



Investigation of the Effect of Packing Type on Thermal Performance of a Wet Cooling Tower Using Nanofluid Flow

Mohammad Nakhaee Sharif¹ , Hamidreza Goshayeshi² , Reza Saleh³

1. M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

2. Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

3. Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

Abstract

Wet cooling towers are important components in many industrial and power plant systems. Packings are the main part of heat and mass transfer in these equipment's, and optimizing their performance has always been of interest to researchers. In this study, the effect of nanofluid flow rate on the thermal performance of two different types of packing, including film and splash packing, in a wet cooling tower was experimentally investigated. For this purpose, a laboratory model of a cooling tower with the ability to replace the packing and accurately control the operating conditions was designed and built. The working fluid in this study was a water-based nanofluid containing iron oxide nanoparticles, which was used at different flow rates due to its favorable thermal properties. The results obtained showed that by reducing the nanofluid flow rate, the thermal performance of the tower increased in both types of packing, but the performance of splash packing was better than that of film packing. The cooling range, efficiency and performance characteristics of splash packing were 14.7%, 9.9% and 32% more optimal than the film type, respectively. The improvement in splash packing performance is mainly attributed to the increase in the fluid-air contact area and the creation of more turbulence in the flow. This research shows that the appropriate choice of packing type can lead to an increase in the thermal efficiency of wet cooling towers and play an effective role in their optimal design.

Keywords

Cooling tower

Splash packing

Film packing

Flow rate

Efficiency

Received: 13.06.2025

Revised: 01.08.2025

Accepted: 07.08.2025

*Corresponding Author

Mohammad Nakhaee Sharif

Email

mohamadnakhaev@yahoo.com

1- Introduction

Wet cooling towers, as one of the key components in heat transfer and industrial air-conditioning systems, play a vital role in dissipating excess heat from industrial processes, power plants, and HVAC systems. Among their internal components, the packing materials are of particular importance since their performance has a direct impact on the thermal efficiency of the tower. Packings enhance heat and mass transfer by increasing the contact surface between the cooling fluid and the airflow.

Packings are generally made of thin sheets arranged with small spacing and are categorized into two main types: film packings and splash packings [1]. Splash packings are designed to maximize contact area and prolong water-air interaction by breaking the water stream into fine droplets through its impact on horizontal or inclined bars. In contrast, in film packings, water flows as a thin film over vertical sheets, and heat transfer mainly occurs through surface evaporation of this film [2].

How to Cite this Article:

[1] M. N. Sharif, H. Goshayeshi, and R. Saleh, "Investigation of the effect of packing type on thermal performance of a wet cooling tower using nanofluid flow,"

Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering, vol. 4, no. 1, pp. 203–216, 2025. [Online]. Available:

<https://doi.org/10.22034/stme.2025.523322.1130> (in Persian)



Zhao et al. compared the cooling performance of six types of film packings. Their results indicated that small parallel grooves altered the cooling efficiency and performance of the packings, while cross grooves significantly reduced their effectiveness. Overall, the optimized packings increased cooling capacity by 3.8% to 12.2% [3]. In an experimental study, Rahmati et al. investigated the effects of hot water temperature, water flow rate, inlet air flow rate, and the number of packing layers on the cooling tower performance. The findings showed that efficiency is directly related to hot water temperature, the number of packing layers, and air mass flow rate, while it decreases with increasing water flow rate [4].

Similarly, S. Mohammad studied the influence of operating parameters such as packing type, water and air flow rate, and hot water inlet temperature. The results revealed that tower performance improves with higher airflow and inlet water temperature, but decreases with increasing water flow rate. In addition, denser packing arrangements enhanced cooling capability [5].

In another study, Imani Monfared et al. experimentally examined the effect of six different packing types on the thermal performance of a wet cooling tower using ZnO/water nanofluid. Their findings demonstrated that the use of metallic mesh packing improved the thermal characteristics of the tower when employing ZnO/water nanofluid [6].

Overall, existing evidence indicates that the thermal performance of packings strongly depends on parameters such as material, geometry, water and air flow rates, inlet temperature, and environmental conditions [7].

The aim of the present research is to investigate the thermal performance of two common types of packings—splash and film—in a wet cooling tower under various fluid flow conditions. For this purpose, an iron oxide/water nanofluid is employed as the working fluid, allowing for a precise comparison of the thermal performance of both packing types under identical conditions.

2- Research Methods

2-1- Experimental setup

For the experimental tests, a laboratory forced-draft wet cooling tower was designed and constructed. The tower body was made of transparent polycarbonate with a height of 1.2 m and a square cross-section of 25×25 cm, providing sufficient strength while allowing direct observation of the cooling process inside the tower. The detailed specifications of the experimental setup are presented in Table 1.

Table 1: Physical specifications of the laboratory cooling tower

Cooling tower specifications	Amount(unit)
Tower dimensions	25×25×120 (cm)
Packing dimensions	25×25×60 (cm)
Maximum nanofluid flow rate	6 (Lpm)
Maximum air flow rate	3/2 (Lpm)

The experiments were conducted under steady-state thermal conditions at different fluid flow rates ranging from 2 to 6 kg/min. For each packing type, all tests were performed under identical environmental conditions and repeated to ensure reliable comparison of their thermal performance. Figure 1 shows a picture of the laboratory cooling tower.



Figure 1: Laboratory cooling tower

2-2- Packing

In wet cooling towers, the heat and mass transfer processes mainly occur within the packing section, and the thermal resistance characteristics of the packing directly influence the tower's operational efficiency [8]. In this study, two commonly used packing types, film packing and splash packing, were employed to evaluate their impact on the tower's thermal performance. The primary objective was to compare the performance of these two packings under identical operating conditions and to assess their thermal efficiency at different nanofluid flow rates. Figure 2 and Figure 3 show the film and splash packaging.



Figure 2: Film type packaging

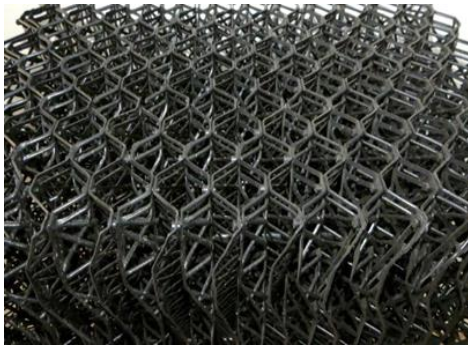


Figure 3: Splash type packaging

3- Results

In this study, the thermal performance of two different types of packings, film and splash, in a forced-draft wet cooling tower was experimentally investigated using an Fe_3O_4 /water nanofluid. The film packing was made of PVC, while the splash packing was made of polypropylene. Due to equipment availability, this difference in material was unavoidable and was considered a limitation in

analyzing the results, as the packing material can affect heat transfer characteristics.

The results showed that, as the nanofluid-to-air flow rate ratio increased from 0.63 to 1.88, the outlet water temperature increased for both packings due to reduced contact time and lower heat transfer efficiency at higher flow rates. On average, the outlet temperature of the splash packing was approximately 1.8% lower than that of the film packing. For instance, at a ratio of 0.63, the outlet temperatures were 23.56 °C for the splash packing and 24.14 °C for the film packing, indicating more effective heat removal in the splash configuration.

