

مروری بر اثر نانوسیالات در کاهش میزان هدررفت آب و بهبود مشخصه‌های حرارتی در برج‌های خنک‌کن

فاطمه راضی آستارایی^{۱*}، سید علی موسوی^۲

۱. استادیار دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۹/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۴/۰۳)

چکیده

در بیشتر کارخانه‌ها، برج‌های خنک‌کن جزء کاربردی‌ترین تجهیزات هستند که برای حذف حرارت اضافی در فرایند و پس‌دادن آن به محیط استفاده می‌شوند. مقاله حاضر یک مرور اجمالی بر روش‌های نوین در حوزه تأثیر انواع نانوسیالات بر بهبود خواص حرارتی و کاهش میزان هدررفت آب است. نانوسیالات می‌توانند خواص حرارتی همچون ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب رسانش حرارتی را بهبود بخشند و سبب افزایش ویسکوزیته و چگالی در مقایسه با سیال پایه شوند. پراکنده‌شدن نانوذره سبب افزایش کشش سطحی نانوسیال شده و مقاومت در برابر تبخیرشدن آب افزایش می‌یابد. بنابراین، در مقاله حاضر تأثیر نانوسیالات روی اکساید/آب، گرافیت نانوپروس/آب، آلومینا/آب، تیتانیوم اکساید/آب و مس اکساید/آب را با غلظت‌های متفاوت بر بهبود عملکرد برج‌های خنک‌کن بررسی می‌شود. در تحقیقات مشاهده‌شده با استفاده از نانوسیالات مشخصه‌هایی از جمله میزان خنک‌کردن، مشخصه برج خنک‌کن، ضریب انتقال حرارت حجمی و بازده بهبود می‌یابد. بهترین نمونه گزارش شده در مقالات انجام‌شده، استفاده از نانوسیال روی اکساید/آب با غلظت‌های ۰/۰۲ و ۰/۰۵ wt% است که ویژگی مشخصه حرارتی را به ترتیب به میزان ۲۱/۵ و ۲۲/۵ درصد در مقایسه با آب خالص بهبود داده بود. در ادامه، نتایج آنالیز حساسیت در تحقیقات صورت گرفته تحلیل و بررسی می‌شود.

کلیدواژه‌گان: برج خنک‌کن، عملکرد حرارتی، نانوسیال، هدررفت آب.

مقدمه

برج خنک‌کن^۱ وسیله‌ای برای دفع حرارت اضافی از آب است تا آب به دمای پایین‌تری برسد [۱]. برج‌های خنک‌کن در نیروگاه‌های حرارتی، سیستم‌های تهویه هوا، تصفیه روغن، واحدهای پتروشیمی و سایر کارخانه‌های شیمیایی به کار برده می‌شوند [۱]. براساس تماس بین آب گرم و جریان هوا، برج‌های خنک‌کن به دو دسته خشک و مرطوب تقسیم می‌شوند [۱]. در برج‌های خنک‌کن خشک هیچ‌گونه تماس مستقیمی بین آب و هوا وجود ندارد. در حقیقت، این نوع برج‌ها شبیه مبدل حرارتی پوسته-لوله‌ای هستند [۲] که آب گرم داخل لوله‌ها قرار دارد و جریان هوا از میان لوله‌ها می‌گذرد. در برج‌های خنک‌کن مرطوب تماس مستقیم بین هوا و آب وجود دارد. به بیان دیگر، در این نوع برج‌ها انتقال حرارت و جرم بین آب و هوا صورت می‌گیرد. بهبود عملکرد برج‌های خنک‌کننده را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد: بررسی اجزای فیزیکی برج، شرایط عملیاتی و شرایط محیطی [۳].

پکینگ‌ها سطح بسیار وسیعی را برای انتقال جرم و حرارت فراهم می‌کنند و کارکرد بسیار مهمی در برج خنک‌کن دارند [۳] مهم‌ترین اجزای برج خنک‌کن عبارتند از: پکینگ، سیستم توزیع آب در بالای برج، حذف‌کننده قطره از خروجی هوای برج، پمپ و جداکننده‌های ناخالصی در ورودی برج. نمایی از یک برج خنک‌کن مرطوب در شکل ۱ نشان داده شده است [۳].

در برج‌های خنک‌کن دو مورد بسیار مهم برای محققان اهمیت دارد: بهبود مشخصه‌های حرارتی و کاهش هدررفت آب. بهبود مشخصه‌های حرارتی سبب افزایش کارایی و بیشتر خنک‌کردن آب می‌شود. از طرفی، هنگام تبادل حرارت و جرم بین آب و هوا، میزان آب بخار شده درخور توجه است که می‌توان با اضافه کردن نانوذره و تغییر میزان کشش سطحی، میزان آب اتلافی را کاهش داد. معمولاً، محققان برای حل این دو مشکل اساسی، دو موضوع را بررسی می‌کنند: استفاده از پکینگ‌های متفاوت و استفاده از نانوسیالات متفاوت به جای آب خالص [۱ و ۳-۵]. از این رو، در مقاله حاضر ابتدا تحقیقات صورت گرفته در حوزه استفاده از نانوسیال به جای آب خالص به همراه شرایط عملیاتی، به طور خلاصه بیان می‌شود. در ادامه، پس از ارائه روابط استفاده شده در تحقیقات،

نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت شرح داده شده و تجزیه و تحلیل می‌شوند.

