

# بهبود عملکرد چگالنده هوایی نیروگاهی با کاربرد پره‌های نانوکامپوزیتی در فاصله‌های هوایی مختلف

محمد نمازی‌زاده

m\_namazizadeh@sbu.ac.ir

رامین حقیقی خوشخو\*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، r\_haghighi@sbu.ac.ir

فاطمه جدا

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، f\_joda@sbu.ac.ir

## چکیده

در کار حاضر به منظور بهبود عملکرد چگالنده‌های هوایی نیروگاهی تأثیر تغییر همزمان جنس ماده سازنده پره‌های دسته‌لوله و فاصله هوایی بین ردیف پره‌های مربوط به دسته‌لوله‌های متوالی بر عملکرد چگالنده هوایی مورد بررسی قرار گرفته است. تغییر این فاصله هوایی و همچنین جنس ماده سازنده پره می‌تواند بر روی ضریب انتقال گرما و افت فشار جریان هوا، وزن دسته‌لوله و فرسایش ناشی از ذرات جامد موثر باشد. در این مقاله ابتدا در فاصله‌های هوایی مختلف، ماده مناسب برای پره تعیین شده و سپس تأثیر شرایط دمایی محیط در فاصله‌های هوایی مختلف بر عملکرد ترموهیدرولیکی جریان سمت هوای دسته‌لوله منتخب، بررسی و مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بین ۵۴ دسته‌لوله مورد بررسی در صورت استفاده از دسته‌لوله‌های  $M_5$  و انتخاب فاصله هوایی یک میلی‌متر، جریان در سمت هوای دسته‌لوله عملکرد ترموهیدرولیکی بهتری خواهد داشت به طوری که عدد ناسلت به میزان ۵۷/۲٪ افزایش، PEC به میزان ۶۴/۴٪ افزایش، ضریب اصطکاک به میزان ۷/۹٪ کاهش و وزن کلی دسته‌لوله‌ها به میزان ۱۰/۸٪ کاهش خواهد یافت. **واژه‌های کلیدی:** چگالنده هوایی، دسته‌لوله، نانوکامپوزیت، فاصله هوایی، خنک‌کن نیروگاهی، افت فشار.

## Performance Enhancement of Air-Cooled Condenser (A.C.C) by utilizing Nano-composite fins at various air gaps

M. Namazizadeh

R. Haghighi Khoshkhou

F. Joda

Mechanical & Energy Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Mechanical & Energy Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Mechanical & Energy Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

## Abstract

The present study evaluated the effect of simultaneous change of the material of tube bundle fins and air gap between rows of fins in consecutive tube bundles on the performance of A.C.C in order to improve their performance. Changing this air gap as well as the fin material can affect the heat transfer coefficient, air pressure drop, and weight of the tube bundle. In this paper, the suitable material for fin was first determined in different air gap, and then the effect of the velocity of inlet air on tube bundle as well as ambient temperature conditions on the thermo-hydraulic performance of airflow on the selected tube bundle side was studied. According to the results, among the 54 simulated tube bundles, the use of the selected fin material and 1-mm air gap on the tube bundle airside exhibited improved thermohydraulic performance. Using the selected tube bundle, the Nusselt number and the performance evaluation criteria increased by 57.2% and 64.4%, and the friction factor and the overall weight of the tube bundle decreased by 7.9% and 10.8%, respectively, compared to the current bundle.

**Keywords:** Air-cooled condenser, Tube bundle, Nano-composite, Air gap, Power plant cooling, Pressure drop.

کاهش دهد [۱۰].

با توجه به این که در چگالنده‌های هوایی، جریان هوا به عنوان جریان سمت غالب بوده و تعیین کننده عملکرد دسته‌لوله است [۱۱]، اکثر تحقیقات انجام شده به بررسی جریان سمت هوا و ارائه روش‌هایی به منظور بهبود عملکرد جریان در سمت هوا اقدام نموده‌اند که از جمله این روش‌ها می‌توان به ایجاد تغییر در هندسه پره و ارزیابی امکان به‌کارگیری هندسه‌های مختلف برای پره [۱۳-۱۶]، استفاده از گردابه‌ساز بر روی پره‌ها [۱۷]، استفاده از اسپری آب [۱۸، ۱۹] و استفاده از اسپری مواد تغییر فاز دهنده [۲۰] اشاره نمود.

از جمله روش‌هایی که می‌تواند به منظور بهبود عملکرد چگالنده‌های هوایی مورد استفاده قرار گیرد، تغییر جنس دسته‌لوله‌ها است. در حال حاضر دسته‌لوله‌های چگالنده‌های هوایی، از پره‌های آلومینیومی و لوله‌هایی از جنس کربن استیل ساخته می‌شوند. در کنار تلاش‌های زیاد محققان به منظور ارتقا عملکرد ترموهیدرولیکی

## ۱- مقدمه

امروزه با افزایش تقاضای انرژی، استفاده از دستگاه‌های گرمایی کارآمد و با بازدهی بالا، ضروری است [۱-۳]. طی چند دهه گذشته و در راستای بهبود عملکرد دستگاه‌های گرمایی، محققین مختلف از روش‌های فعال و غیرفعال گوناگونی برای افزایش کارایی ترموهیدرولیکی این دستگاه‌ها استفاده کرده‌اند [۴، ۵] که هدف از کاربرد این روش‌ها، ارتقای بازده، کاهش هزینه، سبک‌سازی و فشرده سازی دستگاه‌های گرمایی است [۶].

با توجه به چالش جهانی آب در قرن ۲۱ [۷] به منظور مصرف آب کمتر و حفاظت از منابع آب به خصوص در مناطق گرم و نیمه خشک از سیستم‌های خنک‌کن خشک مستقیم برای چگالش بخار خروجی از توربین نیروگاه‌های فسیلی استفاده می‌شود [۸، ۹]. به‌کارگیری چگالنده هوایی می‌تواند میزان مصرف آب جهت تولید انرژی را تا ۹۵٪

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: r\_haghighi@sbu.ac.ir

چگالنده‌های هوایی، همواره بحث سبک‌سازی دسته‌لوله‌ها و در نتیجه کاهش وزن کلی چگالنده هوایی نیز به عنوان یکی از چالش‌های اساسی برای ارتقا عملکرد کلی چگالنده‌های هوایی مطرح بوده‌است.

در کاربردهای مهندسی اغلب به تلفیق خواص مواد نیاز است [۲۱] و با پیشرفت‌های صورت گرفته در فناوری‌های ساخت و تولید، امروزه استفاده از کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها به سرعت رو به رشد بوده و در صنایع و تجهیزات مختلفی کاربرد دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به صنایع خودروسازی [۲۲-۲۴]، حوزه پزشکی [۲۵]، حوزه الکترونیک [۲۶]، ساخت میکروکانال‌ها [۲۷]، ساخت مبادله‌کن‌های گرمایی [۲۸]، [۲۹] و استفاده در پره‌های توربین [۳۰، ۳۱] اشاره نمود.

