسیله مدل رینولدز^(۱) [۲۷] می توان γ را به دوروش توصیف کرد. باتوجه به شکل (۱-۲) در این مدل قسمت سطح تماس را سمت هوای جاری در نظر می گیریم. جریان در این مدل به دو صورت است:

- ۱ - جریان هوا به سمت سطح تماس که دارای خواص جریان هوا است، با دبی جرمی γ_R بر واحد سطح تماس.

۲ - جریانی برابر جریان قبل از سطح تماس به جریان هوا که دارای خواص هوا در سطح تماس است . قانون اول ترمودینامیک را برای حجم کنترل نشان داده شده روی سطح تماس می نویسیم .

$$\dot{q} = \gamma_R (h_s - h_g) \quad (11-2)$$

دبی γ_R را دبی رینولدز می نامند [۲۷]. باتوجه به روابط (۱۰-۲) و (۱۱-۲) نتیجه زیر بدست می آید :

$$\gamma = \gamma_R \quad (12-2)$$

اگر سطح را خشک در نظر بگیریم رابطه ای شبیه رابطه (۱۱-۲) بدست می آید که در آن به جای انتالپی باید از حاصلضرب گرمای ویژه هوا در فشار ثابت و دما استفاده کنیم .

$$\dot{q} \approx \gamma_R C_p (T_s - T_g) \quad (13-2)$$

این رابطه تقریبی است . علت آن این است که γ_R در رابطه (۱۳-۲) دقیقاً برابر γ_R در رابطه (۱۱-۲) نیست . زیرا در رابطه (۱۱-۲) مقداری انتقال جرم نیز در اثر تبخیر بوجود می آید . ولی در رابطه (۱۳-۲) انتقال جرم صورت نمی گیرد . پس باتوجه به روابط (۱۱-۲) و (۱۳-۲) می توان γ را تقریب زد .

$$\gamma = \frac{h}{C_p} \quad (3-2)$$

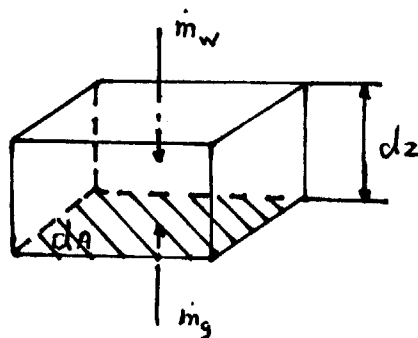
بنابراین به کمک رابطه (۳-۲) می توان انتقال حرارت روی سطح تماس مرطوب را با انتقال حرارت روی سطح خشک بصورت تقریبی بدست آورد . البته کاربرد این فرمول احتیاج به بحث بیشتری دارد . زیرا از یک طرف مدل رینولدز یک مدل تقریبی است و از طرف دیگر رفتار هندسی جریان روی سطح خشک با رفتار جریان روی سطح مرطوب اختلاف دارد .

همانطور که گفته شد همراه با انتقال حرارت ، انتقال جرم نیز صورت می گیرد . البته محاسبه انتقال حرارت با رابطه (۱۰-۲) به مقدار انتقال جرم زیاد بستگی ندارد و معمولاً از جزئیات مربوط به انتقال جرم صرف نظر می کنند . مطالعات انجام شده نیز نشان می دهد که در نظر گرفتن انتقال جرم بهبود چندانی در محاسبات حاصل نمی کند . اطلاعات بیشتر در این زمینه را می توان در مرجع [۲] بدست آورد . در بیشتر محاسبات معمولاً حالت خروجی هوا را از هسته خنک کننده اشباع در نظر می گیرند و برای محاسبه چگالی هوا و مقدار آب آن از انتالپی هوای خروجی استفاده می کنند . این انتالپی از محاسبات انتقال حرارت بدست می آید . البته اگر هوای خروجی اشباع نباشد ، حالت خروجی آن بدون در نظر گرفتن انتقال جرم قابل محاسبه نیست . این حالت را در بخشهای آتی بررسی می کنیم .

۲-۲) تئوری طراحی حرارتی

۱-۲-۲) رابطه مرکب [۱۸ و ۲۰]

رابطه مرکب کمیتهای لازم جهت خنک کردن را به خواص و اطلاعات هسته خنک کننده مربوط می‌کند. المان کوچکی در هسته خنک کننده یک برج خنک کن مرطوب جریان مخالف در نظر بگیرید شکل (۲-۲).



شکل (۲-۲). المان هسته خنک کننده. المان حجم dV و سطح تماس A_i بر واحد حجم.

نرخ انتقال حرارت از آب به هوا در داخل المان $d\dot{Q}$ با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$d\dot{Q} = \dot{q} A_i dV \quad (۱۴-۲)$$

که در آن A_i سطح تماس آب و هوا بر واحد حجم، dV حجم المان و $\dot{q}$ شار حرارتی^(۱) موضعی در سطح تماس که با رابطه (۱۰-۲) مشخص شده است، می‌باشند. قانون اول ترمودینامیک برای جریان هوای مرطوب از داخل المان چنین است.

$$d\dot{Q} = (\dot{m}_g dA) dh_g \quad (۱۵-۲)$$

که در آن dA سطح جریان المان و dh_g افزایش انتالپی هوای مرطوب در راستای جریان هوا می‌باشند. رابطه (۱۵-۲) یک رابطه تقریبی است اما دقت آن زیاد است [۲]. با مساوی قرار دادن روابط (۱۴-۲) و (۱۵-۲) و جایگذاری $\dot{q}$ از رابطه (۱۰-۲) به رابطه زیر می‌رسیم.

$$\frac{dh_g}{h_s - h_g} = \frac{\gamma}{\dot{m}_g} A_i dz \quad (۱۶-۲)$$

که dz طول المان در راستای جریان هوا است. از موازنه انتالپی استفاده می‌کنیم.

$$\dot{m}_g dh_g = -\dot{m}_w dh_w \quad (۱۷-۲)$$

باتوجه به اینکه $\dot{m}_w$ برابر با $\frac{\dot{M}_w}{A}$ می‌باشد، از حذف dh_g در سمت چپ رابطه (۱۷-۲) نتیجه می‌گیریم

$$\frac{dh_w}{h_s - h_g} = \frac{\gamma A_i}{\dot{M}_w} Adz \quad (۱۸-۲)$$

حال می‌توان از رابطه (۱۸-۲) بین ورودی و خروجی هوا در هسته خنک کننده انتگرال گرفت.

$$\int_{h_{w,out}}^{h_{w,in}} \frac{dh_w}{h_s - h_g} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\gamma A_i}{\dot{M}_w} Adz$$

یا

$$I_M = I_P \quad (۱۹-۲)$$

رابطه (۱۹-۲) اساس تحلیل مرکب می‌باشد. مقدار انتگرال I_M به خواص آب و هوا در ورودی و خروجی برج بستگی دارد و توسط یک روش عددی می‌توان مقدار این انتگرال را بدون در نظر گرفتن نوع هسته خنک کننده محاسبه کرد. مقدار انتگرال I_P به خواص هسته خنک کننده بستگی دارد و مستقل از خواص ورودی و خروجی آب و هوا است. بنابراین طراحی یک برج، درحقیقت تعیین خواص و مقادیر آب و هوا و تعیین خواص هسته خنک کننده به گونه‌ایست که تساوی (۱۹-۲) برقرار باشد.

۲-۲-۲) مشخصه هسته خنک کننده

مقدار انتگرال I_P در رابطه مرکب (۱۹-۲) برای انواع مختلف هسته‌های خنک کننده با ارتفاعهای مختلف و نیز برای خواص افشانه‌های بخصوص اندازه‌گیری شده است. بحث مربوط به افشانه‌ها را بعداً در نظر می‌گیریم. مقدار این انتگرال معمولاً توسط آزمایش‌های تجربی بدست می‌آید و نتایج بصورت نمودار و یا فرمول تجربی بیان می‌شوند. این فرمولها معمولاً برای مقاطع دایره‌ای شکل بدست آمده‌اند. در رابطه (۱۹-۲) ابتدا $\dot{M}_w$ را با $\frac{\dot{m}_w/\dot{m}_g}{M_g}$ جایگزین می‌کنیم. سپس $\dot{m}_g$ را به جای $\frac{\dot{M}_g}{A}$ جایگزین می‌کنیم. نتیجه چنین می‌شود:

$$I_P = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_w} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\gamma}{\dot{m}_g} A_i dz \quad (۲۰-۲)$$

مقدار $\frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_w}$ مقدار ثابتی در نظر گرفته شده و از انتگرال خارج شده است. از طرفی می‌دانیم که

$$\gamma = \frac{h}{C_p} \quad (۲۱-۲)$$

بنابراین (۲۰-۲) را می توان چنین نوشت

$$I_p = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_w} \int_{z_1}^{z_2} \frac{h}{C_p \dot{m}_g} A_i dz \quad (21-2)$$

مقدار $\frac{h}{C_p \dot{m}_g}$ عدد استنتن^(۱) می باشد که وابسته به عدد رینولدز (عدد رینولدز برای هوا) می باشد، پس می توان گفت که I_p تابعی از نسبت شار جرمی ها و عدد رینولدز هوا می باشد.

$$I_p = f\left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}, Re_g\right) \quad (22-2)$$

از آنجا که شکل سطح تماس هوا و آب، A_i پیچیده است، پیدا کردن رابطه ای برای عدد استنتن نمی تواند در مشخص کردن I_p کمکی بکند. زیرا A_i علاوه بر سطح تماس شامل سطح ریزش آب نیز می باشد. پس بهتر است که عدد $\frac{\gamma}{\dot{m}_g} A_i$ را بصورت یک گروه از کمیتها در نظر بگیریم. می توان این گروه را یک مقدار ثابت در نظر گرفت که مقدار آن را باید از آزمایش بدست آورد و در نتیجه مقدار I_p چنین می شود.

$$I_p = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_w} \left[\left(\frac{\gamma}{\dot{m}_g} \right) A_i (z_2 - z_1) \right] \quad (23-2)$$

پس بطور کلی مقدار I_p یا مقدار داخل کروشه ها در رابطه فوق را باید توسط آزمایش معین کرد بصورت تابعی از کمیت بی بعد نسبت شار جرمی ها بیان کرد.

مقدار انتگرال I_p را که مشخصه ای برای هسته خنک کننده در برج است، می توان به دو فرم بررسی کرد. در فرم اول مقدار داخل کروشه را در رابطه (۲۳-۲) بعنوان مشخصه ای که شامل خواص حرارتی هسته خنک کننده است در نظر می گیریم و در فرم دوم کلیه مقدار I_p را بعنوان مشخصه هسته خنک کننده معرفی می کنیم. هر دو روش در عمل به کار می روند. در روش اول مقدار داخل کروشه را که شامل عدد استنتن می باشد، بعنوان تعداد واحدهای انتقال حرارت (NTU) معرفی می کنیم. حاصل ضرب $A_i(z_2 - z_1)$ برابر سطح تماس آب و هوا بر واحد سطح ریزش هسته خنک کننده، a_i می باشد. پس NTU را می توان چنین تعریف کرد:

$$NTU = \frac{\gamma}{\dot{m}_g} a_i \quad (24-2)$$

از آنجا که a_i متناسب با ارتفاع هسته خنک کننده است، پس NTU نیز متناسب با ارتفاع هسته خنک کننده است. پس NTU' را برابر NTU بر واحد ارتفاع هسته خنک کننده تعریف می کنیم.

$$NTU' = \frac{NTU}{z_2 - z_1} \quad (25-2)$$

باتوجه به مطالب فوق I_p را می توان چنین نوشت

$$I_p = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_w} NTU \quad (26-2)$$

اگر این مقدار را در رابطه مرکب قرار دهیم نتیجه چنین می شود :

$$\int_{h_{w,out}}^{h_{w,in}} \frac{dh_w}{h_s - h_g} = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_w} NTU \quad (27-2)$$

باید توجه داشت که چون I_p تابعی از نسبت دبی ها و عدد رینولدز هوا است ، پس NTU نیز چنین است .

$$NTU = f\left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}, Re_g\right) \quad (28-2)$$

در روش دوم خود I_p بعنوان مشخصه هسته خنک کننده اندازه گیری می شود . بنابراین در رابطه (۲۳-۲) عبارت داخل کروشه را درنسبت دبی ها ضرب می کنیم که $\dot{m}_g$ حذف می شود .

$$I_p = \frac{\gamma A_i (z_2 - z_1)}{\dot{m}_w} \quad (29-2)$$

در اکثر مقالات و کتابهایی که در این زمینه منتشر شده اند ، مشخصه خنک کننده بصورت $\frac{Kav}{L}$ معرفی

شده است . متغیرهای این کمیت با متغیرهای رابطه (۲۹-۲) هم ارز هستند . L معرف شار جرمی آب است . پس L و $\dot{m}_w$ هم ارز هستند . مقدار γ همان K است . مقدار a نیز متناظر با A_i می باشد و همچنین $z_2 - z_1$ که برابر حجم مؤثر هسته خنک کننده بر واحد سطح ریزش است ، با V هم ارز می باشد . پس رابطه مرکب با متغیرهای تعریف شده جدید چنین می شود :

$$\int_{h_{w,out}}^{h_{w,in}} \frac{dh_w}{h_s - h_g} = \frac{Kav}{L} \quad (30-2)$$

مزیت روش اول این است که مشخصه حرارتی هسته خنک کننده بصورت واحدهای انتقال حرارت

بیان می شود که در همه روشهای انتقال حرارت خشک مورد استفاده قرار می گیرد . بنابراین هماهنگی بین روشهای طراحی کلیه مبدلهای حرارتی بوجود می آورد . مزیت روش دوم این است که دبی ها را از رابطه مرکب حذف می کند و بنابراین تابعیت مشخصه نسبت به $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ در خود مشخصه ملحوظ می شود .

۳-۲-۲) موازنه انتالپی

یک المان کوچک را که در راستای افقی گسترده است ، در هسته خنک کننده در نظر بگیرید . مقدار

انتقال حرارت dQ از آب به هوا در جهت جریان هوا به طور تقریب چنین است :

$$dQ = \dot{m}_g dh_g = - \dot{m}_w dh_w \quad (۳۱-۲)$$

علت تقریبی بودن رابطه این است که از انتقال جرم ناشی از تبخیر آب صرف نظر کرده ایم . حال اگر در محدوده هسته خنک کننده از رابطه (۳۱-۲) انتگرال بگیریم نتیجه چنین می شود :

$$\dot{m}_g (h_{g,out} - h_{g,in}) = \dot{m}_w (h_{w,in} - h_{w,out}) \quad (۳۲-۲)$$

از رابطه اخیر می توان برای تعیین $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ استفاده کرد .

۲-۲-۴) تعیین نسبت دبی جرمی آب به هوا

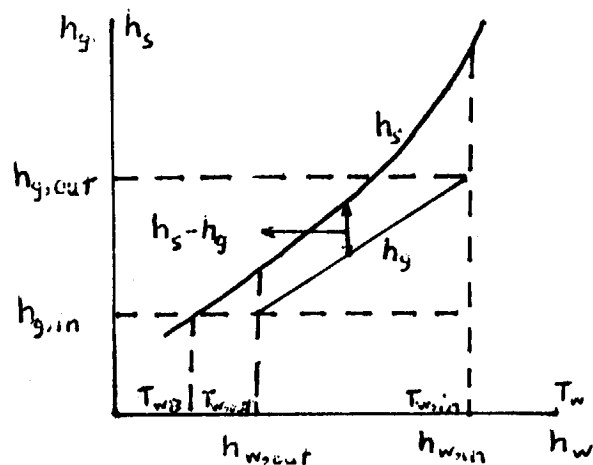
همانطور که گفته شد برای طراحی برج باید رابطه مرکب I_M و I_P هر دو تابعی از $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ هستند ، پس نقطه طراحی برج نقطه ای است که در آن رابطه (۱۹-۲) برقرار بشود . برای این منظور سه مرحله را باید انجام داد :

۱ - تعیین I_M در $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ های مختلف

۲ - تعیین I_P در $\frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_w}$ های مختلف

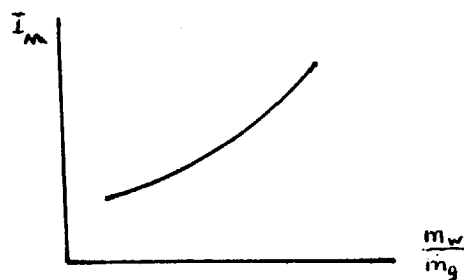
۳ - تعیین $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ که رابطه (۱۹-۲) را ارضا بکند .

مرحله اول : برای تعیین I_M می توان شکل (۳-۲) را در نظر گرفت . در این شکل منحنی h_g و h_s بر حسب h_w ترسیم شده اند . البته محور h_w را می توان با دمای آب تقسیم بندی کرد . چون مقدار h_w متناسب با T_w است و در عمل از دمای آب استفاده می شود . بنابراین هر دو مقیاس روی شکل ترسیم شده اند . انتالپی هوای ورودی به هسته خنک کننده برابر انتالپی هوای اشباع در دمای حباب تر محیط است . زیرا انتالپی هوای مرطوب در فشار اتمسفر و انتالپی مرجع در دمای صفر درجه ، تنها تابعی از دمای حباب تر می باشند . انتالپی هوا h_g در هر $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ از رابطه (۳۲-۲) بدست می آید . رابطه (۳۱-۲) نشان می دهد که شیب خط h_g برابر مقدار ثابت $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ است . بنابراین مقادیر میانی h_g را می توان با میانبایی خطی بدست آورد . پس مقدار انتگرال I_M را می توان به روشهای ترسیمی یا عددی بدست آورد .



شکل (۳-۲). محاسبه I_M . مقادیر h_s از جدول (۱-۲) بدست می آیند.

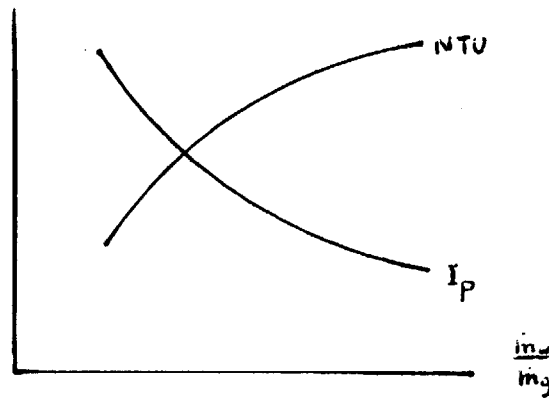
یک روش تقریبی برای محاسبه I_M روش چهار نقطه‌ای است. در این روش مقدار $h_s - h_g$ برابر میانگین آن در فواصل ۰/۹ و ۰/۶، ۰/۴، ۰/۱ روی محور افقی h_w بین $h_{w,in}$ و $h_{w,out}$ در نظر گرفته می شود [۴]. افزایش مقدار $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ باعث افزایش شیب خط h_g می شود، اما نقطه $h_{g,in}$ ثابت است. پس $h_s - h_g$ با افزایش مقدار $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ کاهش می یابد و بنابراین مقدار انتگرال I_M افزایش می یابد. ضمناً $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ تا یک حد معین بیشتر نمی تواند افزایش یابد. زیرا در این حالت خط h_g بر منحنی h_s مماس می شود و یا آنرا قطع می کند که موجب بزرگ شدن بیش از حد I_M می شود. برای این شرایط قسمت هسته خنک کننده باید خیلی بزرگ بشود که مطلوب نیست. شکل (۴-۲) تغییرات I_M را برحسب $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ نشان می دهد.



شکل (۴-۲). نحوه تغییرات I_M برحسب $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$.

مرحله دوم: در این مرحله تغییرات I_p برحسب $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ باید مشخص بشود. در این مرحله یک نوع هسته خنک کننده و ارتفاع آنرا انتخاب می کنیم. همانطور که قبلاً گفته شد $\frac{Kav}{L}$ برحسب $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ و Re_g می باشد.

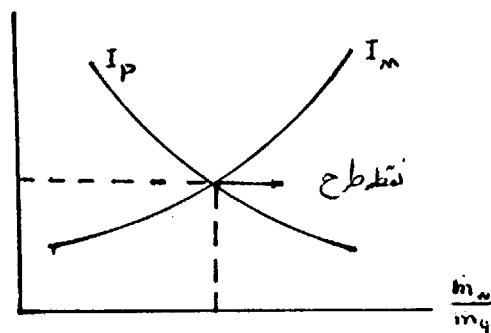
معمولاً از تابعیت I_p نسبت به Re_g به علت ضعیف بودن این تابعیت، صرف نظر می کنند. در ضمن مقدار NTU با افزایش $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ افزایش می یابد و طبق رابطه (۲-۲۶) مقدار $\frac{Kav}{L}$ کاهش می یابد. شکل (۲-۵) تغییرات NTU و I_p را برحسب $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ نشان می دهد.



شکل (۲-۵). تغییرات NTU و I_p برحسب $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$.

مرحله سوم: حال که نمودار تغییرات I_p و I_M را برحسب $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ بدست آوردیم می توان نقطه طرح برج را بدست آورد. این دو منحنی در یک نقطه یکدیگر را قطع می کنند که همان نقطه طرح می باشد. بنابراین نسبت دبی های آب و هوا برای یک نوع هسته خنک کننده با ارتفاع معین و شرایط حرارتی خواسته شده، تعیین می شود، شکل (۲-۶). پس از مشخص شدن نسبت دبی ها می توان دبی جرمی هوا را از رابطه زیر بدست آورد.

$$\dot{M}_g = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_w} \dot{M}_w \quad (۲-۳۲)$$



شکل (۲-۶). نحوه بدست آوردن نقطه طرح.

حال می توان در طراحی برجهای با جریان طبیعی ، برای ابعاد حدس زده شده میزان افت فشار را در برج با نیروی غوطه وری تولید شده مقایسه کرد . در طراحی برجهای با جریان اجباری نیز برای هر سطح مقطع برج می توان میزان افت فشار را محاسبه کرد و اندازه و قدرت فن لازم را برای برج بدست آورد . در هر دو نوع طراحی ، تعداد زیادی طرح هستند که شرایط خنک کنندگی خواسته شده را ارضاء می کنند و جواب مسأله هستند . در این مرحله باید با توجه به هزینه ساخت و حداقل کردن مقدار آن بهترین نوع برج را انتخاب کرد .

خواص هوای خشک و هوای اشباع که در روابط گذشته به کار می روند در جدول (۱-۲) آورده شده است . این خواص در فشار یک اتمسفر اندازه گیری شده اند .

جدول (۱-۲) . خواص آب ، هوای خشک و هوای اشباع در فشار یک اتمسفر

Temp. °C	Saturated-water substance				Dry air		Saturated air ($p = 1 \text{ atm}$)		
	Saturation pressure, kN/m ²	Specific enthalpy, kJ/kg		Specific volume, steam, m ³ /kg	Specific enthalpy, kJ/kg	Density, kg/m ³	Specific enthalpy, kJ/kg	Density, kg/m ³	Mass fraction humidity, kg/kg
		Water	Steam						
0	0.61	0.0	2501.6	206.2	0.0	1.293	9.4	1.289	0.00376
2	0.71	8.4	2505.2	179.9	2.0	1.283	12.9	1.280	0.00434
4	0.81	16.8	2508.9	157.3	4.0	1.274	16.6	1.270	0.00500
6	0.93	25.2	2512.6	137.8	6.0	1.265	20.5	1.260	0.00576
8	1.07	33.6	2516.2	121.0	8.0	1.256	24.6	1.251	0.00661
10	1.23	42.0	2519.9	106.4	10.0	1.247	29.0	1.241	0.00757
12	1.40	50.4	2523.6	93.8	12.1	1.238	33.8	1.232	0.00865
14	1.60	58.8	2527.2	82.9	14.1	1.229	38.9	1.222	0.00987
16	1.82	67.1	2530.9	73.4	16.1	1.221	44.3	1.213	0.01124
18	2.06	75.5	2534.5	65.1	18.1	1.212	50.2	1.203	0.01277
20	2.34	83.9	2538.2	57.8	20.1	1.204	56.6	1.194	0.01449
22	2.64	92.2	2541.8	51.5	22.1	1.196	63.4	1.184	0.01640
24	2.98	100.6	2545.5	45.9	24.1	1.188	70.8	1.175	0.01854
26	3.26	108.9	2549.1	41.0	26.1	1.180	78.9	1.165	0.02091
28	3.78	117.3	2552.7	36.7	28.1	1.172	87.6	1.156	0.02356
30	4.24	125.7	2556.4	32.9	30.1	1.165	97.1	1.146	0.02650
32	4.75	134.0	2560.0	29.6	32.1	1.157	107.3	1.136	0.02976
34	5.32	142.4	2563.6	26.6	34.1	1.149	118.5	1.127	0.03337
36	5.94	150.7	2567.2	24.0	36.1	1.142	130.7	1.117	0.03736
38	6.62	159.1	2570.8	21.6	38.2	1.135	144.0	1.107	0.04178
40	7.38	167.5	2574.4	19.55	40.2	1.127	158.4	1.096	0.04666
42	8.20	175.8	2577.9	17.69	42.2	1.120	174.1	1.086	0.05204
44	9.10	184.2	2581.5	16.04	44.2	1.113	191.3	1.076	0.05797
46	10.09	192.5	2585.1	14.56	46.2	1.106	210.0	1.065	0.06451
48	11.16	200.9	2588.6	13.23	48.2	1.099	230.4	1.054	0.07170
50	12.33	209.3	2592.2	12.05	50.2	1.093	252.6	1.042	0.07962

۲-۳) هسته خنک کننده

۲-۳-۱) انتخاب نوع هسته خنک کننده

هسته خنک کننده برای جلوگیری از ریزش سریع آب در فضای داخل برج و ایجاد سطح تبادل حرارت بین آب و هوا به کار می‌رود. برای چنین منظوری دو روش ممکن است بکار برده شود. ابتدا می‌توان هسته خنک کننده را به شکلی به کار برد که قطرات آب به آنها برخورد بکنند و پخش شوند، که در این روش باید هسته خنک کننده را به صورت تیرهای افقی در مسیر قطرات آب قرار داد. در روش دوم هسته خنک کننده را طوری به کار می‌برند که یک لایه نازک آب روی آن ایجاد بشود و انتقال حرارت با جریان هوا توسط این لایه نازک آب صورت بگیرد. یک روش برای پخش کردن قطرات آب در فضای برج، به کار بردن افشانه^(۱) در برج است. در این حالت احتیاجی به هسته خنک کننده نیست و افشانه خود نقش پخش کنندگی آب را دارد. لوو^(۲) و کریستی^(۳) [۱۶] مطالعات آزمایشگاهی را در مورد این نوع از برجهای انجام داده‌اند. البته امروزه به کاربردن هسته خنک کننده ترجیح داده می‌شود، زیرا نصب یک افشانه پایدار در فضای خالی برج امکان پذیر نیست. هرچند که وجود افشانه در بالا و پایین هسته خنک کننده می‌تواند سطح تبادل حرارتی را افزایش بدهد.