پیشینه تحقیق

محققان از پکینگ‌هایی با جنس متفاوت استفاده کرده و نتایج مربوط به هر یک را با هم مقایسه می‌کنند. از آنجا که هدف مقاله بررسی تأثیر نانوسیالات است، به موضوع اثر پکینگ‌ها پرداخته نمی‌شود. استفاده از نانوسیالات یک روش نوین است که با پیشرفت چشمگیر تکنولوژی نانو در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نانوسیالات از دو بخش تشکیل شده‌اند: سیال پایه مانند آب، روغن، اتیلن گلیکول و... و نانوذرات مانند Cu ، Ag ، CuO ، Al_2O_3 و... که در سیال پایه به روش‌های گوناگون پراکنده شده و تشکیل یک سوسپانسیون پایدار می‌دهند [۶]. در نانوسیالات ضریب رسانش حرارتی (K) [۷] و چگالی (ρ) [۸] افزایش می‌یابد. بنابراین، عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشند و مقدار هدررفت آب را کاهش می‌دهند. بیشترین نانوذره‌هایی که در برج‌های خنک‌کن استفاده می‌شوند، عبارتند از: ZnO ، CuO ، TiO_2 ، AL_2O_3 [۱ و ۳-۵].

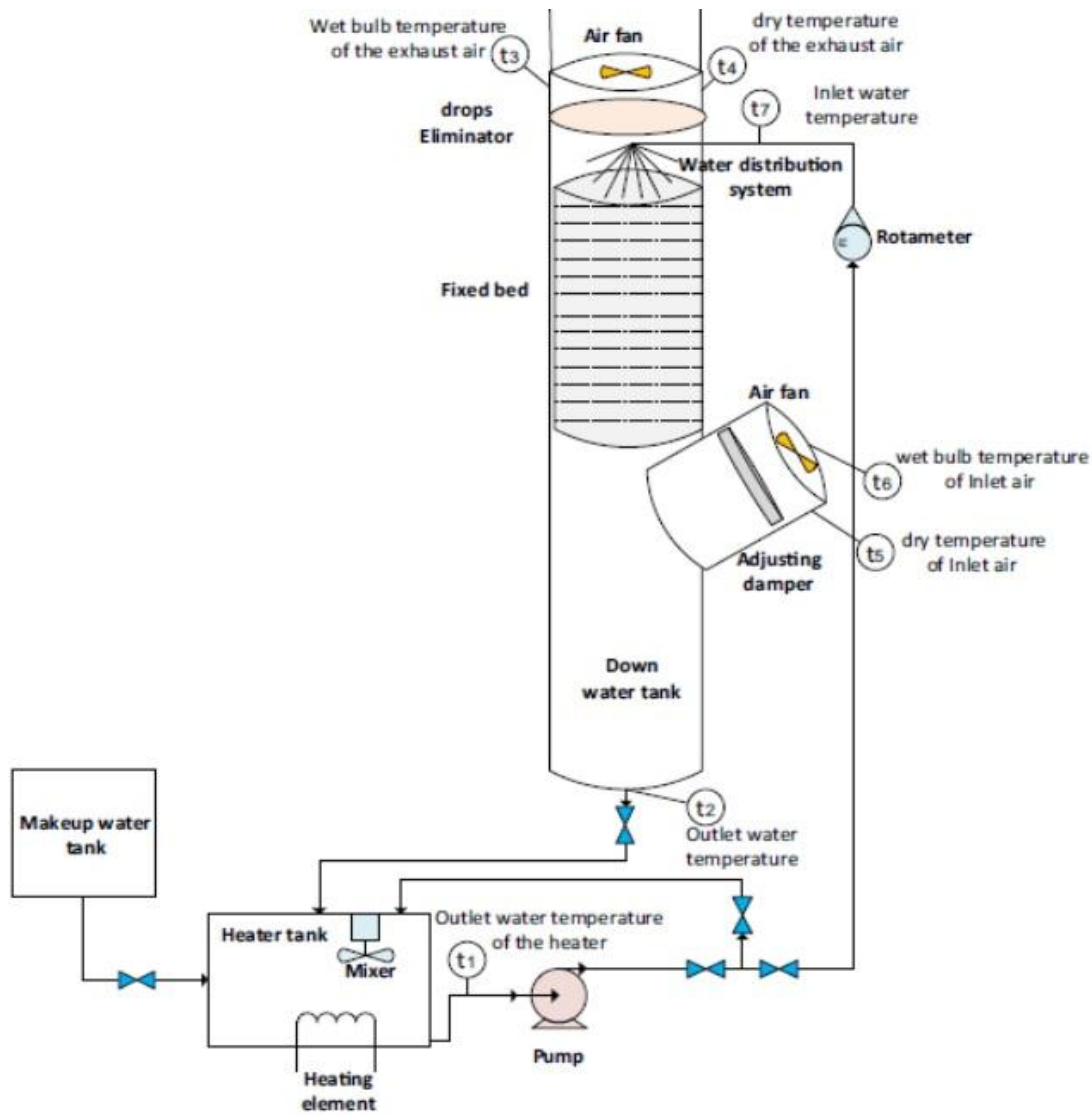
روش کار

در تحقیق حاضر برخی آزمایش‌ها و تحقیقات پژوهشگران در زمینه اثر استفاده از نانوسیالات به منظور بهبود عملکرد برج‌های خنک‌کن بیان می‌شود. محققان روی نانوسیالات مختلف (با غلظت‌های مختلف) همچون روی اکساید/آب (ZnO/water)، گرافیت نانوپروس/آب ($\text{nonporous graphene}$)، آلومینا/آب ($\text{AL}_2\text{O}_3/\text{water}$)، تیتانیوم اکساید/آب ($\text{TiO}_2/\text{water}$) و مس اکساید/آب (CuO/water) آزمایش کردند. نتایج نشان داد استفاده از نانوسیالات به بهبود عملکرد برج منجر می‌شود. بنابراین، در این قسمت ابتدا برای تعریف و معرفی پارامترهای مهم برج خنک‌کن، روابط استفاده شده در تحقیقات بیان می‌شود و در ادامه به طور خلاصه تحقیقات آزمایشگاهی محققان به همراه شرایط عملیاتی در جدول ۱ به طور خلاصه ارائه می‌شود.

روابط استفاده شده در تحقیقات به شرح زیر است:

اختلاف دمای بین آب ورودی و آب خروجی برج خنک‌کن را میزان خنک‌کردن می‌گویند که به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۹]:

1. Tower characteristic



شکل ۱. نمایی از یک برج خنک‌کن مرطوب به همراه تمامی تجهیزات آن [۳]

$$\varepsilon = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{t_{a,wet1} - t_{w2}} \quad (3)$$

