

ارایه یک روش برای کاهش ناخالصی‌های محلول در برج‌های خنک‌کن تر

منصور خانکی*

قزوین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

چکیده: یکی از سامانه‌های بسیار کارا در انتقال انرژی از نیروگاه‌ها و صنایع شیمیایی به محیط، برج‌های خنک‌کن تر می‌باشد. ناخالصی محلول در آب برج‌های خنک‌کن تر، که با آب تغذیه به آن وارد می‌شود، توسط زیراب محدود می‌شود. در این پژوهش به کیفیت آب در برج خنک‌کن تر پرداخته شد. در تحلیل‌های به‌عمل‌آمده نشان داده شد که زیراب پیوسته کارا تر از زیراب تناوبی می‌باشد. همچنین در چند برج خنک‌کن تر می‌توان سامانه زیراب برج‌ها را به گونه‌ای مورد استفاده قرار داد تا با یک زیراب کلی معین ناخالصی محلول در برج‌های خنک‌کن کاهش یابد. در یک مورد اثربخشی زیراب در یک گروه شامل ۵ برج خنک‌کن مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که با زیراب ۲۰٪ مقدار متوسط ناخالصی در برج‌ها را می‌توان از ۶ برابر ناخالصی محلول در آب تغذیه به ۲٫۷۴ کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: برج خنک‌کن، ناخالصی‌های محلول، زیراب، رسوب.

KEY WORDS: Cooling tower; Dissolved Impurities; Blowdown; Precipitation.

مقدمه

استفاده از زیراب در کنترل ناخالصی محلول در حجم‌های جوششی نیروگاهی و اتمی مورد توجه پژوهشگران بوده است. در مورد کنترل رژیم دیگ‌های بخار دارای درام (که بخش چشمگیری از نیروگاه‌ها را تشکیل می‌دهد) رُم^(۱) [۱] در سال ۱۹۳۸ میلادی رساله خود را در تبخیر مرحله‌ای منتشر نمود. پژوهشگران دیگری به کنترل ناخالصی و ساماندهی رژیم آب در نیروگاه‌ها توجه نموده‌اند [۲ - ۶]. فدرف^(۲) [۷] یک روش برای محاسبه‌های تبخیر مرحله‌ای در مولدهای بخار دارای درام پیشنهاد نموده است. گوربارف و همکاران [۸] در رابطه با توزیع ناخالصی محلول در مولدهای بخار و تخمین تخلیه آن‌ها در فرایند توقف کار واحد پژوهش نموده‌اند.

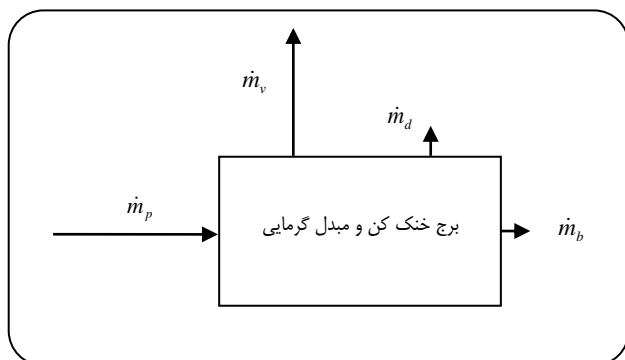
در نیروگاه‌های گرمایی به‌طور تقریبی بین ۶۰ تا ۷۰ درصد انرژی دریافتی از سوخت سرانجام به محیط منتقل می‌شود. در سامانه‌های تهویه مطبوع نیز گرمای نفوذ یافته به محیط زندگی به همراه انرژی لازم برای کارکرد سامانه تهویه مطبوع به محیط منتقل می‌شود. در صنایع گوناگون انرژی بر، بخش چشمگیری از انرژی به محیط منتقل می‌شود. یکی از سامانه‌های بسیار کارا در انتقال انرژی از سامانه به محیط، برج‌های خنک‌کن تر می‌باشد. مکانیسم انتقال گرما در این برج‌ها به تبخیر آب متکی است. به‌تقریب ۹۷ درصد گرمای منتقل شده صرف تبخیر آب می‌شود. ناخالصی محلول در برج‌های خنک‌کن تر با زیراب محدود می‌شود.

*E-mail: khanaki@eng.ikiu.ac.ir , Khanaki.m@gmail.com

*عقد دار مکاتبات

(۱) Romm E.I.

(۲) Fedorov A.I.



شکل ۱ - شدت جریان‌های جرمی ورودی و خروجی برج خنک‌کن.

حل می‌شود، املاحی که از طریق آب جبرانی به آب برج وارد می‌شوند در حوضچه برج متراکم می‌شوند. با زیراب، ناخالصی واردشده از طریق آب جبرانی تخلیه می‌شود. مقدار زیراب بسته به مقدار ناخالصی محلول در آب جبرانی برج خنک‌کن و مقدار بیشینه مجاز آن تعیین می‌شود. هرگونه کاهش در ناخالصی محلول در آب برج می‌تواند به کاهش رسوب در برج خنک‌کن کمک نماید.

