# روش‌های بهینه‌سازی مصرف آب در برج‌های خنک‌کننده مرطوب

**مصطفی فتوحی*، ناصر رضاخانی**

کارشناس ارشد مهندسی شیمی، پژوهشکده توسعه صنایع شیمیایی جهاد دانشگاهی

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۳/۰۷

**پیام‌نگار: fotouhi.mostafa@gmail.com**

**چکیده**

*یکی از مهم‌ترین دستگاه‌های تبریدی، برج‌های خنک‌کننده مرطوب است. قابلیت خنک‌سازی این برج، آن را قادر به فعالیت در گستره آب‌وهوایی وسیعی کرده است. در این برج‌ها، قسمتی از آب بازگشتی از منبع گرم در طول حرکت در پرکن‌ها تبخیر می‌شود. تبخیر و نیز تخلیه اضافی، نشتی، به بیرون پاشیدن، سرریز جریان، اتلاف هواخورد و بیرون‌اندازی نیز باعث اتلاف آب در برج می‌شود. ازآنجاکه سرزمین ایران در منطقه‌ای کم آب واقع‌شده، استفاده بهینه از منابع آب، یک ضرورت به‌شمار می‌آید. در این مطالعه، راه‌های کاهش مصرف آب در برج‌های خنک‌کننده مرطوب بررسی و آثار اجرای این راهکارها بر روی برج خنک‌کننده مرطوب از نوع جریان متقابل در منطقه البرز به‌عنوان نمونه مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با اجرای راهکارهای ساده و صرف هزینه اندک می‌توان در حدود ۱۳۰۰ مترمکعب در یک دوره سه‌ماهه در تابستان در مصرف آب صرفه‌جویی کرد.*

**کلیدواژه‌ها: برج خنک‌کننده مرطوب، صرفه‌جویی آب، بهینه‌سازی.**

## ۱. مقدمه

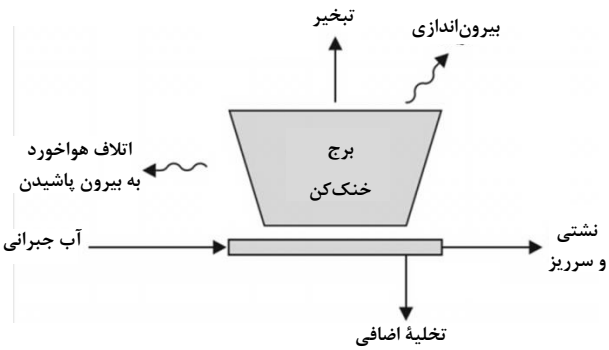
انواع برج‌های خنک‌کن به‌عنوان یکی از اجزای اصلی سیستم‌های سرمایشی، در صنایع مختلف چون نیروگاه‌ها، تأسیسات شیمیایی و تهویه مطبوع کاربردی گسترده دارند[۱]. معمولاً با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و هزینه‌های ثابت و جاری، یکی از انواع سیستم‌های خنک‌کن مانند کولرهای هوایی، برج هلر، برج گردش باز (مرطوب)، برج گردش بسته یا برج‌های ترکیبی به‌کار می‌رود[۲]. در این میان، به دلیل هزینه اولیه پایین و سهولت کاربری و ایجاد اختلاف دمای مناسب، سیستم خنک‌کننده گردش باز (مرطوب) از همه رایج‌تر است. در این برج‌ها، با افزایش سطح تماس آب‌وهوا در برج، تبخیر آسان می‌شود و بر اثر از دست رفتن گرمای نهان تبخیر، آب به‌سرعت خنک می‌شود. درنتیجه، مقداری از آب براثر تبخیر از دست می‌رود[۳].

در شکل (۱) جریان‌های آب ورودی و خروجی در برج‌های خنک‌کننده مرطوب را مشاهده می‌کنید. تبخیر، تخلیهٔ اضافی[۱]،

* کرج، پژوهشکده توسعه صنایع شیمیایی جهاد دانشگاهی، گروه آب و انرژی

۱. Blowdown: فرایندی که طی آن میزانی از آب برج به دور ریخته می‌شود تا ناخالص‌های موجود در آب‌گردشی برج در هنگام تبخیر کنترل شود.

نشتی، به بیرون پاشیدن[1]، سرریز جریان، اتلاف هواخورد[2] و بیرون‌اندازی[3] از مهم‌ترین منابع اتلاف آب در این برج‌ها می‌باشند[۴].