هسته‌های خنک کننده را از مواد مختلفی می‌سازند. از جمله چوب، پلاستیک، صفحات آلزست سیمانی شیاردار، صفحه پلاستیکی فرم داده شده و صفحات فولاد گالوانیزه، صفحات فایبرگلاس^(۴) یا صفحاتی که با رزین اشباع شده‌اند. بعضی از هسته‌های خنک کننده که توسط لوو و کریستی [۱۶] آزمایش شده‌اند در شکل (۲-۷) نشان داده شده‌اند. تخته‌های چوبی کاربرد زیادی دارند. بخصوص بعنوان تیرهای پخش کننده^(۵). اما تخته‌هایی که شکل هندسی خاصی دارند، می‌توانند سطح بیشتری را ایجاد کنند. صفحات آلزست سیمانی شیاردار در برجهای بزرگ و نیز در برجهای با جریان طبیعی قابلیت زیادی دارند و بیشتر در این نوع از برجهای به کار می‌روند [۱۱]. اما چنین صفحاتی سنگین هستند و حمل و نقل آنها مشکل است. بنابراین معمولاً در برجهای کوچک از آنها استفاده نمی‌شود. در برجهای کوچک تیرهای چوبی و نوع بخصوصی از پلاستیکهای فرم داده شده بهتر هستند.

1 - Spray

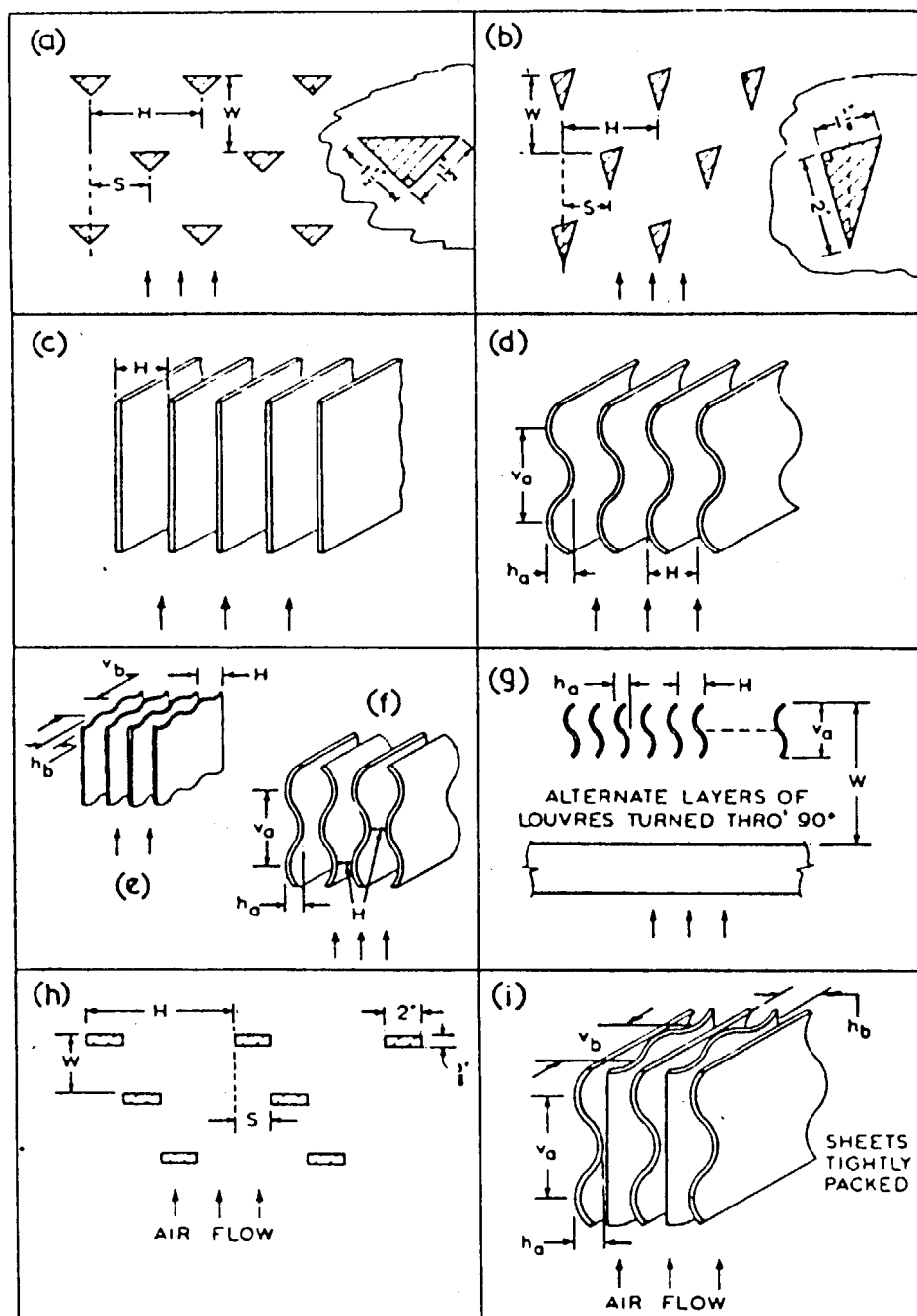
2 - Lowe

3 - Christie

4 - Fiberglass

5 - Splash bars

پارامترهای مهم در انتخاب هسته خنک کننده بسیار هستند. مهمترین آنها مشخصه حرارتی، افت فشار، قیمت و دوام آن است. البته مشخصه حرارتی و افت فشار از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. دوام هسته خنک کننده برای برجهایی که نباید زیاد بی کار باشند از اهمیت خاصی برخوردار است. در برجهایی که در نیروگاههای برق به کار می روند. از آنجا که جهت تعمیرات نباید برج از کار متوقف بشود، انتخاب هسته های خنک کننده بادوام زیاد لازم است.



شکل (۷-۲). شکل هسته های خنک کننده که توسط لورو کریستی آزمایش شده اند.

قیمت در طراحی برج شامل قیمت هسته خنک کننده، قیمت نصب، قیمت پمپ و قیمت‌های دیگری می‌باشد که باید بصورت کلی مورد بررسی قرار بگیرند. واضح است که هسته خنک کننده‌ای که دارای قیمت کمتر، ضریب حرارتی بیشتر و افت فشار کمتر است نسبت به انواع دیگر ارجحیت دارد. اما باید بین این فاکتورها مناسب‌ترین نوع را انتخاب کرد، زیرا افزایش کیفیت یکی از این پارامترها مستلزم کاهش دیگری خواهد بود. این مسأله را می‌توان با طرحی چند برج با هسته‌های خنک کننده مختلف و برآورد قیمت‌های آنها بررسی کرد. البته این روش بیشتر برای طراحی برج‌های بزرگ که قیمت و کیفیت مهم هستند، دارای اهمیت است و در مورد برج‌های کوچک اختلاف قیمت‌ها آنقدر زیاد نیست که چنین روش پراخرجی را لازم داشته باشد.

۲-۳-۲) مشخصه انتقال حرارت

همانطور که قبلاً گفته شد، مشخصه حرارتی هسته خنک کننده را می‌توان با دو کمیت NTU یا $\frac{Kav}{L}$ بیان کرد. برای تحلیل بهتر و گسترده‌تر مسأله از مشخصه‌های حرارتی به ازای واحد ارتفاع هسته خنک کننده یا در حقیقت مشخصه حرارتی به ازای واحد حجم هسته خنک کنند استفاده می‌کنیم. برای دو حالت فوق این کمیت‌ها متناظر با NTU' و $\frac{Ka}{L}$ هستند. رابطه بین $\frac{Ka}{L}$ و NTU' بصورت زیر است:

$$\frac{Ka}{L} = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_w} NTU' \quad (2-34)$$

هر یک از این مشخصه‌ها می‌توانند بصورت تحلیلی یا نموداری برحسب $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ بیان شوند. البته تابعیت این مشخصه‌ها با Re_g نیز می‌تواند به روشهای فوق بیان بشود. لوی و کریستی [۱۶] توسط آزمایشات خود نشان دادند که این توابع را می‌توان بصورت کلی زیر نمایش داد.

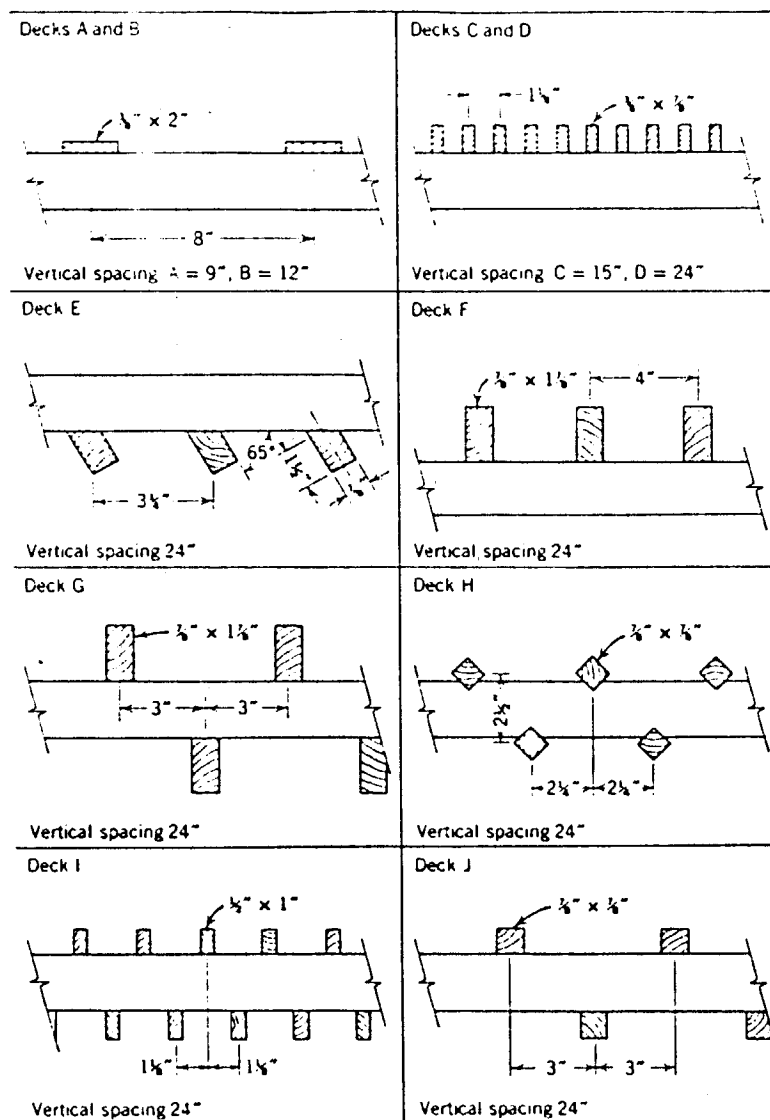
$$\frac{Ka}{L} \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g} \equiv NTU' = \lambda \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g} \right)^{1-n} \quad (2-35)$$

برای تیرهای چوبی با شکل (۲-۷a) و $H = W = 152/4 \text{ mm}$ و $S = 76/2 \text{ mm}$ که آنرا نوع a می‌نامیم، مقادیر $\lambda = 0/309 \text{ m}^{-1}$ و $n = 0/5$ بدست آمده است. برای صفحات آریست سیمانی با شکل (۲-۷d) و $h_a = 54/0 \text{ mm}$ و $v_a = 146/0 \text{ mm}$ و $H = 44/5 \text{ mm}$ که آنرا نوع b می‌نامیم، مقادیر $\lambda = 0/691 \text{ m}^{-1}$ و $n = 0/69$ بدست آمده است. این مقادیر از آزمایش با برجی به مقطع $1/216 \text{ m}^2$ و ارتفاع در محدوده

۱/۲ - ۲/۴m و با جریان کاملاً مخالف بدست آمده‌اند. در کتاب طراحی مبدل‌های حرارتی نوشته فراس^(۱)

[۸] چند نوع دیگر از هسته‌های خنک کننده معرفی شده‌اند که مشخصات آنها با تیپ بندی شکل (۸-۲)

همراه با دو نوع هسته خنک کننده که در فوق معرفی شدند، در جدول (۲-۲) آورده شده‌اند.



شکل (۸-۲). تیپ بندی چند نوع هسته خنک کننده و مشخصات آنها [۸].

در رابطه (۲-۳۵) مقادیر $\dot{m}_w$ و $\dot{m}_g$ بعنوان متغیر مستقل در آزمایشات در نظر گرفته نشده‌اند. اما آزمایش لیبرام^(۱) [۱۵] با سطح مقطع کوچکتر نشان داد که مقدار $\dot{m}_w$ بعنوان یک متغیر مستقل وارد مسأله می‌شود. بنابراین در برجهای با سطح مقطع بزرگ مقدار $\dot{m}_w$ یا Re_g بعنوان یک متغیر مستقل دارای اهمیت زیادی نیستند. اما در برجهای کوچک این مقادیر برای تصحیح رابطه (۲-۳۵) باید به کار بروند.

تزوکا^(۲) [۲۸] اطلاعات حاصل از یک آزمایش را در یک برج با جریان مخالف و سطح مقطع 0.6 m^2 با هسته‌های خنک کننده دارای مسیرهای صاف که از صفحه‌های رزین دار ساخته شده بودند و نیز هسته‌های خنک کننده که از صفحه‌های پلاستیکی شیاردار و پره‌ای ساخته شده بودند، جمع‌آوری کرد. او توانست این اطلاعات را برای شکلها و اندازه‌های مختلف با دبی آب و هوای متغیر، توسط یک رابطه ساده توانی بی‌بعد نمایش بدهد.

البته چند شکل مختلف را می‌توان برای مشخصه هسته خنک کننده به کار برد که در هر مورد باید مشخصه معرفی شده را با دقت بررسی کرد. اطلاعات دقیق‌تر را می‌توان از کاتالوگهای سازنده هسته خنک کننده بدست آورد. در برجهای با جریان متقاطع، جریان هوا بصورت افقی از روی هسته خنک کننده می‌گذرد. اما چون NTU' نوعی ضریب انتقال حرارت است، مقدار آن به مسیر عبور هوا بستگی دارد و بنابراین از همان رابطه (۲-۳۵) که برای جریان مخالف استفاده می‌شود، می‌توان استفاده کرد. به شرط اینکه مسیر جریان افقی شبیه مسیر جریان عمودی در برج با جریان مخالف باشد. این مطلب را اطلاعاتی که برای دو نوع برج با یک هسته خنک کننده یکسان بدست آمده ثابت می‌کند.

هایاشی^(۳) [۹] اطلاعات مربوط به هسته‌های خنک کننده از نوع پلاستیکی (PVC) را که به شکل قطره گیرها^(۴) ساخته شده بودند، توسط یک رابطه توانی، برای عدد نوسلت که براساس اعداد رینولدز هوا و آب بود، نشان داد. در این رابطه به فرم (۲-۳۵)، n دارای مقدار 0.42 است در صورتیکه ΔT وابستگی ضعیفی به $\dot{m}_g$ دارد (باتوان 0.09).

در تعیین مشخصه حرارتی هسته خنک کننده باید اثر افشانه را نیز در نظر گرفت. در برج با جریان مخالف، لَو و کریستی [۱۶] مقادیر ΔT را بین 0.33 تا 0.66 با $n = 0.5$ پیشنهاد می‌کنند. در طراحی برج با جریان مخالف این مقدار NTU' را که برای افشانه بدست می‌آید باید با مقدار NTU' که برای هسته خنک

کننده بدست می آید جمع کنیم. اثر قطره گیرها نیز باید در نظر گرفته بشود که البته بسیار کم است. اطلاعاتی که در مقیاس کامل بدست می آید بهتر از اطلاعاتی هستند که در مقیاس کوچک بدست آورده اند و رابطه بین طراحی و اطلاعات موجود به این شکل منطقی تر است.

جدول (۳-۲). مقادیر n و λ برای انواع هسته خنک کننده [۸].

نوع هسته خنک کننده	n	λm^{-1}
A	۰/۶۲	۰/۲۶۲
B	۰/۶۲	۰/۲۳
C	۰/۶	۰/۲۴۱
D	۰/۵۸	۰/۱۹۵
E	۰/۴۶	۰/۱۸
F	۰/۵۱	۰/۱۶۴
G	۰/۵۷	۰/۱۷۱
H	۰/۴۷	۰/۲۰۸
I	۰/۵۷	۰/۲۲۱
J	۰/۵۴	۰/۱۶۹
a	۰/۵	۰/۳۰۹
b	۰/۶۹	۰/۶۹۱

۲-۳-۳) افت فشار

افت فشار را می توان با $N'_{v,p}$ که برابر تعداد افت فشار دینامیکی به ازای واحد ارتفاع هسته خنک کننده است بیان کرد. بعنوان یک تخمین ضعیف می توان آنرا ثابت در نظر گرفت. اما معمولاً مقدار $N'_{v,p}$ با افزایش $\dot{m}_g$ کاهش می یابد و با افزایش $\dot{m}_w$ افزایش می یابد [۱۳]. افت فشار برای هسته های خنک کننده شکل (۷-۲) توسط لوی و کریستی [۱۶] اندازه گیری شده است. برای هندسه شکل (۷a-۲) مقدار $N'_{v,p}$ به ازای دبی آب $1/365 \frac{kg}{m^2s}$ و سرعت هوا $0/912 \frac{m}{s}$ برابر $12/17 m^{-1}$ است. اگر سرعت هوا دو برابر بشود

مقدار $N'_{v,p}$ ، ۱۰/۸۵ می شود و اگر شار جرمی آب دو برابر بشود مقدار $N'_{v,p}$ ، ۱۵/۷۹ خواهد شد. سه مقدار متناظر فوق برای هسته خنک کننده آریست سیمانی شیاردار نوع b، ۱۰/۵۳، ۸/۸۸ و ۱۲/۵ می باشند. اگر اثر افشانه در انتقال حرارت زیاد باشد، تأثیر افشانه روی افت فشار نیز باید در نظر گرفته بشود.

۲-۴) حالت هوای خروجی از هسته خنک کننده

انتالپی هوای خروجی از هسته خنک کننده با معین شدن نسبت $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ تعیین می شود. اما حالت خروجی هوا از هسته خنک کننده فقط با انتالپی آن مشخص نمی شود. زیرا مشخصات دیگر هوای خروجی برای موارد زیر باید معین بشوند. اول اینکه میزان آبی که در هوا به شکل بخار وجود دارد باید معین بشود تا بتوان آب مصرفی در طی تحول خنک شدن را بدست آورد. دوم اینکه در طراحی برجهای با جریان طبیعی لازم است که چگالی هوای خروجی معین بشود. زیرا نقش چگالی هوا در نیروی غوطه وری بسیار مهم است.

در بیشتر موارد حالت هوای خروجی بصورت اشباع است و یا اینکه می توان آنرا اشباع در نظر گرفت. بنابراین می توان حالت آنرا تنها به کمک انتالپی آن بدست آورد. پس میزان رطوبت و نسبت جرمی رطوبت را در آن به کمک جدول (۱-۲) می توان بدست آورد. مواردی که در آنها حالت هوای خروجی از هسته خنک کننده نمی تواند اشباع باشد عبارتند از هوای محیط گرم و خشک، دمای متوسط آب بالا و یا کم بودن ارتفاع هسته خنک کننده. اگر هوای محیط اشباع باشد در طول مسیر حرکت هوا، حالت آن اشباع باقی می ماند. در غیر این صورت ترکیبی از حالت های سه گانه فوق ممکن است برای هوای خروجی وجود داشته باشد.

برای پیدا کردن رطوبت هوای خروجی باید تغییرات آنرا در طول هسته خنک کننده محاسبه کرد. از نسبت جرمی رطوبت بعنوان معیاری برای اندازه گیری رطوبت هوای خروجی استفاده می کنیم که برابر جرم آب به ازای واحد جرم هوای مرطوب تعریف می شود و با f آنرا مشخص می کنیم. از آنجا که پدیده های انتقال جرم شبیه انتقال حرارت هستند، همان مدل رینولدز را برای این بحث در نظر می گیریم. پس رابطه ای که قانون بقاء جرم را برای آب بیان می کند چنین است.

$$\dot{w} = \gamma_w \frac{f_g - f_s}{1 - f_s} \quad (2-36)$$

که در آن $\dot{w}$ دبی جرمی آب انتقال یافته به هوا به ازای واحد سطح تماس، f_g نسبت جرمی رطوبت هوا در

نزدیکی سطح تماس، f_s نسبت جرمی رطوبت هوا در روی سطح تماس و γ_w ضریب انتقال جرم هستند. قانون بقاء جرم برای سطح تماس به شکل زیر است

$$\dot{m}_g df_g = \dot{w} A_i dz \quad (2-37)$$

که از آن می‌توان تغییرات رطوبت هوای جاری را بدست آورد. از حذف $\dot{w}$ بین روابط (2-36) و (2-37) می‌توان رابطه جدیدی به فرم دیفرانسیلی بدست آورد.

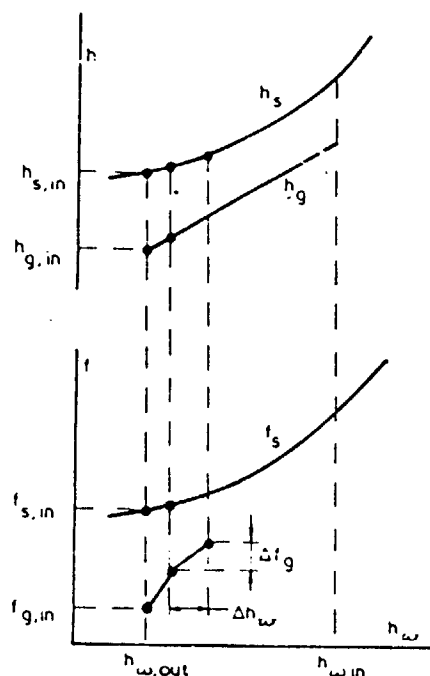
$$\frac{df_g}{f_s - f_g} (1 - f_s) = \left(\frac{\gamma_w}{\dot{m}_g} A_i \right) dz \quad (2-38)$$

اگر $\gamma_w = \gamma$ باشد، با توجه به رابطه (2-16) می‌توان طرف راست معادله (2-38) را با $\frac{df_g}{h_s - h_g}$ جایگزین کرد. همانطور که می‌دانید شرط $\gamma_w = \gamma$ یعنی تساوی ضریب انتقال حرارت و ضریب انتقال جرم، برای سیالاتی با عدد لوئیس نزدیک به یک صدق می‌کند و برای هوای مرطوب چنین شرطی برقرار است [29].

بنابراین با توجه به رابطه (2-17) می‌توان رابطه زیر را بدست آورد:

$$\frac{df_g}{f_s - f_g} (1 - f_s) = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g} \frac{df_g}{h_s - h_g} \quad (2-39)$$

رابطه اخیر روشی را برای دنبال کردن تغییرات رطوبت هوا در مسیر حرکت آن بدست می‌دهد. مقادیر h_s و h_g و $\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}$ در قسمتهای قبل مشخص شدند و با استفاده از آنها می‌توان f_g را بدست آورد. مقادیر f_s را می‌توان در مراحل مختلف محاسبات از جدول (2-1) بدست آورد. پس برای این منظور باید معادله (2-39) را به فرم تفاضلهای محدود نوشت و با یک روش عددی مقادیر f_g را در h_w های مختلف (دمای آب مختلف) بدست آورد. مقادیر اولیه f_g ، h_g و h_s معلوم هستند و یا می‌توان آنها را از جدول (2-1) بدست آورد. با این روش عددی می‌توان از ورود تا خروج هوا در هسته خنک کننده f_g را در مراحل مختلف محاسبه کرد و بنابراین f_g را در خروج از هسته خنک کننده معین کرد. با دانستن h_g و f_g در خروجی از هسته خنک کننده حالت هوای خروجی مشخص می‌شود. شکل (2-9) روش محاسبات را نمایش می‌دهد.