یکی دیگر از متغیرهایی که بر رفتار ترموهیدرولیکی سمت هوای دسته‌لوله تاثیرگذار است، تغییر فاصله هوایی بین ردیف پره‌های مربوط به دسته‌لوله‌های متوالی می‌باشد. تغییر این فاصله هوایی از طرفی می‌تواند بر افت فشار و انتقال گرمای جریان سمت هوای دسته‌لوله تاثیرگذار باشد و از طرف دیگر باعث تغییر طول کلی چگالنده هوایی شده و در نتیجه باعث تغییر وزن کلی چگالنده خواهد شد. در سال ۲۰۲۰، نمازی‌زاده و همکاران [۳۲] به بررسی عددی تأثیر این فاصله هوایی بر عملکرد ترموهیدرولیکی جریان سمت هوای دسته‌لوله پرداختند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که سمت هوای دسته‌لوله در فاصله هوایی یک میلی‌متر عملکرد ترموهیدرولیکی بهتری خواهد داشت.

با توجه به تحقیقات انجام شده با هدف بهبود عملکرد چگالنده‌های هوایی، در این مقاله تاثیر تغییر جنس پره‌های دسته‌لوله در فاصله‌های هوایی مختلف بر عملکرد ترموهیدرولیکی جریان سمت هوای دسته‌لوله و همچنین میزان فرسایش ناشی از ذرات جامد مطالعه شده‌است. با بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه چگالنده‌های هوایی به خصوص در سمت پره‌ها، مشخص می‌گردد که تا به حال تأثیر تغییر همزمان جنس پره‌ها و فاصله هوایی بین ردیف پره‌های مربوط به دسته‌لوله‌های متوالی بر عملکرد ترموهیدرولیکی چگالنده هوایی و همچنین میزان فرسایش ناشی از ذرات جامد مورد بررسی و تحقیق قرار نگرفته است. از آنجایی که تغییر این فاصله هوایی و همچنین جنس پره می‌تواند هم بر روی ضریب انتقال گرما و افت فشار جریان هوا در طول پره و هم فرسایش ذرات جامد تأثیرگذار باشد، در این مقاله ابتدا تأثیر تغییر همزمان فاصله هوایی بین ردیف پره‌های بین دو دسته‌لوله متوالی و جنس پره بر عملکرد ترموهیدرولیکی جریان سمت هوای چگالنده مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌است. همچنین پس از تعیین جنس مناسب برای پره و انتخاب دسته‌لوله منتخب، میزان فرسایش ناشی از ذرات جامد در فاصله‌های هوایی مختلف دسته‌لوله منتخب، بررسی و مطالعه شده‌است.

## ۲- دسته‌لوله چگالنده هوایی نیروگاهی

نوع دسته‌لوله‌های مورد استفاده در چگالنده هوایی در طول زمان دچار تغییرات زیادی شده‌است. لوله‌های گرد با پره محیطی، لوله‌های بیضوی و لوله‌های تخت از جمله دسته‌لوله‌های مورد استفاده در چگالنده هوایی بوده‌اند. امروزه برای جلوگیری از ایجاد جریان برگشتی به خاطر اختلاف فشار و همچنین کم‌تر کردن هزینه‌های ساخت، از

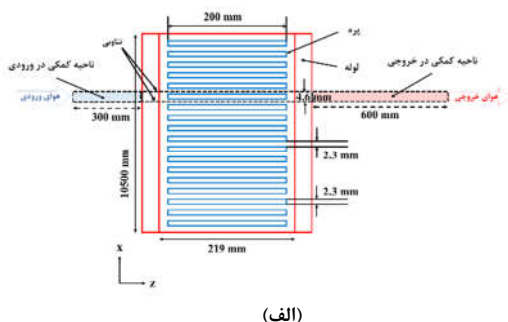
دسته‌لوله‌های تک ردیفه استفاده می‌شود. این دسته‌لوله‌ها از لوله‌های تک‌ردیفه پره‌دار، تشکیل شده‌اند.

در چگالنده‌های هوایی که از دسته‌لوله‌های تک ردیفه ساخته شده‌اند، همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده، جریان بخار از داخل لوله عبور کرده و جریان هوای خنک‌کن با عبور از سمت پره‌ها و با گرفتن گرمای نهان چگالش، باعث تغییر فاز و چگالش بخار داخل لوله‌ها می‌شود. دسته‌لوله‌های چگالنده هوایی از دو بخش لوله و پره تشکیل شده‌اند که در دسته‌لوله‌های فعلی مورد استفاده، لوله از جنس کربن استیل و پره از جنس آلومینیوم ساخته شده‌اند.

در مطالعه حاضر به بررسی چگالنده هوایی نیروگاه زواره پرداخته شده‌است. نیروگاه چرخه ترکیبی زواره با ظرفیت ۴۸۴ مگاوات، شامل دو واحد گازی با ظرفیت ۱۶۲ مگاوات و یک واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی است. طول دسته‌لوله‌های نیروگاه زواره ۱۰۵۰۰ میلی‌متر بوده که ابعاد سطح مقطع لوله  $19 \times 200$  میلی‌متر مربع و ابعاد سطح مقطع پره‌های آن  $19 \times 200$  میلی‌متر مربع است که ضخامت پره‌ها  $0.26$  میلی‌متر و گام آن‌ها  $2/3$  میلی‌متر می‌باشد. با در نظر گرفتن ابعاد و گام پره‌ها مشخص می‌گردد که در هر متر از لوله‌های کربن استیلی، ۴۳۵ پره آلومینیومی بریز گردیده که دامنه محاسباتی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده‌است. در ابتدا و انتهای پره یک ناحیه محاسباتی کمکی به طول ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متر گسترش داده شده‌است تا از یکنواخت بودن جریان هوا در ورودی پره و عدم وجود جریان برگشتی در خروجی پره اطمینان حاصل شود.



شکل ۱- نمای از دسته‌لوله‌های تک ردیفه چگالنده هوایی



(الف)

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (5)$$

دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده هم شامل ناحیه سیال و هم شامل ناحیه جامد است. بنابراین انتقال گرما باید در هر دو ناحیه سیال و جامد مورد بررسی قرار گیرد. فرآیند انتقال گرما در دامنه جامد به صورت انتقال گرمای رسانش خالص در نظر گرفته شده و در دامنه سیال انتقال گرما به صورت ترکیبی از انتقال گرمای رسانش و همرفتی خواهد بود. بنابراین انتقال گرما در پره به صورت زیر است [۳۲]:

$$\nabla(\lambda \cdot \nabla T) = 0 \quad (6)$$

همچنین برای بررسی اثر آشفنگی جریان از مدل آشفنگی Low  $Re\ k-\epsilon$  [۳۳] استفاده شده که معادلات مربوط به این مدل به شرح زیر است [۳۲]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (8)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \left( k^2 / \epsilon \right) \quad (9)$$

$$G_k = -\rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (10)$$

در روابط فوق  $C_{1\epsilon}$ ،  $C_{2\epsilon}$  و  $C_\mu$  مقادیر ثابت هستند که مقدار آن‌ها در مدل آشفنگی Low  $Re\ k-\epsilon$  در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مقادیر متغیرهای مدل آشفنگی Low  $Re\ k-\epsilon$  [۳۳]

$C_\mu$	۰/۰۹
$C_{1\epsilon}$	۱/۴۴
$C_{2\epsilon}$	۱/۹۲
$\sigma_k$	۱/۰
$\sigma_\epsilon$	۱/۳
$\sigma_T$	۱/۰