که در آن t_{w1} و t_{w2} به ترتیب دمای ورودی و خروجی آب، دمای خروجی آب و دمای حباب مرطوب هوای ورودی هستند.

ضریب انتقال حرارت برج خنک‌کن را نیز می‌توان به صورت رابطه ۴ محاسبه کرد [۴]:

$$\alpha = \frac{C_{pa} m_a}{A} \ln \left(\frac{t_w - t_{a,in}}{t_w - t_{a,out}} \right) \quad (4)$$

که در آن t_w ، A ، C_{pa} ، m_a و $t_{a,in}$ و $t_{a,out}$ به ترتیب دبی جرمی هوا، ظرفیت گرمایی ویژه هوا، سطح انتقال حرارت یا جرم، دمای آب، دمای هوای ورودی و دمای هوای خروجی هستند.

$$t_{drop} = t_{w1} - t_{w2} \quad (1)$$

که در آن t_{w1} و t_{w2} به ترتیب دمای ورودی و خروجی آب هستند.

مشخصه برج خنک‌کن، که بسیار در آنالیز عملکرد حرارتی کاربردی است، در رابطه ۲ نشان داده شده است [۱۰]:

$$TC = \int_{t_{w2}}^{t_{w1}} C_{pw} dt / (h_{as} - h_a) \quad (2)$$

که در آن C_{pw} ، h_{as} و h_a به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه آب، آنتالپی اشباع هوا در دمای t_w و آنتالپی هوا هستند. راندمان یک برج خنک‌کن به صورت نسبت اختلاف دمای آب ورودی و خروجی برج به بیشترین اختلاف دمای ممکن بیان می‌شود که می‌تواند ایجاد شود (رابطه ۳): [۱۱].

برای محاسبه میزان خنک کردن، مشخصه برج خنک کن، ضریب انتقال حرارت حجمی و بازده به صورت تابعی از درصد حجمی (φ) پیشنهاد دادند که در روابط ۶-۹ بیان می شود:

$$t_{drop} = 375.0\varphi^3 - 394/\varphi^2 + 17/9\varphi + 14/9 \quad (6)$$

$$TC = -62963\varphi^5 + 14780\varphi^3 - 1246/7\varphi^2 + 43/1\varphi + 2/1 \quad (7)$$

$$h_a = -3.5404\varphi^4 + 7.929\varphi^3 - 5894/7\varphi^2 + 2.01/8\varphi + 1.0/1 \quad (8)$$

$$\varepsilon = -749.0/5\varphi^4 + 161.0/1\varphi^3 - 111/9\varphi^2 + 3/1\varphi + 0/5 \quad (9)$$

همچنین، ظرفیت گرمایی ویژه یک مخلوط (در اینجا نانوسیال) تابعی خطی از غلظت و ظرفیت گرمایی ویژه اجزای تشکیل دهنده است که می توان به صورت رابطه ۵ بیان کرد [۱۲].

$$C_{Pnf} = \varphi C_{Pnp} + (1 - \varphi) C_{Pbf} \quad (5)$$

که در آن φ ، C_{Pnp} و C_{Pbf} به ترتیب درصد حجمی نانوذره، ظرفیت گرمایی ویژه نانوذره و ظرفیت گرمایی ویژه سیال پایه هستند.