The cooling range (ΔT) decreased with increasing flow rate for both packing types, but the splash packing consistently provided a higher cooling range. At a ratio of 0.63, ΔT for the splash packing was 14.14 °C, compared to 12.86 °C for the film packing, representing an improvement of about 9.9%. Although the difference became smaller at higher flow rates, the splash packing maintained better cooling performance across all tested conditions.

In terms of thermal efficiency, the splash packing also outperformed the film packing. At a ratio of 0.63, the thermal efficiency was 75% for splash packing and 70% for film packing, meaning the splash packing achieved approximately 14.7% higher efficiency. As the flow rate increased to 1.88, the efficiencies dropped to 59% and 57%, respectively, but the splash packing maintained its advantage, especially at lower flow rates, due to enhanced droplet breakup and better nanofluid mixing.

Similarly, the cooling tower performance characteristic, which reflects the overall heat transfer capability, was higher for splash packing under all conditions. At a ratio of 0.63, this parameter was 2.35 for splash packing and 1.78 for film packing, showing an improvement of 32%. Even at the highest tested ratio of 1.88, the splash packing continued to perform better than the film packing.

Overall, the results demonstrate that the splash packing consistently delivers superior thermal performance compared to the film packing, providing lower outlet water temperatures, higher cooling ranges, greater thermal efficiency, and improved overall heat transfer capacity, particularly at lower flow rates.

4- Conclusion

This study experimentally investigated the thermal performance of a forced-draft wet cooling tower using two different packings: film packing and splash packing. The experiments were carried out under identical environmental conditions at various flow rates of an Fe_3O_4 /water nanofluid with a concentration of 0.15%, and key parameters such as outlet water temperature, cooling range, thermal efficiency, and the tower performance characteristic were evaluated.

The results showed that the splash packing consistently outperformed the film packing. At a flow rate ratio of 0.63, the cooling range of splash packing was about 9.9% higher, the thermal efficiency was 14.7% greater, and the performance characteristic improved by 32% compared to the film packing. Moreover, the outlet water temperature with splash packing was approximately 4.2% lower, confirming its more effective heat transfer capability.

Overall, it can be concluded that under similar operating conditions, the use of splash packing not only enhances system efficiency but also improves the overall thermal performance of wet cooling towers. These findings highlight splash packing as an effective approach for the design and optimization of industrial cooling towers.

5- References

[1] Y. Xi, Z. Yu, L. Zhang, A. Yu, L. Liu, B. Bao, et al., "Research on heat and mass transfer characteristics of a counterflow wet cooling tower

using a new type of straight wave packing," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 193, p. 108540, 2023, doi: [10.1016/j.ijthermalsci.2023.108540](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108540)

[2] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *1996 ASHRAE Handbook: HVAC Systems and Equipment*. Atlanta, GA: ASHRAE, 1996.

[3] Z. Zhao, J. Gao, X. Zhu, and Q. Qiu, "Experimental study of the corrugated structure of film packing on thermal and resistance characteristics of cross-flow cooling tower," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 141, p. 106610, 2023, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106610](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106610).

[4] M. Rahmati, S. R. Alavi, and M. R. Tavakoli, "Experimental investigation on performance enhancement of forced draft wet cooling towers with special emphasis on the role of stage numbers," *Energy Convers. Manag.*, vol. 126, pp. 971–981, 2016, doi: [10.1016/j.enconman.2016.08.059](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.059)(in Persian).

[5] E. S. Mohammed, Q. K. Jasim, and M. W. Kanbar, "Experimental study on promoting the thermal performance of a forced draft counter flow evaporative cooling tower," *Adv. Nat. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 36–48, 2017.

[6] P. Imani-Mofrad, Z. H. Saeed, and M. Shanbedi, "Experimental investigation of filled bed effect on the thermal performance of a wet cooling tower by using ZnO /water nanofluid," *Energy Convers. Manag.*, vol. 127, pp. 199–207, 2016, doi: [10.1016/j.enconman.2016.09.009](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.009)(in Persian).

[7] Z. Hashemi, A. Zamanifard, M. Gholampour, J. S. Liaw, and C. C. Wang, "Recent progress in fill media technology for wet cooling towers," *Processes*, vol. 11, no. 9, p. 2578, 2023, doi: [16] L. Yang, L. Zhang, J. Hu, Y. Li, J. Fang, Z. Yu, et al., "Experiment and numerical study on thermal performance of counterflow wet cooling tower filled with double S-wave packing," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 200, p. 108984, 2024, doi: [10.1016/j.ijthermalsci.2024.108984](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.108984).



بررسی تأثیر نوع پکینگ بر عملکرد حرارتی برج خنک کننده مرطوب با جریان نانوسیال

محمد نخعی شریف^{۱*}، حمیدرضا گشایشی^۲، رضا صالح^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

چکیده

کلمات کلیدی

برج خنک کننده

پکینگ اسپلش

پکینگ فیلمی

دبی

راندمان

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶

*نویسنده مسئول

محمد نخعی شریف

ایمیل

mohamadnakhaev@yahoo.com

برج‌های خنک کننده مرطوب از اجزای مهم در بسیاری از سامانه‌های صنعتی و نیروگاهی محسوب می‌شوند. پکینگ‌ها به‌عنوان بخش اصلی انتقال حرارت و جرم در این تجهیزات هستند و بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها همواره مورد توجه محققان بوده است. در این پژوهش، تأثیر نرخ جریان نانوسیال بر عملکرد حرارتی دو نوع پکینگ مختلف، شامل پکینگ فیلمی و اسپلش، در یک برج خنک کننده مرطوب مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. برای این منظور، یک مدل آزمایشگاهی از برج خنک کننده با قابلیت تعویض پکینگ و واپایش دقیق شرایط عملیاتی طراحی و ساخته شد. سیال عامل در این مطالعه، نانوسیال پایه آبی حاوی نانوذرات اکسید آهن بود که به دلیل خواص حرارتی مطلوب، در نرخ‌های مختلف جریان به کار گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان داد که با کاهش نرخ جریان نانوسیال، عملکرد حرارتی برج در هر دو نوع پکینگ افزایش یافت، اما عملکرد پکینگ اسپلش بهتر از پکینگ فیلمی بود. دامنه خنک‌سازی، راندمان و مشخصه عملکرد در پکینگ اسپلش به ترتیب ۷/۱۴٪، ۹/۹٪ و ۳۲٪ بهینه‌تر از نوع فیلمی به دست آمد. بهبود عملکرد پکینگ اسپلش عمدتاً به افزایش سطح تماس سیال و هوا، و ایجاد آشفتنی بیشتر در جریان نسبت داده می‌شود. این تحقیق نشان می‌دهد که انتخاب مناسب نوع پکینگ می‌تواند به افزایش بازده حرارتی برج‌های خنک کننده مرطوب منجر شود و در طراحی بهینه آن‌ها نقش مؤثری ایفا کند.

۱- مقدمه

فرایند انتقال حرارت و جرم در برج‌های خنک کننده متأثر از تماس مستقیم میان فیلم مایع جاری بر سطوح عمودی و جریان هوای مخالف است. در این شرایط طراحی پکینگ‌ها نقش تعیین کننده‌ای در بهبود یا کاهش عملکرد برج ایفا می‌کند. به‌طور معمول حدود ۹۶ درصد برج‌های خنک کننده از پکینگ‌های پی وی سی با سطح صاف و شیارهای متقاطع بهره می‌برند [۱]. پکینگ‌ها اغلب از صفحات نازک با فاصله کم تشکیل شده‌اند و به دو دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند: پکینگ‌های فیلمی و پکینگ‌های اسپلش [۲].