در بررسی جریان دوفازی جامد-گاز، ذرات به دامنه حل محاسباتی وارد شده و معادلات حرکت برای آن‌ها با استفاده از رویکرد لاگرانژی حل می‌شود. در این رویکرد معادله نیروهای وارد بر ذرات جامد که تبیین کننده مسیر حرکت ذرات جامد در میدان جریان سیال است، با استفاده از مدل فاز گسسته حل شده است. شکل کلی این معادلات برای یک ذره با جرم ثابت به صورت زیر است [۳۴]:

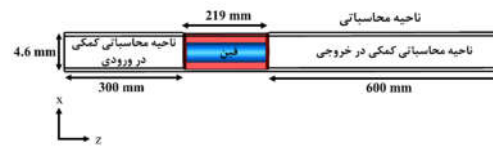
$$\frac{d\vec{U}_p}{dt} = (1 - B)\vec{g} + \frac{1}{\tau_p} v_{rel} \hat{n}_{rel} + \vec{f}_{saff} + \vec{f}_{Brownian} + \vec{f}_{VM} + \vec{f}_{\Delta p} \quad (11)$$

$$\frac{d\vec{X}_p}{dt} = \vec{U}_p \quad (12)$$

تحقیقات حاکی از آن است که مقدار نیروهای برآ، سافمن، براونی و جرم مجازی برای ذرات بسیار ریز با اندازه‌های کمتر از میکرون قابل توجه می‌باشد و در بررسی حرکت ذرات درشت‌تر، می‌توان از اثر این نیروها در مقابل نیروی پسا صرف‌نظر نمود [۳۴]. شکل کلی نیروی برآ سافمن در زیر آمده که در آن  $K$  ثابت عددی و برابر با ۲/۵۹۴ است



(ب)



(ج)

شکل ۲- دسته‌لوله انتخابی (الف) ابعاد و مشخصات هندسی (ب) فاصله هوایی بین دو دسته‌لوله متوالی (ج) نمایی از ناحیه محاسباتی

### ۳- فرمول‌بندی و مدل‌سازی

در کار حاضر به منظور مدل‌سازی میدان جریان سیال پیوسته، معادلات RANS<sup>۱</sup> با رویکرد اولبری به کار گرفته شده‌اند که این معادلات برای حل جریان‌های آشفته سیالات نیوتنی تراکم ناپذیر استفاده می‌شوند. این معادلات با استفاده از روش تنش‌های رینولدز، متوسط‌گیری زمانی می‌شوند. چگالی جریان هوا متغیر با دما در نظر گرفته شده و از مدل گاز ایده‌آل غیرقابل تراکم استفاده شده است. همچنین سایر خواص سیال ثابت و همگن در نظر گرفته شده‌اند. در مدل حاضر با صرف‌نظر از مقاومت تماسی بین لوله و پره‌ها و همچنین انتقال گرمای تابشی، جریان و انتقال گرمای هوای خنک‌کننده به صورت پایا فرض شده است. معادلات حاکم بر جریان سمت هوای دسته‌لوله به شکل زیر در نظر گرفته شده است [۱۳]:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

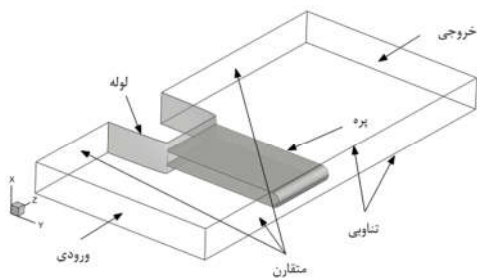
$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] + \rho g_i \quad (2)$$

(i, j, k=1,2,3 and i≠j)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [u_j(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_j(\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (3)$$

$$E = h_e - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \quad (4)$$

<sup>1</sup> Reynolds averaged Navier-Stokes



شکل ۳- شرایط مرزی

با توجه به این که انتخاب ماده مناسب برای پره‌ها در فاصله‌های هوایی مختلف یکی از اهداف اصلی کار حاضر است، از مواد مختلفی که خواص آن‌ها از تحقیقات انجام شده قبلی استخراج شده، استفاده می‌گردد. در این پژوهش تأثیر استفاده از شش نوع ماده مختلف به عنوان پره‌های دسته‌لوله‌های چگالنده‌های هوایی مورد بررسی قرار گرفته که مشخصات آن‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- شش نوع دسته‌لوله مورد بررسی

دسته‌لوله	جنس پره
M <sub>1</sub>	آلومینیوم (Al) [35]
M <sub>2</sub>	آلومینیوم نیتريد (AlN) [36, 37]
M <sub>3</sub>	نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی با ۰/۵٪ وزنی نانوصفحات گرافن (Al-0.5 wt.% GNPs) [35]
M <sub>4</sub>	منیزیم (Mg) [38]
M <sub>5</sub>	کامپوزیت زمینه منیزیمی مقاوم شده با ۱٪ حجمی الیاف کربنی کوتاه و پوشش داده شده با نیکل (Mg-1.0 vol% carbon fibers with nickel coating) [39]
M <sub>6</sub>	آلیاژ منیزیم-آلومینیوم (as-cost Mg-0.5Al) [40]

هر شش نوع دسته‌لوله معرفی شده در جدول ۳، از لوله‌های کربن استیلی ساخته شده‌اند. در شکل ۴ رسانایی گرمایی مربوط به پره‌های شش نوع دسته‌لوله در محدوده دمای ۲۶۰ تا ۳۲۰ کلوین نشان داده شده و سایر خواص از مراجع مربوطه استخراج شده‌است. همچنین با تغییر جنس پره‌ها، جرم کلی پره‌ها و دسته‌لوله‌ها تغییر خواهد کرد که در شکل ۵ نسبت جرم کلی دسته‌لوله‌های پیشنهادی به دسته‌لوله‌های فعلی (M<sub>1</sub>) نشان داده شده‌است.

برای شبیه‌سازی جریان دوفازی، ذرات جامد با اندازه‌های مختلف و در محدوده ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرومتر با سرعت اولیه صفر در جهت نرمال مرز ورودی و در یک بازه زمانی مشخص ۲۰ ثانیه به داخل دامنه محاسباتی تزریق می‌گردند. چگالی ذرات تزریق شده مشابه خرده چوب و خاک اره و برابر با ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و دبی جرمی ذرات ۰/۰۱ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده‌است. همچنین توزیع جرمی ذرات تزریق شده با اندازه‌های مختلف و به کمک توزیع روسین-راملر صورت گرفته‌است.

[۳۴]:

$$\vec{f}_{saff} = \frac{2\rho_f v^{0.5} K d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{ik} d_{kl})^{0.25}} (\bar{U}_f - \bar{U}_p) \quad (13)$$

همچنین نیروی براونی با استفاده از یک فرآیند نویز سفید گوسی و مطابق با روابط زیر محاسبه می‌گردد [۳۴]:

$$S_{n,ij} = S_0 \delta_{ij} \quad (14)$$

$$S_0 = \frac{216vK_B T}{\pi^2 \rho d_p^5 \left(\frac{\rho_p}{\rho}\right)^2 C_c} \quad (15)$$

$$\vec{F}_{Brownian} = \zeta_i \sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}} \quad (16)$$

در جریان دوفازی، نیروی جرم مجازی به اینرسی اعمال شده به ذرات جامد در نتیجه افزایش یا کاهش شتاب فاز سیال اطلاق می‌شود. این نیرو توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۴]:

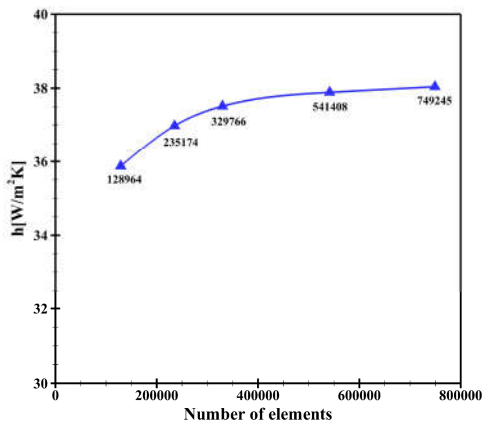
$$F_{VM} = \frac{\rho_p V_p}{2} \left( \frac{Du_f}{Dt} - \frac{du_p}{dt} \right) \quad (17)$$

در خصوص شرایط مرزی لازم برای حل مسئله، جریان هوا با دما و سرعت ثابت وارد ناحیه محاسباتی می‌شود که در نتیجه در ورودی ناحیه محاسباتی، شرط مرزی  $u = u_a = \text{const}$ ،  $T = T_a = \text{const}$  و  $v = w = 0$  برقرار است. همچنین در خروجی دامنه محاسباتی شرط  $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0$  با توجه به این که در داخل لوله، چگالش بخار رخ می‌دهد، در دیواره لوله شرط مرزی دیواره ثابت با دمای ثابت برقرار است که در شکل ۳ و جدول ۲ جزئیات شرایط مرزی مورد استفاده برای حل معادلات حاکم، آورده شده‌است.

جدول ۲- شرایط مرزی

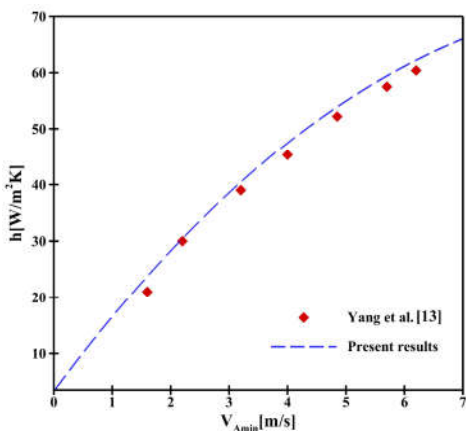
$u = u_a = \text{const}$ $v = w = 0$ $T = T_a = \text{const}$	ورودی
$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0$	خروجی
$u = v = w = 0$ $T = T_w = \text{const}$	دیواره لوله
$v = 0$ $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0$ $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$	مقارن
$u = v = w = 0$ $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$	تناوبی

با توجه به نتایج حاصل، شبکه‌بندی چهارم به عنوان شبکه منتخب در حل عددی، مورد استفاده قرار گرفته است. این شبکه‌بندی دارای ۵۴۱۴۰۸ المان است.



شکل ۶- بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی مورد استفاده

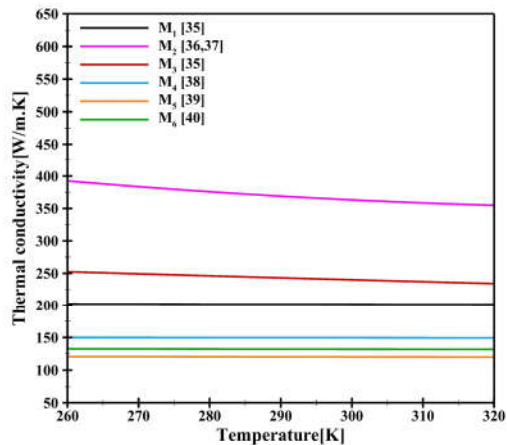
به منظور اعتبارسنجی روش عددی، از نتایج آزمایشگاهی پیشین [۱۳] استفاده شده است که برای این منظور از مقایسه ضریب انتقال گرمای همرفتی جریان هوای خنک‌کننده در سرعت‌های مختلف هوای ورودی به پره استفاده شده و نتایج بدست آمده از روش عددی مورد استفاده در این مقاله با نتایج کار آزمایشگاهی یانگ و همکاران [۱۳] مقایسه شده و نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. مقایسه نتایج روش عددی و داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که روش حل عددی، از تطابق و صحت قابل قبولی برخوردار است که در نتیجه مدل و روش محاسباتی استفاده شده در مقاله حاضر، برای دستیابی به اهداف مدنظر، مناسب می‌باشد.



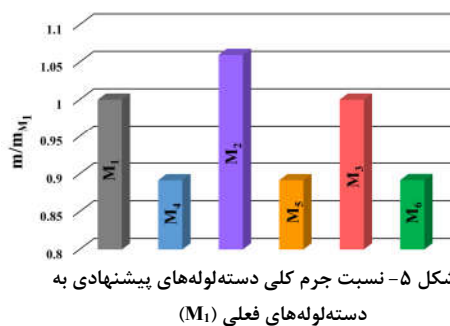
شکل ۷- اعتبارسنجی روش عددی

## ۵- نتایج و بحث

در کار حاضر به منظور شبیه‌سازی جریان و حل معادلات ناویر-استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز، از روش حجم محدود در یک هندسه سه‌بعدی استفاده شده است. عبارات پخش و انتقال به وسیله



شکل ۴- رسانایی گرمایی پره‌های شش دسته‌لوله پیشنهادی



شکل ۵- نسبت جرم کلی دسته‌لوله‌های پیشنهادی به دسته‌لوله‌های فعلی (M1)

## ۴- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی نتایج

به منظور کاهش خطاهای محاسباتی و همچنین افزایش دقت حل عددی، بایستی شبکه‌بندی مورد استفاده از کیفیت مناسبی برخوردار باشد. در کار حاضر به جهت آشفته بودن جریان، شبکه‌بندی میدان سیال از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به این‌که دامنه حل سیال گسسته در نظر گرفته می‌شود، در نواحی از دامنه حل که گرادین‌های شدید وجود دارد، شبکه‌بندی باید به قدر کافی ریز باشد تا تغییرات متغیرهای جریان به خوبی در نظر گرفته شوند. در کار حاضر، شبکه‌بندی توسط نرم‌افزار ANSYS Meshing صورت گرفته است. شبکه‌بندی به صورت سلول‌های شش وجهی و هرمی به طور بی‌سازمان انجام گرفت تا امکان تراکم گره‌ها و المان‌ها به طور محلی در موقعیت به خصوصی از هندسه وجود داشته باشد و سطوح با دقت بیشتری گسسته شوند. در نزدیکی دیواره‌ها ۵ لایه شبکه با نرخ رشد ۱/۲ در نظر گرفته شده و ضخامت اولین لایه به گونه‌ای تنظیم شده است که  $y^+$  در محدوده ۱۰ قرار داشته باشد. همچنین به منظور اطمینان از دقت حل عددی لازم است اثر اندازه المان‌ها بر متغیرهای مسئله، شبیه‌سازی با چندین شبکه با تعداد المان‌های مختلف انجام گیرد.

به منظور بررسی استقلال از شبکه حل عددی، هندسه حل با ۵ نوع شبکه با اندازه‌های مختلف شبکه‌بندی شده و ضریب انتقال گرمای همرفتی جریان هوا به عنوان معیار انتخاب شبکه مناسب برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. که نتایج استقلال از شبکه برای سرعت هوای ۱/۷۲ m/s و فاصله هوایی یک میلی‌متر در شکل ۶ آورده شده است.