**شکل ۱. جریان‌های آب ورودی و خروجی در برج‌های خنک‌کننده مرطوب.**

درنتیجه، مقدار زیادی آب (در حدود ۱ تا ۳ درصد آب در گردش) در این برج‌ها هدر می‌رود. با افزایش بهای آب و کمبود آن، باید برج‌های خنک‌کننده به‌منظور کاهش مصرف آب مدیریت و تنظیم شوند. همچنین، مدیریت انرژی نیز در سیستم‌های سرمایشی دارای اهمیت است؛ مثلاً، اگر دمای آب برگشتی از برج یک درجه سلسیوس افزایش یابد، توان مصرفی در سیستمی هواساز به‌منظور حفظ دمای مطلوب محیط، ۳ درصد افزایش می‌یابد. راه‌های مختلفی برای بهینه‌سازی برج به‌کار گرفته می‌شود اما ساده‌ترین و ارزان‌ترین آن‌ها، نگهداری صحیح و بازدید روزانه عملکرد آن از جانب اپراتورهاست. بازدید و بازرسی منظم برج باعث مشخص شدن معایب و درنتیجه رفع آن می‌شود. یکی دیگر از راه‌های شناخت صحیح و ارزیابی عملکرد بهینه برج انجام مدل‌سازی و تحلیل نتایج در حالات مختلف آن است. با مدل‌سازی برج‌های موجود، می‌توان میزان مصرف آب آنها را محاسبه کرد و سپس برآوردی برای کاهش مصرف آب و انرژی در صورت انجام بهینه‌سازی ارائه داد[۵].

هدف از این مقاله، شناسایی و ارائه راهکارهایی برای کاهش مصرف آب در برج‌های خنک‌کننده مرطوب موجود در سیستم‌های خنک‌سازی است.

## ۲. صرفه‌جویی آب در برج‌های خنک‌کننده مرطوب

همان‌طور که گفته شد، خشک‌سالی‌های اخیر و کاهش منابع آب در اقصی نقاط دنیا، به‌خصوص ایران، از یکسو و افزایش بهای آب و برق از سوی دیگر، موجب شده است که مدیران سازمان‌ها و کارخانه‌ها، در فکر کاهش مصرف آب و برق در تجهیزات خود باشند. برج خنک‌کننده در صورت طراحی نادرست، فرسودگی و عدم بهره‌گیری از دانش روز می‌تواند موجب اتلاف فراوان آب و انرژی (برق) شود. گام‌های لازم برای یافتن راهکارهایی با هدف صرفه‌جویی آب در برج‌های خنک‌کننده مرطوب را می‌توان از این قرار برشمرد:

### ۲-۱ شناسایی ورودی‌ها و خروجی‌های آب

موازنه آب در برج‌های خنک‌کننده شامل تمام جریان‌های آب ورودی و خروجی مربوط به عملیات این سیستم است. مطابق شکل (۱)، برای جبران هرگونه آب تلف‌شده در چرخه آب خنک‌کن، باید آب به سیستم تزریق شود. از این‌رو، کلیه خروجی‌های برج باید به‌صورت کامل شناسایی و تا حد ممکن اندازه‌گیری شوند. برخی از راه‌های هدر رفت آب مانند تبخیر و تخلیهٔ اضافی به نحوه عملکرد فرایندی برج مربوط می‌شوند که می‌توان با بهینه‌سازی فرایند آن‌ها را کنترل کرد. برخی دیگر شامل سرریز، بیرون‌اندازی، به بیرون پاشیدن، اتلاف هواخورد و نشتی مربوط به نحوه طراحی و ساخت مکانیکی یا عملکرد اجزای برج مرتبط می‌شوند که باید تا حد امکان حذف شوند[۶].

### ۲-۲ پایش عملیات برج

برای مدیریت عملکرد و شرایط عملیاتی برج باید الگوی مصرف آب در برج‌ها با بازرسی منظم تعیین شود. نظارت منظم بر آب مصرفی برج‌های خنک‌کننده، هرگونه اوج مصرف و رفتار غیرعادی در مصرف آب را مشخص می‌کند. به همین منظور، دستگاه اندازه‌گیری جریان آب باید در مسیر آب جبرانی قرار گیرد تا میزان مصرف آب سیستم مشخص شود. همچنین، باید با استفاده از ابزار دقیق ثابت یا متحرک مقدار مصرف توان الکتروموتورها پایش شود. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری دقیق می‌توان وضعیت کارکرد برج را بررسی و تأثیر تغییرات احتمالی، شامل تعویض نوع واشر درزبند، تغییرات دبی آب‌وهوای در گردش و افزایش یا کاهش ارتفاع واشر درزبند را پیش‌بینی کرد[۷].

---

۱. Splash out: آب‌های خارج‌شده از قسمت ورودی هوا و دیگر قسمت‌های باز در برج را گویند.

۲. Windage: خروج قطرات آب از برج‌های خنک‌کننده براثر بادهای غالب از طریق هوای ورودی یا خروجی.

۳. Drift: بیرون رفتن قطرات آب به همراه هوای خروجی براثر نیروی دهش یا مکش هواکش.

### ۲-۳ انتخاب منبع تأمین مناسب آب

کیفیت آب در دسترس برای استفاده ممکن است بر مواد یا فرایند برج خنک‌کننده تأثیر بگذارد. تولیدکنندگان برج‌های خنک‌کننده محدوده‌ی استانداردی برای کیفیت آب تعیین می‌کنند. این موضوع به مواد برج و طراحی آن بستگی دارد و در تولیدکنندگان مختلف و انواع برج فرق می‌کند. در انتخاب هر منبع آب باید کیفیت آب، در دسترس بودن و هزینه‌های آن بررسی شود.