تعریف مسئله

یون‌هایی که همانند یون‌های کلر، آهن، سولفات و .. همچنین املاح غیرمحلول که در حجم آبی به صورت معلق توزیع می‌شوند و قابلیت انحلال ناچیزی در بخار خروجی از برج دارند به علت تبخیر آب که املاح کمی را با خود حمل می‌کند، در آب‌گردشی برج متراکم می‌شوند. در پژوهش حاضر تغییر این اجزا در آب برج خنک‌کن مورد بررسی قرار گرفته است و مدلی برای کاهش آن‌ها در آب برج خنک‌کن پیشنهاد شده است.

معادله‌های حاکم بر مسئله

بررسی تغییرهای ناخالصی محلول در حجم‌های تبخیری

بررسی جریان‌های جرمی

جریان‌های جرمی به سامانه تبخیری در شکل ۱ نشان داده شده است.

معادله بقای جرم برای این سامانه:

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_p - \dot{m}_v - \dot{m}_d - \dot{m}_b \quad (1)$$

با آغاز به کار نیروگاه‌های اتمی موضوع رژیم آب این نیروگاه‌ها در کنترل ناخالصی و ایجاد رسوب در مولدهای بخار و راکتورها که می‌توانست ماهیت رادیواکتیو داشته باشد نیز مورد توجه قرار گرفت [۹ - ۱۱]. نیروگاه‌های اتمی با آب تحت فشار VVER-1000 نوع روسی نیروگاه‌های PWR می‌باشد. مولدهای بخار نوع PGV-1000 حلقه ارتباط مدار اول و دوم در این نوع نیروگاه است. ویژگی افقی بودن مولدهای بخار نوع PGV-1000 و متغیر بودن نرخ تولید بخار در واحد حجم مولد ویژگی تازه‌ای بود که با تولید بخار در درام نیروگاه‌های بخاری متفاوت بود و در نتیجه طبیعت سه‌بعدی این تغییرها سبب انجام فعالیت‌های پژوهشی بیشتری در این زمینه شد. برای بهبود توزیع ناخالصی محلول در این نوع مولد بخار و به کارگیری ایده رُم مدرن‌سازی رژیم آب این نوع مولد بخار [۱۲] از جمله آن‌ها است. ارایه تجربه‌های مدل‌سازی یک‌بعدی رژیم آب و بهبود رژیم آب واحدهای جوششی در نیروگاه‌های اتمی و متعارف در کارهای گوربارف^(۱) مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۳ - ۱۴]. خانکی [۱۵] یک مدل دوبعدی برای توزیع ناخالصی محلول در مولد بخار PGV-1000 پیشنهاد کرده است. جهانفرنی و همکاران [۱۶] طرح تبخیر چندمرحله‌ای تازه‌ای را در مولدهای بخار PGV-1000 مورد بررسی قرار داده‌اند.

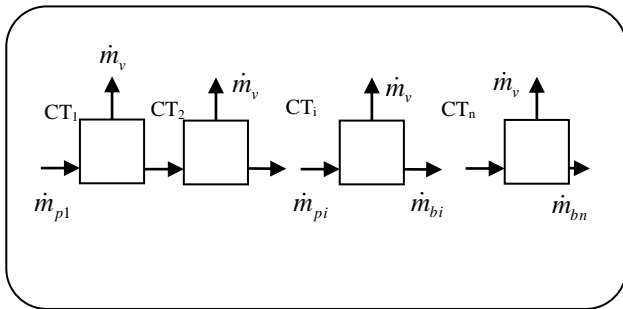
در برج‌های خنک‌کن تر، توجه بیشتر پژوهشگران در رابطه با مدل‌های گرما - جرم به منظور بهبود بازدهی انتقال گرما بوده است. جمیل الرحمان خان^(۲) و همکاران [۱۷] بازدهی برج خنک‌کن با جریان متقابل را بررسی نموده‌اند. جناس سی کلویپر^(۳) و همکاران [۱۸] رابطه افت ضریب انتقال گرما برای پکینگ برج‌های خنک‌کن تر را مورد توجه قرار داده‌اند. رفعت الواکد^(۴) و همکاران [۱۹] عملکرد برج‌های خنک‌کن تر را با شبیه‌سازی دینامیک سیال‌های محاسباتی بررسی نموده‌اند. شبیه‌سازی عددی رفتار برج‌های خنک‌کن تر در تحقیقات پژوهشگران دیگر نیز دیده می‌شود [۲۰ - ۲۳]. پژوهش تجربی در عملکرد برج خنک‌کن تر در کار برخی دیگر از پژوهشگران دیده می‌شود [۲۴ - ۲۶]. برخی دیگر از پژوهشگران در رابطه با اثر شرایط محیطی بر عملکرد برج خنک‌کن تر تحقیق نموده‌اند [۲۷ - ۲۹]. بررسی پژوهش‌های به عمل آمده نشان می‌دهد که موضوع ناخالصی محلول در آب برج خنک‌کن کمتر مورد بررسی قرار گرفته است و امکان کار بیشتر در این زمینه وجود دارد. از آنجایی که مقدار کمی از املاح در بخار آب

(۱) Gorburov V. I.