در سال ۲۰۱۶ پیمان ایمانی مفرد و همکارانش [۳]، با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیقاتشان روابطی تجربی

جدول ۱. ارائه انواع و غلظت های نانوسیالات استفاده شده در آزمایش ها به همراه شرایط عملیاتی

مرجع	شرایط عملیاتی	ویژگی های نانوذره	غلظت	نانوسیال
[۳]	نانوسیال به روش دومرحله ای سنتز شده و شش پکینگ متفاوت با جنس های متفاوت استفاده شده است ۲۶ = دمای محیط (°C) ۴۸ = رطوبت نسبی هوای ورودی (%) ۱/۸ = دبی جرمی مایع (kg/min) ۱/۸ = دبی جرمی هوا (kg/min)	فرمول شیمیایی: ZnO رنگ: سفید شیری شکل: کره ۱۰-۳۰: قطر میانگین (nm) ۹۹/۸ درصد >: درجه خلوص ۱۲۰-۸۰: سطح ویژه (m ² /g) ۵/۶۰۶: چگالی (g/cm ³) ۰/۵۱: ظرفیت گرمایی ویژه (J/g °C)	۰/۱-۰/۰۲ wt% ۰/۰۸، ۰/۰۵، ۰/۰۲ و ۱ (درصد)	ZnO/water
[۴]	نانوسیال به روش دومرحله ای سنتز شده است ۷۰۰ = CWCT (mm) طول لوله ۱۲ = قطر خارجی (mm) ۱ = ضخامت دیواره (mm) شرایط عملیاتی اسمی: ۱/۵ = دبی جرمی مایع (Kg/s) ۴۳ = دمای آب ورودی (°C) ۳۰ = دمای سیال اسپری شده (°C) ۲/۲۵ = سرعت هوای ورودی (m/s) ۱۰ = دمای هوای ورودی (°C)	فرمول شیمیایی: Al ₂ O ₃ رنگ: سفید ۱۰، ۳۰، ۸۰: اندازه میانگین	0/1-1 wt% ۰/۸، ۰/۵، ۰/۳، ۰/۱ و ۱ (wt %)	Al ₂ O ₃ /water
[۵]	۶۰ = دمای آب ورودی (°C) ۳۰ = دمای آب خروجی (°C) ۲۰ = دمای حباب مرطوب محیط (°C) ۲۶ = دمای حباب خشک محیط (°C) ۵۰ = دبی جرمی آب ورودی (Kg/s) ۲۴ = سطح پکینگ (m ²) ۳ = ارتفاع پکینگ (m)	AL ₂ O ₃ : ρ(Kg/m ³) = ۳۹۷۰ C _p (J/Kg-K) = ۷۵۰ TiO ₂ : ρ(Kg/m ³) = ۴۱۵۷ C _p (J/Kg-K) = ۷۱۰ CuO: ρ(Kg/m ³) = ۶۵۱۰ C _p (J/Kg-K) = ۵۴۰	۲/۴ vol%	AL ₂ O ₃ / water , TiO ₂ /water و CuO/water
[۱]	نانوسیال به روش دومرحله ای سنتز شده است ۴/۶۶، ۳/۵۳ = دبی جرمی مایع (kg/min) و ۵/۶۹ ۴/۱۲۵ = دبی جرمی هوا (kg/min) ۴۰، ۴۵ = دمای آب ورودی (°C)	۲۰-۱۰: قطر میانگین (nm) ۱۰ (µm): طول میانگین	۰/۱ wt%	MWNTs/water nanoporous grapheme/water

یافته‌ها

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، مشاهده شد که با استفاده از نانوسیالات با غلظت‌های متفاوت می‌توان دو چالش موجود در برج‌های خنک‌کن را تا حدود زیادی برطرف کرد. حال در این قسمت نتایجی که توسط محققان به دست آمده است، به طور خلاصه بیان می‌شود:

پیمان ایمانی مفرد و همکارانش [۳] به منظور بهبود خواص حرارتی روی نانوسیال روی اکساید/آب (ZnO/water) (با غلظت‌های ۰/۰۸ wt%، ۰/۰۵ و ۰/۱) در شش نوع پکینگ مختلف رتیکال فلزی، پلاستیکی پائول، شش‌ضلعی فلزی دایره‌ای، صفحه‌ای چهارضلعی توری فلزی، توری فلزی مدور و صفحه‌ای فلزی موج‌دار تحقیق کردند که نتایج آن عبارت است از:

غلظت ۰/۰۸ wt%

- میزان خنک‌کردن با استفاده از نانوسیال روی اکساید/آب (ZnO/water) در مقایسه با آب خالص افزایش یافت (به طور مثال، میزان خنک‌کردن با استفاده از نانوسیال و آب خالص در پکینگ رتیکال فلزی به ترتیب $15/8$ و 15 محاسبه شد). از طرفی، بیشترین میزان افزایش در پکینگ صفحه‌ای چهارضلعی توری فلزی به میزان 1°C رخ داد.
- مشخصه برج خنک‌کن با استفاده از نانوسیال روی اکساید/آب (ZnO/water) در مقایسه با آب خالص افزایش یافت (به طور مثال، مشخصه برج خنک‌کن با استفاده از نانوسیال و آب خالص در پکینگ رتیکال فلزی به ترتیب $2/7$ و $2/3$ محاسبه شد). از طرفی، بیشترین میزان افزایش در پکینگ صفحه‌ای چهارضلعی توری فلزی به میزان $0/5$ رخ داد.
- ضریب انتقال حرارت حجمی با استفاده از نانوسیال روی اکساید/آب (ZnO/water) در مقایسه با آب خالص افزایش یافت (به طور مثال، ضریب انتقال حرارت حجمی با استفاده از نانوسیال و آب خالص در پکینگ رتیکال فلزی به ترتیب $12/3$ و $8/7$ محاسبه شد). از طرفی، بیشترین میزان افزایش در پکینگ صفحه‌ای چهارضلعی توری فلزی به میزان 4 W/m^3 $^{\circ}\text{C}$ گزارش شد.
- راندمان با استفاده از نانوسیال روی اکساید/آب