برج‌های خنک کننده مرطوب به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی در سامانه‌های انتقال حرارت و تهویه صنعتی، نقش اساسی در دفع حرارت زائد از فرایندهای صنعتی، نیروگاه‌ها و سامانه‌های تهویه مطبوع ایفا می‌کنند. یکی از مهم‌ترین اجزای داخلی این برج‌ها، پکینگ‌ها هستند که عملکرد آن‌ها تأثیر مستقیمی بر راندمان حرارتی و میزان خنک‌سازی دارد. پکینگ‌ها با افزایش سطح تماس میان سیال خنک کننده و جریان هوای عبوری، شرایط بهینه‌ای برای انتقال حرارت و جرم فراهم می‌آورند.

How to Cite this Article:

[1] M. N. Sharif, H. Goshayeshi, and R. Saleh, "Investigation of the effect of packing type on thermal performance of a wet cooling tower using nanofluid flow," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 203-216, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.523322.1130> (in Persian)



©2025 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

خنک‌کنندگی در پکینگ‌های بهینه بین ۳/۸٪ تا ۱۲/۲٪ افزایش یافت [۸].

در مطالعه‌های تجربی، رحمتی و همکاران تأثیر دمای آب گرم، دبی آب، دبی هوای ورودی و تعداد لایه‌های پکینگ را بر عملکرد برج خنک‌کننده مورد بررسی قرار دادند. در واقع این تحقیق بر تأثیر تراکم پکینگ با تأکید بر نقش تعداد لایه پکینگ تمرکز دارد. یافته‌ها حاکی از آن هستند که بازدهی به‌طور مستقیم با دمای آب گرم، تعداد لایه پکینگ و دبی جرمی هوا مرتبط است؛ در حالی که با افزایش دبی آب کاهش می‌یابد [۹]. اختلاف دمای آب، بازده خنک‌کنندگی و مشخصه برج با افزایش تعداد لایه‌های پکینگ بهبود می‌یابد [۱۰]. همچنین پژوهشی درباره پکینگ‌های پی‌وی سی با گام‌های مختلف (۷، ۹ و ۱۸ میلی‌متر) نشان داد که تغییرات گام تأثیر معناداری بر اختلاف دمای آب و بازده برج دارد [۱۱].

در مطالعه‌های دیگر اس. محمد اثر عامل‌های عملیاتی نظیر نوع پکینگ، دبی هوا و آب و دمای آب ورودی را بررسی کرد. یافته‌ها نشان می‌دهند که عملکرد برج خنک‌کننده با افزایش دبی جریان هوا و دمای آب ورودی بهبود می‌یابد، اما با افزایش دبی آب عملکرد برج کاهش می‌یابد. همچنین افزایش تراکم پکینگ توانایی خنک‌کنندگی را بهبود می‌بخشد. بهبود عملکرد در شاخص‌های کارایی مانند دامنه خنک‌سازی، ضریب بازدهی و اختلاف تا دمای مرطوب، با افزایش دبی جریان جرمی هوای خنک‌کننده تا ۱۸۸ کیلوگرم در ساعت مشاهده می‌شود؛ اما پس از این مقدار کاهش می‌یابد. علاوه بر این، بیشترین درصد بهبود زمانی ثبت شده است که از گرم‌ترین آب ورودی استفاده شده است که این در مورد دامنه خنک‌سازی مشهودتر از سایر مؤلفه‌ها است. در میان همه متغیرهای ورودی، دبی جریان هوا به‌عنوان اصلی‌ترین عامل کنترل‌کننده عملکرد سامانه شناسایی شد [۱۲].

در مطالعه ایمانی منفرد و همکاران، بررسی تجربی تأثیر شش نوع مختلف پکینگ بر عملکرد حرارتی برج خنک‌کننده مرطوب با استفاده از نانوسیال اکسید روی/آب صورت گرفته است. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از بستر فلزی شبکه‌ای باعث بهبود ویژگی‌های حرارتی برج خنک‌کننده در هنگام استفاده از نانوسیال اکسید روی/آب می‌شود [۱۳]. در پژوهش دیگری عملکرد حرارتی انواع مختلف پکینگ در حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانولوله‌های کربنی چنددیواره ارزیابی و نتایج آن با یکدیگر و همچنین با آب خالص مقایسه شده است. استفاده از پکینگ مناسب در دبی بهیبه جریان نانوسیال تأثیر مطلوبی بر بهبود عملکرد برج دارد [۱۴].

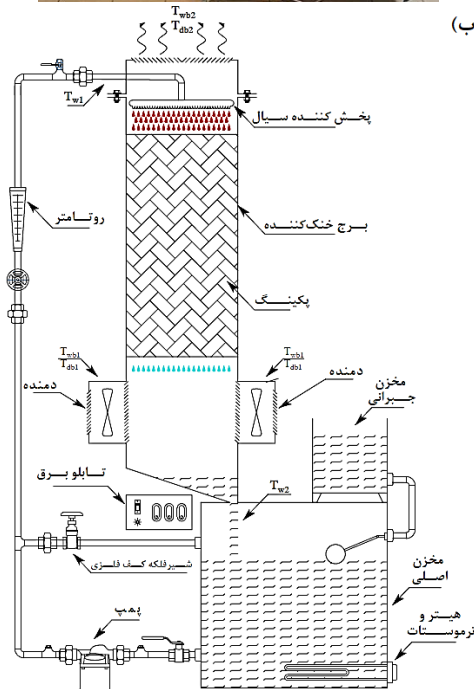
پکینگ اسپلش به‌منظور افزایش سطح تماس و زمان برخورد آب با هوا طراحی شده و عملکرد آن مبتنی بر شکستن جریان آب به قطرات ریز از طریق برخورد با میله‌های افقی یا مورب است. این قطرات با دارا بودن نسبت سطح به حجم بالا، موجب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شوند. علاوه بر این، وجود یک لایه نازک فیلم آب در اطراف عناصر پکینگ و افت فشار پایین، از جمله مزایای این نوع پکینگ به شمار می‌رود [۳]. یکی دیگر از مزایای قطرات کوچک تر، توانایی آن‌ها در جدا کردن ذرات آلودگی از آب است. علاوه بر این نوع پکینگ با ایجاد افت فشار کم در طول برج خنک‌کننده مزیت دیگری را ارائه می‌دهد [۴]. از طرف دیگر در پکینگ‌های فیلمی، آب به‌صورت یک لایه نازک بر روی صفحات عمودی جریان یافته و انتقال حرارت عمدتاً از طریق تبخیر سطحی این لایه انجام می‌گیرد [۳].