بهره‌برداری مجدد از منابع متناوب آب می‌تواند مصرف آب برج‌ها را به نحو چشمگیری کاهش دهد. آب تخلیهٔ اضافی و هر آبی را که برای نگه‌داری و تمیز کردن سیستم مصرف می‌شود، می‌تواند جمع‌آوری و دوباره مصرف کرد تا مصرف کل آب مجموعه کاهش یابد.

### ۲-۴ افزایش کیفیت آب در گردش

در هر برج خنک‌کننده‌تر، در هر دو جریان هوا و آب احتمال آلودگی وجود دارد. آلودگی‌های هوا شامل گردوخاک، مواد آلی، حشرات، اندامگانهای میکروبی و گازهاست و آب جبرانی می‌تواند شامل انواع مختلف نمک، ذرات جامد سوسپانسیونی و اندامگانهای میکروبی باشد. احتمال آلودگی آب بر اثر مخلوط شدن با مواد فرایندی نیز وجود دارد. علاوه بر این‌ها، در سیستم‌های خنک‌کننده، ذرات جامد سوسپانسیونی در جریان‌ها به دلیل خوردگی، رسوب داخلی لوله‌ها و دیگ‌ها و رشد میکروبی در آن‌ها تولید می‌شوند. بنابراین، تمیز نگه‌داشتن آب در گردش برج خنک‌کننده باعث افزایش انتقال حرارت، کاهش مصرف آب و کاهش هزینه نگه‌داری می‌شود. تزریق مواد شیمیایی مناسب و صافش، اغلب راه‌حل‌های مناسبی برای افزایش کیفیت آب به‌شمار می‌آیند[۸].

برای مدیریت هرچه بهتر آب مصرفی در سیستم برج‌های خنک‌کننده باید سیستم‌های تصفیه آب و صافی‌های آب تخلیهٔ اضافی و آب جبرانی بهینه و میزان تأثیر عملیاتی آن بررسی شود. معمولاً، ارزیابی سیستم تصفیه آب با جمع‌آوری نمونه‌هایی از آب به‌منظور انجام آنالیز صورت می‌گیرد تا نظارت دقیق برخوردگی و برنامه کنترل تخلیهٔ اضافی وجود داشته باشد. همچنین، باید با بررسی میزان آلاینده‌های موجود در آب روش صحیح نگه‌داری صافیها اختیار شوند. یکی از ساده‌ترین روش‌های تمیز کردن صافیهای آب، استفاده از سیستم شستشوی معکوس است[۸].

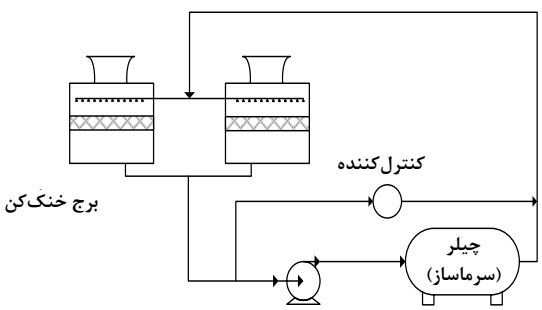
### ۲-۵ نوسازی و بهبود امکانات

برنامه‌ریزی مناسب برای جایگزینی و ارتقا، تجهیزات، فرصتی برای بهبود عملکرد و پایداری سیستم‌های قدیمی خنک‌کننده آب به‌شمار می‌آید و اغلب با تعمیرات ساده و ارتقای اجزا یا تعویض آن با آخرین فنّاوری‌ها، عملکرد برج بهبود می‌یابد. ازآنجاکه تمام قسمت‌های داخل برج بر هم تأثیر می‌گذارند، هرگونه اصلاح در ورودی هوا، دریچه‌ها، پرکن‌ها، سیستم توزیع آب، قطره‌گیرها یا کانال خروجی هوا (سیلندر هواکش) باعث تغییر اختلاف فشار داخل برج و به‌تبع آن، تغییرات عملیاتی هواکش و درنهایت تغییرات جریان هوا و بازده برج می‌شوند. از این‌رو، قبل از هرگونه اصلاح یا بهینه‌سازی، باید آثار جانبی آن را نیز در نظر گرفت تا نتایج نامطلوب به‌بار نیاید. استفاده از شبیه‌سازهای کامپیوتری می‌توانند در پیش‌بینی آثار تغییرات احتمالی مؤثر واقع شوند[۹].

به‌منظور کاهش مصرف آب، می‌توان سیستم خنک‌کننده آب را بر پایه فناوری‌های جدید دوباره طراحی کرد. فناوری‌هایی مانند استفاده از برج‌های خنک‌کننده خشک، برج خنک‌کننده نامستقیم، برج‌های هیبریدی، چگالنده‌های تبخیری و غیره ازاین‌دست‌اند. اغلب این‌ها مصرف آب را کاهش می‌دهند اما ممکن است مصرف انرژی را بیشتر کنند[۹].

## ۳. ارائه راهکارهای کاهش مصرف آب برای یک برج خنک‌کن موجود به‌عنوان نمونه

برای بررسی تأثیر اصلاحات در برج خنک‌کننده، روی یک برج نمونه واقع در استان البرز تحقیق به‌عمل آمد. در شکل (۲) نمودار تصویری در شکل (۳) تصویری از این برج را مشاهده می‌کنید.