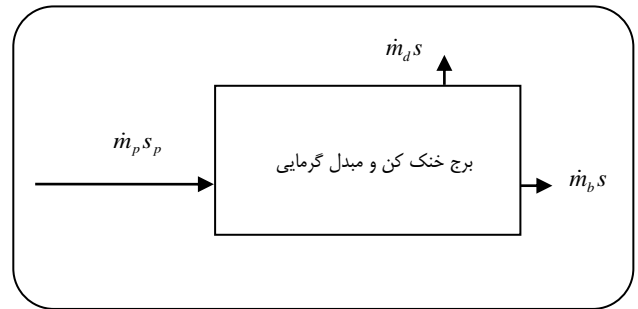
(۲) Jameel-Ur-Rehman Khan

(۳) Johannes C. Kloppers

(۴) Rafat Al-Waked



شکل ۳- نرخ‌های جرمی ورودی و خروجی برج‌های خنک‌کن متوالی.



شکل ۲- نرخ جریان‌های ورود و خروج ناخالصی برج خنک‌کن.

در زمان آغاز کار برج خنک‌کن، هرگاه در $t_0=0$ معادله $S_0=S_p$ برقرار باشد:

$$\frac{s(t)}{s_p} = \frac{(1+p) - e^{-\frac{p\dot{m}_v t}{M}}}{p} \quad t=0, s=s_p \quad (6)$$

ناخالصی محلول در برج‌های خنک‌کن در حالت پایدار

هرگاه چند برج خنک‌کن به‌منظور انتقال گرما به محیط در نظر گرفته شوند و آب تغذیه و زیراب آن‌ها مستقل باشد، برای هرکدام از آن‌ها معادله (۶) برای محاسبه نسبت ناخالصی محلول در آب برج نسبت به ناخالصی محلول در آب تغذیه می‌تواند به‌کار برده شود.

می‌توان نشان داد که در ترکیب برج‌ها به‌صورت نشان داده‌شده در شکل ۳ که آب تغذیه برج خنک‌کن بعدی، از آب حوضچه برج پیشین تأمین می‌شود، به علت زیاد بودن مقدار آب تغذیه برج‌های بعدی که نقش زیراب را برای برج پیشین نیز به عهده دارد، مقدار ناخالصی محلول در برج پیشین به مقدار چشمگیری کاهش می‌یابد. به‌این‌ترتیب در کل می‌توان با زیراب معین به ناخالصی محلول کمتر در برج‌ها دست‌یافت.

ترکیب n برج خنک‌کن تر در شکل ۳ در نظر گرفته می‌شود: بقای جرم برای برج‌های خنک‌کن اول تا i ام با صرف‌نظر از آب هدر رفته با جریان هوا:

$$\dot{m}_{p1} = i\dot{m}_v + \dot{m}_{bi} = i\dot{m}_v + (n-i)\dot{m}_v + \dot{m}_{bn} \quad (7)$$

و برای کل برج‌ها:

$$\dot{m}_{p1} = n\dot{m}_v + \dot{m}_{bn} \quad (8)$$

بالانس ناخالصی محلول برای i برج اول:

$$s_p \dot{m}_{p1} = s_i \dot{m}_{bi} = s_i (\dot{m}_{p1} - i\dot{m}_v) \quad (9)$$

با فرض جریان جرمی پایدار:

$$\dot{m}_p = \dot{m}_v + \dot{m}_d + \dot{m}_b \quad (2)$$

معادله بقا برای ناخالصی محلول در حجم تبخیری:

در شکل ۲ ورودی و خروجی‌های ناخالصی‌ها به سامانه نشان داده‌شده است.

با چشم‌پوشی از رسوب احتمالی ناخالصی‌های محلول در مبدل گرمایی و حمل ناخالصی توسط بخار آب، میزان ناخالصی خروجی از برج و ورودی به برج از ناحیه آب خنک‌کن ثابت است با توجه به این مطلب، معادله بقای جرمی ناخالصی برج را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\frac{dMs}{dt} = \dot{m}_p s_p - (\dot{m}_b + \dot{m}_d) s \quad (3)$$

در این رابطه مقدار S و s_p به ترتیب نشان‌دهنده جزء مورد مطالعه ناخالصی در آب برج خنک‌کن و آب جبرانی است. با ثابت بودن جرم آب درون برج و استفاده از معادله پیوستگی:

$$M \frac{ds}{dt} = (\dot{m}_v + \dot{m}_b + \dot{m}_d) s_p - (\dot{m}_b + \dot{m}_d) s \quad (4)$$

با تعریف p به‌صورت نسبت مجموع جرم زیراب و آب هدر رفته با جریان هوا^(۱) به جرم آب تبخیر شده و حل این معادله تغییر ناخالصی محلول با زمان در برج خنک‌کن به دست می‌آید. نتیجه حل این معادله به‌صورت زیر است:

$$\frac{s(t)}{s_p} = \frac{(1+p) - \left(1+p-p\frac{s_i}{s_p}\right) e^{-\frac{p\dot{m}_v}{M}(t-t_0)}}{p} \quad (5)$$

$$t = t_0, s = s_i, p = \frac{\dot{m}_b + \dot{m}_d}{\dot{m}_v}$$

(۱) Drift

و در نتیجه:

$$\frac{s_i}{s_p} = 1 + \frac{\frac{i}{n}}{\left(1 - \frac{i}{n}\right) + \frac{\dot{m}_{bn}}{n\dot{m}_v}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

برای یک برج خنک کن که نسبت شدت جریان جرمی زیراب به تبخیر ۲۰٪ است از معادله (۶) نسبت ناخالصی محلول در آب برج به آب تغذیه برابر ۶ به دست می‌آید. برای دو برج که به طور متوالی به یکدیگر متصل هستند از معادله (۱۰) مقدار ناخالصی محلول در برج اول برابر ۱،۷ برابر ناخالصی محلول در آب تغذیه و برای برج خنک کن دوم برابر ۶ خواهد بود و به این ترتیب متوسط ناخالصی محلول در آب خنک کن برجها کاهش یافته است.