(ZnO/water) در مقایسه با آب خالص افزایش یافت (به طور مثال، ضریب انتقال راندمان با استفاده از نانوسیال و آب خالص در پکینگ رتیکال فلزی به ترتیب 60 و 56 درصد محاسبه شد). از طرفی، بیشترین میزان افزایش در پکینگ شش‌ضلعی توری فلزی مدور به میزان $4/5$ درصد رخ داد.

غلظت ۰/۰۵ wt%

• مشخصه برج خنک‌کن با استفاده از نانوسیال حدود $22/5$ درصد افزایش یافت. نتایج نشان داد مشخصه برج خنک‌کن با استفاده از غلظت $0/05$ درصد بهبود یافت، ولی در غلظت‌هایی بیشتر از این مقدار، شیب افزایش مشخصه برج خنک‌کن کاهش پیدا کرد.

غلظت ۰/۱ wt%

میزان خنک‌کردن با استفاده از نانوسیال در مقایسه با آب خالص حدود 11 درصد افزایش یافت. درخور یادآوری است که استفاده از غلظت‌هایی بیشتر از $0/1$ درصد، موجب مشکل رسوب در برج خنک‌کن می‌شود/ مشخصه برج خنک‌کن و بازده نیز با استفاده از نانوسیال به ترتیب $14/9$ و $9/5$ درصد افزایش یافت.

در نهایت، با توجه به نتایج، بهترین نتیجه با استفاده از غلظت $0/1$ درصد به دست آمد. مشاهده شد که با افزایش بیشتر غلظت، دمای آب خروجی تقریباً ثابت می‌ماند. طبق نتایج به دست آمده، بازده برج خنک‌کن با افزایش غلظت و نسبت مایع به هوا به ترتیب افزایش و کاهش یافت. همچنین، افزایش نسبت مایع به هوا میزان خنک‌کردن را کاهش می‌دهد.

کیسوا سویی کیسه و همکارانش [۴] روی نانوسیال آلومینا/آب ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$) (با غلظت $0/5$ درصد) برای بهبود مشخصه‌های حرارتی تحقیق کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد بازده برج خنک‌کن و ضریب انتقال حرارت به ترتیب حدود 19 و 20 درصد در مقایسه با آب خالص افزایش یافت. افزایش دبی جرمی مایع نیز این دو مشخصه را بهبود بخشید.

دمای خروجی هوا و اختلاف رطوبت به ترتیب $4/8$ و 18 درصد در مقایسه با آب خالص افزایش یافت. نسبت اختلاف رطوبت نیز در مقایسه با آب خالص $10/5$ درصد کاهش یافت.

مشخصه‌های حرارتی تحقیق کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد در دمای آب ورودی 45°C و نسبت دبی جرمی آب به هوای (L/G) $1/37$ ، میزان خنک‌کردن برای $\text{nanoporous grapheme/water}$ و MWNTs/water به ترتیب 40 و 67 درصد افزایش یافت. ضریب رسانش حرارتی به ترتیب 20 و 16 درصد افزایش یافت. میزان هدررفت آب نیز به ترتیب 10 و 19 درصد نسبت به آب خالص کاهش یافت.

نتایج به دست آمده برای میزان خنک‌کردن در نسبت دبی جرمی آب (L) به دبی جرمی هوا (G) $1/13$ و در دماهای ورودی 33 ، 40 و 45°C در جدول ۲ خلاصه شده است:

جدول ۲. میزان خنک‌کردن آب خالص، $\text{nanoporous grapheme/water}$ و MWNTs/water در دماهای ورودی 33 ، 40 و 45°C

برگرفته از [۱]

دمای ورودی ($^{\circ}\text{C}$)	آب خالص ($^{\circ}\text{C}$)	MWNTs/water ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{nanoporous grapheme/water}$ ($^{\circ}\text{C}$)
۳۳	۴/۳	۵/۸	۶/۹
۴۰	۶/۶	۷/۲	۸/۳
۴۵	۷/۴	۱/۴	۱۲/۴

آنها همچنین روی تأثیر نانوسیال بر هدررفت آب نیز تحقیقاتی انجام دادند. طبق نتایج به دست آمده میزان هدررفت آب با استفاده از نانوسیال کاهش یافت. به خصوص پس از گذشت 100 دقیقه میزان کاهش بسیار محسوس بود و گرافن نیز تأثیر بیشتری نسبت MWNTs داشت.

