Journal Of Energy Conversion
Volume: 8, Issue: 2, 2021

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی آزاد از دو لوله افقی با سطح مقطع بادامکی در یک آرایش عمودی در آب

علی جوادپور ، محمد نجفی*

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۵

چکیده

در مطالعه تجربی حاضر، انتقال حرارت جابجایی آزاد پایا از دو لوله با سطح مقطع بادامکی که به صورت افقی در یک آرایش عمودی، تحت موقعیت های مختلف و برای فواصل مرکز تا مرکز ۱/۵، ۲ و ۲/۵ برابر قطر معادل لوله، مورد بررسی قرار داده شده است. چگونگی توزیع ضریب انتقال جابجایی محلی و میانگین روی سطح لوله ها به صورت تکی و در آرایش عمودی در محدوده اعداد رایلی اصلاح شده ۱۰۸×۶/۵ تا ۱۰۹×۲/۶ و همچنین اثر فاصله مرکز تا مرکز لوله ها در آرایش بر نرخ انتقال حرارت از سطح لوله، مورد بررسی قرار گرفت؛ اثر موقعیت بر توزیع ضریب انتقال حرارت لوله افقی تکی مورد مطالعه قرار داده شده است. نتایج نشان داد که، تحت شرایط یکسان و در محدوده اعداد رایلی اصلاح شده مورد آزمایش، ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی و میانگین یک لوله بادامکی افقی در موقعیت رو به پایین از دیگر موقعیت ها بیشتر است. در آرایش عمودی از دو لوله افقی با مقطع بادامکی نرخ انتقال حرارت از لوله بالایی بطور موثری به فاصله مرکز تا مرکز لوله ها از یکدیگر وابسته است.

* **عهده‌دار مکاتبات:** Mohammad36najafi@gmail.com

کلمات کلیدی: انتقال حرارت جابجایی آزاد، لوله بادامکی افقی، عدد ناسلت، آرایش عمودی.

۱- مقدمه

امروزه انتقال حرارت جابجایی آزاد از لوله های افقی کاربرد های فراوانی از قبیل ثابت نگهداشتن دمای اجزای الکترونیکی در زمان کار، طراحی کلکتور های خورشید و مبدل های حرارتی دارد. مبدل های حرارتی کاربرد قابل توجهی در نیروگاه های تولید انرژی دارند و تحقیقات وسیعی جهت بالا بردن راندمان حرارتی آن ها انجام شده است. لوله هایی با سطح مقطع دایروی، به علت سهولت در ساخت به طور گسترده ای در صنعت و در تولید مبدل های حرارتی مورد استفاده قرار می گیرند. اما نیاز به افزایش انتقال حرارت و همچنین کاهش فضای مورد نیاز برای مبدل های حرارتی به همراه کاهش در هزینه های تعمیر و نگهداری از این دستگاه ها محققان را به سمت بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد از لوله هایی با سطح مقطع غیره دایره ای سوق داده است[۱-۴].

از اولین تلاش ها در زمینه ی انتقال حرارت جابجایی آزاد در آرایش لوله ها، می توان به اکرت و سون جن[1] [۵] و لیبرمن و گیبهارت[2] [۶] اشاره داشت. در این آزمایش از سه استوانه دما ثابت افقی با قطر ۲۲/۳ میلیمتر در یک آرایش عمودی استفاده

[1] Eckert & soehngen
[2] Liberman & gibhart

نحوه استناد به این مقاله: جوادپور علی، نجفی محمد. بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی آزاد از دو لوله افقی با سطح مقطع بادامکی در یک آرایش عمودی در آب. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۰; ۸ (۲) :۱-۱۴

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]

شد. نتایج بدست آمده نشان داد که انتقال حرارت از پایین ترین استوانه در آرایش عمودی برابر با انتقال حرارت از استوانه تکی می باشد. از دیگر کارهای انجام شده تحت شار ثابت می توان به آزمایش انجام شده توسط مارسرس[1] [۷] که از یک آرایش عمودی از سه، پنج و نه استوانه با قطر ۶/۳۵ میلیمتر با پنج فاصله ی مساوی از ۲ تا ۲۰ برابر قطر استوانه، برای اعداد گراشف در بازه ی ۷۵۰ تا ۲۰۰۰ اشاره داشت. نتایج بدست آمده نشان داد که برای فواصل مرکز تا مرکز کوچک، استوانه هایی که در آرایش عمودی قرار می گیرند، عدد ناسلت برای استوانه های بالایی در آرایش اندکی کاهش را نشان می دهد.