**شکل ۲. نمودار تصویری سیستم خنک‌کن مورد مطالعه.**

**شکل ۳. عکس برج‌های خنک‌کن مورد مطالعه.**

این برج خنک‌کننده ۳۶۰۰۰۰ لیتر در ساعت آب سرد برای چیلر (سرماساز) موجود در موتورخانه تأمین می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طراحی برج به‌صورت متقابل و جریان هوا از نوع القایی است. مشخصات برج در جدول (۱) درج شده است.

**جدول ۱. مشخصات فنی برج خنک‌کن مورد مطالعه.**

| موارد | توضیحات | |
|---|---|---|
| موقعیت برج خنک‌کن | واقع در البرز | |
| نوع برج | متقابل با جریان هوای القایی | |
| ابعاد برج (دو واحد) | ۶/۵×۳/۲×۳/۵ | متر |
| میزان دبی آب در گردش | ۳۶۰۰۰۰ | لیتر بر ساعت |
| دمای آب خروجی | ۲۷/۲ | درجه سلسیوس |
| دمای هوای ورودی | ۲۹/۶ | درجه سلسیوس |
| دمای هوای حباب تر | ۱۷/۲ | درجه سلسیوس |
| میزان هوادهی | ۱۵۷۰۰۰ | مترمکعب بر ساعت |
| ارتفاع ریزش | ۱۲۰ | سانتی‌متر |
| ارتفاع واشر درزگیر | ۶۰ | سانتی‌متر |
| نوع واشر درزگیر | جریان متقابل پلیمری زنبوری با گام ۱۹ | |
| ارتفاع قطره‌گیر | ۱۵ | سانتی‌متر |
| نوع قطره‌گیر | پلیمری زنبوری | |
| سیستم تصفیه آب | ندارد | |
| نوع هواکش | محوری | |
| توان موتور هواکش | ۴ | کیلووات |
| سرعت موتور هواکش | ۱۴۲۰ | دور بر دقیقه |

عملیات بهینه‌سازی مصرف آب برج‌های خنک‌کن، پیشنهادشده در این مطالعه شامل موارد زیرند:

۱. بررسی کلی برج خنک‌کن و اندازه‌گیری‌های میدانی جریان‌های ورودی و خروجی آب‌وهوا

نتایج اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در جدول درج شده است. این نتایج مقادیر به‌دست‌آمده، در ۴ بازه زمانی مختلف با شرایط آب و هوایی متفاوت است. همچنین، بازدید کلی از برج نتایج زیر را در پی داشت:

برج در قسمت‌های مختلفی دارای نشتی است. مطابق شکل (۴)، سمت راست، دریچه ورودی هوا نشتی آب دارد. این نشتی به دلیل جریان کم هوا نیست بلکه به دلیل آب‌بند نبودن و نصب ناصحیح بدنه‌ی کامپوزیتی دستگاه است و مطابق شکل (۴)، سمت چپ، در زیر حوضچه آب سرد در ناحیه اتصال کامپوزیت‌ها دستگاه دچار نشتی است.

**شکل ۴. سمت راست: دریچه‌های ورودی، سمت چپ: نمای کف برج از پایین.**

- همچنین مطابق شکل (۵)، در قسمت ورودی هوای برج به دلیل نصب نادرست حائل‌ها (که برای جلوگیری از پاشش آب به بیرون است) آب به بیرون نشت می‌کند.

**شکل ۵. پاشش مستقیم قطرات آب از دریچه‌های مکش هوا به بیرون.**

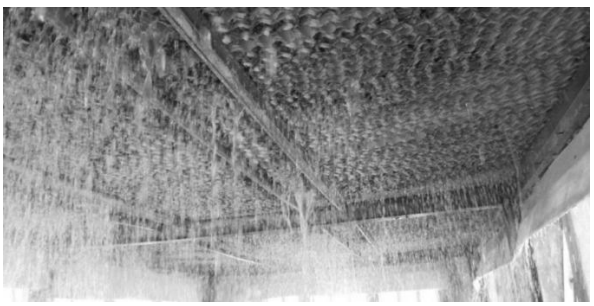
- بخش عمده‌ای از آب مصرفی برج به دلیل خروج قطرات آب همراه هوای خروجی (بیرون‌اندازی) است. این مشکل به حدی است که بخشی از آب‌های خروجی که به دریچه‌های هواکش برخورد می‌کند به‌صورت مایع‌بر روی سقف برج جمع می‌شود (شکل (۶)). همچنین، با بازدید از بالای برج، بیرون‌اندازی به‌راحتی قابل‌مشاهده است. این مشکل به دلیل سرعت زیاد هواکشها و نصب ناصحیح و کیفیت پایین قطره‌گیرهای برج خنک‌کن است. مطابق بخش سمت راست شکل (۶)، قطره‌گیرها به‌طور منظم و صحیح نصب نشده‌اند.