جدول ۴- طول کلی چگالنده هوایی در فاصله‌های هوایی مختلف

فاصله هوایی [mm]	طول کلی چگالنده [mm]
۰	۸۱۵۲۲
۱	۸۲۹۰۸
۲	۸۴۲۹۴
۳	۸۵۶۸۰
۴	۸۷۰۶۶
۵	۸۸۴۵۲

در کار حاضر، ابتدا تأثیر استفاده از پره‌هایی با جنس متفاوت در فاصله‌های هوایی مختلف بر عملکرد ترموهیدرولیکی جریان در سمت هوای دسته‌لوله برای ۵۴ حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته که ۵۴ حالت شبیه‌سازی شده در جدول ۵ آورده شده‌است.

جدول ۵- پنجاه و چهار حالت شبیه‌سازی شده

فاصله هوایی [mm]	شماره حالت					
	نوع دسته‌لوله					
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>
۰	۱	۱۰	۱۹	۲۸	۳۷	۴۶
۰/۵	۲	۱۱	۲۰	۲۹	۳۸	۴۷
۱	۳	۱۲	۲۱	۳۰	۳۹	۴۸
۱/۵	۴	۱۳	۲۲	۳۱	۴۰	۴۹
۲	۵	۱۴	۲۳	۳۲	۴۱	۵۰
۲/۵	۶	۱۵	۲۴	۳۳	۴۲	۵۱
۳	۷	۱۶	۲۵	۳۴	۴۳	۵۲
۴	۸	۱۷	۲۶	۳۵	۴۴	۵۳
۵	۹	۱۸	۲۷	۳۶	۴۵	۵۴

در شکل ۸ نتایج مربوط به تغییرات عدد ناسلت جریان در سمت هوای دسته‌لوله با تغییر جنس پره در فاصله‌های هوایی مختلف نشان داده شده‌است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش مقدار فاصله هوایی عدد ناسلت کاهش خواهد یافت و در فاصله‌های هوایی مختلف، بالاترین عدد ناسلت مربوط به دسته‌لوله M<sub>5</sub> و کمترین آن مربوط به دسته‌لوله M<sub>2</sub> است. در بین ۵۴ دسته‌لوله شبیه‌سازی شده، بیشترین عدد ناسلت مربوط به دسته‌لوله M<sub>5</sub> با فاصله هوایی ۰/۵ میلی‌متر خواهد بود که عدد ناسلت آن نسبت به دسته‌لوله‌های فعلی ۵۹/۲٪ افزایش خواهد یافت.

همچنین تغییرات ضریب اصطکاک جریان سمت هوا، در دسته‌لوله‌های مختلف در فاصله‌های هوایی گوناگون در شکل ۹ نشان داده شده که نتایج حاکی از آن است که در هر شش دسته‌لوله مورد بررسی، کمترین ضریب اصطکاک جریان هوا در فاصله هوایی ۱ میلی‌متر رخ می‌دهد و تغییر جنس ماده سازنده پره تغییر چندانی در ضریب اصطکاک نخواهد داشت. همچنین نتایج حاکی از آن است که در بین ۵۴ دسته‌لوله مورد بررسی، کمترین ضریب اصطکاک مربوط به دسته‌لوله M<sub>5</sub> با فاصله هوایی یک میلی‌متر است که ضریب اصطکاک جریان هوا در این دسته‌لوله نسبت به دسته‌لوله‌های فعلی ۷/۹٪ کاهش می‌یابد.

طرح بالادستی مرتبه دوم گسسته‌سازی شده‌اند. همچنین برای حل معادلات حرکت، جریان سیال به صورت پایدار حل شده‌اند. برای شبیه‌سازی اثرات آشفتگی و اغتشاش جریان از مدل آشفتگی Low Re  $k-\epsilon$  استفاده شده و برای کوپلینگ فشار و سرعت، روش SIMPLE [۴۱] به کار رفته‌است. همچنین شرط همگرایی برای مقادیر سرعت، تنش‌های رینولدز و عبارات پیوستگی کمتر از ۰/۰۰۰۰۰۱ در نظر گرفته شد.

به منظور مشخص نمودن رفتار ترموهیدرولیکی سمت هوای دسته‌لوله از مقدار ضریب انتقال گرما و افت فشار جریان هوا استفاده شده‌است که ضریب انتقال گرمای سمت هوای دسته‌لوله با استفاده از روابط زیر بدست خواهد آمد [۳۲]:

$$h = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} \quad (17)$$

$$\Delta T = T_{tu} - T \quad (18)$$

$$\bar{T} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (19)$$

$$T_{out} = \frac{\iint \rho u \cdot T \cdot dA}{\iint \rho u \cdot dA} \quad (20)$$

همچنین افت فشار در سمت هوای دسته‌لوله از رابطه زیر بدست می‌آید [۳۲]:

$$\Delta p = \bar{p}_{in} - \bar{p}_{out} \quad (21)$$

$$\bar{p} = \frac{\iint p \cdot dA}{\iint dA} \quad (22)$$

برای مقایسه عملکرد ترموهیدرولیکی سمت هوای دسته‌لوله در فاصله‌های هوایی مختلف از معیار ارزیابی عملکرد<sup>۱</sup> PEC استفاده شده‌است که تأثیر هردو متغیر انتقال گرما و افت فشار در آن در نظر گرفته شده و به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۲]:

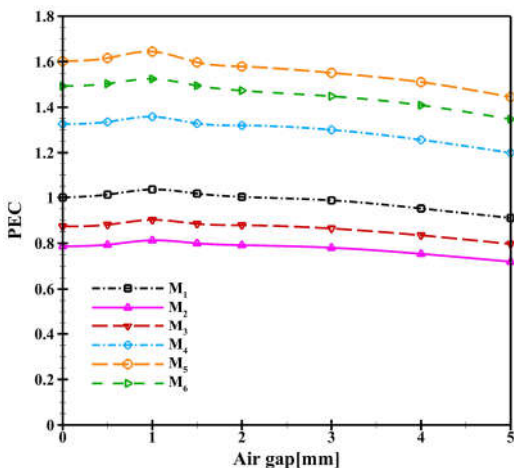
$$PEC = \left( \frac{Nu}{Nu_0} \right) \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (23)$$

$$Nu = \frac{h \cdot D_t}{\lambda} \quad (24)$$

$$f = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho V_{Amin}^2} \quad (25)$$

با توجه به این‌که با تغییر فاصله هوایی بین ردیف پره‌های مربوط به دسته‌لوله‌های متوالی، طول کلی چگالنده نیز تغییر می‌نماید، برای مشخص نمودن محدوده تغییرات فاصله هوایی، از فرض محدودیت افزایش ۱۰ درصدی طول کلی چگالنده هوایی نیروگاه استفاده شده است که در نتیجه، محدوده ۰ تا ۵ میلی‌متر به عنوان محدوده تغییر فاصله هوایی در نظر گرفته شد. چگالنده هوایی نیروگاه نمونه شامل ۱۴ ماژول بوده و هر ماژول دارای ۲۰۴ دسته‌لوله است که در جدول ۴ تغییرات طول کلی چگالنده در فاصله‌های هوایی مختلف (در محدوده ۰ تا ۵ میلی‌متر) نشان داده شده‌است.