اسپارو و نیمر[2] [۸] انتقال حرارت جابجایی آزاد از یک آرایش عمودی از دو استوانه افقی درون آب در دمای ثابت با قطر ۳۷/۹ میلیمتر با فاصله ی مرکز تا مرکز از ۲ تا ۹ برابر قطر استوانه ها، برای اعداد رایلی [3]در بازه ی بین[4] 10^4 تا 10^5 به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. مشاهده شد، نرخ انتقال حرارت هر یک از استوانه ها در حالتی که در فواصل بین مرکز تا مرکز نسبتا بزرگی قرار گرفته باشند می تواند همانند یک استوانه تکی در نظر گرفته شود. مطالعات تجربی دیگری نیز بر روی انتقال حرارت جابجایی آزاد در آرایش افقی استوانه های دما ثابت صورت پذیرفت که نتایج یکسانی مشاهده شد، که در میان این تحقیقات می توان به کارهایی که توسط بوسنیک[4] و همکارانش[۹] و همچنین هانتر و چات[5] [۱۰] انجام گرفته است اشاره نمود.

کاظم زاده و همکارانش[۱۱] انتقال حرارت جابجایی آزاد از یک ردیف عمودی از استوانه های افقی محدود به دیوارهای عایق برای عدد رایلی کوچکتر از ۱۰۰۰ را مورد بررسی قرار دادند. بررسی هایشان نشان داد، با افزایش تعداد استوانه ها و فاصله استوانه ها از هم، فاصله ی بهینه دیواره های محدود کننده افزایش می یابد در حالی که با افزایش عدد رایلی فاصله ی بهینه کاهش می یابد.

صدیق پور و همکاراش [۱۲] از یک آرایش عمودی از ۲ تا ۸ استوانه با قطر ۶/۶ میلیمترکه در فاصله هایی از ۳/۵ تا ۳۰/۵ برابر قطر استوانه ها قرار داده شده است، برای اعداد رایلی ۵۰۰ ، ۶۰۰ ، ۷۰۰ بهره بردند و یک رابطه ی تجربی برای پیش بینی عدد ناسلت متوسط در کل آرایش در بازه ی اعداد رایلی مورد آزمایش پیشنهاد شد. ریموند[6]و همکارانش [۱۳] انتقال حرارت جابجایی آزاد از یک جفت استوانه افقی که در یک آرایش عمودی به صورت هم راستا قرار داده شده است، در محدوده ی اعداد رایلی $10^6 \times 2$ تا $10^6 \times 6$ و برای فواصل مرکز تا مرکز ۳ ,۲,۱/۵ برابر قطر استوانه ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در آرایش دوتایی عمودی زمانی که استوانه پایینی گرم نمی شود هیچ تاثیری بر انتقال حرارت از استوانه بالایی ندارد، اما با گرمایش استوانه پایینی دود حرارتی توسط استوانه پایینی در برخورد با استوانه بالایی باعث افزایش انتقال حرارت از استوانه بالایی می شود . چویخ[7]و همکارانش [۱۴] مطالعه ای عددی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد آرام از دو استوانه دما ثابت در آرایش عمودی با فاصله ی بین استوانه ی از بازه ی بین ۲ تا ۶ برابر قطر استوانه ها و اعداد رایلی بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ انجام داد که نتایج حاصل از آن با نتایج بدست آمده از بررسی های تجربی سازگاری خوبی داشت. سسینی[8] [۱۵] اثر استوانه های افقی را بر روی انتقال حرارت جابجایی آزاد مورد بررسی قرار داد، برای اعداد رایلی خیلی بزرگ تاثیرات ناشی از آرایش افقی استوانه ها تقریبا با تاثیرات ناشی از نیروهای شناوری مرتبط است .

یوسفی و اشجعی[۱۶] انتقال حرارت جابجایی آزاد بر روی لوله ها با سطح مقطع بیضوی در هوا را مورد مطالعه قرار دادند. تاثیرات فاصله استوانه ها از یکدیگر و عدد رایلی در این تحقیقات مورد بررسی قرار گرفت، آن ها نشان دادند که تغییرات فاصله بر روی انتقال حرارت از استوانه بالایی تاثیر گذار است، همچنین برای فواصل کم انتقال حرارت استوانه بالایی می تواند به

[1] Marsace
[2] Sparrow & neithammer
[3] Rayleigh number
[4] Boessneck
[5] Chata & hunter
[6] Reymond
[7] Chouikh
[8] Cesini