**شکل ۶. بیرون‌اندازی از بالای برج.**

- مشکلاتی چون رسوب، بالا بودن میزان مواد معلق آب، ایجاد اکسیژن، عدم تزریق مداوم کلر، به پدیده‌ای سه مشکل عمده شامل خوردگی، تشکیل رسوب و رشد موجودات زنده منجر می‌شوند. پس از بازدید از سیستم، مشاهده شد لوله‌کشی‌ها و اتصالات فلزی برج دارای خوردگی‌اند (شکل (۷)). اگرچه در این تحقیق امکان اندازه‌گیری میزان خوردگی لوله‌ها مقدور نبود، اما خسارت خوردگی به‌صورت خوردگی کلی، موضعی و حذف لعاب گالوانیزه مشهود است.

**شکل ۷. خوردگی بخش‌هایی از برج.**

- آب بعد از پاشش بر واشرهای درزگیر و عبور از آن‌ها، وارد ناحیه ریزش می‌شود. در شکل (۸) ناحیه ریزش برج را مشاهده می‌کنید. در قسمت‌هایی، آب پیوسته خارج می‌شود و برخی قسمت‌ها خشک است. دلیل این امر نصب ناصحیح واشرهای درزگیر و بخصوص گرفتگی نازل‌ها در برج است. گرفتگی نازل‌ها باعث می‌شود آب به‌صورت مناسب توزیع نشود. همچنین، نصب ناصحیح واشرهای درزگیر و ایجاد فاصله در بین قطعات آن باعث می‌شود آب بدون تماس مناسب با هوا به‌طور مستقیم به سمت پایین سرازیر شود.



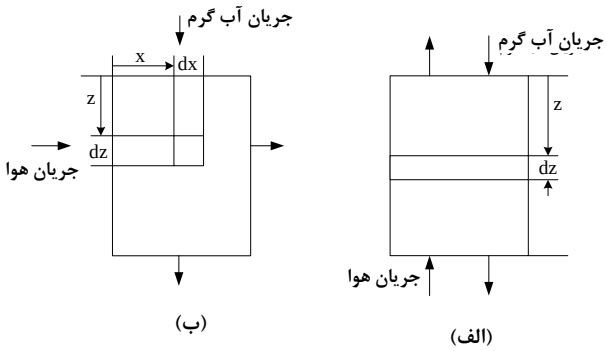
**شکل ۸. توزیع نامتوازن آب در واشرهای درزگیر.**

۲. شبیه‌سازی برج خنک‌کن فعلی به‌منظور شناخت وضعیت موجود و انجام محاسبات ترمودینامیکی با هدف بررسی میزان اثر تغییرات احتمالی

هدف از انجام این موارد، مقایسه وضعیت برج حاضر در شرایط فعلی با شرایط کارکرد در حالت مطلوب است. به این منظور، شبیه‌سازی برج با ابعاد، مشخصات واشرهای درزگیر، دبی آب‌وهوا و شرایط آب و هوایی شبیه‌سازی می‌شود تا مشخص شود برج در حالت بهینه چه مقدار تبخیر خواهد داشت. در پایان، این داده‌ها با نتایج اندازه‌گیری‌های انجام‌شده مقایسه شده و پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف آب مشخص می‌شود.

روش‌های مرکل، NTU و پاپ برای محاسبات ترمودینامیکی برج به کار می‌روند. روابط مورداستفاده در کلیه روش‌ها بر مبنای قوانین انتقال جرم و حرارت استوارند. اما تفاوت‌هایی در فرضها و پارامترهای مورداستفاده نیز وجود دارد[۱۰]. در این تحقیق به‌منظور ارزیابی برج‌های خنک‌کننده، از مدل پاپ استفاده‌شده است. انتقال حرارت و جرم نیز میان آب‌وهوا در برج‌های خنک‌کننده در سه منطقه (ریزش، آکنه و پاشش) برج‌های خنک‌کننده اتفاق می‌افتد. بنابراین، محاسبات ترمودینامیکی هر منطقه به‌صورت جداگانه انجام‌شده است[۱۱]. با توجه به جهت جریان‌های آب‌وهوا در مناطق برج، مدل‌سازی در دو حالت جریان مخالف و جریان متقاطع قابل‌ارائه است که بر این اساس باید مطابق شکل (۹) حجم کنترل

مناسب را اختیار کرد. در اغلب روش‌های مدل‌سازی ارائه‌شده یک بخش از آکنه به‌عنوان حجم کنترل در نظر گرفته می‌شود[۱۲].




**شکل ۹. حجم کنترل موجود بر روی آکنه با (الف)جریان مخالف؛ (ب) جریان متقاطع.**

با فرض آن‌که حجم کنترل برای جریان متقاطع اختیار شود، قانون بقای جرم برای این حجم کنترل به قرار زیر خواهد بود:

$$L_H|_z \Delta xY - L_H|_{z+\Delta z} \Delta xY + G\Delta zY\ \omega_H|_x - G\Delta zY\ \omega_H|_{x+\Delta x} = 0 \quad (۱)$$

با توجه به این‌که فرایند به‌صورت بی‌درو انجام می‌شود، شکل دیفرانسیلی رابطه (۱) از این قرار خواهد بود:

$$L_H C_{pw} \frac{\partial T_{wH}}{\partial z} = \left(h_w a + C_{pw} \frac{\partial L_H}{\partial z}\right)(T_i - T_{wH}) \quad (۲)$$

درواقع، رابطه (۲) نشان می‌دهد که تغییر دمای جریان آب ناشی از انتقال حرارت محسوس از آب به فصل مشترک و حرارت محسوس همراه با جرم انتقال‌یافته بین دو فاز است[۱۲].