بررسی تغییر ناخالصی محلول در برج خنک کن با استفاده از زیراب تناوبی

استفاده از زیراب تناوبی در برجهای خنک کن تراوری معمول نیست با این وجود از نظر تحلیلی مقایسه وضعیت ناخالصی محلول و تغییر آن بر حسب زمان را می‌توان محاسبه نمود. هنگامی که زیراب صفر است مقدار ناخالصی محلول در آب برج خنک کن متناسب با آب تغذیه برج به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. پس از باز شدن زیراب مقدار ناخالصی محلول در برج خنک کن کاهش خواهد یافت. با استفاده از معادله‌های (۵) و (۶) می‌توان تغییر ناخالصی محلول در آب برج خنک کن را در حالت زیراب تناوبی، محاسبه نمود. در حالتی که زیراب قطع است معادله تغییر ناخالصی محلول به صورت:

$$\frac{s(t)}{s_p} = \frac{\dot{m}_v + \dot{m}_p + \dot{m}_d}{M} t + \frac{s_{min}}{s_p} \quad (11)$$

به دست می‌آید. و برای حالتی که زیراب با نرخ ثابت جرمی وجود دارد تغییر ناخالصی محلول بر حسب زمان از معادله:

$$\frac{s(t)}{s_p} = \frac{(1+p) - \left(1+p-p \frac{s_{max}}{s_p}\right) e^{-\frac{p\dot{m}_v}{M}(t-t_c)}}{p} \quad (12)$$

می‌تواند محاسبه شود.

با استفاده از روش عددی مقدار ناخالصی محلول در آب برج خنک کن در دو حالت مقایسه می‌شوند. برای زیراب ثابت درصد زیراب:

$$p = \frac{1}{\frac{s_{max}}{s_p} - 1} \quad (13)$$

و برای زیراب متناوب:

$$p_{av} = \frac{(T-t_c)p}{T} \quad (14)$$

فرضیه‌های به عمل آمده

- ۱- ناخالصی بر واحد جرم آب تغذیه ثابت است.
- ۲- شدت جریان جرمی آب تغذیه، تبخیر، زیراب و آب هدر رفته با جریان هوا ثابت هستند.
- ۳- برجهای خنک کن که به صورت متوالی بررسی می‌شوند میزان توان خنک‌کنندگی یکسان دارند (میزان تبخیر آب در آنها یکسان فرض می‌شوند).
- ۴- سامانه مورد بررسی شامل برج خنک کن و مبدل گرمایی در نظر گرفته شده است. به این ترتیب جریان آب خنک به مبدل و جریان برگشتی از مبدل جریان‌های داخل سامانه‌ای فرض شده‌اند.
- ۵- میزان آب هدر رفته با جریان هوا ناچیز فرض می‌شود.

مدل‌سازی سامانه

تغییر ناخالصی محلول با زمان در برج خنک کن

معادله‌های حاکم بر مسئله (معادله (۶)) در محیط نرم‌افزار متکد^(۱) حل شده‌اند. در شکل ۴ نمودار تغییر ناخالصی محلول در برج خنک کن با زمان نشان داده شده است.

همان‌گونه که دیده می‌شود میزان ناخالصی محلول در برج به حدی که توسط معادله (۶) داده شده است میل می‌کند. نرخ تغییر ناخالصی محلول در برج خنک کن به حجم آب داخل برج خنک کن و نرخ آب تغذیه برج برای جریان اتلاف ناشی از تبخیر، زیراب و آب هدر رفته با جریان هوا وابسته می‌باشد.

مقدار ناخالصی محلول در چند برج که به صورت متوالی با هم

مرتبط هستند.

با استفاده از رابطه (۱۰) می‌توان در حالت پایدار ناخالصی محلول در برجها را به دست آورد. در این محاسبه‌ها که در محیط نرم‌افزار متکد

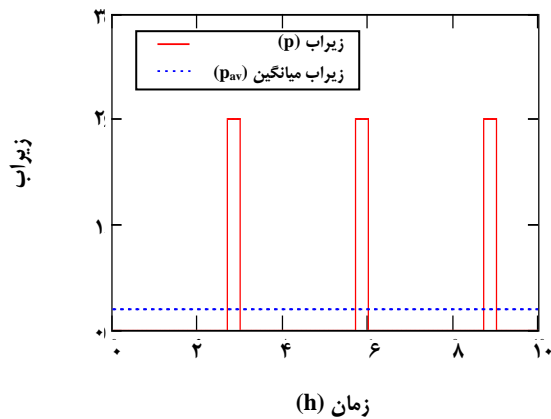
مقایسه اثربخشی زیراب ثابت و متناوب

برای مقایسه اثربخشی زیراب ثابت و متناوب، مقدار زیراب ثابت و متوسط مقدار زیراب متناوب یکسان در نظر گرفته شده‌اند.