شکل (۲-۹). تعیین نسبت جرمی رطوبت هوا به روش تفاضل محدود

مقادیر h_s و f_s در جدول (۲-۱) برحسب دمای آب با روابط زیر با دقت بسیار خوبی محاسبه می شوند.

$$h_s = 8.50892 + 2.10627 T - 0.0133267 T^2 + 0.00136795 T^3 \quad (۲-۴۰)$$

$$f_s = 3.79273 \times 10^{-3} + 2.46051 \times 10^{-4} T + 1.27793 \times 10^{-5} T^2 - 2.6177 \times 10^{-8} T^3 + 5.56886 \times 10^{-9} T^4 \quad (۲-۴۱)$$

معادله (۲-۳۹) به فرم تفاضل متناهی و برحسب دمای آب چنین می شود:

$$\frac{f_{gn+1} - f_{gn}}{f_{sn} - f_{gn}} = 4.2 \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g} \frac{T_{wn+1} - T_{wn}}{h_{sn} - h_{gn}} \quad (۲-۴۲)$$

که از آن می توان در هر مرحله f_{gn+1} را بدست آورد.

$$f_{gn+1} = 4.2 \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g} (f_{sn} - f_{gn}) \left(\frac{T_{wn+1} - T_{wn}}{h_{sn} - h_{gn}} \right) + f_{gn} \quad (۲-۴۳)$$

۲-۵) انحراف جریان مخالف از حالت یکنواخت

در مباحث گذشته جریان را یک بعدی در نظر گرفتیم و فرض کردیم که جریان یکنواخت باشد.

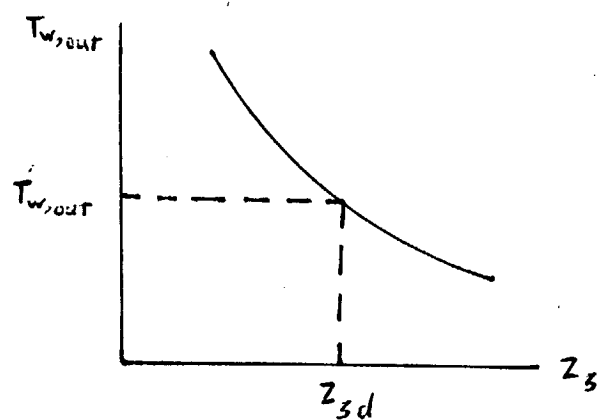
بنابراین تغییرات انتالی را در راستای جریان در نظر گرفتیم و تغییرات در یک صفحه عمود بر مسیر جریان را

صفر در نظر گرفتیم. اما عواملی هستند که موجب غیریکنواختی جریان می شوند. در برجهای با جریان

مخالف، چه برجهای جریان طبیعی و چه برجهای جریان اجباری، جریان هوا هنگام ورود به خنک کننده تغییر مسیر می دهد که همین امر موجب غیریکنواختی جریان می شود.

آزمایشاتی در ابعاد بزرگ انجام شده اند و اندازه گیریهای انجام شده نشان می دهد که جریان در سطح مقطع برج (هسته خنک کننده) دارای تغییراتی است [۲۱]. این تغییرات در میانه های برج کم می باشد اما در مرکز و کنار دیواره ها قابل ملاحظه است. بنابراین حتی اگر باد هم وجود نداشته باشد جریان غیریکنواخت خواهد بود. وجود باد در محیط اطراف موجب انحراف بیشتری شود. اما اندازه گیری چنین پدیده هایی بسیار مشکل است. در برجهایی که فن بالای آنها قرار دارد، غیریکنواختی بیشتر در قسمتهای پایین هسته خنک کننده وجود دارد. اما در برجهایی که فن در قسمت پایین آنها قرار دارد، وجود فن باعث افزایش جریان هوا در وسط هسته خنک کننده و کاهش آن در کناره های هسته خنک کننده می شود. با این حال طرح برج را براساس جریان یکنواخت یک بعدی انجام می دهند. زیرا در مقیاس بزرگ این غیریکنواختی اثر زیادی ندارد و ضمناً محاسبات انجام شده در حالت یک بعدی، تقریبی برای جریان واقعی هستند.

یک روش برای منظور کردن غیریکنواختی جریان این است که تحلیل دو و یا سه بعدی روی جریان انجام شود [۱۷]، که البته احتیاج به محاسبات پیچیده کامپیوتری دارد. روش دیگر این است که یک پروفیل سرعت برای سرعت هوا در مقطع هسته خنک کننده در نظر بگیریم، که احتیاج به داده های تجربی دقیقی که از یک آزمایش معتبر بدست آمده باشد، دارد. بنابراین روشی پرهزینه می باشد. این پروفیل سرعت باید برای محاسبه نسبت دبی میانگین و نیزافت فشار میانگین به کار برود. بطور کلی این روشهای تصحیح گران و وقت گیر هستند که البته دقت بدست آمده از این روشها قابل توجه نیست و می توان با مدل یک بعدی مسأله را حل کرد و در نهایت یک فاکتور تصحیح برای غیریکنواختی در نظر گرفت [۲۴].



شکل (۳-۳). بدست آوردن دمای آب خروجی تغییر یافته در اثر تغییر شرایط طرح به روش ترسیمی.

فصل چهارم

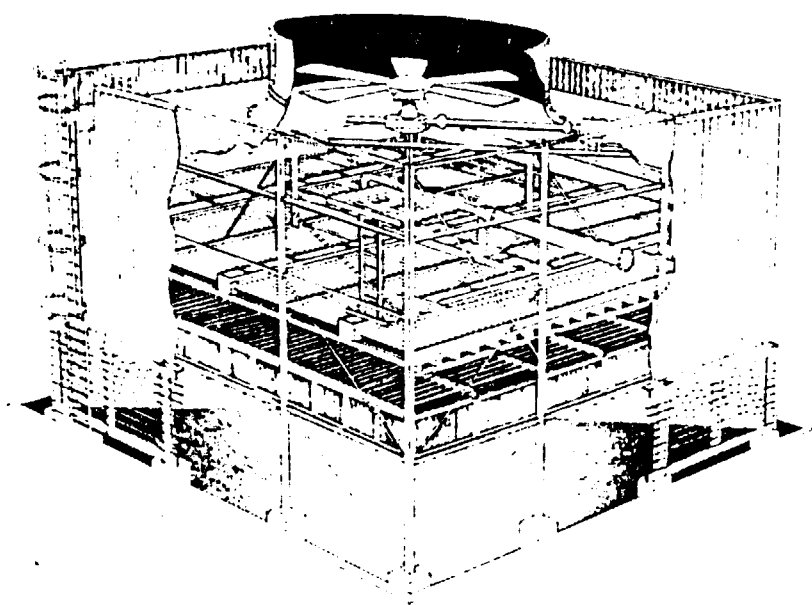
طراحی برجهای خنک کن مرطوب با جریان اجباری

دسته دیگری از برجهای خنک کن مرطوب جریان مخالف، برجهای خنک کن مرطوب با جریان اجباری هستند. از آنجا که این برجها را می توان کنترل کرد، کاربرد بیشتری نسبت به برجهای خنک کن با جریان طبیعی دارند. وجود فن در این برجها و قابلیت تغییر دادن سرعت دوران و زاویه پره های فن باعث می شود که کنترل کردن این برجها امکان پذیر بشود. اما در برجهای با جریان طبیعی نمی توان کنترلی روی دبی هوا داشت، زیرا نیروی لازم برای به جریان درآوردن هوا توسط نیروی غوطه وری و نیز ارتفاع برج حاصل می شود و بنابراین در یک برج ساخته شده، شرایط محیطی و ابعاد برج و نیز شرایط آب ورودی به برج خود بخود جریان هوا و مقدار آنرا تحت تأثیر قرار می دهند.

در این فصل ابتدا برجهای خنک کن با جریان اجباری را معرفی می کنیم. سپس طراحی این برجها را مثل فصل گذشته شرح می دهیم و در ضمن میزان آب مصرفی در برج خنک کن را محاسبه می کنیم. در انتها نیز اثر تغییر شرایط طرح را روی دمای آب خروجی بدست می آوریم. بسیاری از مطالب این فصل مثل فصل گذشته است و بنابراین از شرح آنها خودداری می کنیم و اشاره کوتاهی به آنها می کنیم.

(۱-۴) معرفی برجهای خنک کن با جریان اجباری

در این نوع از برجها جریان هوا توسط یک یا چند فن بوجود می آید. درنوع رانشی آن، فن در پایین برج قرار می گیرد و جریان هوا را برقرار می کند. ولی درنوع مکشی آن فن بالای برج قرار می گیرد. جریان در هسته خنک کننده ممکن است بصورت جریان مخالف یا جریان متقاطع و یا ترکیبی از این دو باشد. نوع جریان مخالف این برجها مانند شکل (۱-۴) است.



شکل (۱-۴). نمای برج خنک کن مرطوب با جریان اجباری مخالف

برجهای خنک کن با جریان اجباری گونه های وسیع تری را نسبت به نوع جریان طبیعی دربرمی گیرند. از لحاظ اندازه این برجها می توانند از برجهای کوچک دو یا سه متری تا برجهای بزرگ باشند. به این ترتیب این برجها را می توان برای خنک کردن آب تأسیسات یک ساختمان کوچک تا یک نیروگاه بسیار بزرگ با ظرفیت بالا به کار برد. در برجهای بزرگ، بیشتر فن های محوری و نوع مکشی را به کار می برند، در صورتیکه در برجهای کوچک بیشتر فن های محوری یا شعاعی از نوع رانشی به کار برده می شوند. هسته های خنک کننده از نوع چوبی و یا پلاستیکی و یا از انواع دیگر هستند. نوع پلاستیکی به علت سبکی آن به هنگام نصب دارای مزیت است. اطراف برج با ورقهای گالوانیزه و یا صفحه های آلست - سیمانی پوشیده می شود. از صفحه های پلاستیک (PVC) نیز می توان برای پوشاندن اطراف برج استفاده کرد.

براساس نوع و ارتفاع هسته خنک کننده میزان دبی آب بر واحد سطح در برج حدود ۲/۳ با انحراف ۲۰٪ از این مقدار است [۴]. سرعت جریان هوا نیز حدود ۱/۵ تا ۴ متر بر ثانیه است و نیز میانگین نسبت دبی جرمی آب به دبی جرمی هوا حدود ۰/۵ تا ۲/۵ است.

۴-۲) مشخصه حرارتی و طراحی برج

مثل برج خنک کن با جریان طبیعی اولین مرحله از طراحی برجهای خنک کن با جریان اجباری تعیین نسبت دبی آب به دبی هوا برای مشخصات طرح و نوع بخصوصی از هسته خنک کننده است. البته در این نوع از برجها در این مرحله احتیاجی به دمای حباب خشک هوا نیست. دمای حباب خشک برای محاسبه میزان آب مصرفی در برج به کار می رود.

از آنجا که برجهای خنک کن با جریان اجباری کوچکتر از برجهای خنک کن با جریان طبیعی هستند، هوای محیط تحت تأثیر هوای خروجی از برج قرار می گیرد. بنابراین دمای حباب تر محیط پس از شروع به کارکردن برج به اندازه ΔT_{WB} افزایش پیدا می کند. ΔT_{WB} با افزایش ابعاد برج، افزایش پیدا می کند. بنابراین برای تصحیح دمای حباب تر باید ΔT_{WB} به دمای حباب تر محیط که برای طراحی به کار می رود، اضافه شود. البته طراحی براساس دمای حباب تر محیط انجام می شود و این تصحیح برای اندازه گیری آب مصرفی به کار می رود. ΔT_{WB} تابعی از دبی آب، دمای حباب تر طراحی، دمای تمایل و بازده دمایی است. از آنجا که پدیده گردش مجدد در یک محدوده زمانی از کار برج بوجود می آید BS4485 [۴] مقدار تصحیح را حدود شصت درصد مقدار ماکزیمم تخمین زده شده پیشنهاد می کند. بعنوان مثال برای $T_{WB} = 17^\circ$ و $T_{w,out} - T_{WB} = 8/5^\circ$ و $T_{w,in} - T_{w,out} = 8^\circ$ مقادیر زیر بدست آمده اند.

$\dot{M}_w \frac{m^3}{s}$	۰/۵	۱/۰	۲/۰	۴/۰	۶/۰
$\Delta T_{WB} \text{ } ^\circ\text{C}$	۰/۲	۰/۳	۰/۵	۰/۸	۰/۹

ملاحظه می شود که با افزایش دبی آب مقدار ΔT_{WB} نیز افزایش پیدا می کند. با افزایش متغیرهای دیگر نیز ΔT_{WB} افزایش می یابد.

با مشخص شدن نسبت دبی آب به دبی هوا، دبی جرمی هوا بدست می آید. حال برای طراحی برج باید یک سطح مقطع از هسته خنک کننده را انتخاب کنیم. همچنین نوع و تعداد فن ها را نیز باید مشخص کنیم. همانطور که قبلاً گفته شد، این فن ها می توانند محوری یا شعاعی و نیز از نوع رانشی یا مکشی باشند.

این فن‌ها باید به گونه‌ای انتخاب بشوند که بتوانند افت فشار ناشی از جریان هوا در برج را جبران بکنند. بنابراین دو انتخاب باید انجام بدهیم، سطح مقطع هسته خنک کننده و فن، با تغییر این دو انتخاب می‌توان به حالت بهینه در طرح برج دست یافت. قبل از این مرحله باید تصمیم گرفت که برج بصورت رانشی باشد و یا مکشی. ممکن است برای چند انتخاب طراحی را انجام داد و از بین آنها یکی را انتخاب کرد. در هر صورت ابتدا باید افت فشار درون برج را محاسبه کنیم و با استفاده از مشخصه هیدرولیکی فن، نقطه کار فن را بدست آوریم. معمولاً مشخصه فن‌ها براساس دبی حجمی هوا ترسیم می‌شوند. پس باید دبی حجمی هوا را از دبی جرمی آن بدست آورد.

کل افت فشار در برج را می‌توان مجموع سه افت فشار در نظر گرفت [۲۵].

$$\Delta P_{\text{tower}} = \Delta P_{\text{pack}} + n_{\text{ex}} \Delta P_{\text{ex}} + \Delta P_{\text{misc}} \quad (۱-۴)$$

که در رابطه فوق ΔP_{pack} افت فشار در هسته خنک کننده

ΔP_{ex} افت فشار دینامیکی در خروجی فن

ΔP_{misc} افت‌های متفرقه مثل افت در ورودی هوا

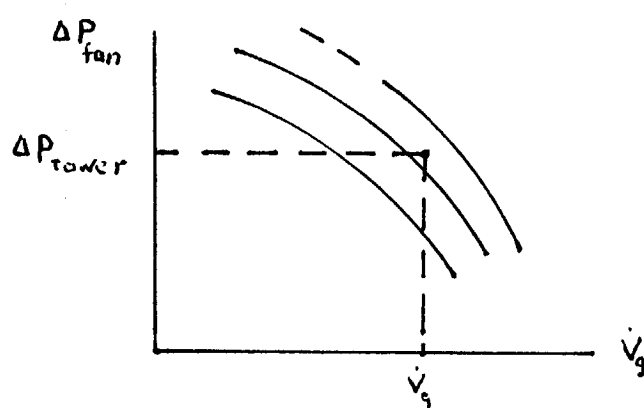
n_{ex} یک ضریب بین صفر تا یک که به خروجی فن بستگی دارد.

ΔP_{pack} را می‌توان از مشخصات افت فشار دینامیکی هسته خنک کننده، $N_{v,p}$ و نیز فشار دینامیکی جریان هوا در سطح مقطع ورودی هسته خنک کننده در برج بدست آورد. عبارت $n_{\text{ex}} \Delta P_{\text{ex}}$ برای در نظر گرفتن افت فشار دینامیکی در خروجی از فن به کار برده می‌شود. این ترم می‌تواند تمام و یا بخشی از فشار دینامیکی در خروجی فن باشد. پس n_{ex} بین صفر تا یک است. اگر هیچ دیفیوزری در خروجی از فن مکشی وجود نداشته باشد آنگاه n_{ex} برابر یک است زیرا تمام فشار دینامیکی خروجی تلف می‌شود. n_{ex} برای برج‌های رانشی نزدیک به یک است زیرا فشار دینامیکی نمی‌تواند در زیر هسته خنک کننده بازیافت شود. به کاربردن دیفیوزر می‌تواند مقدار n_{ex} را تا ۰/۵ و یا کمتر کاهش بدهد. مقدار ΔP_{ex} از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta P_{\text{ex}} = \frac{1}{2\rho_g} \left(\frac{\dot{M}_g}{n_f A_{f,\text{ex}}} \right)^2 \quad (۲-۴)$$

که در آن $\dot{M}_g$ دبی جرمی هوا، ρ_g چگالی هوا در محل فن، n_f تعداد فن‌ها و $A_{f,\text{ex}}$ سطح مقطع خروجی از فن می‌باشند. افت فشار ΔP_{misc} معمولاً در مقایسه با افت‌های قبلی کوچکتر است. نکته‌ای که باید در رابطه (۲-۴) در نظر داشت این است که اگر برج رانشی باشد ρ_g همان چگالی هوای محیط است و اگر برج مکشی

باشد چگالی هوای خروجی از برج خواهد بود که بیشتر از چگالی هوای محیط است .
 حال با مشخص کردن ΔP_{tower} و دبی حجمی هوا ، $\dot{V}_g$ نقطه کار برج را می توان روی مشخصه فن تعیین کرد شکل (۲-۴) . اگر در این نقطه بازده فن بیشتر از ۷۵٪ باشد آنگاه این ترکیب از انتخابهایی که انجام شده است قابل قبول هستند . با امتحان کردن ترکیبهای دیگر می توان بهترین طرح را بدست آورد . بنابراین با تغییر سطح مقطع می توان ترکیبات دیگری بدست آورد و از آنها ، طرح را مشخص کرد .



شکل (۲-۴) . منحنیهای مشخصه فن و نقطه کار برج روی آن .

(۳-۴) محاسبه آب مصرفی در برج

به علت تبخیر آب پیوسته در چرخه خنک کردن مقداری آب مصرف می شود . آب مصرفی در برج حدود یک درصد آبی است که در برج جریان دارد . برای محاسبه آب مصرفی در برج می توان از اختلاف نسبت جرمی رطوبت هوا در ورودی و خروجی از برج استفاده کرد [۲۵] .

$$W = \frac{f_{g,out} - f_{g,in}}{M_w/M_g} \quad (۳-۴)$$

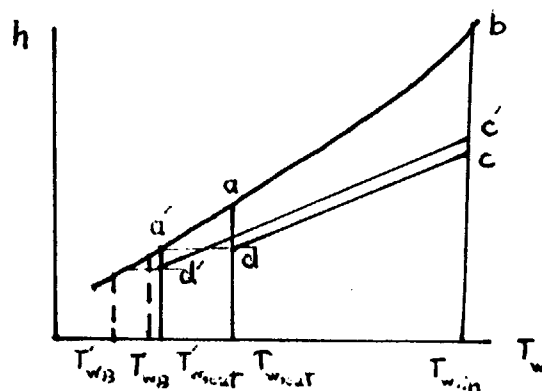
که در آن W نرخ مصرف آب بر حسب جریان آب در برج است . معمولاً مقداری از قطره های آب نیز توسط جریان هوا حمل می شوند و به محیط منتقل می شوند . برای جلوگیری از این امر می توان از حذف کننده ها در خروجی برج استفاده کرد تا قطره های آب را از جریان هوا جدا کرده و به سمت پایین برج منتقل کند .

۴-۴) تغییر شرایط طرح

در برجهای خنک کن با جریان اجباری نقش نیروی غوطه‌وری در جریان هوا بسیار کم است. این فن‌ها هستند که جریان هوا را بوجود می‌آورند. از طرفی تغییر چگالی هوا تأثیر زیادی روی عملکرد فن ندارد. بنابراین اگر فن با یک سرعت دوران ثابت و زاویه پره‌های ثابت کار بکند، تغییر شرایط محیطی یا تغییر دمای آب ورودی به برج، نمی‌تواند روی دبی حجمی هوا اثری بگذارد. این مطلب تعیین دمای خروجی آب از برج را تحت تأثیر تغییر شرایط طرح، نسبت به برجهای خنک کن با جریان طبیعی، ساده‌تر می‌کند. بطور کلی می‌توان گفت که تغییر شرایط طرح در برجهای خنک کن با جریان اجباری ناشی از تغییر دمای حباب تر محیط، تغییر دمای آب ورودی به برج، تغییر نسبت دبی آب به دبی هوا و تغییر تعداد فن‌ها در برجهای سلولی می‌باشد. حال هر یک از این تغییرات را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این رابطه مرجع [۵] معرفی می‌شود.

۴-۴-۱) تغییر دمای حباب تر محیط

در این حالت نسبت دبی‌ها ثابت است. بنابراین مشخصه حرارتی برج باید ثابت بماند. پس باید به روش حدس و خطا دمای آب خروجی را حدس بزنیم و با توجه به دمای حباب تر تغییر یافته، مشخصه حرارتی برج را حساب کنیم. دمای آب خروجی متناظر به مشخصه حرارتی طرح، جواب مسأله می‌باشد. این مطلب را با شکل (۴-۳) می‌توان بهتر بیان کرد.

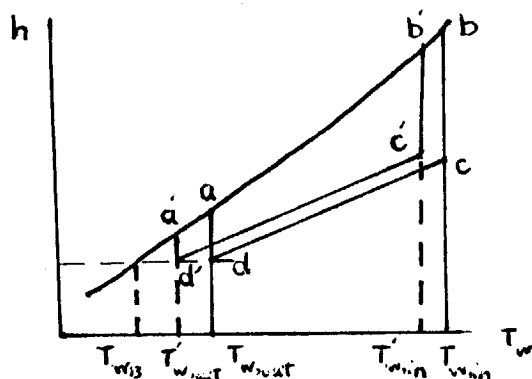


شکل (۴-۳). دیاگرامهای هوای اشباع و هوای مرطوب برحسب دما.

منحنی هوای مرطوب در حالت طرح، dc و منحنی هوای مرطوب پس از تغییر شرط طرح، $d'c'$ موازی یکدیگر هستند. اگر دمای حباب تر T_{WB} به T'_{WB} برسد باید خط $d'c'$ را موازی dc چنان پیدا کنیم که سطح $a'bc'd'$ برابر سطح $abcd$ بشود. این خط دمای خروجی آب را پس از تغییر شرایط طرح $T'_{w,out}$ در نقطه d' نشان می‌دهد.

۴-۴-۲) تغییر دمای آب ورودی

این حالت نیز مثل حالت قبل است. پس نسبت دبی‌ها ثابت است. باید دمای آب خروجی را حدس بزنیم و مشخصه حرارتی برج را با دمای حدس زده شده و دمای آب ورودی تغییر یافته بدست آوریم. دمای آب خروجی متناظر به مشخصه‌های حرارتی که برابر مشخصه حرارتی نقطه طرح باشد، جواب مسأله است. این مطلب در شکل (۴-۴) به روش ترسیمی دیده می‌شود.



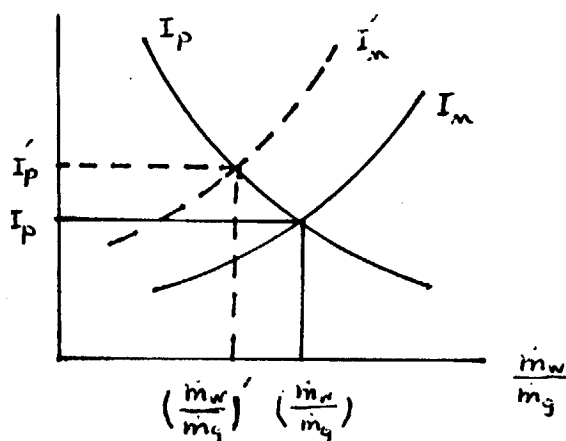
شکل (۴-۴). دیاگرام‌های هوای اشباع و هوای مرطوب برحسب دما

در این شکل باز هم منحنی‌های هوای مرطوب طرح dc و هوای مرطوب پس از تغییر شرایط طرح $d'c'$ موازی یکدیگرند. سطح $a'bc'd'$ باید برابر با سطح $abcd$ باشد. طبق شکل دمای آب خروجی $T'_{w,out}$ متناظر با دمای تغییر یافته آب ورودی $T'_{w,in}$ است.

۴-۴-۳) تغییر نسبت دبی آب به دبی هوا

در این حالت منحنی هوای مرطوب در شرایط طرح موازی منحنی هوای مرطوب در شرایط تغییر یافته نیست برای بدست آوردن دمای آب خروجی ابتدا باید مشخصه حرارتی هسته خنک کننده را در شرایط تغییر یافته برای نسبت دبی جرمی آب به دبی جرمی هوای جدید بدست آورد. سپس مانند

روشهای قبل دمای آب خروجی را حدس زده و مشخصه حرارتی برج را با این دما و نسبت دبی جدید بدست آورد. اگر این مشخصه حرارتی برج برابر با مشخصه حرارتی هسته خنک کننده در نسبت دبی تغییر یافته جدید باشد، جواب مسأله بدست آمده است که همان دمای آب خروجی حدس زده شده است. این مطلب در شکل (۴-۵) به صورت ترسیمی نشان داده شده است.