در فرایند تبخیر در برج ممکن است هوا قبل از خروج از آکنه به حالت اشباع برسد. ازآنجاکه در ادامه مسیر هوای درون آکنه دمای هوای مجاور فصل مشترک ($T_i$) از دمای توده هوا ($T_g$) که به‌تازگی به حالت اشباع رسیده بالاتر است، از این‌رو پتانسیل انتقال جرم از فصل مشترک آب‌وهوا به توده هوا وجود دارد. در این حالت بخارآب اضافی که به جریان هوا منتقل می‌شود، به‌صورت قطرات آب چگالیده و به عبارتی مه تشکیل می‌شود. پس، روابط ارائه‌شده در حالت غیراشباع نمی‌تواند این فرایند را به‌طور دقیق مدل‌سازی کند، و تشخیص ایجاد حالت مه‌آلود درون آکنه از طریق اندازه‌گیری‌های معمول و به واسطهٔ دستگاه‌های رطوبت‌سنج موجود امکان‌پذیر نیست[۱۲].

برای مدل‌سازی فرایند با فرض هوای مه‌آلود از همان حجم کنترل نشان داده‌شده استفاده می‌شود، با این تفاوت که هوا در حالت اشباع قرار دارد و قطرات ریز آب نیز در توده هوا حضور دارند. بنابراین، قانون بقای (پایستگی) جرم برای کل حجم کنترل از این قرار خواهد بود:

$$GC_{pm} \frac{\partial T_{gH}}{\partial x} = \left(G\left(C_{pv}(T_{gH} - T_0) + \lambda_0\right) - GC_{pw}(T_{gH} - T_0)\right) \frac{\partial \omega_{mH}}{\partial x} + h_g a (T_i - T_{gH}) \quad (۳)$$

با استفاده از روش تفاضل محدود پیشرو، معادلات جبری محاسبه‌شده و دمای نقاط آکنه تعیین می‌شود[۱۲].

در این مطالعه، مجموعه روابط ارائه‌شده برای هر حالت و در هر نقطه از شبکه مناطق با استفاده از نرم‌افزار Matlab و تابع fsolve حل شد. از ضریب همگرایی $۱۰^{-۸}$ برای حل استفاده‌شده است تا حداقل خطا در این بخش رخ بنماید. روش حل نیز از این قرار است که ابتدا روابط مربوط به مدل غیراشباع برای هر نقطه حل‌شده، سپس با بررسی رطوبت خروجی هوا $\omega_{\mathrm{H}}(i+1)$ چنانچه مقدار آن بیشتر از مقدار رطوبت مطلق هوای اشباع در دمای $\mathrm{T_{gH}}(i+1)$ یعنی $\omega_{\mathrm{s}}(i+1)$ باشد، دستگاه معادلات را برای حالت هوای مه‌آلود برای آن نقطه حل می‌کند. حل معادلات از نقطه (۱) در انتهای منطقه ریزش آغاز و سپس برای نقاط بالاتر آن (۲ تا n) ادامه می‌یابد. سپس، با مشخص شدن شرایط آب و هوا در منطقه ریزش، حل معادلات برای نقاط منطقه آکنه ادامه می‌یابد و به همین ترتیب تا آخرین نقطه دستگاه، معادلات برای سایر نقاط شبکه در منطقه ریزش حل می‌شود. پیش‌ازاین نتایج برنامه کامپیوتری نوشته‌شده با نتایج حاصل از چند آزمایش واقعی ذکرشده در منابع معتبر کنترل شد تا از عملکرد صحیح آن اطمینان کامل حاصل شود[۱۲].

## ۴. نتیجه‌گیری

در جدول (۲) نتایج حاصل از مدل‌سازی و اندازه‌گیری داده‌های برج خنک‌کننده نمونه درج شده‌اند.

**جدول ۲. نتایج حاصل از مدل‌سازی و اندازه‌گیری برج خنک‌کن مورد مطالعه.**

| ردیف | عنوان | واحد | اندازه‌گیری شده | مدل‌سازی |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | دمای آب ورودی | °C | ۳۲/۵ | ۳۳ |
| ۲ | آهنگ تبخیر | kg/s | ۰/۲۸۳ | ۰/۱۰۰۴ |
| ۳ | مقدار آب جبرانی | kg/s | ۰/۵۹۴ | - |
| ۴ | رطوبت خروجی از برج | ٪ | ۱۰۰ | ۳۷/۶۴ |

مطابق جدول (۲)، آهنگ تبخیر برج ۰/۲۸۳ کیلوگرم بر ثانیه است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده، در حالت مطلوب آهنگ تبخیر سیستم باید ۰/۱۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه باشد. بنابراین، اختلاف بین آهنگ تبخیر اندازه‌گیری شده و آهنگ تبخیر مدل‌سازی در ساعتهای کارکرد، حاکی از میزان هدر رفت آب در برج از طریق تبخیر نامناسب است:

هدر رفت آب در برج از طریق تبخیر نامناسب = ساعات کارکرد سیستم × (نرخ تبخیر مدل‌سازی – نرخ تبخیر اندازه‌گیری شده)

لیتر آب در یک روز ۵۲۵۹ = ۳۶۰۰ × ۸ × (۰/۲۸۳۰-۰/۱۰۰۴)

همچنین، اختلاف بین میزان آب جبرانی اندازه‌گیری شده (۰/۵۹۴ کیلوگرم بر ثانیه) و آهنگ تبخیر مدل‌سازی (۰/۱۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه) نمایانگر کل هدر رفت نامناسب آب در برج است:

هدر رفت کل آب در برج = ساعات کارکرد سیستم × (نرخ تبخیر مدل‌سازی – آب جبرانی اندازه‌گیری شده)

لیتر آب در یک روز ۱۴۲۱۵ = ۳۶۰۰ × ۸ × (۰/۵۹۴-۰/۱۰۰۴)

بنابراین، میزان هدر رفت آب در شرایط کاری فعلی برج در سه ماه تابستان بیشتر ۱۳۰۰ مترمکعب (در ساعت) بوده که ۴ درصد دبی کل جریان در گردش است. از این مقدار حدود ۵۰۰ مترمکعب مربوط به مشکل در فرایند تبخیر (توزیع نامناسب آب و چیدمان نامناسب واشر درزگیر) و ۸۰۰ مترمکعب مربوط به مشکلات عمدتاً مکانیکی شامل سرریز، بیرون‌اندازی، به بیرون پاشیدن، اتلاف هواخورد، نشتی و غیره است. باید گفت که برج یادشده فاقد تخلیهٔ اضافی است. این میزان هدر رفت آب به دلیل سیستم فرسوده و طراحی نامناسب برج است.

علاوه بر آن، در جدول (۲)، رطوبت اندازه‌گیری شده ۱۰۰ درصد است ولی در مدل‌سازی انجام‌شده رطوبت هوای خارج‌شده نزدیک به ۴۰ درصد است که دلیل آن خروج بیش‌ازحد قطرات آب به‌صورت بیرون‌اندازی است. قطرات خروجی بر روی حسگر رطوبت‌سنج قرار می‌گیرد، دستگاه قادر به تشخیص بیرون‌اندازی از بالای برج نیست و بنابراین باعث خطای آزمایش می‌شود. به بیان دیگر، اگر قرار بر کارکرد بهینه برج بود، رطوبت هوای خروجی از بالای برج به حالت اشباع نمی‌رسید. این پدیده دلایل متفاوتی دارد که می‌توان به عملکرد نامناسب واشرهای درزگیر، قطره‌گیرها و سیستم توزیع آب و نیز حجم هوای عبوری بیش از موردنیاز برج اشاره کرد.

ارائه راهکارهای کاهش مصرف آب در برج خنک‌کن نمونه

- استفاده از نوارهای آب‌بند یا چسب‌های مخصوص آب‌بندی برای نشتی‌های کوچک.
- نصب مجدد و صحیح دریچه‌های مکش هوا با هدف جلوگیری از خروج قطرات آب.
- تنظیم سرعت چرخش هواکشها با استفاده از تجهیزاتی چون دستگاه VSD به منظور جلوگیری از پرتاب شدن قطرات آب به بیرون برج.
- استفاده از قطره‌گیرهای مدرن با افت فشار بسیار کم به‌منظور کاهش بیرون‌اندازی در برج و بازگرداندن قطره‌های ریز همراه هوای خروجی.
- کاهش خوردگی در برج با استفاده از روش‌هایی چون استفاده از مواد مقاوم به خوردگی برای کمینه‌سازی اثر محیط خورنده در هرجایی که امکان‌پذیر است، مثلاً استفاده از استیل‌های ضدزنگ یا فایبرگلاس و به کار بردن هواکش حفاظت کاتدی برای بخش‌های فلزی.
- افزایش بازده برج با تمیزکاری نازل‌های پاشش آب و نصب صحیح و تراز واشرهای درزگیر موجود به منظور توزیع مناسب آب در کل برج.
- وارسی مصرف آب به‌صورت دوره‌ای با هدف اطمینان یافتن از عملکرد مناسب سیستم‌ها.

داده‌ها باید در فاصله زمانی منظم ثبت و نیز از جانب فرد متخصص به‌طور دقیق و پیوسته ارزیابی شود. اپراتورها و نیروی پشتیبانی باید اطلاعات کافی از چگونگی استفاده از

دستگاه‌های اندازه‌گیری و صفحات نمایش، ثبت و ضبط داده‌ها و ارزیابی عملکرد سیستم برج‌های خنک‌کن داشته باشند.