پژوهش‌های متعددی به بررسی تأثیر نوع پکینگ، دبی سیال و سایر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد برج‌های خنک‌کننده پرداخته‌اند. نینگ و همکاران نشان دادند که در هر دو شرایط سالم و دارای عیب (مانند گرفتگی)، افزایش نسبت دبی جرمی آب به هوا موجب کاهش مشخصه عملکرد و بازده برج می‌شود [۵]. در مطالعه دیگری تأثیر تغییرات نسبت دبی جرمی آب به هوا بر ویژگی‌های انتقال حرارت و جرم در برج خنک‌کننده تحت دماهای ورودی مختلف آب بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت دبی جرمی آب به هوا، محدوده خنک‌کنندگی آب و بازده برج خنک‌کننده کاهش می‌یابد [۶]. در پژوهشی که عمدتاً بر تأثیر نسبت دبی جرمی آب به هوا بر ویژگی‌های انتقال حرارت و جرم در برج خنک‌کننده تحت دماهای مختلف ورودی آب بر نوع جدیدی از پکینگ تمرکز دارد ثابت شده است که محدوده خنک‌کنندگی آب و بازده برج خنک‌کننده با افزایش نسبت دبی جرمی آب به هوا کاهش می‌یابند. در همین حال، ضریب مشخصه خنک‌کنندگی با افزایش نسبت دبی جرمی آب به هوا کاهش یافته و مقدار آن به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از سایر پکینگ‌های بررسی‌شده قبلی است [۷].

ژائو و همکاران عملکرد خنک‌کنندگی شش نوع پکینگ فیلمی را مقایسه کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند اگرچه تغییرات الگوی ثابتی ندارند؛ اما شیارهای کوچک موازی عملکرد خنک‌کنندگی و بازده پکینگ را تغییر می‌دهند. درحالی‌که شیارهای متقاطع عملکرد خنک‌کنندگی پکینگ را به‌وضوح کاهش می‌دهند. همچنین تأثیر این شیارها بر افت فشار ناچیز گزارش شد و در مجموع، ظرفیت

آب ورودی به برج به کار گرفته شد. به منظور اندازه‌گیری دمای سیال در ورودی و خروجی برج از دماسنج دیجیتالی کالیبره شده استفاده گردید.

در بالای برج به‌جای نازل پاشش، از یک پخش‌کننده ثقلی ساده بهره گرفته شد تا توزیع یکنواخت سیال بر سطح پکینگ‌ها حتی در دبی‌های پایین حاصل شود. سیال خروجی نیز در یک حوضچه در پایین برج جمع‌آوری و به مخزن اولیه بازگردانده می‌شود. طراحی سامانه به‌گونه‌ای انجام شده است که امکان تعویض آسان پکینگ‌ها و انجام مقایسه تجربی بین انواع مختلف آن‌ها فراهم باشد. شکل ۱ تصویر برج خنک‌کننده آزمایشگاهی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: الف) برج خنک‌کننده آزمایشگاهی ب) طرح دستگاه

شواهد موجود نشان می‌دهند که عملکرد حرارتی پکینگ‌ها به‌شدت وابسته به عامل‌های نظیر جنس، هندسه، نرخ جریان آب و هوا، دمای ورودی، و شرایط محیطی است. درک عمیق این وابستگی‌ها، نقشی کلیدی در طراحی، بهینه‌سازی و نگهداری برج‌های خنک‌کننده ایفا می‌کند [۱۵].

هدف این پژوهش بررسی عملکرد حرارتی دو نوع پکینگ متداول یعنی پکینگ اسپلش و پکینگ فیلمی در برج خنک‌کننده مرطوب تحت شرایط مختلف نرخ جریان سیال است. در این راستا از نانوسیال اکسید آهن به‌عنوان سیال کاری استفاده شده است تا در بستر یکسان، عملکرد حرارتی هر دو نوع پکینگ با دقت مقایسه شود. تمرکز تحقیق بر ارزیابی عامل‌های همچون بازده برج، اختلاف دمای آب، دامنه خنک‌سازی و مشخصه برج در مواجهه با تغییر نرخ جریان سیال بوده و هدف نهایی تحلیل تجربی تأثیر نوع پکینگ بر کارایی سامانه سرمایه‌ش تبخیری است. یافته‌های این مطالعه می‌توانند به انتخاب و طراحی بهینه پکینگ‌ها در سامانه‌های خنک‌کننده کمک شایانی نمایند.

۲- الگوسازی تجربی

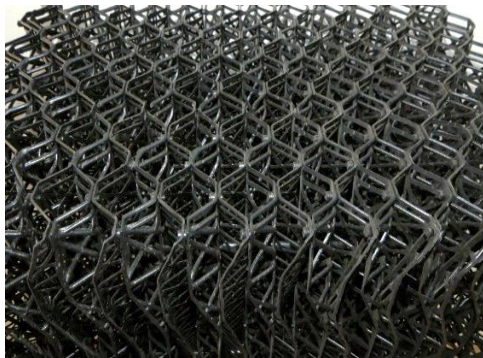
۲-۱- معرفی سامانه آزمایشگاهی

به‌منظور انجام آزمایش‌های تجربی، یک سامانه آزمایشگاهی از نوع برج خنک‌کننده مرطوب با جریان اجباری طراحی و ساخته شد. بدنه برج از جنس پلی‌کربنات شفاف با ارتفاع ۱/۲ متر و مقطع مربعی به ابعاد ۲۵×۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد تا علاوه بر مقاومت کافی، امکان مشاهده مستقیم فرایند خنک‌سازی درون برج فراهم گردد. مشخصات دستگاه آزمایشگاهی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی برج خنک‌کننده آزمایشگاهی

مشخصات برج خنک‌کننده	مقدار	واحد
ابعاد برج	۲۵×۲۵×۱۲۰	سانتی‌متر
ابعاد پکینگ	۲۵×۲۵×۶۰	سانتی‌متر
حداکثر دبی نانوسیال	۶	لیتر بر دقیقه
دبی هوا	۳٫۲	لیتر بر دقیقه

جریان هوای موردنیاز از طریق دو عدد فن محوری که در قسمت پایین برج نصب شده بودند تأمین می‌شد. جهت به گردش درآوردن سیال در مدار بسته، از یک پمپ گریزمرکز خطی استفاده شد که امکان تنظیم دبی در بازه ۲ تا ۶ کیلوگرم بر دقیقه را فراهم می‌کرد. همچنین یک گرم‌کننده برقی به همراه ترموستات برای تنظیم دمای



شکل ۳: پکینگ اسپلش

هر دو نوع پکینگ در بخش میانی برج نصب شده و به گونه‌ای طراحی شدند که امکان تعویض سریع و آزمایش مجدد تحت شرایط یکسان وجود داشته باشد. با توجه به تفاوت سازوکار عملکردی این دو نوع پکینگ، مقایسه آن‌ها در شرایط یکسان دید مناسبی از انتخاب بهینه پکینگ در کاربردهای مختلف برج خنک‌کننده ارائه می‌دهد. مشخصات پکینگ‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات پکینگ‌ها

اسپلش	فیلمی	مشخصات (واحد)
۱۲	۱۲	فاصله صفحات (mm)
۱۱۵	۱۵۰	سطح مؤثر (m^2/m^3)
۳	۲	ضخامت (mm)
۶۰	۶۰	زاویه موج (deg)
پلی پروپیلن	پلی وینیل کلراید	جنس
۰/۱۶	۰/۲۸	هدایت حرارتی (w/m.K)
۸۵-۰	۶۰-۰	دمای عملیاتی ($^{\circ}C$)
مشکی	مشکی	رنگ

۲-۳- نانوسیال و شرایط آزمایش

سیالات متداول مانند آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول که به طور معمول در فرایندهای انتقال حرارت به کار می‌روند، از نظر ویژگی‌های حرارتی دارای ظرفیت محدودی هستند [۱۷]. در این مطالعه از نانوسیال پایه آب حاوی نانوذرات اکسید آهن با غلظت حجمی ۰/۱۵٪ به منظور بهبود انتقال حرارت استفاده شد. نانوسیال به روش دومرحله‌ای تهیه گردید و برای بهبود پراکندگی و پایداری از ستیل تری متیل آمونیوم بروماید به عنوان فعال‌کننده سطحی مورد استفاده گرفت، به طوری که ابتدا نانوذرات به صورت خشک به آب مقطر افزوده و به صورت دستی هم زده شدند و سپس به مدت ۳۰ دقیقه به دستگاه التراسونیک منتقل شدند تا توزیع یکنواختی از ذرات حاصل شود.