کیساو سویی کیسه و همکارانش [۴]: بنا به نتایج به دست آمده هرچه دبی جرمی مایع افزایش یابد، ضریب انتقال حرارت برج نیز افزایش می‌یابد. آنها تغییرات ضریب انتقال حرارت را با دبی‌های جرمی مختلف ($0/222$ ، $0/139$ ، $0/83$ و $0/306$ کیلوگرم بر ثانیه) و غلظت‌های مختلف ($0/1$ ، $0/3$ ، $0/5$ ، $0/8$ و 1 درصد) نانوسیال آلومینا/آب ($\text{AL}_2\text{O}_3/\text{water}$) بررسی کردند. بهترین نتیجه برای غلظت $0/5$ درصد در تمامی دبی‌ها حاصل شد. همچنین، تحقیقات روی پیشرفت راندمان برج نیز انجام شد که بهترین نتیجه برای غلظت $0/5$ درصد در تمامی دبی‌ها به دست آمد. سرعت هوا نیز جز پارامترهای تأثیرگذار است. به همین سبب تأثیر سرعت‌های مختلف ($3/93$ ، $2/3$ ، $1/37$ و $1/68$ متر بر ثانیه) برای هوای ورودی بررسی شد. مشاهده شد که

محسن گودرزی و محسن کیاست [۵] روی نانوسیالات آلومینا/آب ($\text{AL}_2\text{O}_3/\text{water}$)، تیتانیوم اکساید/آب ($\text{TiO}_2/\text{water}$) و مس اکساید/آب (CuO/water) (با غلظت‌های 2 و 4% (vol) به منظور کاهش هدررفت آب تحقیق کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد:

$2\text{vol}\% \text{AL}_2\text{O}_3/\text{water}$

حجم آب اتلافی طی روز در رطوبت نسبی‌های مختلف و دبی جرمی‌های مختلف به ترتیب 15 هزار و 35 هزار lit/day کاهش یافت.

عسکری و همکارانش [۱۱] روی دو نانوسیال $\text{nanoporous grapheme/water}$ و MWNTs/water (با غلظت $0/1$ wt%) به منظور کاهش هدررفت آب و بهبود

بحث

حال در این بخش به تحلیل و بحث در زمینه نتایجی که در تحقیقات پژوهشگران به دست آمده، پرداخته می‌شود: عسکری و همکارانش [۱]: بنا به نتایج به دست آمده هرچه نسبت دبی جرمی مایع به هوا افزایش یابد، میزان خنک‌کردن و راندمان کاهش می‌یابد. آزمایش‌های انجام شده در دماهای ورودی 33 ، 40 و 45°C و نسبت دبی جرمی مایع به هوا ثابت صورت گرفت و نتایج زیر به دست آمد: میزان خنک‌کردن ($\Delta T(^{\circ}\text{C})$):

$\text{Graghene} (T = 45^{\circ}\text{C}) > \text{MWNTs} (T = 45^{\circ}\text{C}) > \text{Graghene} (T = 40^{\circ}\text{C}) > \text{MWNTs} (T = 45^{\circ}\text{C}) > \text{MWNTs} (T = 40^{\circ}\text{C}) > \text{Graghene} (T = 33^{\circ}\text{C}) > \text{MWNTs} (T = 33^{\circ}\text{C}) > \text{آب} (T = 33^{\circ}\text{C})$.

بازده (E) برای نسبت دبی جرمی 1 تا $4/1$:

$\text{Graghene} (T = 45^{\circ}\text{C}) > \text{Graghene} (T = 40^{\circ}\text{C}) > \text{Graghene} (T = 33^{\circ}\text{C}) > \text{MWNTs} (T = 45^{\circ}\text{C}) > \text{MWNTs} (T = 40^{\circ}\text{C}) > \text{MWNTs} (T = 33^{\circ}\text{C}) > \text{آب} (T = 45^{\circ}\text{C}) > \text{آب} (T = 40^{\circ}\text{C}) > \text{آب} (T = 33^{\circ}\text{C})$.

با غلظت ۲ vol % در رطوبت‌های نسبی متفاوت (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد) بررسی شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، افزایش رطوبت نسبی سبب کاهش میزان هدررفت آب می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۴ به طور خلاصه بیان شده است.

درنهایت، تأثیر نانوسیال آلومینا/آب ($Al_2O_3/water$) با غلظت ۲ vol %، نیز در دبی‌های مختلف (۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر ثانیه) مایع بررسی شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، افزایش دبی جرمی سبب افزایش میزان هدررفت آب می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است: استفاده از نانوسیال این میزان هدررفت را کاهش داد، به‌خصوص در دبی‌های بیشتر از ۸۰ Kg/s بسیار این تأثیر محسوس بود. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۵ به طور خلاصه بیان شده است.

ضریب انتقال حرارت و بازده با افزایش سرعت، افزایش می‌یابند.