<sup>1</sup> Performance Evaluation Criteria



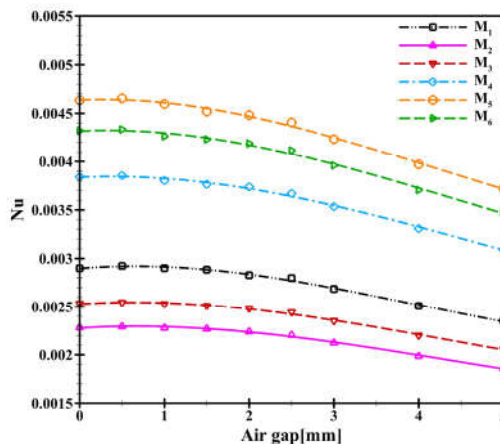
شکل ۱۰- تغییرات PEC جریان سمت هوا با تغییر جنس ماده سازنده پره در فاصله‌های هوایی مختلف

در ادامه به منظور مقایسه عملکرد روش استفاده شده در کار حاضر با کارهای قبلی انجام شده، مقدار PEC بدست آمده در کار حاضر با دو پژوهش مشابه قبلی مقایسه شده است. پژوهش‌های قبلی انجام شده به طور دقیق و کامل مورد بررسی قرار گرفت و دو پژوهش دو و همکاران [۱۷] و همچنین جین و همکاران [۱۶] به عنوان دو نمونه از تحقیقات قبلی، شناسایی و انتخاب شدند.

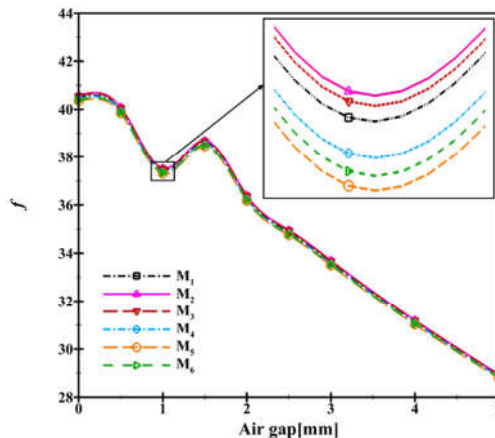
در پژوهش اول، تأثیر استفاده از گردابه‌سازهای مختلف بر عملکرد سمت هوای دسته‌لوله را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی از چهار نوع گردابه‌ساز گوناگون با زوایای حمله مختلف برای بهبود عملکرد جریان در سمت هوای دسته‌لوله استفاده شد. نتایج حاکی از آن است که در صورتی که سرعت هوای ورودی به پره در محدوده ۲/۱ متر بر ثانیه باشد، با استفاده از گردابه‌سازهای مختلف ضریب PEC در محدوده ۱/۱ قرار دارد.

همچنین در مطالعه دیگری به بررسی عملکرد چگالنده‌های هوایی با دسته‌لوله‌های مورب پرداخته شده است. در این بررسی ۵ نوع دسته‌لوله مختلف با زوایای ۰ و ۱۵ و ۳۰ و ۴۵ و ۶۰ بررسی شدند. با توجه به اطلاعات گزارش شده در مقاله، با استفاده از ۴ نوع دسته‌لوله مورب بررسی شده با زوایای ۱۵ و ۳۰ و ۴۵ و ۶۰ و در صورتی که سرعت هوای ورودی به پره در محدوده ۲ متر بر ثانیه باشد، مقدار PEC در محدوده ۰/۹۴ تا ۰/۹۹ خواهد بود. لازم به ذکر است در کار حاضر، با انتخاب دسته‌لوله با جنس و فاصله هوایی مناسب، در صورتی که سرعت هوای ورودی به پره در محدوده ۲/۱ متر بر ثانیه باشد، مقدار ضریب عملکرد ۱/۶۴ در دسترس خواهد بود که نسبت به دو روش قبلی بررسی شده مقدار بسیار مناسبی است.

به عبارت دیگر می‌توان گفت در صورتی که از دسته‌لوله  $M_5$  با فاصله هوایی یک میلی‌متر استفاده شود، معیار ارزیابی عملکرد دسته‌لوله به میزان ۶۴٪ بهبود خواهد یافت که این بهبود ناشی از دو عامل است؛ از طرفی میزان گرمای منتقل شده به جریان بخار داخل چگالنده جهت چگالش آن افزایش می‌یابد که سبب افزایش راندمان خنک‌کاری سیستم خنک‌کن خواهد شد و از سمت دیگر با کاهش ضریب اصطکاک و در نتیجه کاهش میزان افت فشار جریان هوای



شکل ۸- تغییرات عدد ناسلت جریان سمت هوا با تغییر جنس ماده سازنده پره در فاصله‌های هوایی مختلف

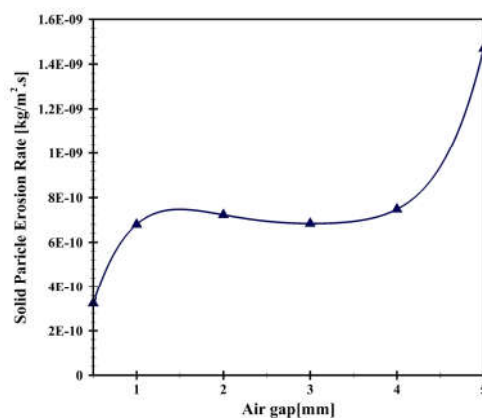


شکل ۹- تغییرات ضریب اصطکاک جریان سمت هوا با تغییر جنس ماده سازنده پره در فاصله‌های هوایی مختلف

نتایج مربوط به تغییرات PEC در فاصله‌های هوایی مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده که نتایج حاکی از آن است که در بین تمامی دسته‌لوله‌های مورد بررسی، بهترین عملکرد ترموهیدرولیکی مربوط به دسته‌لوله  $M_5$  با فاصله هوایی یک میلی‌متر است به گونه‌ای که در این دسته‌لوله، PEC نسبت به دسته‌لوله‌های فعلی به میزان ۶۴/۴٪ افزایش خواهد یافت. بنابراین با در نظر گرفتن موارد بررسی شده می‌توان اذعان نمود که در بین ۵۴ دسته‌لوله مورد بررسی، بهترین عملکرد ترموهیدرولیکی مربوط به دسته‌لوله  $M_5$  با فاصله هوایی یک میلی‌متر خواهد بود.

خنک‌کننده، توان مصرفی فن‌های چگالنده کاهش پیدا خواهد کرد. از آنجایی که فن‌های چگالنده‌های هوایی نیروگاه دارای توان مصرفی قابل توجهی هستند و جز مصارف داخلی اصلی نیروگاه به شمار می‌آیند، کاهش توان مصرفی فن‌های چگالنده هوایی نیروگاهی منجر به بهبود عملکرد کلی نیروگاه حرارتی نیز می‌شود.

یکی از پدیده‌هایی که از وجود ذرات معلق و گرد و غبار در جریان هوا ناشی می‌شود، فرسایش ناشی از ذرات جامد است که در ادامه میزان فرسایش ناشی از ذرات جامد در فاصله‌های هوایی مختلف در سمت هوای دسته‌لوله منتخب بررسی شده‌است. در شکل ۱۱ تغییرات میزان فرسایش ذرات جامد با تغییر فاصله هوایی نشان داده شده‌است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش فاصله هوایی، میزان فرسایش ذرات جامد افزایش می‌یابد لکن در محدوده ۱ تا ۴ میلی‌متر، افزایش محسوسی در میزان فرسایش مشاهده نمی‌گردد. همچنین با توجه به این‌که در فاصله هوایی یک میلی‌متری، دسته‌لوله رفتار ترموهیدرولیکی بهتری نیز دارد، می‌توان ادعان نمود که با در نظر گرفتن رفتار ترموهیدرولیکی و همچنین فرسایش ذرات جامد، فاصله هوایی مناسب برابر با یک میلی‌متر خواهد بود.