۲-۲- پکینگ‌ها

در برج‌های خنک‌کننده مرطوب، فرایند انتقال گرما و جرم عمدتاً در ناحیه پکینگ‌ها اتفاق می‌افتد و ویژگی‌های مقاومت حرارتی پکینگ مستقیماً بر راندمان عملیاتی برج خنک‌کننده تأثیر می‌گذارد [۱۶]. در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر نوع پکینگ بر عملکرد حرارتی برج خنک‌کننده، از دو نوع پکینگ رایج شامل پکینگ فیلمی و پکینگ اسپلش استفاده شد. هدف اصلی مقایسه عملکرد این دو نوع پکینگ تحت شرایط یکسان عملیاتی بود تا کارایی حرارتی آن‌ها در نرخ جریان‌های مختلف نانوسیال مشخص گردد.

پکینگ فیلمی از جنس پی‌وی‌سی با ساختار منظم موج‌دار انتخاب شد که قابلیت ایجاد سطح تماس گسترده و جریان پیوسته لایه‌ای از سیال بر روی سطوح آن را فراهم می‌سازد. این نوع پکینگ با ابعاد 25×25 سانتی‌متر و ارتفاع کلی حدود ۶۰ سانتی‌متر در داخل برج نصب شد. ساختار هندسی آن به گونه‌ای است که جریان آب را به صورت فیلم نازک هدایت کرده و انتقال حرارت و جرم را در سطح وسیعی امکان‌پذیر می‌سازد. شکل ۲ پکینگ فیلمی استفاده شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲: پکینگ فیلمی

در مقابل، پکینگ اسپلش مورد استفاده از جنس پلی پروپیلن انتخاب گردید که به دلیل ساختار باز و شبکه‌ای خود، باعث شکست جریان سیال در حین سقوط و تشکیل قطرات متعدد می‌شود. این امر موجب افزایش سطح تماس بین سیال و هوا از طریق پدیده‌های تبخیر موضعی و اختلاط شدید می‌گردد. ارتفاع مؤثر این پکینگ نیز مشابه پکینگ فیلمی در حدود ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد تا امکان مقایسه منصفانه فراهم باشد. شکل ۳ پکینگ اسپلش را نشان می‌دهد.

برای بررسی جامع‌تر عملکرد برج خنک‌کننده در شرایط مختلف، از مشخصه عملکرد برج استفاده شد که بیانگر ظرفیت انتقال حرارت نسبت به جریان هوا و سیال است. این مؤلفه به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۰]:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{c_{pf} dT}{h_{as} - h_{a1}} \quad (۳)$$

که در رابطه بالا K ضریب انتقال جرم، a سطح مؤثر پکینگ، V حجم پکینگ، L جریان سیال، h_{as} آنتالپی دمای اشباع هوا و h_a آنتالپی هوای ورودی است. C_{pf} ظرفیت حرارتی سیال است که مقدار آن برای نانوسیال از رابطه ۴ محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$(c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(c_p)_{bf} + \varphi(c_p)_p \quad (۴)$$

که در آن $(c_p)_{nf}$ گرمای ویژه نانوسیال، $(c_p)_{bf}$ گرمای ویژه سیال پایه و $(c_p)_p$ گرمای ویژه نانوذرات هستند و φ غلظت حجمی نانوسیال‌ها است.

برای حل انتگرال رابطه ۳ از روش چبیشف که یکی از تکنیک‌های عددی برای انتگرال‌گیری در مسائل پیچیده؛ مانند حل معادله مرکب است استفاده شد. این روش با استفاده از تقریب چندجمله‌ای‌های چبیشف، انتگرال‌گیری را ساده‌تر می‌کند و از نقاط خاصی برای نمونه‌برداری استفاده می‌کند که به کاهش خطا در انتگرال کمک می‌کند. بر اساس این روش رابطه ۳ به صورت زیر حل می‌شود [۲۲]:

$$\begin{aligned} \frac{KaV}{L} &= \int_{T_2}^{T_1} \frac{c_{pf} dT}{h_{as} - h_{a1}} \\ &\approx \frac{c_{pf}(T_{wi} - T_{wo})}{4} \left[\frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right] \quad (۵) \end{aligned}$$

در رابطه فوق مقادیر $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4$ از روابط زیر بدست می‌آیند [۲۲]:

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= (h_{asw} - h_a)_1 \\ h_{saw1} \text{ at } T_w &= T_{wo} + 0.1(T_{wi} - T_{wo}) \quad (۶) \\ \text{and } h_{a1} &= h_{ai} + 0.1(h_{ao} - h_{ai}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta h_2 &= (h_{asw} - h_a)_2 \\ h_{saw2} \text{ at } T_w &= T_{wo} + 0.4(T_{wi} - T_{wo}) \quad (۷) \\ \text{and } h_{a2} &= h_{ai} + 0.4(h_{ao} - h_{ai}) \end{aligned}$$

آزمایش‌ها در شرایط پایدار حرارتی و در دبی‌های مختلف سیال بین ۲ تا ۶ کیلوگرم بر دقیقه انجام گرفت. برای هر نوع پکینگ، کلیه آزمون‌ها تحت شرایط محیطی یکسان و به صورت تکرارشونده اجرا شدند تا امکان مقایسه عملکرد حرارتی آن‌ها فراهم گردد.



شکل ۴: پایداری بصری نانوسیال اکسید آهن/آب مقطر با غلظت ۰/۱۵٪ بعد از ۱ و ۲۴ ساعت

۲-۴- روش تحلیل عملکرد حرارتی

برای ارزیابی عملکرد حرارتی پکینگ‌ها، آزمایش‌ها در دبی‌های مختلف نانوسیال و برای دو نوع پکینگ انجام گرفت. در تمامی آزمایش‌ها دمای ورودی سیال به کمک گرم‌کن الکتریکی ثابت نگه داشته شد و پس از عبور از پکینگ، دمای خروجی سیال توسط دماسنج دیجیتالی اندازه‌گیری گردید.

برای تحلیل عملکرد حرارتی پکینگ‌ها، اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال به‌عنوان شاخص اولیه انتقال حرارت در نظر گرفته شد. دامنه خنک‌سازی از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۸]:

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (۱)$$

که در آن T_1 دمای سیال ورودی به برج خنک‌کننده ($^{\circ}\text{C}$) و T_2 دمای سیال خروجی از برج خنک‌کننده ($^{\circ}\text{C}$) است.