محسن گودرزی و محسن کیاست [۵] روی تأثیر نانوسیالات آلومینا/آب ($Al_2O_3/water$)، تیتانیوم اکساید/آب ($TiO_2/water$) و مس اکساید/آب ($CuO/water$) با غلظت‌های (۱-۴ vol %) بر کاهش میزان هدررفت آب (Lit/day) تحقیق کردند. طبق نتایج به‌دست‌آمده هرچه غلظت نانوسیال افزایش یابد، میزان هدررفت آب کاهش خواهد یافت. در ضمن در یک غلظت ثابت، نانوسیال مس اکساید/آب ($CuO/water$) بیشترین تأثیر را بر کاهش میزان هدررفت آب داشت. با استفاده از آب خالص میزان هدررفت آب $1/85 \times 10^5$ Lit/day تخمین زده شد. این میزان با استفاده از نانوسیالات با غلظت‌های مختلف در جدول ۳ خلاصه شده است. همچنین، تأثیر نانوسیال آلومینا/آب ($Al_2O_3/water$)

جدول ۳. میزان هدررفت آب با استفاده از نانوسیالات در غلظت‌های مختلف [۵]

غلظت (φ) %	CuO/water (Lit/day)	AL ₂ O ₃ / water (Lit/day)	TiO ₂ /water (Lit/day)
۱	$1/7 \times 10^5$	$1/76 \times 10^5$	$1/76 \times 10^5$
۲	$1/6 \times 10^5$	$1/7 \times 10^5$	$1/7 \times 10^5$
۳	$1/5 \times 10^5$	$1/64 \times 10^5$	$1/62 \times 10^5$
۴	$1/42 \times 10^5$	$1/64 \times 10^5$	$1/56 \times 10^5$

جدول ۴. میزان هدررفت آب با استفاده از نانوسیال آلومینا/آب و آب خالص در رطوبت‌های نسبی مختلف [۵]

رطوبت نسبی (RH) %	آب خالص (Lit/day)	AL ₂ O ₃ / water (Lit/day)
۲۰	$2/04 \times 10^5$	$1/88 \times 10^5$
۴۰	$1/94 \times 10^5$	$1/78 \times 10^5$
۶۰	$1/84 \times 10^5$	$1/7 \times 10^5$
۸۰	$1/74 \times 10^5$	$1/6 \times 10^5$

جدول ۵. میزان هدررفت آب با استفاده از نانوسیال آلومینا/آب و آب خالص در دبی‌های جرمی مایع مختلف [۵]

دبی جرمی مایع L(Kg/s)	آب خالص (Lit/day)	AL ₂ O ₃ / water (lit/day)
۴۰	$1/4 \times 10^5$	$1/4 \times 10^5$
۸۰	3×10^5	$2/6 \times 10^5$
۱۲۰	$4/4 \times 10^5$	4×10^5
۱۶۰	$5/8 \times 10^5$	$5/4 \times 10^5$
۲۰۰	$6/6 \times 10^5$	$5/4 \times 10^5$

جمع‌بندی

بنا به نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز حساسیت در تحقیقات، غلظت نانوذره، دبی جرمی ورودی مایع، دبی جرمی ورودی هوا و رطوبت نسبی پارامترهای کلیدی و تأثیرگذار بر میزان هدررفت آب و مشخصه‌های حرارتی برج‌های خنک‌کن هستند. نانوسیالات می‌توانند تا حدود زیادی عملکرد برج‌های خنک‌کن اعم از خشک و تر را بهبود ببخشند که سبب بهبود مشخصه‌های حرارتی و کاهش میزان هدررفت آب شود. با پراکنده‌کردن نانوذرات در یک سیال پایه، نانوسیال سنتز شده، ضریب رسانش حرارتی و کشش سطحی آن نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد. به طور مثال، ضریب رسانش حرارتی برای نانوسیالات MWNTs و نانوپروس گرافن در دمای 45°C به ترتیب ۲۰ و ۱۶ درصد افزایش می‌یابد [۱۳]. بنابراین، استفاده از نانوسیالات سبب بهبود میزان خنک‌کردن، راندمان، مشخصه برج خنک‌کن و ضریب انتقال حرارت برج خنک‌کن می‌شود. کشش سطحی بر میزان هدررفت آب تأثیرگذار است. برای محاسبه میزان کشش سطحی زاویه تماس سیال اندازه‌گیری می‌شود [۱۴]. به طور مثال، زاویه تماس برای آب خالص، نانوسیال MWNTs و نانوسیال نانوپروس گرافن به ترتیب $108/45$ ، $122/22$ و $113/62$ اندازه‌گیری شده است [۱۵]. در نتیجه، اضافه‌کردن نانوذره به یک سیال پایه سبب افزایش کشش سطحی شده و مقاومت در برابر تبخیر شدن را افزایش می‌دهد. از طرفی، انتخاب یک غلظت مناسب برای نانوسیال یکی از نکات

حائز اهمیت در طراحی برج خنک‌کن است. به طور مثال، اگر غلظت نانوسیال از حدی افزایش یابد، سبب ایجاد رسوب و گرفتگی در پخش‌کننده آب شده، کاهش پایداری نانوسیال و به دلیل افزایش ویسکوزیته توان مصرفی پمپ‌های موجود به میزان زیادی افزایش یابد. انتخاب نانوذره مناسب نیز در طراحی لحاظ می‌شود که تابعی از نوع پکینگ و سیال پایه است. به همین دلیل، یک محقق باید نانوذرات مختلف با غلظت‌های مختلف را آزمایش کرده تا مناسب‌ترین نانوسیال را بیابد. در این چهار مقاله‌ای که تحلیل شد، نانوسیال روی اکساید/آب (ZnO/water) [۳] با غلظت $0/08 \text{ wt} \%$ تأثیر زیادی روی میزان خنک‌کردن و مشخصه برج خنک‌کن نداشت، ولی تأثیرش روی بهبود ضریب انتقال حرارت حجمی و راندمان کاملاً محسوس بود. البته، غلظت مناسبی برای این نانوسیال که هم مشکل رسوب نداشته باشد و تأثیر محسوسی روی مشخصه‌های حرارتی بگذارد $0/1 \text{ wt} \%$ گزارش شد. استفاده از نانوسیالات آلومینا/آب ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$) و تیتانیوم اکساید/آب ($\text{TiO}_2/\text{water}$) با غلظت‌های $4-2 \text{ vol} \%$ [۵] تأثیر زیادی بر کاهش هدررفت آب دارد، ولی به نظر می‌رسد که به دلیل غلظت بسیار زیاد مشکل رسوب، گرفتگی و افزایش توان مصرفی پمپ در سیستم رخ دهد. برای نانوسیالات MWNTs و نانوپروس گرافن [۱] نیز غلظت $0/1 \text{ wt} \%$ مناسب‌ترین غلظت برای بهبود خواص حرارتی و کاهش هدررفت آب به نظر می‌رسد.