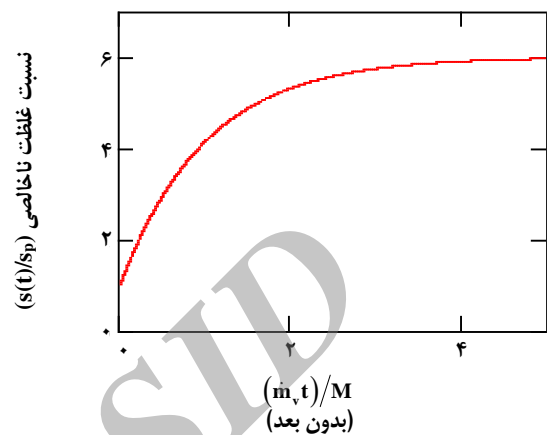
(۱) Matcad

جدول ۱- ناخالصی محلول در مجموعه ۵ برج خنک‌کن.

ناخالصی محلول	ناخالصی محلول	ناخالصی محلول	ناخالصی محلول	ناخالصی محلول
در برج خنک‌کن پنجم	در برج خنک‌کن چهارم	در برج خنک‌کن سوم	در برج خنک‌کن دوم	در برج خنک‌کن اول
۶	۳	۲	۱,۵	۱,۲



شکل ۵ - تغییر زیراب برحسب زمان در زیراب متناوب.



شکل ۴ - تغییر ناخالصی محلول با زمان در آب برج خنک‌کن.

و نتیجه‌ها در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) ارایه شده‌اند. مقدار زیراب متوسط از معادله (۱۴) محاسبه شده است و بر اساس آن با زیراب ثابت، مقدار ناخالصی محلول در برج محاسبه و در نمودار به همراه متوسط ناخالصی محلول در برج خنک‌کن رسم شده است.

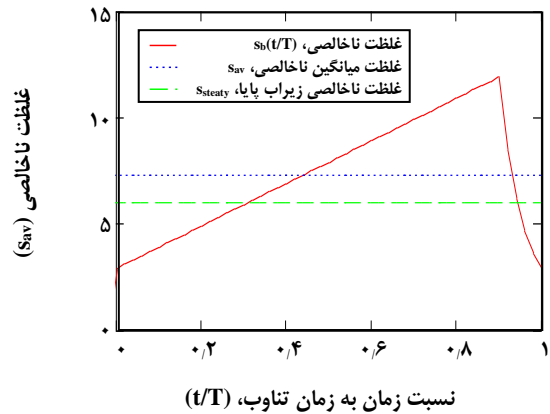
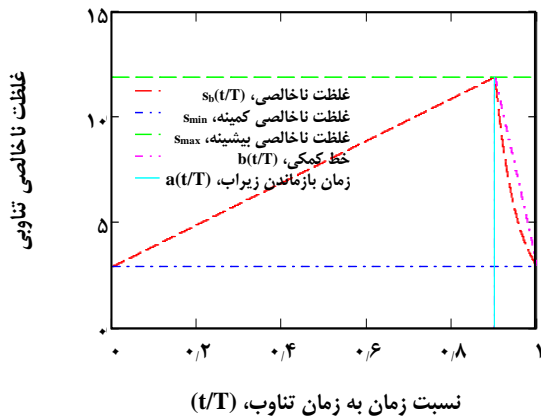
چگونگی تغییر زیراب متناوب در شکل ۵ نشان داده شده است. محور افقی نشان‌دهنده زمان و محور عمودی زیراب می‌باشد. همان‌گونه که از شکل ۶ دیده می‌شود در صورتی که از زیراب ثابت استفاده شود مقدار ناخالصی محلول در آب برج خنک‌کن کمتر خواهد بود در مثال عددی حل شده برای زیراب مؤثر $p=0.2$ در حالت پایدار مقدار ناخالصی بیشینه ۱۱,۹، مقدار ناخالصی کمینه ۲,۹ و متوسط ناخالصی محلول در آب برج در حالت زیراب متناوب حدود ۷,۲ برابر ناخالصی ورودی آب تغذیه می‌باشد. حال آنکه با رژیم زیراب ثابت مقدار ناخالصی حلال در آب برج حدود ۶ برابر ناخالصی آب تغذیه محاسبه می‌شود. به صورت تحلیلی نیز می‌توان نشان داد که در حالت زیراب ثابت متوسط ناخالصی محلول در آب برج خنک‌کن با زیراب کلی یکسان برای دو حالت، کمتر است.

در شکل ۷ به طور نمادین تغییر ناخالصی محلول در حالت زیراب متناوب با زمان نشان داده شده است. با موازنه ناخالصی محلول برای آب برج خنک‌کن در یک تناوب متوسط ناخالصی محلول در آب برج به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

محاسبه شده، مقدار زیراب بیست درصد تبخیر در نظر گرفته شده است. متوسط ناخالصی محلول برای برج‌های خنک‌کن ۲,۷۴ برابر ناخالصی آب تغذیه برج اول به دست می‌آید. مقدارهای ناخالصی محلول در مجموعه ۵ برج خنک‌کن که زیراب یکی آب تغذیه برج بعدی است (شکل ۳) در جدول ۱ نشان داده شده است. حال آنکه این مقدار برای برج‌هایی که آب تغذیه و زیراب مستقل دارند، از معادله (۶) برابر ۶ محاسبه می‌شود.