شکل (۴-۵). مشخصه‌های حرارتی برج و هسته خنک کننده بر حسب نسبت دبی‌ها

در این شکل I_p و I_m مشخصه‌های حرارتی برج و هسته خنک کننده در نقطه طرح هستند و I'_p و I'_m مشخصه‌های حرارتی برج و هسته خنک کننده در دمای آب خروجی تغییر یافته و نسبت دبی تغییر یافته هستند. نسبت دبی‌های تغییر یافته نیز $(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g})'$ می‌باشد.

۴-۴-۴) تغییر تعداد فن‌ها در برجهای سلولی

اگر برج بصورت سلولی باشد یعنی برای هر سلول یک فن به کار برده شود، از کار افتادن فن یک سلول باعث می‌شود که دمای آب خروجی از آن سلول تغییری نکند، اما سلولهای دیگر در نقطه طرح کار می‌کنند. پس برای بدست آوردن دمای آب خروجی کافیست یک معادله انرژی برای آب خروجی نوشت.

$$\dot{m}_w \frac{n_d}{n} T_{w,in} + \dot{m}_w (1 - \frac{n_d}{n}) T_{w,out} = \dot{m}_w T'_{w,out} \quad (۴-۴)$$

که در آن n تعداد کل سلولها، n_d تعداد سلولهای از کار افتاده و $T'_{w,out}$ دمای آب خروجی تغییر یافته است. رابطه اخیر پس از ساده کردن و مرتب کردن آن دمای آب خروجی را تحت تأثیر تغییر شرایط طرح بدست می‌دهد.

$$T'_{w,out} = \frac{n_d}{n} (T_{w,in} - T_{w,out}) + T_{w,out} \quad (۵-۴)$$

به روش عکس نیز می توان با تغییر یکی از پارامترها برای ثابت نگه داشتن دمای آب خروجی از برج تحت تأثیر تغییر شرایط طرح ، از طریق حدس و خطا ، عمل نمود . در برنامه کامپیوتری که در فصل بعد به آن می پردازیم روشهای مستقیم فوق به کار رفته اند .

فصل پنجم

برنامه‌های کامپیوتری

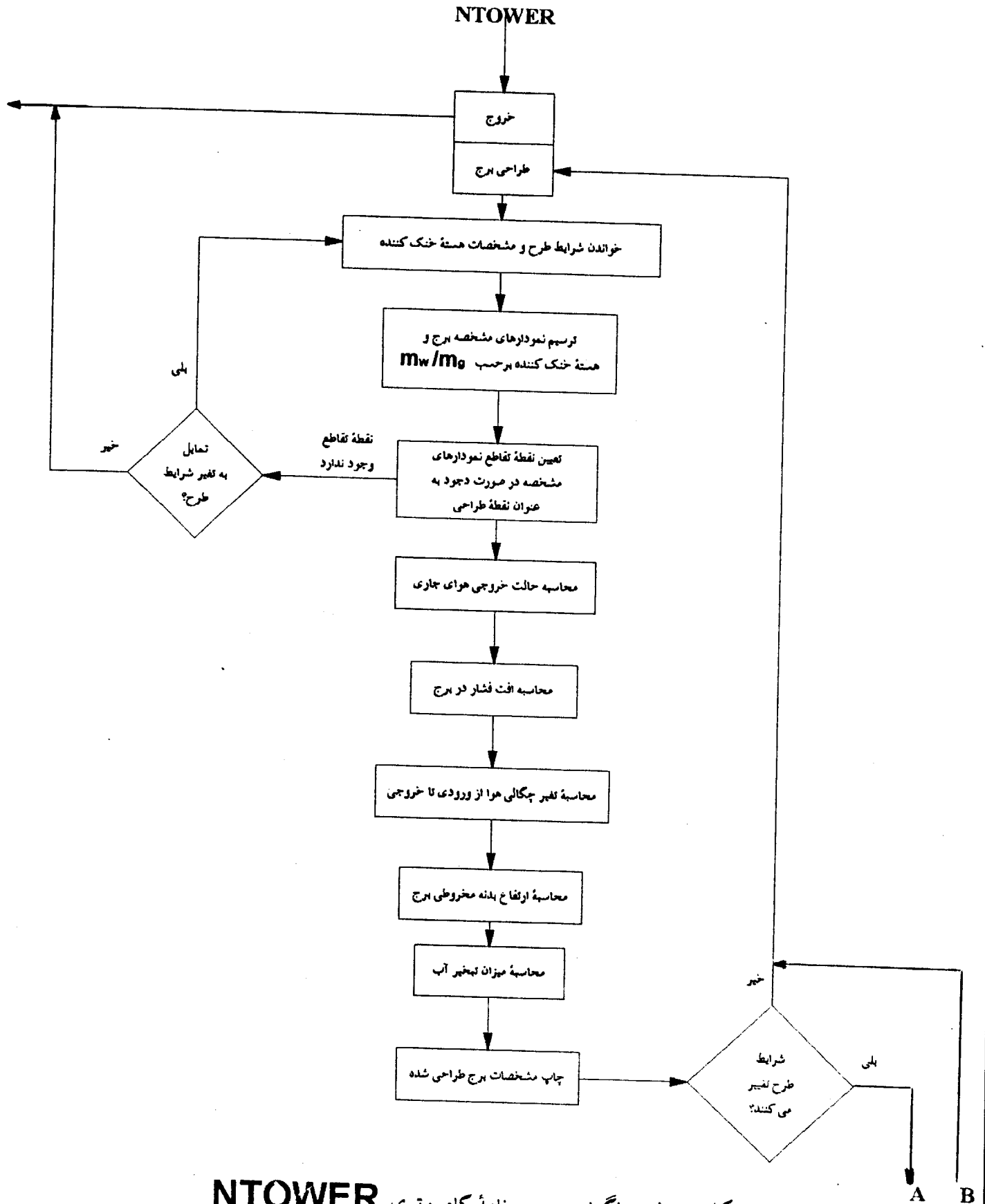
در این فصل برنامه‌های کامپیوتری تهیه شده مورد بررسی قرار می‌گیرند و کلیه زیربرنامه‌ها و توابعی را که در این برنامه‌ها بکار رفته‌اند، مشخص می‌کنیم. روش تهیه برنامه‌ها به گونه‌ای هستند که تطابق کاملی با مطالب فصلهای گذشته دارند. در نوشتن این برنامه سعی شده که کلیه عملیات در زیربرنامه‌های مناسب و مستقل از یکدیگر انجام بشوند، تا قابلیت انعطاف برنامه جهت ایجاد هرگونه تغییر در آن زیاد باشد، همچنین به علت قابلیت گرافیکی این برنامه زبان برنامه‌نویسی بکار گرفته شده در نوشتن این برنامه‌ها، زبان برنامه‌نویسی کوئیک بیسیک^۱ می‌باشد.

۵-۱) برنامه کامپیوتری NTOWER

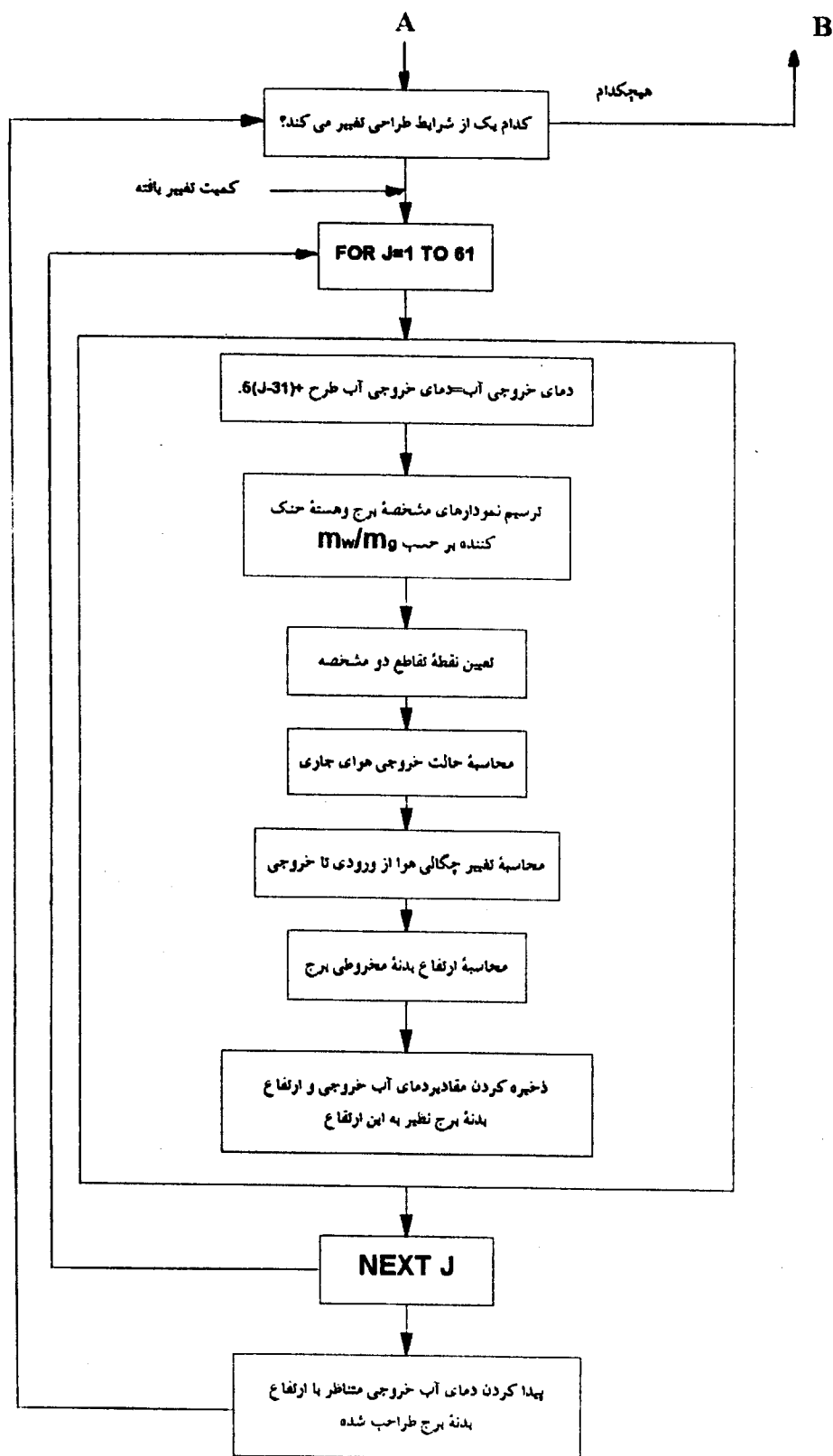
برای طراحی و تحلیل برجهای خنک کن با جریان طبیعی برنامه کامپیوتری NTOWER تهیه شده است. روش عملکرد این برنامه بصورت دیاگرام مسیر^۲ در شکل‌های (۵-۱) و (۵-۲) نشان داده شده‌اند. برای اجرای برنامه ابتدا عبارت NTOWER تایپ می‌شود. در صورت انتخاب گزینه طراحی برج، کلیه

مشخصات طراحی توسط برنامه از طراح پرسیده می شود ، این مشخصات عبارتند از : دمای آب ورودی ، دمای آب خروجی ، دمای حباب تر محیط ، دمای حباب خشک محیط ، دبی جرم آب ، ارتفاع هسته خنک کننده ، مشخصات هسته خنک کننده که ضریب h و توان نمایی n در رابطه (۲-۳۵) هستند و نیز سطح مقطع هسته خنک کننده که با قطر آن مشخص می شود . پس از وارد کردن مشخصات طراحی به برنامه ، نمودارهای مشخصه حرارتی برج و هسته خنک کننده به منظور پیدا کردن نقطه طراحی برج ، برحسب نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا ، ترسیم می شوند . اگر این دو مشخصه یکدیگر را قطع کنند ، نقطه طراحی برج بدست می آید در غیراین صورت کنترل برنامه به گونه ای است که می توان شرایط طرح را عوض کرد . پس از بدست آوردن نقطه طرح ، حالت خروجی هوای جاری در برج بدست می آید . برای بدست آوردن افت فشار در برج از روابط معرفی شده در فصلهای گذشته استفاده می شود ، در این برنامه طراح می تواند اطلاعات خود را در مورد مشخصات هسته خنک کننده بکار برده شده وارد برنامه بکند ، در غیراین صورت از مقادیر ارائه شده در متن پایان نامه استفاده می شود . پس از محاسبه افت فشار برای بدست آوردن ارتفاع بدنه مخروطی لازم است که تغییر چگالی هوا در برج بدست آورده بشود . این عملیات توسط برنامه انجام می شود و سپس ارتفاع بدنه مخروطی برج بدست می آید . در انتهای عملیات طراحی ، پس از محاسبه میزان آب تبخیر شده ، مشخصات برج طراحی شده در نقطه طرح توسط برنامه روی صفحه کامپیوتر چاپ می شوند . این مشخصات عبارتند از مشخصات طرح و مشخصات هسته خنک کننده و نیز ارتفاع بدنه برج و نیز میزان آب مصرفی در برج . لازم به ذکر است که روش بدست آوردن نقطه طراحی بصورت گرافیکی در این برنامه نمایش داده می شود .

پس از انجام طراحی ، استفاده کنند از برنامه می تواند ، برج طراحی شده را در صورت تمایل ، تحلیل کند و اثر تغییر شرایط طرح را روی دمای آب خروجی برج بدست آورد . در این جا سه گزینه تغییرات شرایط طرح را مشخص می کنند ؛ تغییر دمای حباب تر و حباب خشک محیط ، تغییر دمای آب ورودی به برج و تغییر دبی آب ورودی به برج ، پس از وارد کردن شرط تغییر یافته به برنامه ، این برنامه با روشهای حدس و خطا که در فصل سوم بیان شد ، دمای آب خروجی از برج را تعیین می کند . پس از هر مرحله از انجام این کار ، از استفاده کننده پرسیده می شود که آیا مایل به تغییر همان شرط می باشد یا نه ؟ در صورت تمایل استفاده کننده این عمل دوباره انجام می شود ، در غیراین صورت کنترل برنامه باز هم به ابتدای مرحله تغییر شرایط محیطی باز می گردد و استفاده کننده در صورت تمایل می تواند شرط دیگری را تغییر بدهد .



شکل (۵-۱). دیاگرام مسیر برنامه کامپیوتری NTOWER



شکل (۵-۲). دیاگرام مسیر برنامه کامپیوتری NTOWER [ادامه]

پس از تحلیل تغییر شرایط طرح کنترل برنامه به ابتدای برنامه باز می‌گردد. در این مرحله استفاده کننده می‌تواند برج دیگری را طراحی بکند و یا اینکه از برنامه خارج شود.

حال پس از معرفی اجمالی عملکرد برنامه، زیربرنامه‌ها و تابع‌های بکار برده شده در این برنامه را معرفی می‌کنیم.

۲-۵) زیربرنامه‌های برنامه NTOWER

در این قسمت زیربرنامه‌های بکار برده شده در برنامه اصلی NTOWER به ترتیب در برنامه طبق دیاگرام مسیر شکل‌های (۱-۵) و (۲-۵) معرفی می‌شوند.

زیربرنامه Inputs

این زیربرنامه تمامی مشخصات طراحی برای برج را وارد برنامه می‌کند. این داده‌ها عبارتند از: دبی جرمی آب، دمای ورودی آب، دمای خروجی آب، دمای تر محیط، دمای حباب خشک محیط، ضریب λ و توان نمایی n در رابطه (۲-۳۵) که مشخصات نوع هسته خنک کننده را مشخص می‌کنند، ارتفاع هسته خنک کننده بکار برده شده و قطر قاعده هسته خنک کننده.

زیربرنامه MakeChart

این زیربرنامه مشخصه‌های حرارتی برج و هسته خنک کننده را برحسب نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا تشکیل می‌دهد. در این زیربرنامه سه رشته $im()$ ، $ip()$ ، $mrates()$ توسط زیربرنامه‌های دیگر که در خود این زیربرنامه بکار برده می‌شوند تشکیل می‌شوند.

زیربرنامه ImCharact

در این زیربرنامه مشخصه حرارتی برج با توجه به مشخصات حرارتی برج به روش عددی محاسبه می‌شود. روش عددی بکار برده شده برای محاسبه انتگرال، روش دوزنقه‌ای است. این زیربرنامه دو تابع $EntWet$ و Fh را فرامی‌خواند. این دو تابع به ترتیب برای محاسبه انتالپی هوای اشباع در دمای سطح تماس

$$\text{آن با آب و محاسبه انتگرالده انتگرال} \int_{h_{w,out}}^{h_{w,in}} \frac{dh_w}{h_s - h_g} \text{ بکار می‌روند.}$$

مقادیر انتالپی هوای اشباع را در جدول (۲-۱) می‌توان با تابع درجه سوم زیر نمایش داد.

$$h_s = 8.50892 + 2.10657 T - 0.0133267 T^2 + 0.00136795 T^3$$

تابع EntWet مقادیر انتالپی هوای اشباع را طبق رابطه فوق محاسبه می‌کند و در زیر برنامه ImCharact مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رابطه فوق دما برحسب درجه سانتیگراد است.

تابع Fh

برای محاسبه مشخصه حرارتی برج در یک نسبت شار جرمی معین می‌بایست انتگرال I_M را محاسبه کنیم. این انتگرال به روش عددی محاسبه می‌شود. بنابراین انتگرالده آن باید در هر مرحله معین بشود. از آنجا که انتالپی هوای اشباع و انتالپی هوای جاری برحسب دمای آب هستند، تابع Fh نیز مقدار انتگرالده را برحسب دمای آب محاسبه می‌کند. با معین شدن مقدار انتگرالده در هر دما می‌توان به روش ذوزنقه‌ای انتگرال I_M را که معرف مشخصه حرارتی برج در نسبت شار جرمی معین است، محاسبه کرد.

زیربرنامه IpCharact

این زیربرنامه مشخصه حرارتی هسته خنک‌کننده انتخاب شده را با توجه به ارتفاع آن و به کمک رابطه (۲-۳۵) برحسب نسبت شار جرمی معین، محاسبه می‌کند.

زیربرنامه‌های ImCharact و IpCharact در نسبت شار جرمی‌های مختلف فراخوانده می‌شوند و در حقیقت نمودارهای مشخصه حرارتی برج و هسته خنک‌کننده را تشکیل می‌دهند.

زیربرنامه Graph

در این زیربرنامه یک صفحه گرافیکی تشکیل می‌شود که محور افقی آن نسبت شار جرمی را نشان می‌دهد و محور عمودی آن مشخصه حرارتی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از فراخوانی‌های متعدد زیربرنامه‌های ImCharact و IpCharact که در زیربرنامه MakeChart جمع‌آوری می‌شوند، توسط این زیربرنامه مورد استفاده قرار می‌گیرد و نمودارهای مشخصه حرارتی برج و هسته خنک‌کننده روی صفحه گرافیکی نمایش داده می‌شوند. با این زیربرنامه می‌توان نحوه بدست آوردن نقطه طراحی را نمایش داد و در ضمن مقدار بدست آمده توسط برنامه را روی شکل مقایسه کرد. برای سهولت در مقایسه کردن مقادیر بدست آمده توسط برنامه با شکل، مقادیر بدست آمده توسط زیربرنامه‌های بعدی روی همین صفحه گرافیکی نمایش داده می‌شوند.

زیربرنامه Finding

پس از تشکیل نمودارهای مشخصه حرارتی برج و هسته خنک‌کننده، نقطه طراحی که از تقاطع این دو نمودار بدست می‌آید توسط زیربرنامه Finding پیدا می‌شود. در این زیربرنامه، در هر نسبت شار جرمی

معین مقادیر مشخصه حرارتی برج و هسته خنک کننده با یکدیگر مقایسه می شوند. نقطه طراحی جایی است که دو مقدار مشخصه حرارتی با یکدیگر برابر بشوند.

زیربرنامه WriteDesignPoint

پس از مشخص شدن نقطه طراحی و مقدار مشخصه حرارتی آن، این زیربرنامه مقادیر آنها را روی صفحه کامپیوتر چاپ می کند. ضمناً در زیربرنامه Finding متغیر check را برای مشخص کردن وجود نقطه تقاطع بین دو نمودار مشخصه حرارتی برج و هسته خنک کننده به کار می بریم. در صورتیکه بین دو نمودار نقطه تقاطع وجود نداشته باشد متغیر check مقدار ۱- را احراز می کند. در زیربرنامه WriteDesingPoint چنانچه مقدار متغیر check ۱- باشد، پیغامی چاپ می شود که نشان می دهد نقطه تقاطع بین دو نمودار وجود ندارد و از استفاده کننده می پرسد که آیا مایل به تغییر دادن شرایط طراحی می باشد یا خیر؟ که در صورت مثبت بودن جواب استفاده کننده، کنترل برنامه به ابتدای برنامه منتقل می شود.

زیربرنامه StateOutAir

بعد از مشخص شدن نسبت شار جرمی آب به هوا در نقطه طراحی، به کمک رابطه (۲-۴۳) و بصورت عددی می توان طی چند مرحله از ورودی به هسته خنک کننده تا خروج از آن، حالت هوای خروجی از هسته خنک کننده را که با نسبت جرمی رطوبت آن مشخص می شود، بدست آورد. این عملیات در زیربرنامه StateOutAir انجام می شود. این زیربرنامه برای تحلیل یک برج طراحی شده نیز فراخوانده می شود.

زیربرنامه PressureLoss

در این زیربرنامه اطلاعات تجربی در مورد هسته خنک کننده و خصوصیات هیدرولیکی آن که در بخش (۳-۲-۱) از فصل سوم به آنها اشاره کردیم، از استفاده کننده پرسیده می شود. البته مقادیر تجربی که در متن به آنها اشاره شد بعنوان اطلاعات زمینه موجود هستند و می توانند مورد استفاده قرار بگیرند. سپس تعداد واحدهای افت فشار دینامیکی N_v از رابطه (۳-۳) محاسبه می شوند.

زیربرنامه DelDensity

در این زیربرنامه از مطالب بخش (۳-۲-۳) در فصل سوم استفاده می شود. دمای هوای خروجی از هسته خنک کننده طبق رابطه (۳-۱۷) بدست می آید. همچنین چگالی هوای خشک ورودی به برج از رابطه (۳-۲۱) محاسبه می شود. سپس چگالی هوای جاری در ورود به هسته خنک کننده توسط رابطه

(۳-۱۹) محاسبه می‌شود و در نهایت تغییر چگالی هوای جاری از ورود تا خروج از هسته خنک کننده به کمک رابطه (۳-۱۵) معین می‌شود.

زیربرنامه DimensionDesign

با استفاده از نتایج زیربرنامه‌های قبل که در آنها تعداد واحدهای افت فشار دینامیکی N_v و تغییر چگالی هوای جاری محاسبه شدند، این زیربرنامه از رابطه (۳-۲) استفاده می‌کند و در نقطه طرح ارتفاع بدنه برج را برای بوجود آوردن نیروی غوطه‌وری لازم جهت جریان یافتن هوای جاری در نقطه طرح، محاسبه می‌کند.

زیربرنامه WaterLoss

نرخ مصرف آب برحسب دبی جرمی آب ورودی به برج توسط رابطه (۴-۳) محاسبه می‌شود. این زیربرنامه با کمک نتایج حاصل از زیربرنامه StateOutAir که حالت خروجی هوای جاری را معین می‌کند، نرخ مصرف آب را در فرایند خنک کردن، محاسبه می‌کند.

زیربرنامه Outputs

در این زیربرنامه کلیه مشخصات طرح که در ابتدا توسط زیربرنامه Inputs وارد برنامه شده‌اند، همراه با نتایج حاصل از زیربرنامه‌های دیگر که بعنوان طراحی انجام شده‌اند در صفحه کامپیوتر چاپ می‌شوند. ارتفاع بدنه برج و میزان آب مصرفی از نتایج اصلی این محاسبات هستند.

زیربرنامه ChangeCondition

پس از طراحی یک برج با مشخصات طرح داده شده، نوبت به تحلیل این برج تحت تأثیر تغییر شرایط طرح می‌شود. در این زیربرنامه نوع تغییر مشخص و مقدار آن وارد برنامه می‌شود. نحوه عملکرد این قسمت از برنامه در شکل دیاگرام مسیر (۵-۲) توضیح داده شده است. در این زیربرنامه تعداد افت فشار دینامیکی ثابت در نظر گرفته می‌شود و در یک حلقه تکرار زیربرنامه‌های MakeChart، StateOutAir، DelDensity، Finding و DimensionDesign در دماهای آب خروجی حدس زده شده متفاوت فراخوانده می‌شوند و به ازای هر دمای حدس زده شده یک ارتفاع برج بدست می‌آید. این دو رشته از اعداد در دو رشته () htowerc و () tpout ذخیره می‌شوند.

زیربرنامه FindTout

این زیربرنامه برای پیدا کردن دمای آب خروجی متناظر به ارتفاع برج طراحی شده تحت تأثیر تغییر

شرایط طرح بکار می رود. در زیر برنامه ChangeCondition پس از تشکیل رشته های () , thowerc , () tpout این زیر برنامه فراخوانده می شود که با جستجو در این رشته ها، دمای آب خروجی متناظر به ارتفاع برج طراحی شده را پیدا می کند که در حقیقت جواب مسأله می باشد.

بسیاری از زیر برنامه های معرفی شده خود زیر برنامه های دیگر را فرا می خوانند. دسته بندی این زیر برنامه ها به گونه ای است که نوشتن برنامه اصلی و همچنین تغییر دادن آنرا بسیار ساده می کند.