شکل ۱۱- تغییرات میزان فرسایش ناشی از ذرات جامد در سمت هوای دسته‌لوله با تغییر فاصله هوایی

## ۶- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های ارتقا عملکرد چگالنده‌های هوایی، بهبود عملکرد دسته‌لوله‌های این چگالنده‌ها، به خصوص در سمت هوای دسته‌لوله است. در کار حاضر به منظور بهبود عملکرد چگالنده‌های هوایی نیروگاهی، تأثیر تغییر جنس ماده سازنده پره در فاصله‌های هوایی مختلف با هدف سبک‌سازی دسته‌لوله و بهبود عملکرد ترموهیدرولیکی دسته‌لوله مورد ارزیابی قرار گرفت. برای جنس پره از شش نوع ماده مختلف که خواص آن‌ها از پژوهش‌های قبلی استخراج شد، استفاده گردید. همچنین تغییر ده درصدی طول کلی چگالنده هوایی نیروگاه زواره به عنوان معیار تعیین محدوده تغییرات فاصله هوایی در نظر گرفته شد. در ادامه برای مقایسه عملکرد ترموهیدرولیکی دسته‌لوله‌های مختلف از معیار ارزیابی عملکرد PEC استفاده شد.

در کار حاضر، ابتدا تأثیر تغییر جنس پره در فاصله‌های هوایی مختلف بر عملکرد ترموهیدرولیکی سمت هوای دسته‌لوله مورد بررسی

قرار گرفت که نتایج حاکی از آن است که در صورتی که از دسته‌لوله M<sub>5</sub> استفاده شود، در فاصله‌های هوایی مختلف، دسته‌لوله عملکرد ترموهیدرولیکی بهتری خواهد داشت. نتایج نشان می‌دهد که در بین ۵۴ دسته‌لوله مورد بررسی در صورت استفاده از دسته‌لوله‌های M<sub>5</sub> و انتخاب فاصله هوایی یک میلی‌متر، جریان در سمت هوای دسته‌لوله عملکرد ترموهیدرولیکی بهتری خواهد داشت به طوری که عدد ناسلت به میزان ۵۷/۲٪ افزایش، PEC به میزان ۶۴/۴٪ افزایش، ضریب اصطکاک به میزان ۷/۹٪ کاهش و وزن کلی دسته‌لوله‌ها به میزان ۱۰/۸ درصد کاهش خواهد یافت. نتیجه دیگر این است که تغییر جنس پره، در مقدار فاصله هوایی مناسب برای عملکرد ترموهیدرولیکی بهتر جریان در سمت هوای دسته‌لوله تأثیری ندارد و در تمامی دسته‌لوله‌های مورد بررسی، در فاصله هوایی یک میلی‌متر، دسته‌لوله عملکرد ترموهیدرولیکی بهتری خواهد داشت. از طرفی نتایج حاکی از آن است که با افزایش فاصله هوایی، میزان فرسایش ذرات جامد افزایش می‌یابد لکن در محدوده ۱ تا ۴ میلی‌متر، افزایش محسوسی در میزان فرسایش مشاهده نمی‌گردد. همچنین با توجه به این‌که در فاصله هوایی یک میلی‌متری، دسته‌لوله رفتار ترموهیدرولیکی بهتری نیز دارد، می‌توان ادعان نمود که با در نظر گرفتن رفتار ترموهیدرولیکی و همچنین فرسایش ذرات جامد، فاصله هوایی مناسب برابر با یک میلی‌متر خواهد بود.

## ۷- نمادها

A	مساحت سطح انتقال گرما [m <sup>2</sup> ]
B	نسبت چگالی سیال به ذره
b	ضخامت پره [mm]
C <sub>1E</sub> , C <sub>2E</sub> , C <sub>μ</sub>	ثابت‌های مدل آشفتگی
D <sub>t</sub>	قطر لوله [mm]
d <sub>ij</sub>	تانسور تغییر شکل
E	انرژی داخلی [J/kg]
f	ضریب اصطکاک
G	تولید انرژی جنبشی آشفتگی [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
g	شتاب گرانش [m/s <sup>2</sup> ]
h	ضریب انتقال گرمای همرفتی جریان سمت هوا [W/m <sup>2</sup> .K]
h <sub>c</sub>	آنتالپی مخصوص [J/kg]
K <sub>B</sub>	ثابت استفان بولتزمن
k	انرژی جنبشی آشفتگی [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
Nu	عدد بی بعد ناسلت
P	فشار [Pa]
$\bar{p}$	فشار متوسط جریان هوا [Pa]
Q	آهنگ انتقال گرما [W]
$\vec{r}$	بردار موقعیت
T	دما [K]
t	زمان [s]
$\bar{T}$	متوسط دمای جریان هوا [K]
T <sub>tu</sub>	دمای سطح بیرونی لوله [K]
u, v, w	مولفه‌های سرعت [m/s]



- condenser. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 135, pp. 717-731, 2019.
- [9] Huang, X., et al., Effects of geometric structures of air deflectors on thermo-flow performances of air-cooled condenser. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 118, pp. 1022-1039, 2018.
- [10] Davies III, W.A. and P. Hrnjak, Heat transfer and flow regimes during counter-flow steam condensation in flattened-tube air-cooled condensers. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 147, pp. 118930, 2020.
- [11] Davies III, W.A., et al., Heat transfer and flow regimes in large flattened-tube steam condensers. Applied Thermal Engineering, Vol. 148, pp. 722-733, 2019.
- [12] Deng, H. and J. Liu, Performance prediction of finned air-cooled condenser using a conjugate heat-transfer model. Applied Thermal Engineering, Vol. 150, pp. 386-397, 2019.
- [13] Yang, L., et al., Thermal-flow characteristics of the new wave-finned flat tube bundles in air-cooled condensers. International Journal of Thermal Sciences, Vol. 53, pp. 166-174, 2012.
- [14] Duan, F., et al., Numerical study of laminar flow and heat transfer characteristics in the fin side of the intermittent wavy finned flat tube heat exchanger. Applied Thermal Engineering, Vol. 103, pp. 112-127, 2016.
- [15] Lin, J., et al., Improving Air-Side Heat Transfer Performance in Air-Cooled Power Plant Condensers. Applied Thermal Engineering, Vol.170, pp.114913, 2020.
- [16] Jin, R., et al., Thermo-flow performances of air-cooled condenser cell with oblique finned tube bundles. International Journal of Thermal Sciences, Vol. 135, pp. 478-492, 2019.
- [17] Du, X., et al., Heat transfer enhancement of wavy finned flat tube by punched longitudinal vortex generators. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 75, pp. 368-380, 2014.
- [18] Xiao, L., et al., Experimental study on heat transfer enhancement of wavy finned flat tubes by water spray cooling. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 110, pp. 383-392, 2017.
- [19] Xiao, L., et al., Numerical study on performance improvement of air-cooled condenser by water spray cooling. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 125, pp. 1028-1042, 2018.
- [20] Xu, B., et al., System-level analysis of a novel air-cooled condenser using spray freezing of phase change materials. Applied Thermal Engineering, Vol. 131, pp. 102-114, 2018.
- [۲۱] پرویزی س. و همکاران، بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت AA 6061 / SiC تولید شده با فرایند اصطکاکی اغتشاشی چند مرحله ای. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۵۰، ش. ۱، ص. ۵۵-۶۰، ۱۳۹۹.
- [22] Selvam, C., et al., Overall heat transfer coefficient improvement of an automobile radiator with graphene based suspensions. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 115, pp. 580-588, 2017.
- [23] Aghareb Parast, M.S., et al., Investigation on effects of lubrication and heat treatment on fretting fatigue behavior of aluminum-matrix nano-composite. Modares Mechanical Engineering, Vol. 21, No. 8, 2021.
- [۲۴] آزادی م.، زمردی پور م. و فریدون ع.، مطالعه اثر نرخ بارگذاری بر خواص کششی الیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیت پایه آلومینیومی. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۵۱، ش. ۱، ص. ۹-۱۸، ۱۴۰۰.
- [25] Sharifianjazi, F., et al., Hydroxyapatite Consolidated by Zirconia: Applications for Dental Implant. Journal of Composites and Compounds, Vol. 2, No. 2, pp. 26-34, 2020.
- [26] Ren, Q., P. Guo, and J. Zhu, Thermal management of electronic devices using pin-fin based cascade microencapsulated PCM/expanded graphite composite.