مقایسه اثربخشی زیراب ثابت و متناوب

هنگامی که زیراب بسته است. ناخالصی محلول در آب برج خنک‌کن به طور خطی افزایش پیدا می‌کند و با باز شدن زیراب، ناخالصی محلول در آب کاهش می‌یابد و با توجه به تناوب پیش‌بینی شده تغییر ناخالصی در آب برج خنک‌کن، با الگوی معینی تغییر می‌کند. برای حل عددی تغییر ناخالصی محلول در آب برج با معین بودن مقدارهای شدت جریان بخار تولیدی، آب هدر رفته با جریان هوا، زیراب، مقدار آب موجود در آب برج خنک‌کن، زمان قطع بودن آب زیراب، زمان تناوب و مقدار زیراب، مقدارهای ناخالصی محلول کمینه و بیشینه از معادله‌های (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آیند. این محاسبه‌ها در محیط متکد انجام شده



شکل ۷- مقایسه ناخالصی محلول در حالت زیراب ثابت و متناوب.

شکل ۶ - تغییر ناخالصی آب برج در یک تناوب، مقدار متوسط ناخالصی محلول و مقدار ناخالصی در حالت زیراب ثابت.

$$m_p s_p = m_b s_{b,steady} \quad (18)$$

محاسبه کرد. با فرض برابری زیراب کلی در دو حالت زیراب متناوب و زیراب ثابت، و مقایسه این دو معادله اخیر می‌توان نتیجه‌گیری کرد که:

$$s_{b,steady} = s_{b,ave,-T} = s_{b,ave,t_c-T} \quad (19)$$

به عبارت دیگر متوسط ناخالصی محلول در بازه زمانی T و t_c با مقدار ناخالصی محلول در حالت زیراب ثابت برابر است. با توجه به شکل ۷ متوسط ناخالصی محلول در آب برج در بازه زمانی صفر تا t_c برابر است با:

$$s_{ave,-t_c} = \frac{s_{max} + s_{min}}{2} \quad (20)$$

که این مقدار برابر است با ناخالصی محلول در آب برج در بازه t_c تا T هرگاه ناخالصی محلول از مقدار بیشینه به کمینه به صورت خطی کاهش پیدا نماید. و این مقدار از s_{b,ave,t_c-T} بزرگ‌تر است. مقدار ناخالصی متوسط کل را می‌توان از معادله:

$$s_{ave,-T} = \frac{\left(\frac{s_{max} + s_{min}}{2}\right)(t_c) + s_{b,ave,t_c-T}(T - t_c)}{T} \quad (21)$$

محاسبه نمود.

با عنایت به اینکه $s_{b,ave,t_c-T} > \left(\frac{s_{max} + s_{min}}{2}\right)$ می‌توان رابطه‌های زیر را نتیجه‌گیری نمود:

$$s_{b,ave,-T} \int_0^T \dot{m}_b dt = \int_0^{t_c} \dot{m}_b s_b dt + \int_{t_c}^T \dot{m}_b s_b dt \quad (15)$$

$$s_{b,ave,-T} \int_0^T \dot{m}_b dt = \int_0^{t_c} \dot{m}_b s_b dt + \int_{t_c}^T \dot{m}_b s_b dt$$

ولی مقدار کلی زیراب در فاصله زمانی t_c تا T با شدت جریان ثابت تخلیه می‌شود یعنی:

$$\int_0^T \dot{m}_b dt = \int_0^{t_c} \dot{m}_b dt + \int_{t_c}^T \dot{m}_b dt = \dot{m}_b (T - t_c) \quad (16)$$

حال با توجه به اینکه ناخالصی وارد شده همراه با آب تغذیه تنها در فاصله زمانی $T - t_c$ از برج خارج می‌شود می‌توان معادله (۱۵) را به صورت زیر نوشت:

$$s_{b,ave,-T} \int_0^T \dot{m}_b dt = \int_0^{t_c} \dot{m}_b s_b dt + \int_{t_c}^T \dot{m}_b s_b dt = \dot{m}_b \int_{t_c}^T s_b dt$$

$$\int_0^T \dot{m}_b dt = \int_0^{t_c} \dot{m}_b dt + \int_{t_c}^T \dot{m}_b dt = \dot{m}_b (T - t_c)$$

$$\Rightarrow s_{b,ave,-T} \dot{m}_b (T - t_c) = \dot{m}_b \int_{t_c}^T s_b dt \quad (17)$$

$$\Rightarrow s_{b,ave,-T} (T - t_c) = \int_{t_c}^T s_b dt = s_{b,ave,t_c-T} (T - t_c)$$

$$\Rightarrow s_{b,ave,-T} = s_{b,ave,t_c-T}$$

و از سوی دیگر در حالت زیراب ثابت مقدار ناخالصی محلول در آب برج را می‌توان از معادله:

CT	برج خنک کن
M	مقدار آب در برج خنک کن
\dot{m}_p	شدت جریان جرمی آب تغذیه، kg/s.m^2
\dot{m}_v	شدت جریان جرمی بخار، kg/sm^2
\dot{m}_b	شدت جریان جرمی زیراب، kg/s.m^2
\dot{m}_i	شدت جریان جرمی آب تغذیه به برج i ، kg/s.m^2
\dot{m}_d	نسبت شدت جریان جرمی زیراب و آب هدر رفته با جریان هوا نسبت به شدت جریان آب تبخیر شده
p	مقدار زیراب
p_{av}	مقدار میانگین زیراب در بازه $0-T$ برای زیراب متناوب
s	ناخالصی آب تغذیه، mg/kg
s_p	ناخالصی محلول در زیراب، mg/kg
s_b	ناخالصی میانگین محلول در آب برج خنک‌کن، mg/kg
n	تعداد برج‌های خنک کن که به صورت متوالی متصل شده‌اند.
s_{max}	ناخالصی محلول بیشینه در آب برج، mg/kg
s_{min}	ناخالص محلول کمینه در آب برج خنک کن، mg/kg
t	زمان (s)
t_c	زمان بسته بودن زیراب در یک تناوب
T	زمان تناوب (s)
CT	برج خنک کن
i	زیرنویس ترتیبی
ave	متوسط
steady	پایدار
min	کمینه
min	بیشینه

$$s_{ave,-T} = \frac{\left(\frac{s_{max} + s_{min}}{2}\right)(t_c) + s_{b,ave,t_c-T}(T - t_c)}{T} \quad (22)$$

$$s_{ave,-T} > \frac{s_{b,ave,t_c-T}(t_c) + s_{b,ave,t_c-T}(T - t_c)}{T}$$

$$s_{ave,-T} > s_{b,ave,t_c-T} = s_{b,ave,-T} = s_{steady}$$

با توجه به معادله‌های پیش‌گفته می‌توان نتیجه‌گیری نمود که متوسط ناخالصی محلول در حالت زیراب متناوب، نسبت به زیراب ثابت با زیراب کلی یکسان، بیشتر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش میزان ناخالصی محلول در آب برج خنک‌کن مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد در یک برج خنک‌کن تر با مقدار کلی زیراب ثابت، املاح محلول در آب برج خنک‌کن در حالتی که زیراب ثابت است، از متوسط ناخالصی محلول در آب برج خنک‌کن در حالتی که زیراب متناوب است، کمتر می‌باشد. به عبارت دیگر زیراب ثابت از زیراب متناوب در کاهش ناخالصی محلول در آب برج خنک‌کن مؤثرتر است.

بررسی‌ها نشان داد که هرگاه در چند برج خنک‌کن که به صورت متوالی آب زیراب اولی، تغذیه آب برج خنک‌کن بعدی را تشکیل می‌دهد میزان ناخالصی محلول در آب برج‌های خنک‌کن کاهش خواهد یافت. در یک مورد نشان داده شد که با مقدار زیراب معادل بیست درصد تبخیر، متوسط ناخالصی محلول برای برج‌های خنک‌کن ۲،۷۴ برابر ناخالصی آب تغذیه برج اول به دست می‌آید. حال آن‌که این مقدار برای برج‌هایی که آب تغذیه و زیراب مستقل دارند، برابر ۶ محاسبه می‌شود.

نمادها

VVER	نوع روسی نیروگاه اتمی با آب تحت فشار
PGV	مولد بخار افقی نیروگاه اتمی VVER

مراجع

- [1] Romm E.I., "Chemical Displacement and Evaporation in Steam Generators", Doctorate Thesis, VTE, 175 p (1938).
- [2] Стыркович М.А., О применении ступенчатого испарения при кипении котлов конденсатом. *Электрические Станции*. 175 с (1951).

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۶/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۶/۲۲

- [3] Жирнов Н. И., Кот от А.А. Непрерывная из котлов лысого давления. *Электрические Станции*, **2**: 23-27 (1965).
- [4] Марголова Т. Х. Реконструкция котлов леффлева для перевода их на ступенчатое испарение. *Тр. Ин-та / МЭИ, Вып*, **25**: 133-143 (1955).
- [5] Горбуров В. И., Эорин В. М., Хритонов, Ю. В., О контроле водного режима парогенерирующих устройств. *Теплоэнергетика*, **7**, 25-0 (1994).
- [6] Сиряпина Л. А., Маргулова Т. Х., Повышение эффективности продувки парогенераторов АЭС с ВВЭР. *Теплоэнергетика*. **6**, 59-60 (1984).
- [7] Fedorov A. I., [A Method for Calculating the Staged Evaporating Systems in Drum Boilers with Double-Side Salt Sections](#), *Thermal Engineering*, **54** (4): 301-309 (2007).
- [8] Gorburov V. I. Kutdyusov, Yu. F., Bud'koa I. O., Makartseva A. N., Ulanova A. V., Rusakova M. V., Anurkina R. P., Sal'nikov A. A., Zhukov A. G Beklemyshev, E. I. Belyaev A. N., Trunov N. B., and Kharchenkoc S. A., [Distribution of Impurities in Steam_Generating Equipment with Estimating the Efficiency of Their Removal during the Power Unit Shutdown Process](#), *Atomic Energy*, **108**(2), (2010).
- [9] Гуцев Д. Ф., Козов Ю. В., Некрасов А. В., Титов В. Ф., Тараконов Г. А., О концентрации растворимых примесей в водяном объеме парогенератора ПГВ-1000. *Теплоэнергетика*, **12**: 62-63 (1987).
- [10] Слтник А. Ф. Эффективность продувки парогенераторов ПГВ-1000. *Теплоэнергетика*, 66-67 (1988).
- [11] Козлов Ю. В., Румянцев Л.К., Свистонов П. Е., Севастьянов, В. П. И др., Распределение растворимых примесей питательной воды в водяном объеме парогенератора ПГВ-1000 *Электрические Станции*, **2**: 33-37 (1992).
- [12] Козлов Ю. В., Свистонов П. Е., Траканов Г. А. И др., Исследование распределения солей в водяном объеме парогенераторов ПГВ-1000М с модернизированными системами раздачи питательной воды и продувки. *Электрические Станции*, **9**: 30-32 (1991).
- [13] Gorburov V.I., Zorin V.M., Khritonov U.V. Distribution Soluble Impurities in Water Volume of the Steam Generating Equipment, *Vestnik MPEI*, **3**: 41-50 (1996).
- [14] Gorburov V.I. Zorin V.M., Doctors, Kaverznev M.M., Khaaneki M., Engineers MPEI [On the Evaporation in Steam Generating Plants](#), *Thermal Engineering*, **3**: 55-58 (1997).
- [15] خانکی، منصور؛ [ارایه یک مدل دوبعدی جهت توزیع ناخالصی محلول در مولد بخار PGV-1000](#)، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴)۲۶: ۸۱ تا ۹۲ (۱۳۸۶).
- [16] Jahanfarnia G., Tashakor S., Karkhi N., Abrishami A., [New Multistage Evaporation Plan in PGV-1000 Steam Generators](#), *Annals of Nuclear Energy*, **54**: 43-46 (2013).
- [17] Jameel-Ur-Rehman Khan, M Yaqub, Syed M. Zubair, [Performance Characteristics of Counter Flow Wet Cooling Towers](#), *Energy Conversion and Management*, **44**(13): 2073-2091 (2003).