فهرست علائم و نشانه‌ها

علائم یونانی	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J/Kg } ^{\circ}\text{C}$)	C_p
چگالی (Kg/m^3)	ضریب رسانش حرارتی (W/m/k)	K
بازده برج خنک‌کن	آنتالپی (J/Kg)	h
درصد حجمی (%)	دبی جرمی مایع (Kg/s)	L
ضریب انتقال حرارت ($\text{W/m}^2/^{\circ}\text{C}$)	دبی جرمی هوا (Kg/s)	G
اندیس‌ها	دما ($^{\circ}\text{C}$)	t
ورودی	مشخصه برج خنک‌کن	TC
خروجی	سطح انتقال حرارت یا جرم (m^2)	A
هوا	درصد وزنی (%)	%wt
آب	رطوبت نسبی (%)	RH
محدوده		drop

منابع

- [1]. Askari S, Lotfi R, Seifkordi A, Rashidi AM, Koolivand H. A novel approach for energy and water conservation in wet cooling towers by using MWNTs and nanoporous graphene nanofluids. *Energy conversion and management*. 2016 Feb 1;109:10-8.
- [2]. Zhai Z, Fu S. Improving cooling efficiency of dry-cooling towers under cross-wind conditions by using wind-break methods. *Applied Thermal Engineering*. 2006 Jul 1;26(10):1008-17.
- [3]. Imani-Mofrad P, Saeed ZH, Shanbedi M. Experimental investigation of filled bed effect on the thermal performance of a wet cooling tower by using ZnO/water nanofluid. *Energy Conversion and Management*. 2016 Nov 1;127:199-207.
- [4]. Xie X, Zhang Y, He C, Xu T, Zhang B, Chen Q. Bench-Scale Experimental Study on the Heat Transfer Intensification of a Closed Wet Cooling Tower Using Aluminum Oxide Nanofluids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2017 May 12;56(20):6022-34.
- [5]. Goodarzi, M., Kiasat, M., Influence of nanoparticle immersed in water on Thermal performance of wet cooling tower. 1th *tajhizatconf.*, Dec. 2013. Tehran, Iran. [Persian].
- [6]. Babu JR, Kumar KK, Rao SS. State-of-art review on hybrid nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017 Sep 1;77:551-65.
- [7]. Esfe MH, Alirezaie A, Rejvani M. An applicable study on the thermal conductivity of SWCNT-MgO hybrid nanofluid and price-performance analysis for energy management. *Applied Thermal Engineering*. 2017 Jan 25;111:1202-10.
- [8]. Yarmand H, Gharekhani S, Ahmadi G, Shirazi SF, Baradaran S, Montazer E, Zubir MN, Alehashem MS, Kazi SN, Dahari M. Graphene nanoplatelets-silver hybrid nanofluids for enhanced heat transfer. *Energy conversion and management*. 2015 Aug 1;100:419-28.
- [9]. Rao RV, Patel VK. Optimization of mechanical draft counter flow wet-cooling tower using artificial bee colony algorithm. *Energy Conversion and Management*. 2011 Jul 1;52(7):2611-22.
- [10]. Atarzadeh MA, Rasouli S, Mehmandoust B. Numerical Analysis the Equations of Heat and Mass Transfer in Cooling Towers. Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Khomeini Shahr Branch, Khomeini Shahr, Iran. 2015.
- [11]. Alavi SR, Rahmati M. Experimental investigation on thermal performance of natural draft wet cooling towers employing an innovative wind-creator setup. *Energy conversion and management*. 2016 Aug 15;122:504-14.
- [12]. Azad AV, Azad NV. Application of nanofluids for the optimal design of shell and tube heat exchangers using genetic algorithm. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2016 Sep 1;8:198-206.
- [13]. Pak BC, Cho YI. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer an International Journal*. 1998 Apr 1;11(2):151-70.
- [14]. Lim S, Horiuchi H, Nikolov AD, Wasan D. Nanofluids alter the surface wettability of solids. *Langmuir*. 2015 May 21;31(21):5827-35.
- [15]. Bhuiyan MH, Saidur R, Amalina MA, Mostafizur RM, Islam AK. Effect of nanoparticles concentration and their sizes on surface tension of nanofluids. *Procedia Engineering*. 2015 Jan 1;105:431-7.