- بهبود شرایط واشرهای درزگیر

واشرهای درزگیر مهم‌ترین قسمت برج‌های خنک‌کننده‌اند، زیرا فرایند اصلی تبادل حرارتی و جرمی آب روی واشرهای درزگیر صورت می‌گیرد. بنابراین، به‌روزرسانی و بهبود واشرهای درزگیر بازدهی برج را به‌طور قابل قبولی افزایش می‌دهد. واشرهای درزبند با سطح انتقالی بیشتر و شکل‌های منحصربه‌فرد بر کاهش مصرف آب در برج تأثیر زیادی می‌گذارند. لذا یکی از راهکارهای مهم تغییر واشرهای درزگیر برج به مدل‌های به‌روزتر و مناسب‌تر است.

- نظارت بر کیفیت آب و استفاده از سیستم صافش مناسب.

## ۵. نتیجه‌گیری کلی

با توجه به این‌که تأمین آب باکیفیت مناسب در بخش صنعتی یکی از مشکلات اساسی این بخش بوده، و توسعه صنایع مختلف در کشور ازجمله برنامه‌های دولت است، بهینه‌سازی الگوی مصرف آب در صنعت یکی از راه‌حل‌های رفع مشکل کم‌آبی است. ازآنجا برج‌های خنک‌کننده در اغلب صنایع یکی از اجزای اصلی سیستم آن‌هاست، بهینه‌سازی مصرف آب به تأمین آب موردنیاز کمک شایانی خواهد کرد.

در این تحقیق، سعی بر آن شده تا راه‌حل‌های مناسبی برای الگوی مصرف آب و بهینه‌سازی سیستم‌های خنک‌کننده ارائه شود. با شبیه‌سازی برج‌های موجود و بررسی کلی آن و اندازه‌گیری‌های میدانی می‌توان نواقص آن‌ها را مشخص و سپس راهکارهایی به‌منظور کاهش مصرف آب در سیستم ارائه کرد.

مطالعه انجام‌شده برای یک برج نمونه در استان البرز نشان داد که با صرف هزینه اندک و بهینه‌سازی یک برج خنک‌کننده در حال کار، می‌توان در حدود ۱۳۰۰ مترمکعب در یک دوره سه‌ماهه در تابستان در مصرف آب صرفه‌جویی کرد.

## فهرست علائم و نشانه‌ها

| | |
|---|---|
| $C_p$ (J/kg.K) | ظرفیت گرمای ویژه |
| G (kg/s) | آهنگ جریانی هوا |
| h (W/(m$^2$K) | ضریب انتقال حرارت |
| L (kg/s) | آهنگ جریان آب |
| i | Air |
| w | Water |
| ω | humidity Relative |

## مراجع


[۱] صارمی، م.، میرصفری، م.، سکاک، س.، خانکی، م.، "بررسی عوامل موثر در طراحی برج خنک کننده تر جریان مخالف"، نخستین کنفرانس بین المللی تهویه مطبوع و تاسیسات حرارتی و برودتی، (۱۳۹۴).

[۲] رحمانی، خ.، "کاهش مصرف آب در برج های خنک کن نیروگاهی و ملاحظات مربوط به خوردگی و رسوبگذاری"، هفدهمین کنفرانس بین المللی برق، (۱۳۸۱).

[۳] سبزواری، م.، احراری، م.، "بررسی کارایی برج خنک کن نیروگاه طوس و ارائه راهکار جهت کاهش خوردگی و تلفات آب برج خنک کن"، هفتمین کنفرانس نیروگاه های برق، (۱۳۹۳).

[4] Shah, R., Rathod, T., "Thermal Design Of Cooling Tower", International Journal Of Advanced Engineering Research And Studies, Vol. 1: p. 26-29, (2012).

[۵] ابراهیمی، س.، گشایشی، ح.، "بررسی انتقال حرارت و جرم در برج های خنک کننده جریان مخالف با جابجایی مکانیکی"، دومین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران، (۱۳۹۴).

[6] Kröger, D. G., "Air-cooled Heat Exchangers and Cooling Towers", Penwell Corporation, (2004).

[۷] گودرزی، م.، اکبری، و.، "بهبود عملکرد حرارتی برج های خنک کننده مرطوب جریان متقابل با انتخاب یک پکینگ مناسب"، اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی، (۱۳۹۱).

[۸] گوگل، م.، زاروی، ا.، "استفاده مجدد از زیرآب برج‌های خنک کننده در مجتمع پتروشیمی رازی"، پژوهش نفت، ص ۱۳۳-۱۲۴، (۲۰۱۳).

[۹] امیرگونه زاده، و.، شجاع، ک.، "روش های بهینه سازی چند منظوره برج‌های خنک‌کننده و پارامترهای موثر بر آن"، کنفرانس بین المللی مهندسی، هنر و محیط زیست، (۱۳۹۳).

[10] Kröger, D. G., Kloppers, J., "Cooling tower performance evaluation: Merkel, Poppe, and e-NTU methods of analysis", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.127: p. 1-7, (2005).

[11] Ao, R., Patel, V., "Optimization of mechanical draft counter flow wet-cooling tower using artificial bee colony algorithm", Energy Conversion and Management, Vol.52(7): p. 2611-2622, (2011).

[12] Zamen, M., Amidpour, M., Firoozjaei, M. R., "A novel integrated system for fresh water production in greenhouse: Dynamic simulation", Desalination, Vol.322: p. 52-59, (2013).