همچنین برای مقایسه کارایی پکینگ‌ها در شرایط مختلف از بازده حرارتی برج بر اساس دمای مرطوب نیز استفاده شد. بازده حرارتی برج خنک‌کننده به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{wb}} \quad (۲)$$

که در این رابطه T_{wb} دمای حباب مرطوب هوای ورودی به برج خنک‌کننده است.

جدول ۳: مقادیر عدم قطعیت اندازه‌گیری و محاسبات

مؤلفه	حداکثر عدم قطعیت (%)
دما	۰/۴
دبی سیال کاری	۴
دبی هوا	۲
دامنه خنک‌سازی	۰/۴
مشخصه عملکرد برج خنک‌کننده	۴/۵

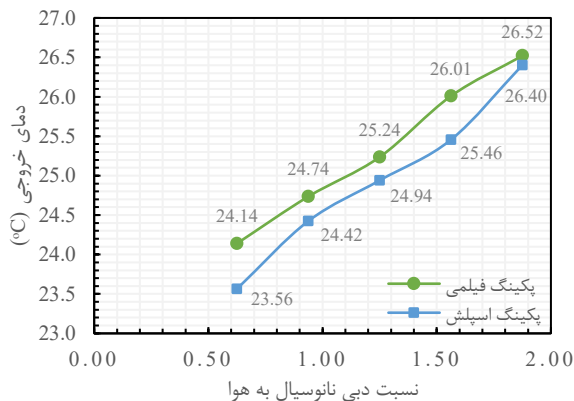
۴- نتایج و بحث

در این مطالعه عملکرد حرارتی دو نوع پکینگ فیلمی و اسپلش در برج خنک‌کننده مرطوب با استفاده از نانوسیال اکسید آهن/آب به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. لازم است توجه شود که پکینگ‌های استفاده‌شده دارای جنس متفاوتی بوده‌اند؛ پکینگ فیلمی از جنس پلی‌وینیل کلراید و پکینگ اسپلش از جنس پلی‌پروپیلن تهیه شده‌اند. این تفاوت جنس به دلیل محدودیت‌های تأمین تجهیزات و در دسترس بودن نمونه‌های تجاری متداول بوده است. از آنجاکه جنس مواد می‌تواند بر ویژگی‌های انتقال حرارت و عملکرد پکینگ‌ها تأثیرگذار باشد، این موضوع به‌عنوان یک محدودیت مهم در تحلیل نتایج در نظر گرفته شده است.

در ادامه نتایج آزمایش‌ها در نسبت‌های مختلف دبی نانوسیال به هوا ارائه شده و تأثیرات نوع پکینگ بر عامل‌های حرارتی مورد تحلیل قرار گرفته است.

۴-۱- دمای خروجی و دامنه خنک‌سازی

شکل ۵ دمای خروجی برای دو نوع پکینگ فیلمی و اسپلش را در نرخ‌های مختلف دبی نانوسیال بررسی می‌کنند. با افزایش نسبت دبی نانوسیال به هوا از ۰/۶۳ تا ۱/۸۸، دمای خروجی سیال در هر دو نوع پکینگ روند افزایشی دارد. این افزایش ناشی از کاهش زمان تماس و انتقال حرارت بین گام‌های سیال و هوا در دبی‌های بالاتر است.



شکل ۵: دمای خروجی در نرخ‌های مختلف نانوسیال

$$\Delta h_3 = (h_{asw} - h_a)_3$$

$$h_{saw3} \text{ at } T_w = T_{wo} + 0.6(T_{wi} - T_{wo}) \quad (5)$$

$$\text{and } h_{a3} = h_{ai} + 0.6(h_{ao} - h_{ai})$$

$$\Delta h_4 = (h_{asw} - h_a)_4$$

$$h_{saw4} \text{ at } T_w = T_{wo} + 0.9(T_{wi} - T_{wo}) \quad (6)$$

$$\text{and } h_{a4} = h_{ai} + 0.9(h_{ao} - h_{ai})$$

در این روش، آنتالپی هوای ورودی و خروجی با بهره‌گیری از داده‌های سایکرومتریک، بر اساس دمای خشک، دمای مرطوب یا رطوبت نسبی هر نقطه محاسبه شده‌اند. همچنین، مقادیر آنتالپی در شرایط اشباع برای دماهای مرجع با استفاده از جداول سایکرومتریک استخراج گردیدند.

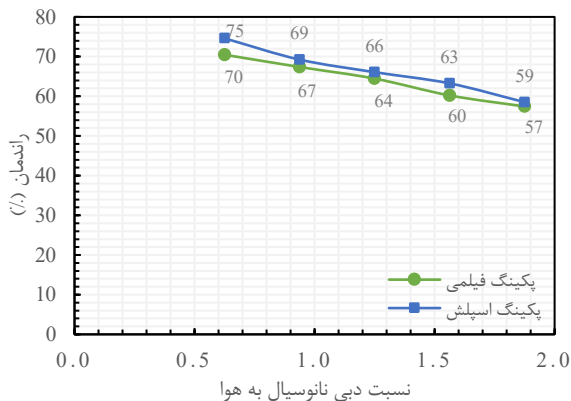
۳- عدم قطعیت

باتوجه به ماهیت تجربی پژوهش حاضر، تحلیل عدم قطعیت در اندازه‌گیری عامل‌های کلیدی صورت گرفت تا دقت و اعتبار نتایج ارزیابی شود. عدم قطعیت کل مربوط به هر متغیر محاسبه‌شده با استفاده از روش ترکیبی مبتنی بر ریشه جمع مربعات عدم قطعیت‌های منابع مختلف محاسبه گردید. در این روش، اگر مقدار نهایی یک کمیت R به چندین عامل مستقل X_i وابسته باشد، عدم قطعیت کل آن به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$U_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(U_{xi} \frac{\partial R}{\partial x_i} \right)^2} \quad (10)$$

در این رابطه U_R بیانگر عدم قطعیت کل، U_{xi} عدم قطعیت اندازه‌گیری هر متغیر مستقل و $\partial R / \partial x_i$ ضریب حساسیت نتیجه نسبت به آن متغیر است. این روش به‌ویژه زمانی کاربرد دارد که چند پارامتر به‌طور همزمان در تعیین یک نتیجه نهایی مؤثر باشند. به‌منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، هر آزمایش سه بار تحت شرایط یکسان تکرار گردید و میانگین مقادیر حاصل، به‌عنوان مبنای تحلیل استفاده شد. در، مقادیر عدم قطعیت نسبی برای عامل‌هایی اندازه‌گیری‌شده در این مطالعه گزارش شده است.

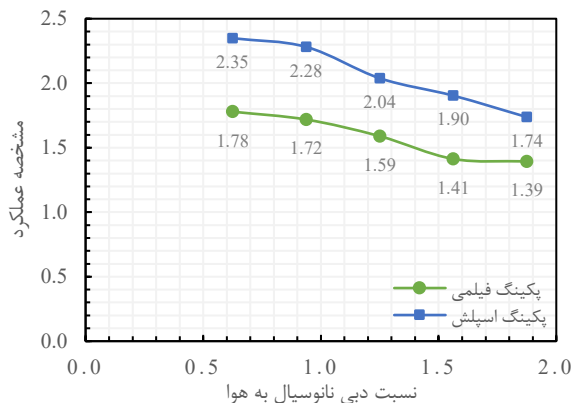
که نشان می‌دهد راندمان برج با نوع اسپلش در مقایسه با پکینگ فیلمی ۷/۱۴٪ بهینه‌تر بوده است. با افزایش نسبت دبی به ۱/۸۸، این مقادیر به ترتیب به ۵۹٪ و ۵۷٪ کاهش یافت. این تفاوت به‌ویژه در دبی‌های پایین قابل توجه‌تر بوده و بیانگر کارایی بهتر سازوکار برخوردی در پاشش و اختلاط نانوسیال در پکینگ اسپلش است.