۵-۳) برنامه کامپیوتری MTOWER

برای طراحی و تحلیل برجها خنک کن با جریان اجباری برنامه کامپیوتری MTOWER تهیه شده است. روش عملکرد این برنامه بصورت دیاگرام مسیر در شکل های (۵-۳) و (۵-۴) نشان داده شده اند. برای اجرای برنامه ابتدا عبارت MTOWER تایپ می شود. این برنامه تا حد زیادی شبیه به برنامه NTOWER است. بسیاری از زیر برنامه های این دو با هم مشترک هستند، زیرا اصول طراحی هر دو نوع برج تقریباً یکی است. فرق اساسی بین برجهای خنک کن با جریان طبیعی با برجهای خنک کن با جریان اجباری در عامل محرک برای جریان هوا است. در برجهای با جریان اجباری نیروی فن این نقش را دارد، بنابراین در ابتدای برنامه که می خواهیم داده های مسأله را وارد کنیم تعداد فن و مشخصات مربوط به دیفیوزر و سطح مقطع خروجی فن را نیز باید وارد برنامه بکنیم. در ضمن برجهای خنک کن با جریان اجباری می توانند دارای مقطع دایره ای مستطیلی باشند که در خواسته های برنامه نوع سطح مقطع و ابعاد آن نیز پرسیده می شوند. همچنین فن می تواند در بالای برج و یا در ورودی هوا در پایین برج قرار بگیرد که به ترتیب نوع مکشی و رانشی هستند. از این نظر نیز نوع برج توسط برنامه از استفاده کننده پرسیده می شود.

در برجهای خنک کن با جریان طبیعی تعداد واحدهای افت فشار دینامیکی محاسبه می شوند و برای پیدا کردن ارتفاع بدنه برج به کار می روند در حالیکه در برنامه MTOWER برای تعیین مشخصات جزئی فن باید تعداد واحدهای افت فشار دینامیکی را باتوجه به سرعت ورودی هوا که فشار دینامیکی براساس آن محاسبه می شود، بصورت افت فشار برحسب واحد فشار بدست آورد. همچنین دبی حجمی هوا باتوجه به چگالی آن در ورودی فن به جای دبی جرمی آب محاسبه می شود.

در مرحله تحلیل برنامه MTOWER نیز پس از طراحی یک برج و چاپ شدن مشخصات آن که شامل افت فشار و دبی حجمی هوای لازم نیز می باشد، چهار گزینه برای تغییر شرایط طرح وجود دارد. دمای

حباب تر محیط دمای آب ورودی به برج، نسبت شار جرمی آب به شار جرمی هوا و تغییر تعداد فن‌ها در برج‌های سلولی و برج‌هایی که با چند فن کار می‌کنند. با انتخاب هر یک از این موارد، تغییر موردنظر وارد برنامه می‌شود و پس از بدست آوردن دمای آب خروجی متناظر به این تغییر به روشهای حدس و خطا، استفاده کننده می‌تواند همان مورد را تغییر بدهد و یا اینکه مورد دیگری را تغییر بدهد. این مرحله شبیه به تحلیل برنامه NTOWER است. البته نحوه بدست آوردن دمای آب خروجی تغییر یافته، در این برنامه براساس توضیحات فصل چهارم است. حال به معرفی زیربرنامه‌های این برنامه می‌پردازیم.

۴-۵) زیربرنامه‌های برنامه MTOWER

بسیاری از زیربرنامه‌های معرفی شده در بخش قبل در این برنامه عیناً بکار برده می‌شوند و بنابراین فقط نام آنها را در زیر می‌آوریم. این زیربرنامه‌ها عبارتند از MakeChart همراه با دو تابع آن EntWet، Fh، Graph، DelDensity، StateOutAir، Finding، ImCharact، IpCharact و WaterLoss. زیربرنامه‌های Inputs و Outputs نیز با کمی تغییر شکل مثل زیربرنامه‌های متناظرشان در برنامه NTOWER هستند. در زیربرنامه Inputs نوع سطح مقطع و ابعاد آن و نیز نوع فن به کار برده شده در برج از نظر مکشی یا رانشی بودن همراه با مشخصات دهانه آن، علاوه بر مشخصات طرح وارد برنامه می‌شوند. در زیربرنامه Outputs نیز به جای ارتفاع بدنه برج، دبی حجمی جریان هوا و افت فشار، که برای انتخاب فن لازم هستند، به همراه نوع برج و مقطع آن چاپ می‌شوند. بقیه موارد در این زیربرنامه مثل زیربرنامه متناظر در برنامه NTOWER است. در ذیل زیربرنامه‌های جدید معرفی می‌شوند.

زیربرنامه DesignPoint

این زیربرنامه شبیه به زیربرنامه WriteDesignPoint در برنامه NTOWER است. در این زیربرنامه نیز محل تقاطع دو نمودار مشخصه حرارتی برج و هسته خنک کننده توسط فراخوانی زیربرنامه Finding پیدا می‌شود و سپس روی صفحه گرافیکی که دو نمودار ترسیم شده‌اند چاپ می‌شود. در صورتیکه بین دو نمودار نقطه تقاطع وجود نداشته باشد، پیغامی مبنی بر این موضوع در این زیربرنامه چاپ می‌شود. در برنامه NTOWER زیربرنامه Findin در برنامه اصلی فراخوانده می‌شود و نتیجه آن توسط زیربرنامه WriteDesignPoint در برنامه اصلی چاپ می‌شود.

زیربرنامه PressureLoss

در این زیربرنامه افت فشار در هسته خنک کننده برحسب تعداد واحدهایی افت فشار دینامیکی بدست می آید. سپس باتوجه به سرعت هوا در هسته خنک کننده، این واحدهای افت فشار دینامیکی به افت فشار مطلق برحسب واحد فشار (پاسکال) بدست می آیند. همچنین افت فشارهای خروجی فن نیز از رابطه (۲-۴) با واحد پاسکال بدست می آید. کل افت فشار که باید توسط فن جبران بشود توسط رابطه (۱-۴) بدست می آید.

زیربرنامه ChangeCondition

در این زیربرنامه پس از طراحی یک برج، اثر تغییرات شرایط طرح روی دمای آب خروجی از برج مورد بررسی قرار می گیرد. این برنامه کمیت تغییر یافته را از استفاده کننده می پرسد، پس از وارد کردن اسم مربوط به کمیت تغییر یافته، زیربرنامه مربوط به آن فراخوانده می شود. در این زیربرنامه چهار زیربرنامه بعدی فراخوانده می شوند.

زیربرنامه ChangeWetbulb

در این زیربرنامه دمای حباب تر تغییر یافته وارد برنامه می شود. سپس با روش حدس و خطا دماهای مختلف برای آب خروجی از برج حدس زده می شود و با فراخوانی زیربرنامه ImCharact مشخصه حرارتی متناظر به این دمای آب خروجی محاسبه می شود. این روش تا زمانی که دمای آب خروجی متناظر به مشخصه حرارتی طرح شود، ادامه پیدا می کند. پس از بدست آوردن دمای آب خروجی، مقدار آن چاپ می شود و از استفاده کننده پرسیده می شود که آیا مایل به تغییر مجدد دمای حباب تر می باشد یا خیر؟ که در صورت تمایل روش تکرار می شود و در غیر این صورت کنترل برنامه به زیربرنامه اصلی ChangeCondition باز می گردد.

زیربرنامه ChangeTin

در این زیربرنامه دمای آب ورودی تغییر یافته وارد برنامه می شود. سپس با روش حدس و خطا مثل زیربرنامه قبل و با فراخوانی زیربرنامه ImCharact دمای آب خروجی متناظر به مشخصه حرارتی طرح، بدست می آید.

زیربرنامه ChangeNumfan

در این زیربرنامه که برای برجهای سلولی بکار می‌رود، تعداد فنهای از کار افتاده وارد برنامه می‌شود. سپس با یک رابطه ساده موازنه انرژی بین جریان آب خنک شده در سلولهای فعال و آب خنک نشده در سلولهای غیرفعال دمای آب خروجی کل از برج بدست می‌آید. پس از بدست آوردن دمای آب خروجی مثل زیربرنامه‌های قبل از استفاده کنند در مورد تمایل به تغییر تعداد فنهای از کار افتاده سؤال می‌شود.

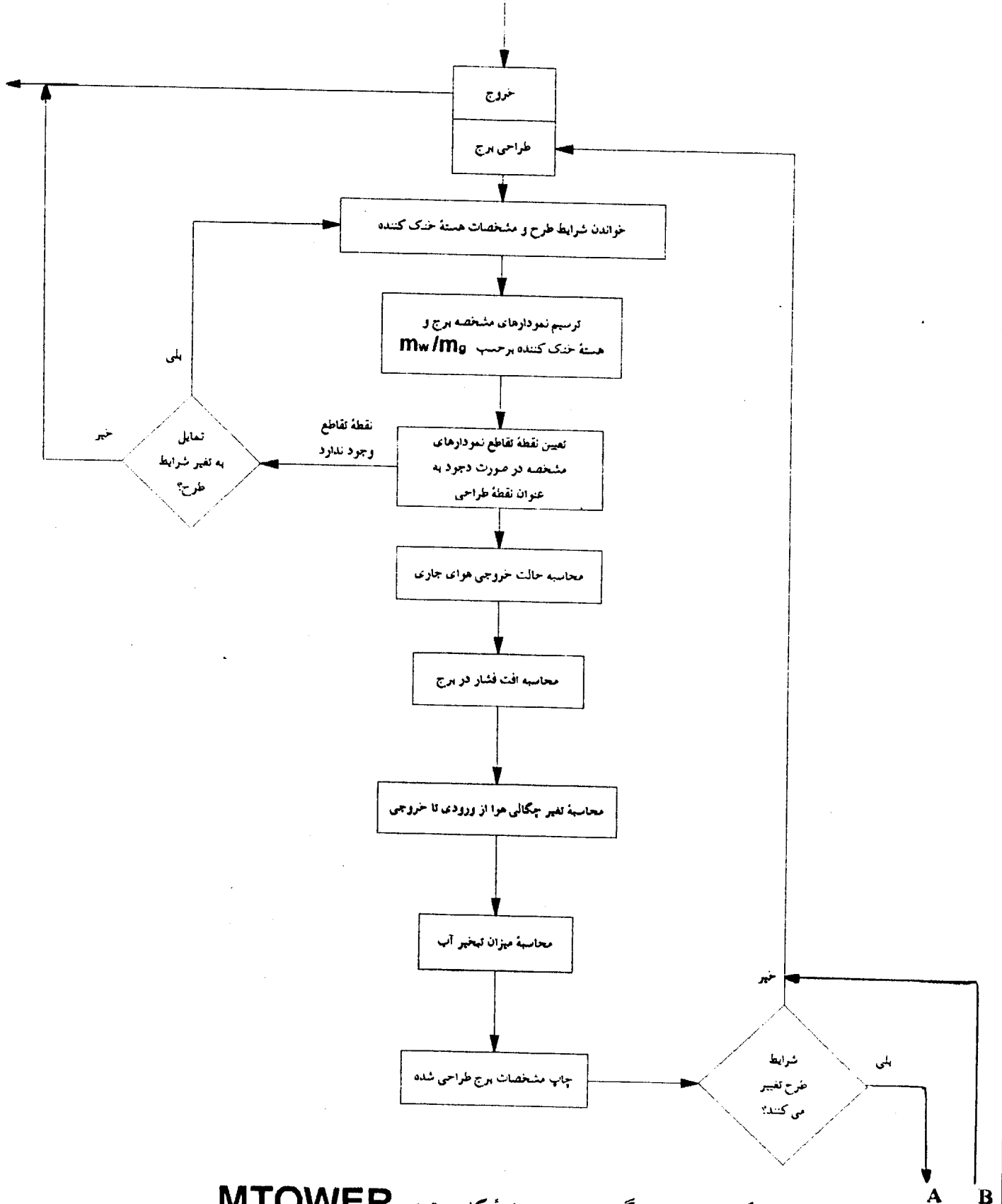
زیربرنامه ChangeRate

در این زیربرنامه نسبت شار گرمی آب به شار گرمی هوای تغییر یافته وارد برنامه می‌شود. سپس با فراخوانی زیربرنامه IpCharact مشخصه حرارتی هسته خنک کننده در نسبت شار گرمی تغییر یافته محاسبه می‌شود. بعد از این مرحله مثل زیربرنامه ChangeTin به روش حدس و خطا با حدس زدن دمای آب خروجی و فراخوانی زیربرنامه ImCharact مشخصه حرارتی برج در دمای آب خروجی حدس زده شده محاسبه می‌شود. این روش تا زمانی که دمای آب خروجی متناظر به مشخصه حرارتی برج برابر با مشخصه حرارتی هسته خنک کننده در نسبت شار گرمی تغییر یافته بشود، ادامه پیدا می‌کند. سپس دمای آب خروجی بدست آمده چاپ می‌شود و از استفاده کننده در مورد تغییر مجدد این کمیت پرسیده می‌شود.

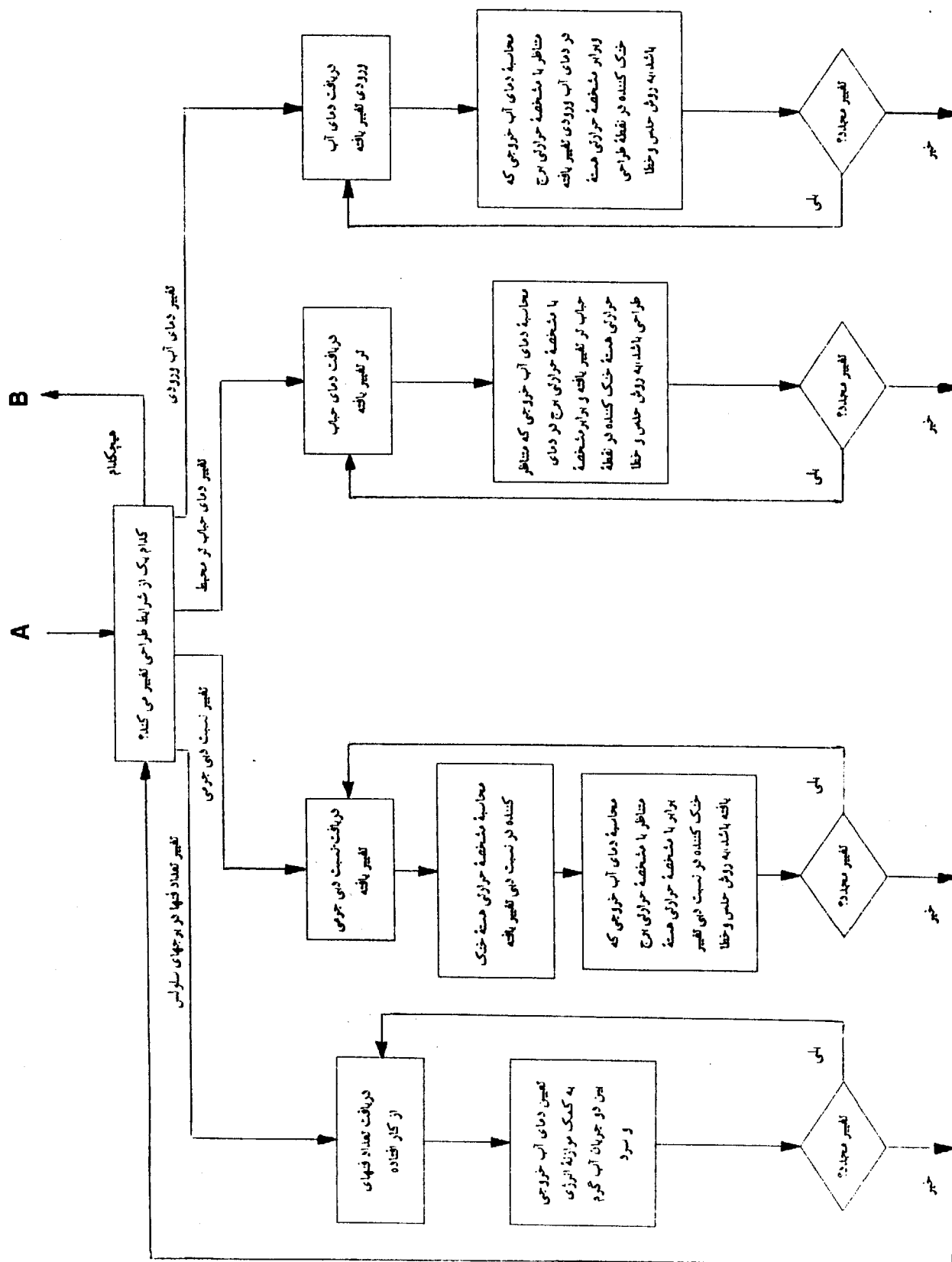
۵-۵) پیشنهاد برای بهبود برنامه‌های کامپیوتری

در برنامه‌های تهیه شده بسیاری از اطلاعات مثل ضریب λ و توان نمایی n توسط استفاده کننده وارد برنامه می‌شود. همچنین ارتفاع هسته خنک کننده نیز توسط استفاده کننده وارد برنامه می‌شود. در این برنامه به علت کمبود اطلاعات در مورد هسته‌های خنک کننده به ناچار این کمیتها وارد برنامه می‌شوند. در صورتیکه اطلاعات در مورد هسته‌های خنک کننده کامل باشند، پیشنهاد می‌شود که این اطلاعات بصورت یک پرونده اطلاعاتی در یک پرونده که همراه با برنامه کامپیوتری است قرار داده شوند و زیربرنامه Inputs از این پرونده اطلاعاتی استفاده بکند. همچنین می‌توان ارتفاع هسته خنک کننده را نیز با توجه به محدوده کمیتهای طراحی در این پرونده اطلاعاتی معین کرد و برنامه از مقادیر آن استفاده بکند (جدول (۲-۲)). این پرونده اطلاعاتی باید به گونه‌ای تنظیم بشود که مشخصات هسته خنک کننده انتخاب شده به راحتی و با یک نظم خاص که در روند اجرای برنامه معین می‌شود قابل دستیابی باشد. برای این منظور می‌توان هسته‌های خنک کننده موجود را کدبندی کرد و در زیربرنامه Inputs فقط کد مربوط به هسته خنک کننده

MTOWER



شکل (۳-۵). دیاگرام مسیر برنامه کامپیوتری MTOWER



شکل (۴-۵). دیاگرام مسیر برنامه کامپیوتری MTOWER (ادامه)

موردنظر را وارد برنامه کرد. با مشخص شدن هسته خنک کننده، برنامه به پرونده اطلاعاتی مراجعه می‌کند و اطلاعات مربوط به هسته خنک کننده را در قسمت مربوطه باز می‌کند و مورد استفاده قرار می‌دهد.

همچنین برنامه می‌تواند چند طرح مختلف را در خود انجام داده و ذخیره بکند و بازهم باتوجه به اطلاعات موجود در پرونده اطلاعاتی، بین آنها بهترین را انتخاب بکند و بعنوان طرح نهایی ارائه بدهد.

در اصطلاح به این شیوه از برنامه‌نویسی، برنامه‌نویسی هوشمند می‌گویند. البته برای برنامه‌نویسی به شیوه هوشمند، احتیاج به اطلاعات بسیار زیادی است که متأسفانه به علت جنبه تجارتي این تکنولوژی دسترسی به چنین اطلاعاتی ساده نیست و در حقیقت بسیار هم مشکل است.

فصل ششم

بررسی نتایج

برنامه‌های کامپیوتری تهیه شده نیاز به مشخصه‌های حرارتی برج را در شرایط مختلف برطرف می‌کند. این برنامه‌ها مشخصه‌های حرارتی برج را در شرایط طرح محاسبه و ترسیم می‌کنند. همچنین مشخصه حرارتی هسته خنک‌کننده انتخاب شده نیز محاسبه می‌شود. با شکل ترسیمی این دو مشخصه که در متن برنامه ارائه می‌شود، طراح می‌تواند نقطه طرح بدست آمده را با محدودیت‌هایی که در طراحی در نظر گرفته می‌شوند مقایسه بکند و در صورت هماهنگی نقطه طرح بدست آمده با موازین طراحی، قدم‌های بعدی طراحی را انجام بدهد. برای مشخص شدن نحوه تغییرات نقطه طرح با عوض کردن پارامترهای مسأله نیاز به یک سری نتایج از پیش بدست آمده است. در این فصل با ارائه مشخصه‌های حرارتی برج در شرایط مختلف، نحوه تغییرات و پارامترهای مهم در مقدار مشخصه حرارتی برج را معین می‌کنیم. در ضمن با ارائه این مشخصه‌ها تشابه بین مشخصه‌های بدست آمده توسط برنامه کامپیوتری با مشخصه‌هایی که در مراجع می‌توان آنها را پیدا کرد، مشخص می‌شود. البته محدوده‌های انتخاب شده در مشخصه‌های بدست آمده بزرگ هستند که در حقیقت توانایی برنامه کامپیوتری را برای ارائه مشخصه‌های حرارتی در طیف وسیعی از شرایط طرح، نشان می‌دهد.

در جدول (۲-۲) خصوصیات چند نوع هسته خنک کننده ارائه شده بود. در این فصل این هسته‌های خنک کننده را برای یک شرایط طرح یکسان به کار برده‌ایم تا عملکرد همه آنها را در برج مشاهده کنیم. برای طراحی یک برج بصورت تئوری هر نوع هسته خنک کننده‌ای را می‌توان به کار برد اما از لحاظ محدودیتهای طراحی باید پارامترهای دخیل در طراحی یک برج از حد مشخصی تجاوز نکنند. بنابراین با توجه به نحوه عملکرد هسته‌های خنک کننده، هر نوع از آنها برای شرایط خاصی مناسب هستند.

در فصلهای گذشته اشاره کردیم که پس از طراحی یک برج براساس شرایط طرح آن، بنا به دلایل مختلف ممکن است که برج در شرایطی به غیر از شرایط طرح خود کار نکند. اثر این تغییر شرایط روی دمای آب خروجی از برج ظاهر می‌شود. بنابراین برای شرایط طرح بخصوصی تأثیر تغییر پارامترهای طرح را روی عملکرد برج مورد بررسی قرار داده‌ایم. این نتایج را برای برجهای خنک کن با جریان اجباری بدست آورده‌ایم، چون نتایج بدست آمده می‌توانند جهت کنترل کردن عملکرد برج توسط تغییر وضعیت فن آن (به کمک تغییر سرعت و یا تغییر زاویه پره‌های فن)، مورد استفاده قرار بگیرند.

در مناطقی که تهیه آب مورد نیاز برای برج دارای اهمیت است، مسأله مصرف آب در برج مهم است. بنابراین در یک شرایط طرح بخصوص باید میزان آب مصرفی را بتوان توسط پارامترهای دیگر کنترل کرد. در نتایج بدست آمده نقش ارتفاع هسته خنک کننده را روی میزان آب مصرفی مورد بررسی قرار داده‌ایم. همچنین ارتفاع هسته خنک کننده در شرایط طرح مشخص، روی افت فشار جریان هوا و میزان دبی حجمی هوای لازم جهت تأمین شرایط خنک کنندگی تحت طرح تأثیر می‌گذارد. اثر این تغییرات نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به کمک برنامه‌های کامپیوتری تهیه شده می‌توان اثر هرگونه تغییری را روی عملکرد برج و یا تأثیرات متقابل پارامترهای مختلف را روی یکدیگر بدست آورد. نتایج بدست آمده جزء مهمترین این تأثیرات هستند و نمی‌توان ادعا کرد که تغییرات شرایط در همین چند نمونه خلاصه می‌شود. انتخاب پارامترهای متغیر به اهداف استفاده کننده از برنامه برای بررسی‌های مورد نظر او بستگی دارد.

۱-۶) مشخصه‌های حرارتی برج

نمودارهای (۱-۶) تا (۵-۶) برای بازده‌های دمایی ثابت و در دماهای حباب تر مختلف ترسیم شده‌اند. این نمودارها مشخصه حرارتی برج را در بازده دمایی ثابت برحسب دماهای حباب تر مختلف بعنوان پارامتر نشان می‌دهند. بازده دمایی در شکل‌های (۱-۶)، (۲-۶)، (۳-۶)، (۴-۶) و (۵-۶) به

ترتیب ۴۰، ۳۸، ۳۶، ۳۲ و ۳۰ درجه سانتیگراد هستند. در هر کدام از این نمودارها دماهای حباب تر ۲۸، ۳۰، ۳۲، ۳۶ و ۳۸ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده‌اند. باتوجه به این نمودارها ملاحظه می‌شود که اولاً با افزایش نسبت دبی آب به دبی هوا مشخصه حرارتی برج افزایش می‌یابد و ثانیاً در یک نسبت دبی ثابت با افزایش دمای حباب تر مشخصه حرارتی برج افزایش می‌یابد. همچنین در نسبت دبی ثابت و دمای حباب تر ثابت با افزایش بازده دمایی، مشخصه حرارتی برج افزایش می‌یابد.

نمودارهای (۶-۶) تا (۱۰-۶) برای دمای حباب تر ثابت و در دماهای تمایل مختلف ترسیم شده‌اند. دمای حباب تر در شکل‌های (۶-۶)، (۷-۶)، (۸-۶)، (۹-۶) و (۱۰-۶) به ترتیب ۲۴، ۲۶، ۲۸، ۳۰ و ۳۲ درجه سانتیگراد هستند. در هر کدام از این نمودارها دماهای تمایل مختلف ترسیم شده‌اند. باتوجه به نمودارها ملاحظه می‌شود که در یک نسبت دبی ثابت مشخصه حرارتی برج با افزایش دمای تمایل کاهش پیدا می‌کند. لازم به توضیح است که این مشخصه‌ها در مقیاس لگاریتمی ترسیم شده‌اند.