سرعت ذره [m/s]	$U_p$
سرعت در محل حداقل جریان [m/s]	$V_{A_{min}}$
حجم ذره [m <sup>3</sup> ]	$V_p$
مختصات کارتزین	x, y, z
<b>علائم یونانی</b>	
اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	$\varepsilon$
دلتهای کرونیگر	$\delta_{ij}$
رسانایی گرمایی [W/m.K]	$\lambda$
عدد تصادفی توزیع گوسی	$\zeta_i$
لزجت دینامیکی [Pa.s]	$\mu$
چگالی [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$
عدد پراتل آشفتگی	$\sigma$
تانسور تنش [J/m <sup>3</sup> ]	$\tau_{ij}$
<b>زیروندها</b>	
مقدار متغیر در فاصله هوایی صفر	0
هوا	A
موثر	Eff
سیال	F
ورودی	In
حداقل	Min
خروجی	Out
ذره جامد	P
آشفتگی	T

## ۸- مراجع

- [1] Mangrulkar, C.K., et al., Thermal performance escalation of cross flow heat exchanger using in-line elliptical tubes. Experimental Heat Transfer, Vol.3, No.7, pp. 1-26, 2020.
- [۲] اتحاد، ا. و ع. الهامی امیری، بررسی عددی تاثیر هندسه بلوک های متخلخل بر افزایش انتقال گرمای همرفتی و افت فشار در جریان نانو سیال درون کانال ها. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۵۱، ش. ۴، ص. ۳۱-۴۰، ۱۴۰۰.
- [۳] درستکار، م. و آ. میرعبداله لواسانی، عملکرد هیدرولیکی - گرمایی یک مبادله کن گرمایی لوله ای غیر دایروی با پره کنگره ای. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۵۱، ش. ۴، ص. ۳۸۷-۳۹۴، ۱۴۰۰.
- [4] Chamoli, S., et al., Numerical optimization of design parameters for a modified double-layer microchannel heat sink. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 138, pp. 373-389, 2019.
- [۵] توکل، م.م.، ح. سعادت، و م. یعقوبی، بررسی تجربی ساختار حرارتی و انتقال حرارت همرفتی از مجموعه پره های سوراخدار با یک سوراخ متقاطع، مجله مکانیک سازه ها و شماره ها، د. ۵، ش. ۳، ص. ۱۹۷-۲۰۸، ۱۳۹۴.
- [6] Bhattacharyya, S., et al., Thermohydraulic characteristics of inline and staggered angular cut baffle inserts in the turbulent flow regime. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 140, No.3, pp. 1-18, 2019.
- [7] Makarigakis, A.K. and B.E. Jimenez-Cisneros, UNESCO's Contribution to Face Global Water Challenges. Water, Vol. 11, No. 2, pp. 388, 2019.
- [8] Deng, H., J. Liu, and W. Zheng, Analysis and comparison on condensation performance of core tubes in air-cooling

- International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 149, pp. 119199, 2020.
- [27] Vajdi, M., et al., Heat transfer and pressure drop in a ZrB<sub>2</sub> microchannel heat sink: a numerical approach. *Ceramics International*, Vol. 46, No. 2, pp. 1730-1735, 2020.
- [28] Nekahi, S., et al., TiB<sub>2</sub>-SiC-based ceramics as alternative efficient micro heat exchangers. *Ceramics International*, Vol. 45, No. 15, pp. 19060-19067, 2019.
- [29] Arie, M., et al., An additively manufactured novel polymer composite heat exchanger for dry cooling applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 147, pp. 118889, 2020.
- [30] Nekahi, S., et al., A numerical approach to the heat transfer and thermal stress in a gas turbine stator blade made of HfB<sub>2</sub>. *Ceramics International*, Vol. 45, No. 18, pp. 24060-24069, 2019.
- [31] Wu, F., et al., Numerical investigations on flow and heat transfer of swirl and impingement composite cooling structures of turbine blade leading edge. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 144, pp. 118625, 2019.
- [32] Namazizadeh, M. and F. Joda, Effect of Air Gap on thermohydraulic performance of finned tube bundles. *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 20, pp. 100687, 2020.
- [33] Tao, W.-Q., Numerical heat transfer, Xi'an Jiaotong University Press, Xi'an, 2001.
- [34] Hosseini, S.B., R.H. Khoshkhou, and S.J. Malabad, Numerical study on polydisperse particle deposition in a compact heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 127, pp. 330-346, 2017.
- [35] Saboori, A., et al., An investigation on the sinterability and the compaction behavior of aluminum/graphene nanoplatelets (GNPs) prepared by powder metallurgy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 26, No. 3, pp. 993-999, 2017.
- [36] Hansdah, G. and B.K. Sahoo, Pyroelectric Property of Binary Nitrides (AlN, GaN and InN). *International Journal of Thermophysics*, Vol. 40, No. 2, pp. 20, 2019.
- [37] Fattahi, M., et al., Aluminum nitride as an alternative ceramic for fabrication of microchannel heat exchangers: a numerical study. *Ceramics International*, Vol. 46, No. 8, pp. 11647-11657, 2020.
- [38] Dieringa, H., Properties of magnesium alloys reinforced with nanoparticles and carbon nanotubes: a review. *Journal of Materials Science*, Vol. 46, No. 2, pp. 289-306, 2011.
- [39] Hou, L., et al., Microstructure, mechanical properties and thermal conductivity of the short carbon fiber reinforced magnesium matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 695, pp. 2820-2826, 2017.
- [40] Ying, T., et al., Thermal conductivity of as-cast and as-extruded binary Mg-Al alloys. *Journal of alloys and compounds*, Vol. 608, pp. 19-24, 2014.
- [41] Patankar, S., Numerical heat transfer and fluid flow. Taylor & Francis, 2018.
- [42] Wang, S., Z. Guo, and Z. Li, Heat transfer enhancement by using metallic filament insert in channel flow. *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 44, No. 7, pp. 1373-1378, 2001.