شکل ۷: راندمان برج در نرخ‌های مختلف نانوسیال

۳-۴- مشخصه عملکرد برج خنک‌کننده

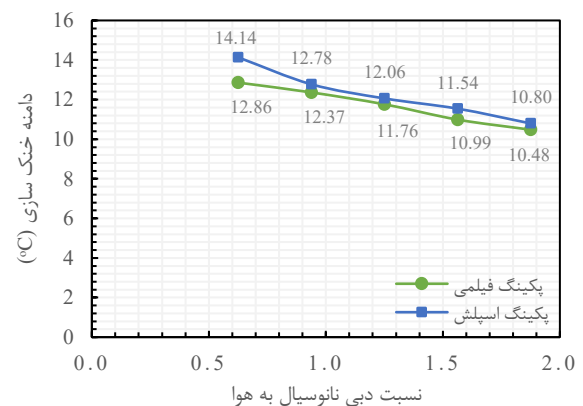
مشخصه عملکرد نیز به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی ارزیابی عملکرد حرارتی برج، برای دو نوع پکینگ محاسبه و تحلیل گردید. نتایج نشان دادند که با افزایش نسبت دبی نانوسیال به هوا، مشخصه عملکرد برای هر دو پکینگ روندی کاهشی دارد که این موضوع با الگوی کاهش دامنه خنک‌سازی هم‌راستا است. شکل ۸ مشخصه عملکرد برای دو نوع پکینگ فیلمی و اسپلش را در نرخ‌های مختلف دبی نانوسیال را نشان می‌دهد.



شکل ۸: مشخصه عملکرد برج خنک‌کننده

در مقایسه میان دو پکینگ، دمای خروجی برای پکینگ اسپلش در تمامی نسبت‌های دبی به طور متوسط ۱/۸٪ پایین‌تر از پکینگ فیلمی بوده است. به‌عنوان مثال در نسبت دبی ۰/۶۳، دمای خروجی در پکینگ اسپلش ۲۳/۵۶ °C و در پکینگ فیلمی ۲۴/۱۴ °C گزارش شده است. این اختلاف نشان می‌دهد که پکینگ اسپلش در حفظ اختلاف دمای بالاتر و دفع حرارت مؤثرتر عمل کرده است.

در بررسی دامنه خنک‌سازی نیز مشاهده می‌شود که با افزایش دبی مقدار اختلاف دما کاهش می‌یابد که این روند در هر دو پکینگ صادق است. در این میان، پکینگ اسپلش در تمام دبی‌ها توانسته دامنه خنک‌سازی بیشتری نسبت به پکینگ فیلمی ایجاد کند. در نسبت دبی ۰/۶۳، ΔT برای پکینگ اسپلش برابر با ۱۴/۱۴ °C بوده، درحالی‌که برای پکینگ فیلمی این مقدار ۱۲/۸۶ °C است که این مقدار برای پکینگ اسپلش ۹/۹٪ بیشتر از نوع فیلمی بوده است. این تفاوت در دبی‌های بالاتر نیز حفظ شده است، اگرچه شدت آن کاهش می‌یابد. شکل ۶ دامنه خنک‌سازی برج خنک‌کننده در نسبت‌های مختلف دبی را نشان می‌دهد.



شکل ۶: دامنه خنک‌سازی در نرخ‌های مختلف نانوسیال

در مجموع، تحلیل دمای خروجی و دامنه خنک‌سازی نشان می‌دهد که پکینگ اسپلش به‌واسطه مکانیزم‌های افزایش سطح تماس و شکستگی قطرات، عملکرد حرارتی مطلوب‌تری به‌ویژه در دبی‌های پایین‌تر از خود نشان داده است.

۲-۴- راندمان حرارتی

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت دبی سیال به هوا راندمان هر دو نوع پکینگ کاهش یافته است.

در تمامی مقادیر نسبت دبی بررسی‌شده، پکینگ اسپلش راندمان بالاتری نسبت به پکینگ فیلمی نشان داد. در نسبت دبی ۰/۶۳، راندمان پکینگ اسپلش برابر با ۷۵٪ و پکینگ فیلمی برابر با ۷۰٪ بود.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
a	سطح مؤثر پکینگ m^2/m^3
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت $kJ/kg.K$
h	آنتالپی kJ/kg
K	ضریب انتقال جرم $kg/m^2.s$
L	نرخ جریان سیال مایع kg/s
T	دما $^{\circ}C$
V	حجم پکینگ m^3
علائم یونانی	
η	راندمان %
ϕ	نسبت غلظت نانوذرات %
زیرنویس	
bf	سیال پایه
f	سیال
nf	نانوسیال
P	نانوذرات
wb	حباب مرطوب

۷- منابع

[1] H. Goshayshi and J. Missenden, "The investigation of cooling tower packing in various arrangements," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 69–80, 2000, doi: [10.1016/S1359-4311\(99\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00011-3).

[2] Y. Xi, Z. Yu, L. Zhang, A. Yu, L. Liu, B. Bao, et al., "Research on heat and mass transfer characteristics of a counterflow wet cooling tower using a new type of straight wave packing," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 193, p. 108540, 2023, doi: [10.1016/j.ijthermalsci.2023.108540](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108540).

[3] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *1996 ASHRAE Handbook: HVAC Systems and Equipment*. Atlanta, GA: ASHRAE, 1996.

[4] S. A. Ahmed, S. B. A. Kareem, and H. F. Makki, "Investigation hydraulic performance of splash fills packing in cooling tower," in *AIP Conf. Proc.*, AIP Publishing, 2020, doi: [10.1063/5.0000275](https://doi.org/10.1063/5.0000275).

پکینگ اسپلش در تمامی نقاط داده شده مشخصه عملکرد بالاتری نسبت به پکینگ فیلمی از خود نشان داد. در نسبت دبی 0.63 ، مقدار این مشخصه برای پکینگ فیلمی برابر با $1/78$ و برای پکینگ اسپلش برابر با $2/35$ بود که 32% بیشتر از نوع فیلمی است. در نسبت دبی $1/88$ ، این مقادیر به ترتیب به $1/74$ و $1/39$ کاهش یافتند. این نتایج حاکی از برتری نسبی پکینگ اسپلش در انتقال حرارت و ظرفیت کلی خنک‌سازی برج هستند.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد حرارتی برج خنک‌کننده مرطوب با جریان اجباری در حضور دو نوع پکینگ متفاوت، شامل پکینگ فیلمی و پکینگ اسپلش، به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در نرخ‌های مختلف جریان نانوسیال اکسید آهن/آب با غلظت 0.15% و در شرایط یکسان محیطی انجام شد و عامل‌های کلیدی نظیر دمای خروجی، دامنه خنک‌سازی، راندمان حرارتی و مشخصه عملکرد برج ارزیابی گردید.