(۲-۶) نقش نوع هسته خنک کننده در تعیین نقطه طرح مناسب

همانطور که گفته شد شرایط طراحی نباید از محدوده‌های مشخص شده، تجاوز بکند. عوامل محدودکننده مختلف هستند. مثلاً ارتفاع هسته خنک کننده نمی‌تواند از حد مشخصی بیشتر باشد. برای این قسمت برجی را در نظر بگیرید که شرایط طرح آن به قرار زیر است: دمای حباب تر محیط 28° ، دمای آب ورودی به برج 80° ، دمای آب خروجی از برج 40° و ارتفاع هسته خنک کننده (که می‌تواند حداکثر ارتفاع مجاز باشد) $2/2$ متر. علت انتخاب این دماها این است که بتوانیم نتایج مناسبی را برای کاربرد هسته‌های خنک کننده بدست آوریم و این نتایج جنبه کلی تری داشته باشند.

در جدول (۲-۲) دوازده نوع هسته خنک کننده با خصوصیات آنها معرفی شده‌اند. در شکل‌های (۱۱-۶) الی (۱۳-۶) مشخصه حرارتی برج در شرایط طرح فوق و نیز مشخصه‌های حرارتی دوازده هسته خنک کننده ترسیم شده‌اند. در شکل (۱۱-۶) ملاحظه می‌کنید که هر چهار نوع هسته خنک کننده A، B، C و D مشخصه حرارتی برج را قطع کرده‌اند اما باتوجه به محدوده مجاز که برای نسبت دبی‌ها ذکر کردیم هسته خنک کننده نوع D در شرایط مناسبی نیست. در شکل (۱۲-۶) باز هم چهار نوع هسته خنک کننده E، F، G و H مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ملاحظه می‌شود که این چهار نوع اصلاً برای چنین برجی مناسب نیستند، زیرا نسبت دبی‌ها در این چهار نوع بسیار کوچک می‌شود.

در ضمن اگر دمای تمایل کمی کمتر بشود هسته‌های خنک کننده E و F اصلاً مشخصه حرارتی برج را قطع نمی‌کنند و نمی‌توانند شرایط طرح را بوجود بیاورند. در شکل (۶-۱۳) چهار نوع هسته خنک کننده I، J، a و b را مورد بررسی قرار داده‌ایم. ملاحظه می‌شود که دو نوع a و b در شرایط بهتری نسبت به ده نوع دیگر هستند. بنابراین بهتر است که یکی از این دو نوع هسته خنک کننده برای طراحی برج مورد نظر به کار بروند. البته نوع b به مراتب از نوع a مناسب‌تر است.

۶-۳) اثر تغییر نسبت دبی جرمی روی عملکرد برج

در برج‌های با جریان اجباری تغییر نسبت دبی جرمی می‌تواند در اثر تغییر دبی جرمی آب و یا تغییر دبی جرمی هوا که خود ناشی از سرعت و یا زاویه پره‌های فن می‌باشد بوجود بیاید. تغییر نسبت دبی جرمی روی دمای آب خروجی از برج تأثیر می‌گذارد. از آنجا که مشخصه حرارتی هسته خنک کننده به نسبت دبی جرمی وابسته است بنابراین در هسته‌های خنک کننده مختلف میزان تأثیر این تغییر روی دمای آب خروجی متفاوت است.

در این قسمت برجی را با شرایط طرح، دمای حباب تر محیط 20° ، دمای آب ورودی 80° ، دبی آب ۲۶ کیلوگرم در ثانیه و ارتفاع هسته خنک کننده ۱/۲ متر در نظر می‌گیریم. با این شرایط دوازده نوع هسته خنک کننده جدول (۲-۲) را به کار می‌بریم. شکل‌های (۶-۱۴) الی (۶-۱۶) تأثیر تغییر نسبت دبی (تغییر دبی هوا) را با هر یک از این دوازده هسته خنک کننده در برج با شرایط فوق نشان می‌دهند. در شکل (۶-۱۴) هسته‌های خنک کننده A، B، C و D بررسی شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در نسبت دبی یکسان دمای آب خروجی در نوع D به مراتب بیشتر از انواع دیگر است. در شکل (۶-۱۵) در هسته‌های خنک کننده E، F، G و H برای نسبت دبی یکسان دمای آب خروجی در نوع F بیشتر از انواع دیگر است. همچنین در شکل (۶-۱۶) چهار نوع هسته خنک کننده I، J، a و b بررسی شده‌اند. در این شکل نیز دمای آب خروجی در نوع J در نسبت دبی یکسان بیشتر از انواع دیگر است. با مقایسه این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که انواع E، a و J تقریباً حساسیت کمتری نسبت به تغییر نسبت دبی دارند.

۶-۴) اثر تغییر دمای حباب تر روی عملکرد برج

تأثیر تغییرات دمای حباب تر محیط به نوع هسته خنک کننده به کار رفته در برج بستگی ندارد. در

شکل (۶-۱۷) تغییر دمای آب خروجی برحسب تغییرات دمای حباب تر محیط در برج معرفی شده بند (۶-۳) ترسیم شده است. ملاحظه می شود که با افزایش دمای حباب تر محیط، دمای آب خروجی از برج نیز افزایش می یابد. البته بصورت کیفی باتوجه به نحوه بدست آوردن مشخصه حرارتی برج و یا بصورت فیزیکی می توان چنین نتیجه ای را حدس زد. اما در این نمودار این نتیجه کیفی بصورت کمی ارائه شده است که می تواند اطلاعات بیشتری را در دسترس قرار بدهد.

۵-۶) اثر تغییر دمای آب ورودی روی عملکرد برج

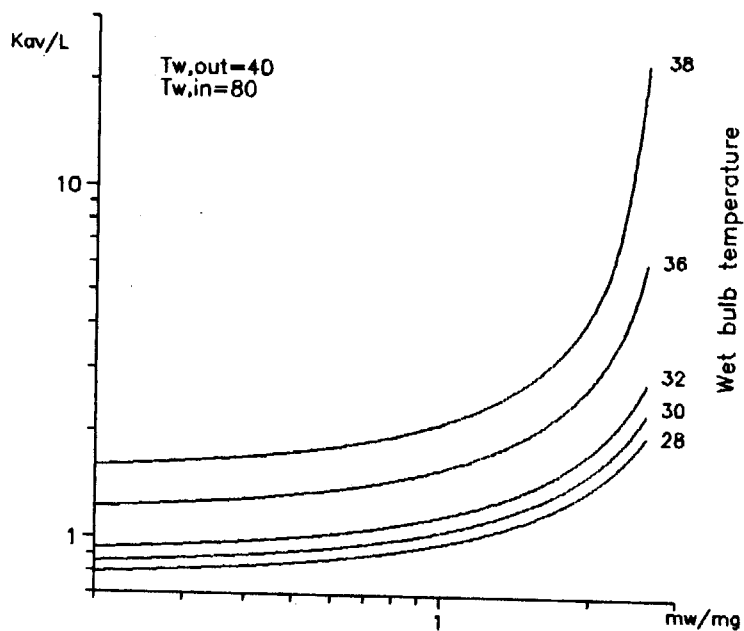
تأثیر تغییر دمای آب ورودی به برج نیز به نوع هسته خنک کننده به کار برده شده در برج وابسته نیست شکل (۶-۱۸). تغییر دمای آب خروجی را برحسب تغییرات دمای آب ورودی به برج در برج معرفی شده در بند (۶-۳) نشان می دهد. باز هم بصورت کیفی و هم بصورت کمی ملاحظه می شود که افزایش دمای آب ورودی به برج باعث افزایش دمای آب خروجی از آن می شود.

۶-۶) اثر ارتفاع هسته خنک کننده در میزان آب مصرفی

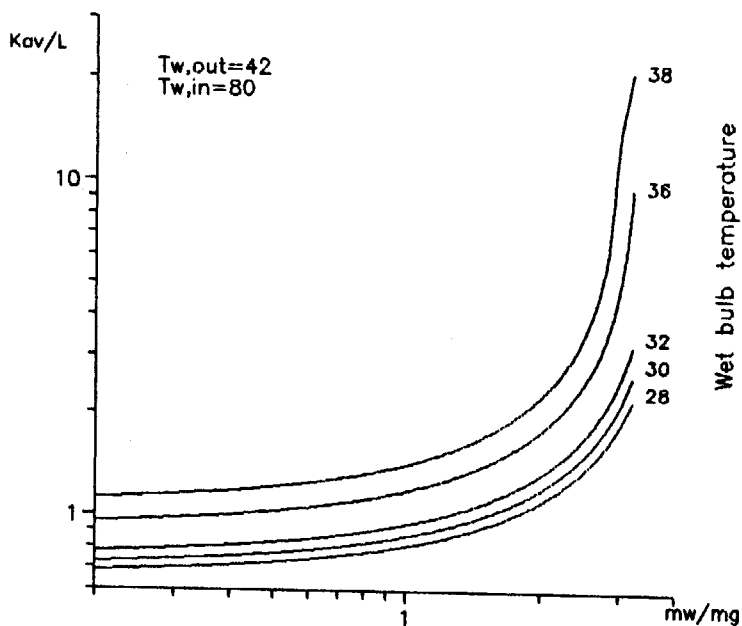
در یک برج خنک کن مرطوب، میزان آب مصرفی به نوع هسته خنک کننده و ارتفاع آن و نیز شرایط طرح بستگی دارد. در شکل های (۶-۱۹) و (۶-۲۰) اثر ارتفاع دو نوع هسته خنک کننده برای برج در شرایط طرح دمای حباب تر محیط 20° ، دمای حباب خشک محیط 35° ، دمای آب ورودی به برج 80° ، دمای آب خروجی از برج 50° و دبی جرمی آب برابر با 26 کیلوگرم در ثانیه نشان داده شده است. باتوجه به این شکلهای ملاحظه می کنید که با افزایش ارتفاع هسته خنک کننده میزان آب مصرفی در برج کاهش می یابد. کاهش میزان آب مصرفی در برج، در اثر افزایش ارتفاع هسته خنک کننده نشان می دهد که انتقال حرارت بصورت محسوس در مقایسه با انتقال حرارت بصورت نهان افزایش پیدا می کند. این بدان علت است که با افزایش سطح تبادل حرارتی میزان انتقال حرارت محسوس در مقایسه با انتقال حرارت غیرمحسوس به مراتب بیشتر می شود. همچنین با مقایسه دو نوع هسته خنک کننده a و b ملاحظه می کنید که میزان آب مصرفی در نوع b به مراتب کمتر از مقدار آن در نوع a است. این به علت بیشتر بودن سطح تبادل حرارتی در هسته خنک کننده نوع b است. بنابراین اگر باید میزان آب مصرفی در برج کم باشد، بهتر است از هسته خنک کننده نوع b استفاده شود.

۶-۷) اثر ارتفاع هسته خنک کننده در افت فشار و دبی هوا

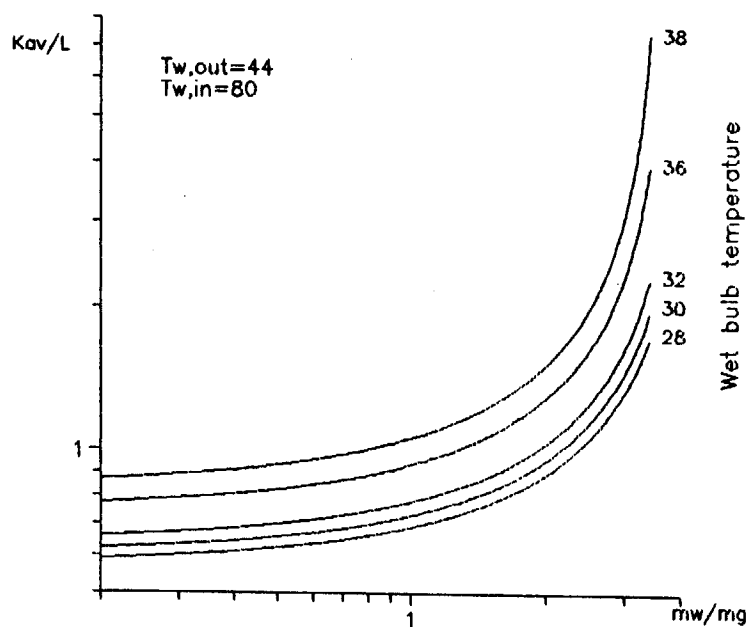
افت فشار هوا به ارتفاع هسته خنک کننده و دبی هوای گذرنده از آن بستگی دارد. در شرایط طرح هر چقدر ارتفاع هسته خنک کننده بیشتر باشد دبی هوای لازم جهت خنک کنندگی طرح کاهش می یابد. کاهش این مقدار دبی باعث کاهش افت فشار هم می شود. در برج خنک کن با جریان اجباری در شرایط طرح معرفی شده در بند (۶-۷)، می توان ارتفاع هسته خنک کننده را تغییر داد و دبی هوای لازم و افت فشار متناظر به این ارتفاع هسته خنک کننده را بدست آورد. شکل های (۶-۲۱) و (۶-۲۲) اثر ارتفاع دو نوع هسته خنک کننده a و b را در شرایط طرح معرفی شده روی افت فشار و دبی هوای لازم نشان می دهند. باتوجه به این شکلهای ملاحظه می شود که با افزایش ارتفاع هسته خنک کننده دبی هوای لازم جهت شرایط طرح کاهش می یابد. این بدان علت است که با افزایش ارتفاع هسته خنک کننده سطح تبادل حرارتی افزایش می یابد. بنابراین میزان هوای لازم جهت تأمین خنک کنندگی طرح کاهش می یابد. با کاهش دبی هوای جاری در هسته خنک کننده افت فشار این هوا نیز کاهش می یابد. زیرا هرچقدر دبی هوا کمتر باشد افت فشار آن نیز کمتر است. باتوجه به شکل های (۶-۲۱) و (۶-۲۲) ملاحظه می شود که دبی هوای لازم در نوع b به مراتب کمتر از مقدار آن در نوع a برای یک ارتفاع معین از هسته خنک کننده است. همچنین میزان افت فشار نیز در نوع b کمتر از مقدار آن در نوع a است. بنابراین با نوع b می توان فن کوچکتری را در شرایط طرح خواسته شده به کار برد.



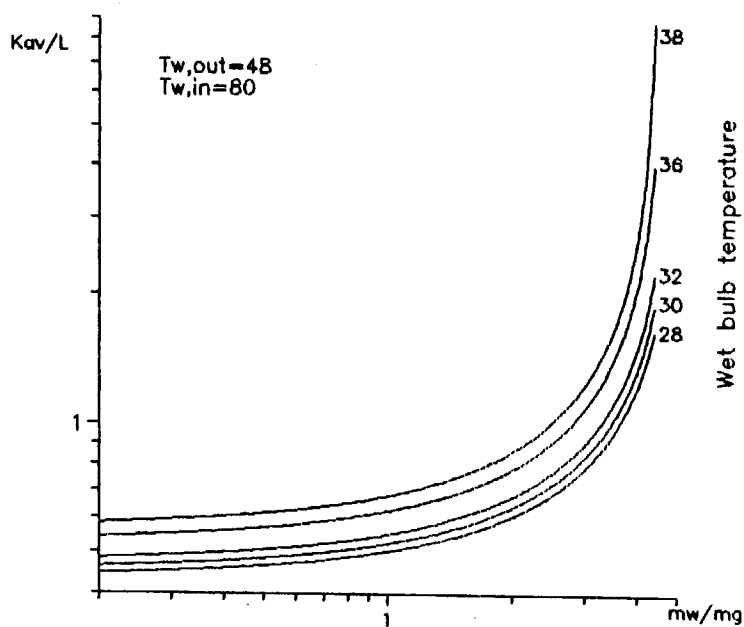
شکل (۶-۱). مشخصه حرارتی برج در بازده دمایی ثابت و دماهای حباب تر مختلف.



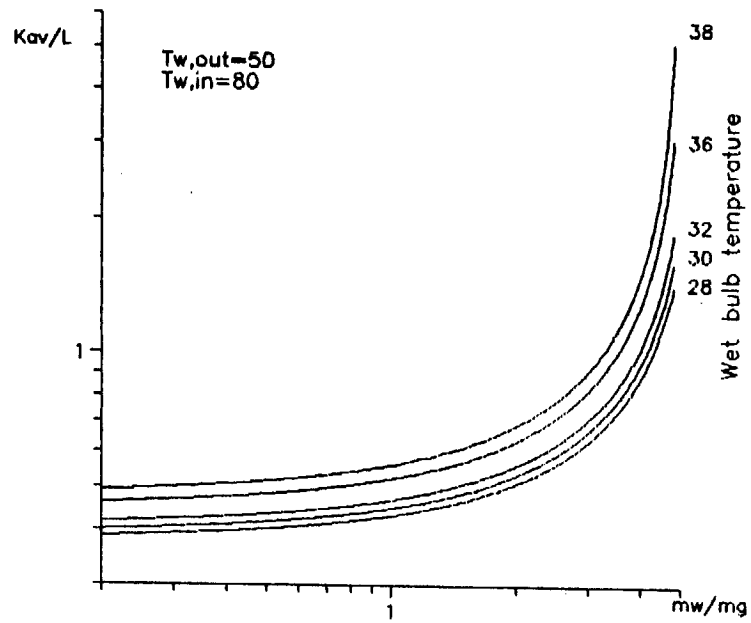
شکل (۶-۲). مشخصه حرارتی برج در بازده دمایی ثابت و دماهای حباب تر مختلف.



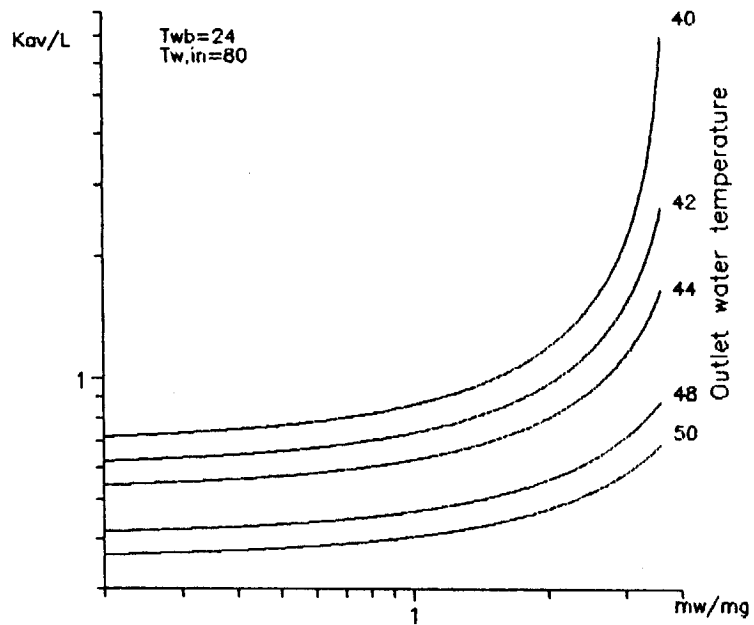
شکل (۳-۶). مشخصه حرارتی برج در بازده دمایی ثابت و دماهای حباب تر مختلف.



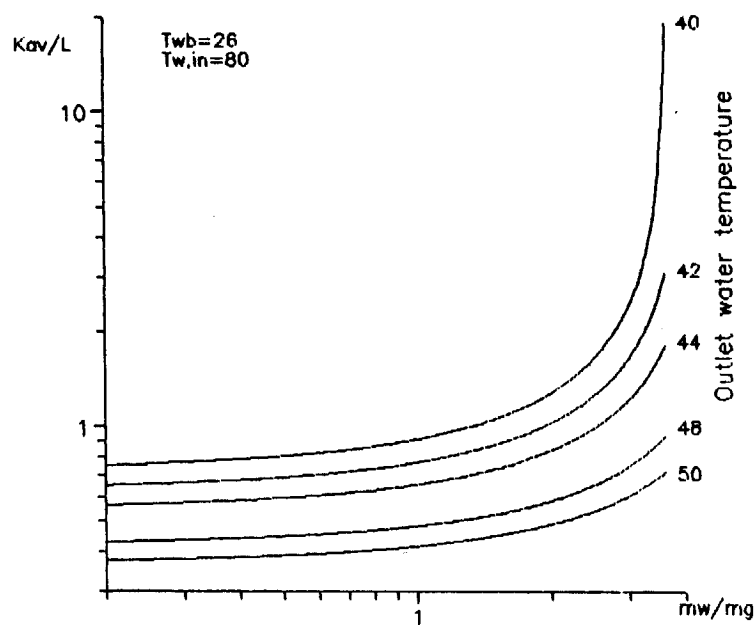
شکل (۴-۶). مشخصه حرارتی برج در بازده دمایی ثابت و دماهای حباب تر مختلف.



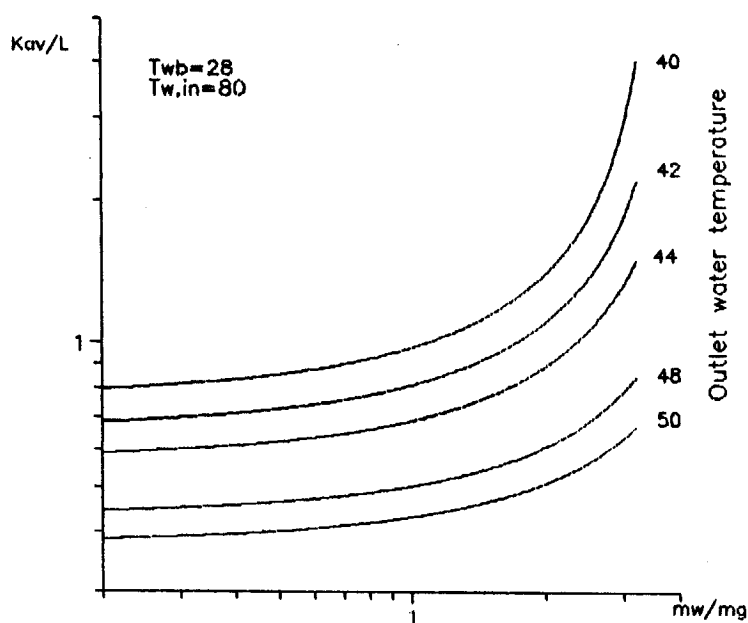
شکل (۵-۶). مشخصه حرارتی برج در بازده دمایی ثابت و دماهای حباب تر مختلف.



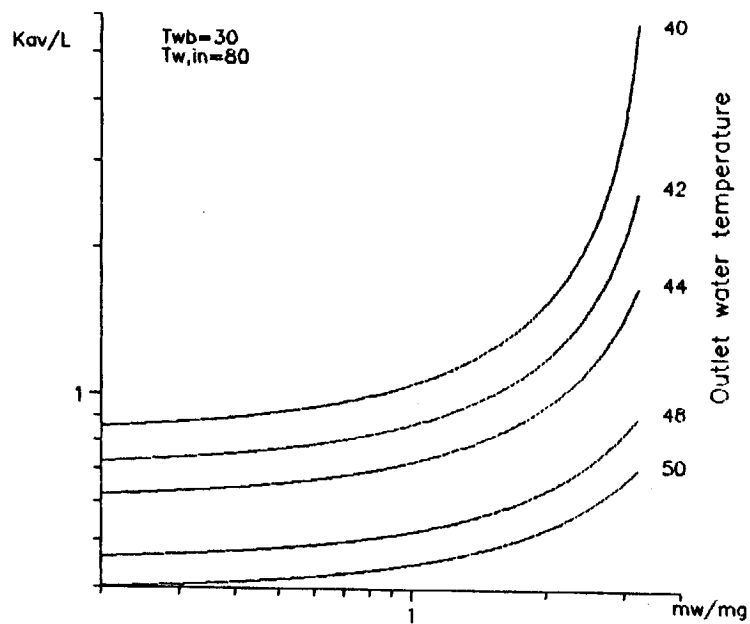
شکل (۶-۶). مشخصه حرارتی برج در دمای حباب تر ثابت و دماهای تمایل مختلف.



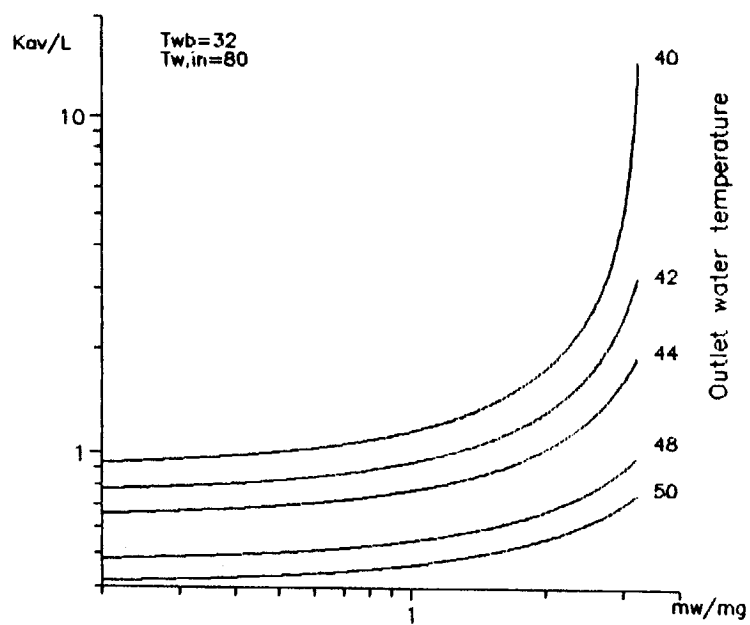
شکل (۶-۷). مشخصه حرارتی برج دردمای حباب تر ثابت و دماهای تمایل مختلف.