- [18] Johannes C. Kloppers, Detlev G. Kroger, [Loss Coefficient Correlation for Wet-Cooling Tower Fills](#), *Applied Thermal Engineering*, **23**(17): 2201-2211 (2003).
- [19] Rafat Al-Waked, Masud Behnia, [CFD Simulation of Wet Cooling Towers](#), *Applied Thermal Engineering*, **26**(4): 382-395 (2006).
- [20] Williamson N., Armfield S., Behnia M., [Numerical Simulation of Flow in a Natural Draft Wet Cooling Tower - The Effect of Radial Thermofluid Fields](#), *Applied Thermal Engineering*, **28**(2-3): 178-189 (2008).
- [۲۱] جعفر کاظمی، فرزاد؛ آهنگری، علیرضا؛ رحیمی، بیژن؛ تحلیل انتقال حرارت و جرم در یک برج خنک‌کن باز، علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک (دانشکده مهندسی) (۱) ۲۱، ۵۹ تا ۷۴ (۱۳۸۸).
- [۲۲] جعفر کاظمی، فرزاد؛ آهنگری، علیرضا؛ تحلیل عملکرد برج خنک‌کن باز توسط دو مدل حاضر و برج نفوذی و ارزیابی این دو مدل در یک برج انباشته، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۲۹: ۸۵ تا ۹۹ (۱۳۸۹).
- [۲۳] معموری، امیررضا؛ گشایشی، حمیدرضا؛ بررسی اثر پرکن بر روی افت دما و فشار در برج خنک‌کن با جریان غیرهمسو مکانیکی، مهندسی مکانیک مجلسی، (۳) ۴: ۳۹ تا ۴۵ (۱۳۹۰).
- [24] Jng-Jing, Xiao_Hua Liu, Yi Jiang, [Experimental and Numerical Analysis of a Cross-Flow Closed Wet Cooling Tower](#), *Applied Thermal Engineering*, **61**(2): 678-689 (2013).
- [25] Ming Gao, Feng-zhong Sun, Kai Wang, Yue-tao Shi, Yuan-bin Zhao, , [Experimental Research of Heat Transfer Performance on Natural Draft Counter Flow Wet Cooling Tower under Cross-Wind Conditions](#), *International Journal of Thermal Sciences*, **47**(7): 935-941 (2008).
- [26] Lemouri M., Boumaza M., [Experimental Investigation of the Performance Characteristics of a Counterflow Wet Cooling Tower](#), *International Journal of Thermal Sciences*, **48**(10): 2049-2056 (2010).
- [27] Wei-Ye Zheng, Dong-Sheng Zhu, Guo-YYan Zhou, Jia-Fei Wu, Yun-Yi Shi, [Thermal Performance Analysis of Closed Wet Cooling Towers under Both Unsaturated and Supersaturated Conditions](#), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**(25-26): 7803-7811 (2012).
- [28] Thirapong Muangnoi, Wanchai Asvapoositkul, Somchai Wongwises, [Effect of Inlet Relative Humidity and Inlet Temperature on the Performance of Counterflow Wet Cooling Tower Based on Exergy Analysis](#), *Energy Conversion and Management*, **49**(10): 2795-2800 (2008).
- [29] Papaefthimiou V.D., Rogdakis E.D., Koronaki I.P., Zannis T.C., [Thermodynamic Study of the Effects of Ambient Air Conditions on the Thermal Performance Characteristics of a Closed Wet Cooling Tower](#), *Applied Thermal Engineering*, **33-34**: 199-207 (2012).