نتایج نشان داد که استفاده از پکینگ اسپلش به طور کلی منجر به عملکرد حرارتی بهتری نسبت به پکینگ فیلمی شد. در نسبت دبی 0.63 ، دامنه خنک‌سازی پکینگ اسپلش $9/9\%$ بیشتر از پکینگ فیلمی بود. همچنین، راندمان حرارتی برج با پکینگ اسپلش نسبت به پکینگ فیلمی $7/14\%$ بالاتر ارزیابی شد. مشخصه عملکرد برج برای پکینگ اسپلش نسبت به فیلمی 32% افزایش نشان داد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت ساختار فیزیکی آن در بهبود انتقال حرارت و افت فشار مناسب‌تر است. علاوه بر این دمای خروجی آب در استفاده از پکینگ اسپلش نسبت به پکینگ فیلمی حدود $2/4\%$ کمتر بود که نشان‌دهنده انتقال حرارت مؤثرتر است.

باتوجه به این نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط مشابه استفاده از پکینگ اسپلش در برج‌های خنک‌کننده مرطوب نه تنها به افزایش راندمان سامانه کمک می‌کند، بلکه موجب بهبود کلی عملکرد حرارتی برج نیز می‌شود. این یافته می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر در طراحی و بهینه‌سازی برج‌های خنک‌کننده صنعتی در نظر گرفته شود.

evaporative cooling tower," *Adv. Nat. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 36–48, 2017.

[13] P. Imani-Mofrad, Z. H. Saeed, and M. Shanbedi, "Experimental investigation of filled bed effect on the thermal performance of a wet cooling tower by using ZnO/water nanofluid," *Energy Convers. Manag.*, vol. 127, pp. 199–207, 2016, doi: [10.1016/j.enconman.2016.09.009](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.009)(in Persian).

[14] R. Javadpour, S. Z. Heris, and J. P. Meyer, "Experimental study of the effect of filled bed type on the performance of a cross-flow cooling tower with the approach of using water-based nanofluids (MWCNTs and TiO₂)," *Energy Rep.*, vol. 8, art. no. 834660, 2022, doi: [10.1016/j.egy.2022.06.027](https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.027)(in Persian).

[15] Z. Hashemi, A. Zamanifard, M. Gholampour, J. S. Liaw, and C. C. Wang, "Recent progress in fill media technology for wet cooling towers," *Processes*, vol. 11, no. 9, p. 2578, 2023, doi: [10.3390/pr11092578](https://doi.org/10.3390/pr11092578)

[16] L. Yang, L. Zhang, J. Hu, Y. Li, J. Fang, Z. Yu, et al., "Experiment and numerical study on thermal performance of counterflow wet cooling tower filled with double S-wave packing," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 200, p. 108984, 2024, doi: [10.1016/j.ijthermalsci.2024.108984](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.108984).

[17] B. Rahmatinejad and F. Azimpour, "Increasing the stability of nanofluids and its estimation methods," *Sci. Technol. Mech. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 7–19, 2023, doi: [10.22034/stme.2023.162633](https://doi.org/10.22034/stme.2023.162633)(in Persian).

[18] H. N. S. Yassien, A. S. Abedalh, O. M. Yousif, and A. T. Hussein, "Impact of CuO+H₂O nanofluid on the cooling towers performance with varying packing densities," *Results Eng.*, vol. 26, p. 104664, 2025, doi: [10.1016/j.rineng.2025.104664](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104664).

[19] S. S. Salins, S. Kumar, K. Reddy, S. Shetty, and A. Tejero-González, "Experimental investigation in a forced draft wet cooling tower using aluminum oxide nanoparticles," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 212, pp. 281–292, 2024, doi: [10.1016/j.cherd.2024.11.010](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.11.010).

[20] P. K. Mondal, S. Mukherjee, B. Kundu, and S. Wongwises, "Investigation of the crosswind-influenced thermal performance of a natural draft

[5] T. Ning, D. Chong, M. Jia, J. Wang, and J. Yan, "Experimental investigation on the performance of wet cooling towers with defects in power plants," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 78, pp. 228–235, 2015, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2014.12.032](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.032).

[6] Q. J. Kong, X. Y. Zhao, D. Q. Xie, B. Zhang, and P. Wang, "Experimental investigation of the heat and mass transfer phenomena in a counterflow wet cooling tower with foam ceramic packing," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 10, no. 1, p. 1687814017752579, 2018, doi: [10.1177/1687814017752579](https://doi.org/10.1177/1687814017752579).

[7] Q. Kong, D. Liu, P. Wang, D. Xie, Q. Wu, and X. Zhao, "Experimental study on the heat and mass transfer characteristics of a counterflow wet cooling tower with foam ceramic packing," *Thermophys. Aeromech.*, vol. 26, no. 2, pp. 267–279, 2019, doi: [10.1134/S0869864319020100](https://doi.org/10.1134/S0869864319020100).

[8] Z. Zhao, J. Gao, X. Zhu, and Q. Qiu, "Experimental study of the corrugated structure of film packing on thermal and resistance characteristics of cross-flow cooling tower," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 141, p. 106610, 2023, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106610](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106610).

[9] M. Rahmati, S. R. Alavi, and M. R. Tavakoli, "Experimental investigation on performance enhancement of forced draft wet cooling towers with special emphasis on the role of stage numbers," *Energy Convers. Manag.*, vol. 126, pp. 971–981, 2016, doi: [10.1016/j.enconman.2016.08.059](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.059)(in Persian).

[10] M. Rahmati, "Effects of ZnO/water nanofluid on the thermal performance of wet cooling towers," *Int. J. Refrig.*, vol. 131, pp. 526–534, 2021, doi: [10.1016/j.ijrefrig.2021.03.017](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.03.017)(in Persian).

[11] P. Shahali, M. Rahmati, S. R. Alavi, and A. Sedaghat, "Experimental study on improving operating conditions of wet cooling towers using various rib numbers of packing," *Int. J. Refrig.*, vol. 65, pp. 80–91, 2016, doi: [10.1016/j.ijrefrig.2015.12.004](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.12.004)(in Persian).

[12] E. S. Mohammed, Q. K. Jasim, and M. W. Kanbar, "Experimental study on promoting the thermal performance of a forced draft counter flow

thermal performance analysis of a new cooling tower prototype," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 213, p. 118719, 2022, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2022.118719](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118719).

[23] Z. Imani and H. B. Nejad, "The importance of uncertainty propagation in studies and investigation of the methods to estimate it," *Mech. Eng. J.*, vol. 33, no. 2, pp. 66–71, 2024, doi: [10.30506/mmep.2024.2018130.2157](https://doi.org/10.30506/mmep.2024.2018130.2157)(in Persian).

counterflow cooling tower," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 85, pp. 1049–1057, 2015, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.048](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.048).

[21] F. Ahmed and W. A. Khan, "Efficiency enhancement of an air-conditioner utilizing nanofluids: An experimental study," *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 575–583, 2021, doi: [10.1016/j.egy.2021.01.023](https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.023).

[22] P. Navarro, J. Ruiz, M. Hernández, A. S. Kaiser, and M. Lucas, "Critical evaluation of the