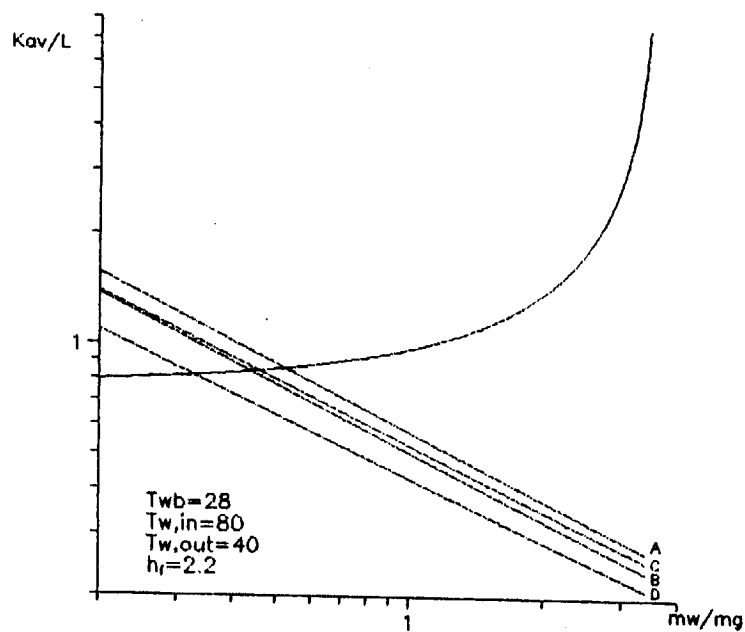
شکل (۶-۸). مشخصه حرارتی برج دردمای حباب تر ثابت و دماهای تمایل مختلف.



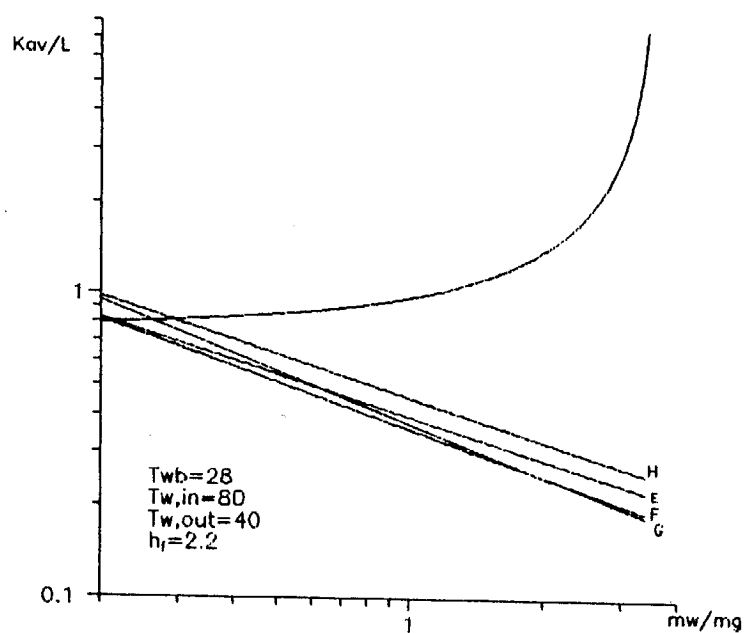
شکل (۶-۹). مشخصه حرارتی برج دردمای حباب تر ثابت و دماهای تمایل مختلف.



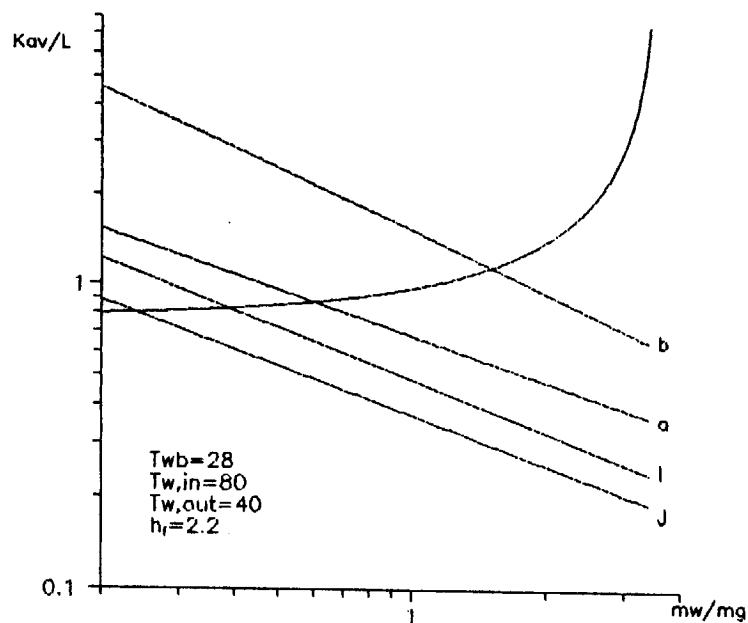
شکل (۶-۱۰). مشخصه حرارتی برج دردمای حباب تر ثابت و دماهای تمایل مختلف.



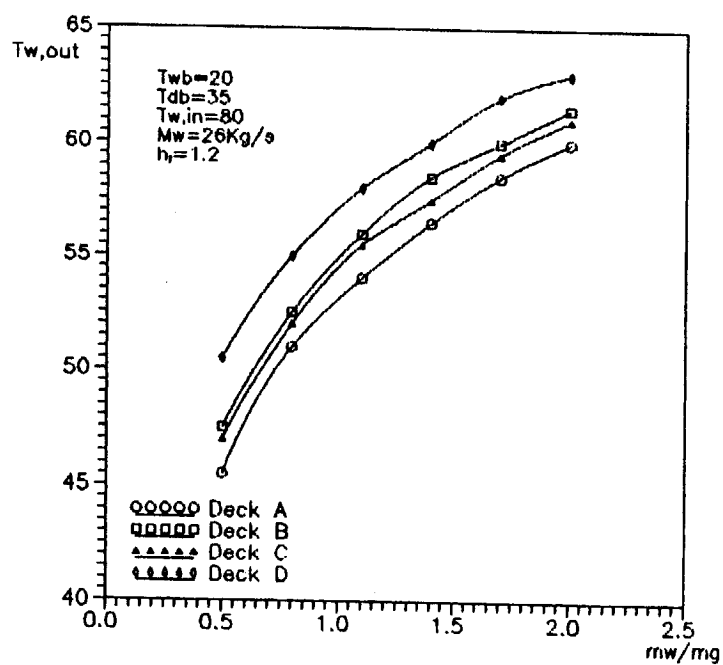
شکل (۶-۱۱). مشخصه های حرارتی هسته های خنک کننده مختلف و برج در شرایط طرح نشان داده شده.



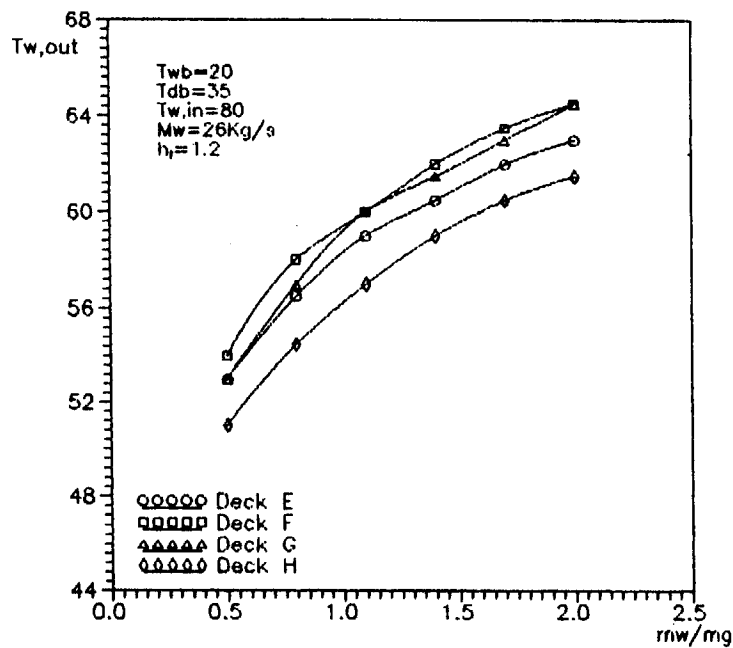
شکل (۶-۱۲). مشخصه های حرارتی هسته های خنک کننده مختلف و برج در شرایط طرح نشان داده شده.



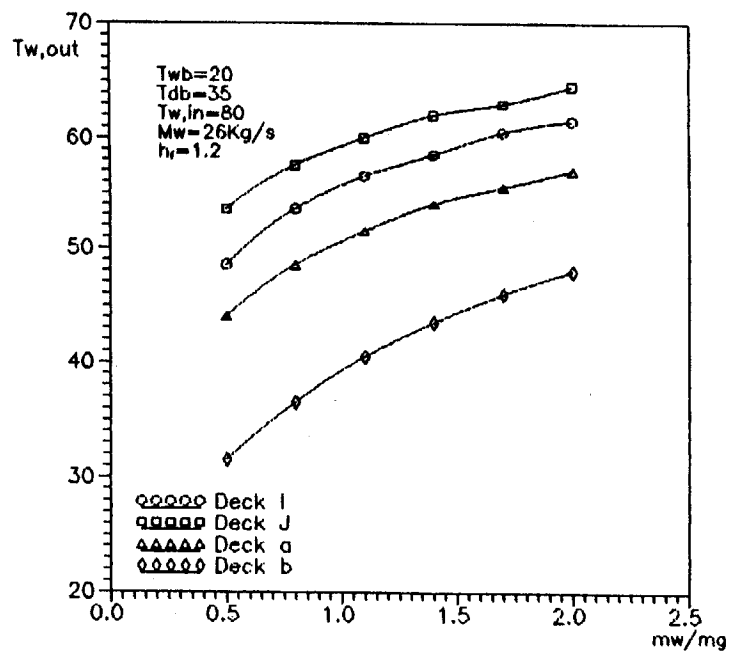
شکل (۶-۱۳). مشخصه های حرارتی هسته های خنک کننده مختلف و برج در شرایط طرح نشان داده شده.



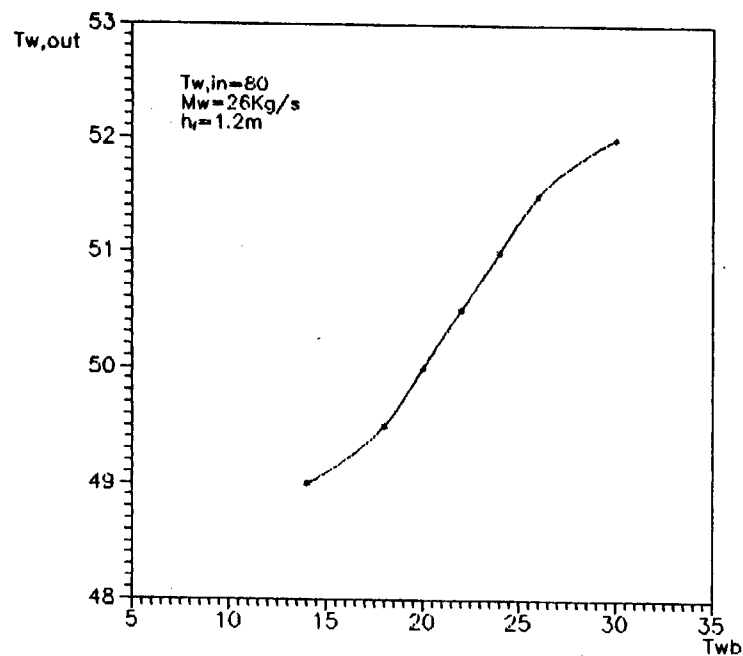
شکل (۶-۱۴). تغییر دمای آب خروجی بر حسب تغییر نسبت شار جرمی آب به هوا برای هسته های خنک کننده مختلف در شرایط طرح یکسان.



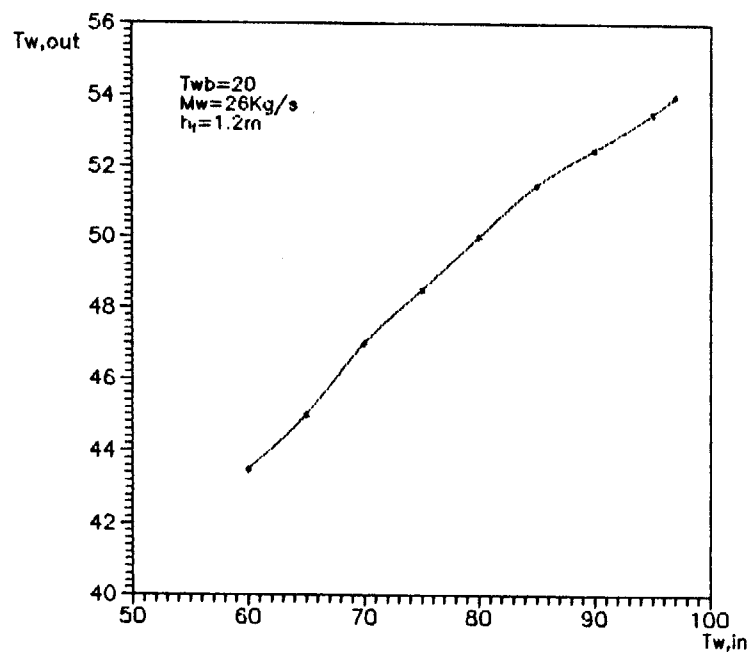
شکل (۶-۱۵). تغییر دمای آب خروجی بر حسب تغییر نسبت شار جرمی آب به هوا برای هسته های خنک کننده مختلف در شرایط طرح یکسان.



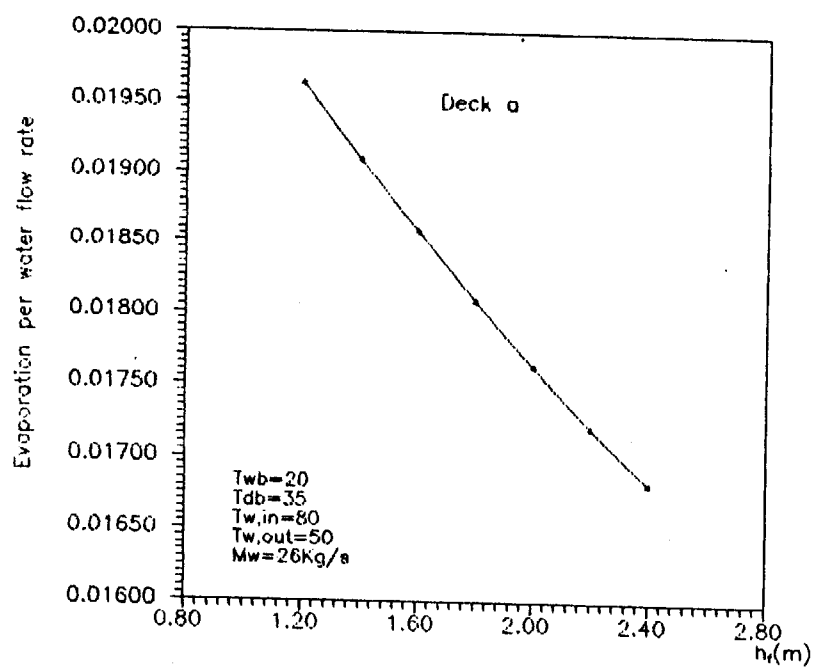
شکل (۶-۱۶). تغییر دمای آب خروجی بر حسب تغییر نسبت شار جرمی آب به هوا برای هسته های خنک کننده مختلف در شرایط طرح یکسان.



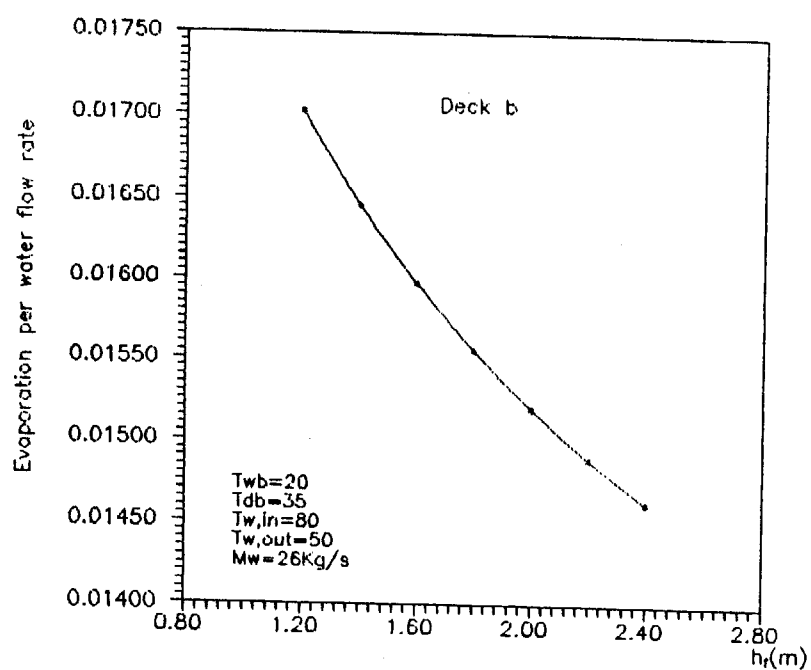
شکل (۶-۱۷). تغییر دمای آب خروجی بر حسب تغییرات دمای حباب تر در یک برج طراحی شده.



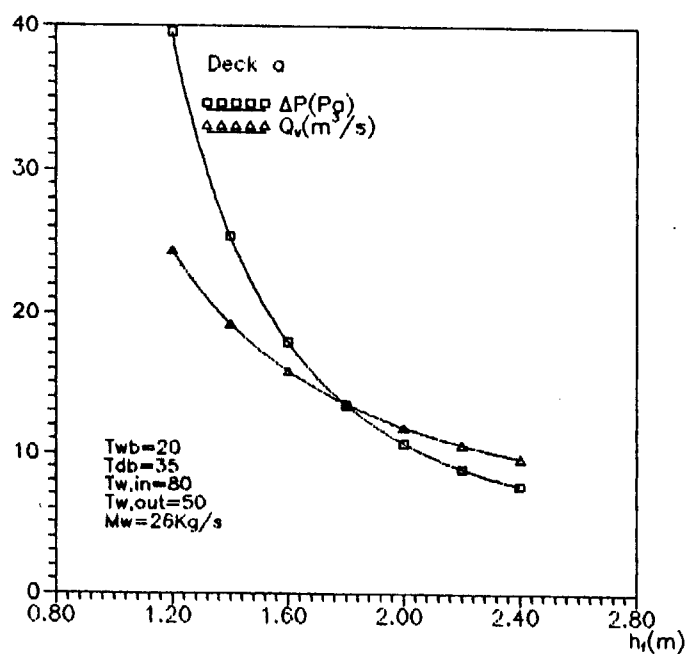
شکل (۶-۱۸). تغییر دمای آب خروجی بر حسب تغییرات دمای آب ورودی در یک برج طراحی شده.



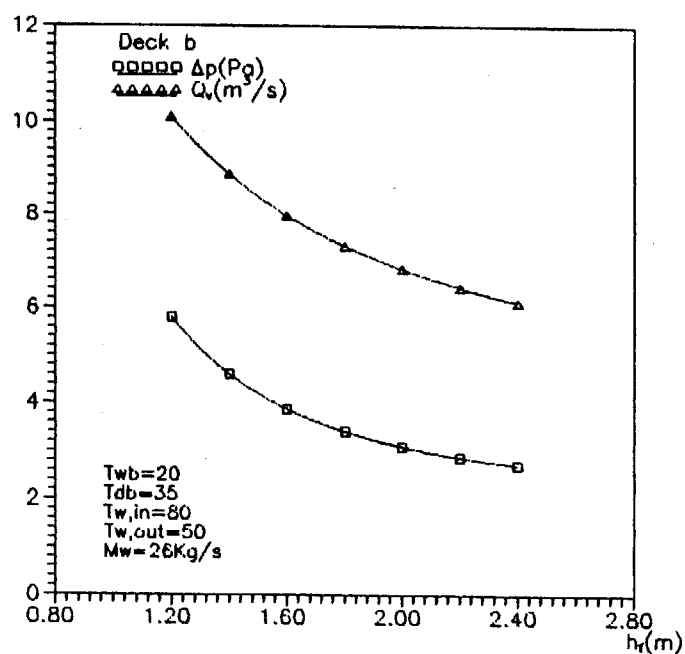
شکل (۶-۱۹). میزان تبخیر آب بر حسب ارتفاع هسته خنک کننده نوع a برای شرایط طرح نشان داده شده.



شکل (۶-۲۰). میزان تبخیر آب بر حسب ارتفاع هسته خنک کننده نوع b برای شرایط طرح نشان داده شده.



شکل (۶-۲۱). افت فشار ودبی حجمی هوا بر حسب تغییرات ارتفاع هسته خنک کننده نوع a در شرایط طرح نشان داده شده.



شکل (۶-۲۲). افت فشار ودبی حجمی هوا بر حسب تغییرات ارتفاع هسته خنک کننده نوع b در شرایط طرح نشان داده شده.

پیوست الف: برنامه کامپیوتری NTOWER

```

DECLARE SUB WaterLoss ()
DECLARE SUB FindTout ()
DECLARE SUB WriteDesignPoint ()
DECLARE SUB ChangeCondition ()
DECLARE SUB Outputs ()
DECLARE SUB MakeChart ()
DECLARE FUNCTION EntWet! (twb!)
DECLARE SUB PressureLoss ()
DECLARE SUB DelDensity ()
DECLARE SUB DimensionDesign ()
DECLARE SUB StateOutAir ()
DECLARE SUB Inputs ()
DECLARE SUB Graph ()
DECLARE SUB Finding ()
DECLARE SUB ImCharact (twout!, twin!, mrate!, im!)
DECLARE SUB IpCharact (landa!, nexp!, mrate!, ip!, h!)
DECLARE FUNCTION Fh! (a!, mrate!)
DIM mrate!(50), ip!(50), im!(50), htowerc!(61), tpout!(61)

CLS
14 PRINT "          Natural draft cooling tower design "
PRINT
PRINT
PRINT "          <1>.Tower Designing"
PRINT "          <0>.Exit          "
INPUT " Input your option"; ans
SELECT CASE ans
CASE IS = 0
GOTO 12
CASE IS = 1
13 CLS
CALL Inputs
CALL MakeChart
CALL Graph

```

```

CALL Finding
IF check = -1 THEN
PRINT
PRINT "   There is not any intersection between "
PRINT " characteristic and packing charts"
PRINT
INPUT " Do you want to change your datas?(Y/N)", options$
SELECT CASE UCASE$(options$)
CASE "Y": GOTO 13
CASE "N": GOTO 12
END SELECT
END IF
CALL WriteDesignPoint
CALL StateOutAir
CALL PressureLoss
CALL DelDensity
CALL DimensionDesign
CALL WaterLoss
CALL Outputs
CALL ChangeCondition
END SELECT
GOTO 14
12 END

SUB ChangeCondition
  SHARED htower, twin, twb, tdb, mw, tout, tpout(), htowerc()
  18 PRINT "What parameter must be varied?"
  PRINT " Options:".
  PRINT "      <0>. Anything"
  PRINT "      <1>. Wet and dry bulb temperatures"
  PRINT "      <2>. Inlet water temperature"
  PRINT "      <3>. Flow rate of water"
  INPUT n
  SELECT CASE n
  CASE IS = 0
  GOTO 8
  CASE IS = 1
  INPUT " Type changed wet and dry bulb temperatures"; twb, tdb
  CASE IS = 2
  INPUT " Type changed inlet water temperature"; twin
  CASE IS = 3
  INPUT " Type changed flow rate of water"; mw
  END SELECT
  FOR j = 1 TO 61
    twout = tout + .5 * (j - 31)
    CALL MakeChart
    CALL Finding
    CALL StateOutAir
    CALL DelDensity
    CALL DimensionDesign
    tpout(j) = twout
    htowerc(j) = htower
  NEXT j
  CALL FindTout
  GOTO 18
8 END SUB

```

SUB DelDensity

```

    SHARED mw, massrate, twin, twout, tdb, fgin, fgout, pgin, deldens
    hgout = EntWet(twb) + massrate * (twin - twout) * 4.2
    aa = hgout - 2501.6 * fgout
    bb = 1.0035 * (1 - fgout) + 1.8723 * fgout
    t2 = aa / bb
    win = fgin / (1 - fgin)
    pain = 1.29252 - 4.69325E-03 * tdb + 1.39881E-05 * tdb ^ 2
    pgin = (win + 1) * pain
    deldens = pgin * (LOG((t2 + 273) / (tdb + 273)))
END SUB

```

SUB DimensionDesign

```

    SHARED d1, nv, pgin, deldens, mw, mg, henter, htower
    ss = nv * .0827 * mg ^ 2
    xx = d1 ^ 4 * pgin * deldens * .799
    htower = henter + ss / xx
END SUB

```

FUNCTION EntWet (twb)

```

    EntWet = 8.50892 + 2.10657 * twb - .0133267 * twb ^ 2 + .00136795# * twb ^ 3
END FUNCTION

```

FUNCTION Fh (a, mrate)

```

    SHARED twout
    hs = 8.50892 + 2.10657 * a - .0133267# * a ^ 2 + .00136795# * a ^ 3
    hg = EntWet(twb) + mrate * (a - twout) * 4.2
    Fh = 4.2 / (hs - hg)
END FUNCTION

```

SUB Finding

```

    SHARED steps, mrate(), im(), ip(), check, massrate, imc, mg, mw
    check = 0
    FOR j = 2 TO steps
        IF ip(j) = im(j) THEN
            massrate = mrate(j): imc = im(j): mg = mw / massrate
            GOTO 1
        END IF
        IF im(j) > ip(j) THEN
            del1 = ip(j - 1) - im(j - 1)
            del = im(j) - ip(j) + del1
            delflx = mrate(j) - mrate(j - 1)
            massrate = mrate(j - 1) + del1 * delflx / del
            imc = im(j - 1) + (im(j) - im(j - 1)) * (massrate - mrate(j - 1)) / delflx
            mg = mw / massrate
            GOTO 1
        END IF
    NEXT j
    check = -1
1 END SUB

```

SUB FindTout

```

    SHARED tpout(), htowerc(), htower, answer, count
    FOR j = 1 TO 60
        IF htowerc(j) = htower THEN
            answer = tpout(j)

```

```

EXIT FOR
END IF
IF htowerc(j + 1) = htower THEN
answer = tpout(j + 1)
EXIT FOR
END IF
IF (htowerc(j) > htower AND htowerc(j + 1) < htower) OR (htowerc(j) < htower AND htowerc(j + 1)
answer = (tpout(j) + tpout(j + 1)) / 2
EXIT FOR
END IF
count = j + 1
NEXT j
IF count = 61 THEN
PRINT " Outlet temperature is changed more than 15c"
END IF
PRINT " The changed outlet temperature....."; answer; "c"
END SUB

```

```

SUB Graph
SHARED steps, mrate(), ip(), im()
CLS
SCREEN 9
COLOR 1, 7
WINDOW (0, 0)-(20, 2)
LINE (.5, .1)-(.5, 1.9), 1
LINE (.5, .1)-(18, .1), 1
LOCATE 3, 57
PRINT "characteristic of tower"
LOCATE 24, 2
PRINT "0"
FOR i = 1 TO 17
PSET (.5 + i, .12)
NEXT i
FOR i = 1 TO 7
PSET (.4, .1 + i * .25)
NEXT i
LOCATE 22, 70
PRINT "17"
LOCATE 22, 75
PRINT "mw/mg"
LOCATE 1, 3
PRINT "kav/1"
LOCATE 2, 4
PRINT "1.75"
FOR j = 3 TO steps
LINE (mrate(j - 1) + .5, im(j - 1) + .1)-(mrate(j) + .5, im(j) + .1)
LINE (mrate(j - 1) + .5, ip(j - 1) + .1)-(mrate(j) + .5, ip(j) + .1)
NEXT j
LOCATE 4, 60
PRINT "<press enter>"
DO
LOOP UNTIL INKEY$ = CHR$(13)
END SUB

```

```

SUB ImCharact (twout, twin, mrate, im)
SHARED a

```

```

del = (twin - twout) / 15
a = twout
am = .5 * (Fh(twout, mrate) + Fh(twin, mrate))
FOR j = 1 TO 14
a = a + del
am = am + Fh(a, mrate)
NEXT j
im = del * am
END SUB

```

SUB Inputs

```

SHARED twb, twout, twin, landa, nexp, h, mw, tdb, tout
SCREEN 9
COLOR , 4
INPUT "Enter Mw,the mass rate of water"; mw
INPUT "Enter Tin,the temperature of inlet water"; twin
INPUT "Enter Tout,the temperature of outlet water"; twout
INPUT "Enter Twb,the wet bulb temperature of environment"; twb
INPUT "Enter Tdb,the dry bulb temperature of environment"; tdb
PRINT
PRINT "      Enter the values of lambda and n in equation:"
PRINT
PRINT "              ntul=lambda*(mw/mg)^(1-n)"
INPUT "lambda"; landa
INPUT " n"; nexp
INPUT "The height of packing"; h
tout = twout
END SUB

```

```

SUB IpCharact (landa, nexp, mrate, ip, h)
ntul = landa * mrate ^ (1 - nexp)
ip = ntul * h / mrate
END SUB

```

SUB MakeChart

```

SHARED twb, twout, twin, steps, landa, nexp, h, mrate(), ip(), im()
steps = 50
mrate(1) = 0
FOR k = 2 TO steps
mrate(k) = mrate(k - 1) + 8 / steps
CALL ImCharact(twout, twin, mrate(k), im(k))
IF im(k) < 0 THEN
steps = k - 1
EXIT FOR
END IF
CALL IpCharact(landa, nexp, mrate(k), ip(k), h)
NEXT k
END SUB

```

SUB Outputs

```

SHARED twin, twout, twb, tdb, henter, htower, h, dth, d1, mw, w1
CLS
PRINT "              Informations of designed tower      "
PRINT
PRINT " Temperature of inlet water....."; twin; "c"
PRINT " Temperature of outlet water....."; twout; "c"

```

```

PRINT " Wet bulb temperature of environment....."; twb; "c"
PRINT " Dry bulb temperautre of environment....."; tdb; "c"
PRINT " Mass rate flow of water....."; mw; "kg/s"
PRINT " The height of fill....."; h; "m"
PRINT " Diameter of tower base....."; d1; "m"
PRINT " The height of air entery....."; henter; "m"
PRINT " Diameter of tower's throat....."; dth; "m"
PRINT " The height of tower....."; htower; "m"
PRINT " The rate of water loss ....."; wl; "kg/kg water"
PRINT
PRINT "      <press enter >"
DO
LOOP UNTIL INKEY$ = CHR$(13)

```

```
END SUB
```

```
SUB PressureLoss
```

```
  SHARED h, nv, d1, henter, dth
```

```
  CLS
```

```

PRINT "   This program computes the dynamic pressure loss in packing region (Nv)"
PRINT " by following equation; "
PRINT "   Nv=Nv,in + Nv,out + Nv,p + Nv,elim + Nv,sp + Nv,col"
PRINT " where Nv,in =losses in air entry"
PRINT "         Nv,out =losses at air exit"
PRINT "         Nv,p   =losses in packing"
PRINT "         Nv,elim=losses in eliminator"
PRINT "         Nv,sp   =losses in spray"
PRINT "         Nv,col  =losses due to support columns,pipes,etc."

```

```
PRINT
```

```
INPUT " What is the base diameter of tower"; d1
```

```
INPUT " What is the height of air entry"; henter
```

```
r = henter / d1
```

```
nvin = 2 + .036 / r ^ 2
```

```
PRINT
```

```
PRINT "   Nv,out=C3/(s^4)  s is ratio of throat to base diameters"
```

```
2 INPUT " The default value for c3 is one. Do you want to change it"; choic$
```

```
SELECT CASE LEFT$(UCASE$(choic$), 1)
```

```
CASE "N": c3 = 1
```

```
CASE "Y": INPUT " Type your demand value for c3"; c3
```

```
CASE ELSE: BEEP: GOTO 2
```

```
END SELECT
```

```
PRINT
```

```
PRINT " The ratio of throat to base diameters is needed.Default value is 0.6"
```

```
3 INPUT " Do you want to change default value"; choic$
```

```
SELECT CASE LEFT$(UCASE$(choic$), 1)
```

```
CASE "N": s = .6
```

```
CASE "Y": INPUT " Type your demand"; s
```

```
CASE ELSE: BEEP: GOTO 3
```

```
END SELECT
```

```
dth = d1 * s
```

```
nvout = c3 / s ^ 4
```

```
PRINT
```

```
4 INPUT " The default.percent of packed region is 0.96.Do you want to change it"; choic$
```

```
SELECT CASE LEFT$(UCASE$(choic$), 1)
```

```
CASE "N": t = .96
```

```
CASE "Y": INPUT " Type your demand"; t
```

```

CASE ELSE: BEEP: GOTO 4
END SELECT
INPUT " What is the number of dynamic pressures loss per unit packing depth"; n1vp
nvp = n1vp * h / t ^ 2
PRINT
PRINT " Nv,elim=C5/(percent of packed region)^2 where C5 is the number of dynamic"
PRINT " pressure loss in eliminator.Default value for C5 is 3"
6 INPUT " Do you want to change it"; choic$
SELECT CASE LEFT$(UCASE$(choic$), 1)
CASE "N": c5 = 3
CASE "Y": INPUT "Type your demand"; c5
CASE ELSE: BEEP: GOTO 6
END SELECT
nvelim = c5 / t ^ 2
PRINT
7 INPUT " Do you want to use spray in the tower"; choic$
SELECT CASE LEFT$(UCASE$(choic$), 1)
CASE "N": nvsp = 0
CASE "Y": INPUT " Type the value of Nv,sp"; nvsp
CASE ELSE: BEEP: GOTO 7
END SELECT
PRINT
INPUT " The value of Nv,col is in the range 2-6,choose or type your demand"; nvcol
nv = nvin + nvout + nvp + nvelim + nvsp + nvcol
END SUB

```

```

SUB StateOutAir
SHARED twout, twin, massrate, del, tdb, fgout, fgin
a = twout
'determination of mass humidity fraction of inlet air'
w = (EntWet(twb) - 1.0035 * tdb) / (2501.6 + 1.8723 * tdb)
fg0 = w / (1 + w)
fgin = fg0
FOR j = 1 TO 14
fs = .00379273# + .000246051# * a + 1.27793E-05 * a ^ 2 - 2.6177E-08 * a ^ 3 + 5.56886E-09 * a ^ 4
a = a + del
fg1 = fg0 + massrate * Fh(a, massrate) * (fs - fg0)
fg0 = fg1
NEXT j
fgout = fg0
END SUB

```

```

SUB WaterLoss
SHARED fgin, fgout, massrate, wl
wl = (fgout - fgin) / massrate
END SUB

```

```

SUB WriteDesignPoint
SHARED massrate, imc
LOCATE 8, 55
PRINT
LOCATE 9, 55
PRINT " Design point data is:"
LOCATE 10, 55
PRINT " mw/mg= "; massrate
LOCATE 11, 55

```

9A

```
PRINT "   kav/1=   "; inc
LOCATE 13, 55
PRINT "   <press enter>"
DO
LOOP UNTIL INKEY$ = CHR$(13)
SCREEN 0
COLOR , 4
WIDTH 80
END SUB
```

پیوست ب: برنامه کامپیوتری MTOWER

```

DECLARE SUB WaterLoss ()
DECLARE SUB ChangeCondition ()
DECLARE SUB Outputs ()
DECLARE SUB ChangeWetbulb ()
DECLARE SUB ChangeTin ()
DECLARE SUB ChangeRate ()
DECLARE SUB ChangeNumfan ()
DECLARE SUB DesignPoint (check!)
DECLARE SUB MakeChart ()
DECLARE FUNCTION EntWet! (twb!)
DECLARE SUB PressureLoss ()
DECLARE SUB DelDensity ()
DECLARE SUB StateOutAir ()
DECLARE SUB Inputs (,).
DECLARE SUB Graph ()
DECLARE SUB Finding (mrate!, im!, check!)
DECLARE SUB ImCharact (twout!, twin!, mrate!, twb!, im!)
DECLARE SUB IpCharact (mrate!, ip!)
DECLARE FUNCTION Fh! (a!, mrate!, twb!, twout!)
DIM mrate!(50), ip!(50), im!(50)
.
.
CLS
14 PRINT "           Mechanical cooling tower design "
PRINT
PRINT
PRINT "           <1>.Tower Designing"
PRINT "           <0>.Exit           "
INPUT " Input your option"; ans
SELECT CASE ans
CASE IS = 0
GOTO 12
CASE IS = 1
13 CLS

```

100

```
CALL Inputs
CALL DesignPoint(check)
IF check = -1 THEN
INPUT "Do you want to change your datas?(Y/N)"; options$
SELECT CASE UCASE$(LEFT$(options$, 1))
CASE "Y": GOTO 13
CASE "N": GOTO 14
END SELECT
END IF
CALL StateOutAir
CALL DelDensity
CALL PressureLoss
CALL WaterLoss
CALL Outputs
CALL ChangeCondition
END SELECT
GOTO 14
12 END
```

```
SUB ChangeCondition
18 PRINT "What parameter must be varied?"
PRINT " Options:"
PRINT "      <0>. Nothing"
PRINT "      <1>. Wet bulb temperature"
PRINT "      <2>. Inlet water temperature"
PRINT "      <3>. Rate of mass flow"
PRINT "      <4>. Number of fans in cellular tower"
INPUT " Type the number for selection"; n
SELECT CASE n
CASE IS = 0
GOTO 8
CASE IS = 1
CALL ChangeWetbulb
CASE IS = 2
CALL ChangeTin
CASE IS = 3
CALL ChangeRate
CASE IS = 4
CALL ChangeNumfan
END SELECT
GOTO 18
3 END SUB
```

```
SUB ChangeNumfan
SHARED twin, twout, nf
17 INPUT "How many of fans are stoped"; nd
ttwout = nd * (twin - twout) / nf + twout
PRINT "The temperature of outlet water will become...."; ttwout; "c"
INPUT " Do you want to comput another change?(Y/N)"; ans$
SELECT CASE UCASE$(LEFT$(ans$, 1))
CASE "Y"
GOTO 17
CASE "N"
GOTO 16
END SELECT
16 END SUB
```

\.)

SUB ChangeRate

```
SHARED twin, twout, twb, massrate
19 INPUT " What is the changed value of mass rate"; mratep
CALL IpCharact(mratep, ipp)
twoutp = twout
SELECT CASE mratep
CASE IS > massrate
DO
twoutp = twoutp + .5
CALL ImCharact(twoutp, twin, mratep, twb, impp)
LOOP UNTIL impp < ipp
CASE IS < massrate
DO
twoutp = twoutp - .5
CALL ImCharact(twoutp, twin, mratep, twb, impp)
LOOP UNTIL impp > ipp
END SELECT
PRINT " The changed temperature of outlet water ....."; twoutp; "c"
INPUT " Do you want to comput another change?(Y/N)"; ans$
SELECT CASE UCASE$(LEFT$(ans$, 1))
CASE "Y"
GOTO 19
CASE "N"
GOTO 20
END SELECT
20 END SUB
```

SUB ChangeTin

```
SHARED twb, twout, imc, twin, massrate
22 INPUT " What is the changed temperature of inlet water,c"; twinp
twoutp = twout
SELECT CASE twinp
CASE IS > twin
DO
twoutp = twoutp + .5
CALL ImCharact(twoutp, twinp, massrate, twb, impp)
LOOP UNTIL impp <= imc
CASE IS < twin
DO
twoutp = twoutp - .5
CALL ImCharact(twoutp, twinp, massrate, twb, impp)
LOOP UNTIL impp >= imc
END SELECT
PRINT " The changed temperature of outlet water ....."; twoutp; "c"
INPUT " Do you want to comput another change?(Y/N)"; ans$
SELECT CASE UCASE$(LEFT$(ans$, 1))
CASE "Y"
GOTO 22
CASE "N"
GOTO 21
END SELECT
21 END SUB
```

SUB ChangeWetbulb

```
SHARED twout, twin, massrate, imc, twb
23 INPUT " Type the new wet bulb temperature,c"; twbp
```

```

twoutp = twout
SELECT CASE twbp
CASE IS > twb
DO
twoutp = twoutp + .5
CALL ImCharact(twoutp, twin, massrate, twbp, impp)
LOOP UNTIL impp <= imc
CASE IS < twb
DO
twoutp = twoutp - .5
CALL ImCharact(twoutp, twin, massrate, twbp, impp)
LOOP UNTIL impp >= imc
END SELECT
PRINT " The changed temperature of outlet water ....."; twoutp; "c"
INPUT " Do you want to comput another change?(Y/N)"; ans$
SELECT CASE UCASE$(LEFT$(ans$, 1))
CASE "Y"
GOTO 23
CASE "N"
GOTO 24
END SELECT
24 END SUB

```

```

SUB DelDensity
SHARED mw, massrate, twin, twout, tdb, fgin, fgout, rogin, deldens, rogout
SHARED type$, vg
hgout = EntWet(twb) + massrate * (twin - twout) * 4.2
aa = hgout - 2501.6 * fgout
bb = 1.0035 * (1 - fgout) + 1.8723 * fgout
t2 = aa / bb
win = fgin / (1 - fgin)
roain = 1.29252 - 4.69325E-03 * tdb + 1.39881E-05 * tdb ^ 2
rogin = (win + 1) * roain
deldens = rogin * (LOG((t2 + 273) / (tdb + 273)))
rogout = rogin + deldens
SELECT CASE UCASE$(type$)
CASE "FORCED DRAFT"
vg = mw / (massrate * rogout)
CASE "INDUCED DRAFT"
vg = mw / (massrate * rogin)
END SELECT
END SUB

```

```

SUB DesignPoint (check!)
SHARED twb, twout, twin, steps, landa, nexp, height, mw, massrate, imc
CALL MakeChart
CALL Graph
CALL Finding(massrate, imc, check)
IF check = -1 GOTO 5
LOCATE 8, 55
PRINT
LOCATE 9, 55
PRINT " Design point data is:"
LOCATE 10, 55
PRINT " mw/mg= "; massrate
LOCATE 11, 55

```

```

PRINT "    kav/l=    "; imc
LOCATE 13, 55
PRINT "    <press enter>"
DO
LOOP UNTIL INKEY$ = CHR$(13)
SCREEN 0
COLOR , 4
WIDTH 80
5 END SUB

```

```

FUNCTION EntWet (twb)
EntWet = 8.50892 + 2.10657 * twb - .0133267 * twb ^ 2 + .00136795# * twb ^ 3
END FUNCTION

```

```

FUNCTION Fh (a, mrate, twb, twout)
hs = 8.50892 + 2.10657 * a - .0133267# * a ^ 2 + .00136795# * a ^ 3
hg = EntWet(twb) + mrate * (a - twout) * 4.2
Fh = 4.2 / (hs - hg)
END FUNCTION

```

```

SUB Finding (massrate, imc, check)
SHARED steps, mrate(), im(), ip(), mw
check = 0
FOR j = 2 TO steps
IF ip(j) = im(j) THEN
massrate = mrate(j): imc = im(j)
GOTO 1
END IF
IF im(j) > ip(j) THEN
dell = ip(j - 1) - im(j - 1)
del = im(j) - ip(j) + dell
delflx = mrate(j) - mrate(j - 1)
massrate = mrate(j - 1) + dell * delflx / del
imc = im(j - 1) + (im(j) - im(j - 1)) * (massrate - mrate(j - 1)) / delflx
GOTO 1
END IF
NEXT j
check = -1
PRINT
PRINT "There is not any intersection between "
PRINT "characteristic and packing charts"
PRINT "Change your choices"
PRINT "<press enter>"
check = -1
DO
LOOP UNTIL INKEY$ = CHR$(13)
1 END SUB

```

```

SUB Graph
SHARED steps, mrate(), ip(), im()
CLS
SCREEN 9
COLOR 1, 7
WINDOW (0, 0)-(20, 2)
LINE (.5, .1)-(.5, 1.9), 1
LINE (.5, .1)-(18, .1), 1

```

```

LOCATE 3, 57
PRINT "characteristic of tower"
LOCATE 24, 2
PRINT "0"
FOR i = 1 TO 17
PSET (.5 + i, .12)
NEXT i
FOR i = 1 TO 7
PSET (.4, .1 + i * .25)
NEXT i
LOCATE 22, 70
PRINT "17"
LOCATE 22, 75
PRINT "mw/mg"
LOCATE 1, 3
PRINT "kav/l"
LOCATE 2, 4
PRINT "1.75"
FOR j = 3 TO steps
LINE (mrate(j - 1) + .5, im(j - 1) + .1)-(mrate(j) + .5, im(j) + .1)
LINE (mrate(j - 1) + .5, ip(j - 1) + .1)-(mrate(j) + .5, ip(j) + .1)
NEXT j
LOCATE 4, 60
PRINT "<press enter>"
DO
LOOP UNTIL INKEY$ = CHR$(13)
END SUB

SUB ImCharact (twout, twin, mrate, twb, im)
del = (twin - twout) / 15
a = twout
am = .5 * (Fh(twout, mrate, twb, twout) + Fh(twin, mrate, twb, twout))
FOR j = 1 TO 14
a = a + del
am = am + Fh(a, mrate, twb, twout)
NEXT j
im = del * am
END SUB

SUB Inputs
SHARED twb, twout, twin, landa, nex, height, mw, tdb, type$, nex, nf
SHARED area$, af, diam, length, wide, area
SCREEN 9
COLOR , 4
INPUT "Enter Mw,the mass mrate of water,kg/s"; mw
INPUT "Enter Tin,the temperature of inlet water,c"; twin
INPUT "Enter Tout,the temperature of outlet water,c"; twout
INPUT "Enter Twb,the wet bulb temperature of environment,c"; twb
INPUT "Enter Tdb,the dry bulb temperature of environment,c"; tdb
PRINT
PRINT "    Enter the values of lambda and n in equation:"
PRINT
PRINT "          ntul=lambda*(mw/mg)^(1-n)"
INPUT "lambda"; landa
INPUT "n"; nex
INPUT "The height of packing"; height

```

```

INPUT "Input type of packing area completely,<Circle> or <Squar>"; areas
SELECT CASE UCASE$(areas$)
CASE "CIRCLE"
INPUT "Diameter of packing area,m"; diam
area = .7854 * diam ^ 2
CASE "SQUAR"
INPUT "The length of packing,m"; length
INPUT "The width of packing,m"; wide
area = length * wide
END SELECT
PRINT "Input the type of tower completely."
INPUT "<forced draft> or <induced draft>"; types$
IF types$ = "induced draft" THEN
INPUT "Input diffuser coefficeint,nex"; nex
END IF
INPUT "Input number of fans"; nf
INPUT "Input fan's exit area,mxm"; af
PRINT
PRINT "      <press enter>"
DO
LOOP UNTIL INKEY$ = CHR$(13)
END SUB

```

```

SUB IpCharact*(mrate, ip)
SHARED landa, nex, height
ntu1 = landa * mrate ^ (1 - nex)
ip = ntu1 * height / mrate
END SUB

```

```

SUB MakeChart
SHARED twb, twout, twin, steps, landa, nex, h, mrate(), ip(), im()
steps = 50
mrate(1) = 0
FOR k = 2 TO steps
mrate(k) = mrate(k - 1) + 8 / steps
CALL ImCharact(twout, twin, mrate(k), twb, im(k))
IF im(k) < 0 THEN
steps = k - 1
EXIT FOR
END IF
CALL IpCharact(mrate(k), ip(k))
NEXT k
END SUB

```

```

SUB Outputs
SHARED massrate, twin, twout, twb, tdb, mw, vg, wide, length, height, nf, af, types$, delp, w,
CLS
PRINT "              Informations of designed tower      "
PRINT
PRINT " Type of mechanical tower....."; types$
PRINT " Temperature of inlet water....."; twin; "c"
PRINT " Temperature of outlet water....."; twout; "c"
PRINT " Wet bulb temperature of environment....."; twb; "c"
PRINT " Dry bulb temperautre of environment....."; tdb; "c"
PRINT " Mass rate flow of water....."; mw; "kg/s"
PRINT " The height of fill....."; height; "m"

```

```

SELECT CASE UCASE$(area$)
CASE "CIRCLE"
PRINT " Diameter of packed area....."; diam; "m"
CASE "SQUAR"
PRINT " The size of packed area....."; length; "x"; wide; "mxm"
END SELECT
PRINT " The number of fans....."; nf
PRINT " The area of fan's outlet....."; af; "mxm"
PRINT " Volume rate flow of air....."; vg; "mxmxm/s"
PRINT " Total pressure loss....."; delp; "Pa"
PRINT " The rate of water loss ....."; w; "kg/kg water"
PRINT
PRINT "      <press enter >"
DO
LOOP UNTIL INKEY$ = CHR$(13)
END SUB

```

```

SUB PressureLoss
SHARED height, delp, mw, massrate, nf, af, nex, area$, type$, rogin
SHARED rogout, area
CLS
PRINT " Pressure loss computation"
PRINT
INPUT "What is the number of dynamic pressures loss per unit packing depth"; nvlp
mg = mw / massrate
delppack = (height * nvlp + 3) * (mg / area) ^ 2 * .5 / rogin
SELECT CASE UCASE$(type$)
CASE "FORCED DRAFT"
dpex = (mw / (massrate * nf * af)) ^ 2 * .5 / rogin
CASE "INDUCED DRAFT"
dpex = nex * (mw / (massrate * nf * af)) ^ 2 * .5 / rogout
END SELECT
delp = 1.05 * (delppack + dpex)
END SUB

```

```

SUB StateOutAir
SHARED twout, twin, massrate, del, tdb, fgout, fgin
a = twout
'determination of mass humidity fraction of inlet air'
w = (EntWet(twb) - 1.0035 * tdb) / (2501.6 + 1.8723 * tdb)
fg0 = w / (1 + w)
fgin = fg0
FOR j = 1 TO 14
fs = .00379273# + .000246051# * a + 1.27793E-05 * a ^ 2 - 2.6177E-08 * a ^ 3 + 5.56886E-09 * a ^ 4
a = a + del
fg1 = fg0 + massrate * Fh(a, massrate, twb, twout) * (fs - fg0)
fg0 = fg1
NEXT j
fgout = fg0
END SUB

```

```

SUB WaterLoss
SHARED fgin, fgout, massrate, w
w = (fgout - fgin) / massrate
END SUB

```