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

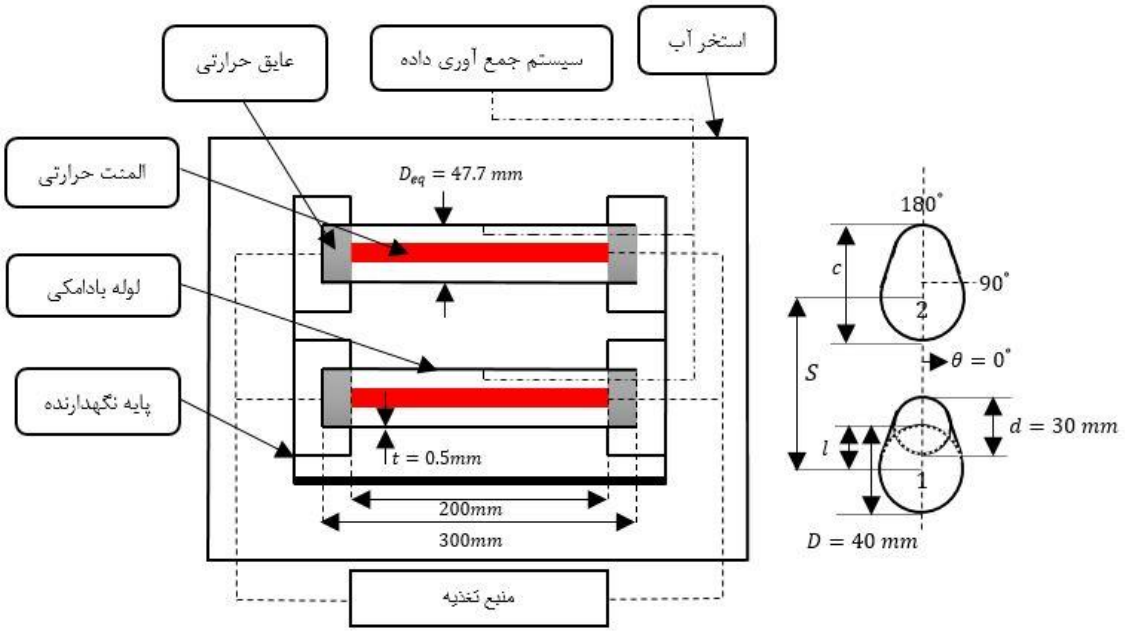
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]

اندازه ی ۵۰ درصد کمتر از استوانه پایینی باشد. علی پور و همکارانش[۱۷] تاثیر نسبت شعاعی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد از یک لوله حلقوی هم محور را مورد بررسی قرار دادند. پرسون[1] و همکارانش[۱۸] انتقال حرارت جابجایی آزاد از یک جفت لوله افقی مستغرق درون استخر آب را مورد مطالعه قرار دادند. افزایش ۱۰ درصد در نرخ انتقال حرارت میانگین در لوله بالایی در آرایش عمودی مشاهده شد. کاتیمورا[2] و همکارانش[۱۹] انتقال حرارت جابجایی آزاد از یک آرایش عمودی شامل ۱۰ لوله دایره ای افقی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که عدد ناسلت میانگین لوله ها در نیمه بالایی آرایش عمودی دستخوش افزایش شده است.

علاوه بر آنچه در بالا به آن اشاره شد، تحقیقات دیگری در ضمینه انتقال حرارت جابجایی انجام شده است با این حال بیشتر این پژوهش ها با استفاده از لوله هایی با مقطع دایره ای انجام پذیرفته است این در حالیست که در تحقیق پیش رو، چگونگی توزیع عدد ناسلت محلی روی سطح خارجی دو لوله افقی با مقطع بادامکی که در یک آرایش عمودی درون استخر آب ساکن قرار داده شده، مورد بررسی قرار داده شده است. در مطالعه حاضر، تاثیر اعمال شارهای حرارتی مختلف و تغییر در موقعیت قرارگیری لوله بادامکی و همچنین تغییر در فاصله مرکز تا مرکز لوله ها در آرایش عمودی بر نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد از لوله ها مورد بررسی قرار داده شده است.

۲- روش انجام آزمایش

در شکل ۱ شماتیک دستگاه مورد استفاده در آزمایش حاضر و شکل ۲ موقعیت لوله بادامکی افقی در شرایط مختلف نشان داده شده است. این مجموعه شامل سیستم اتوماتیک اندازه گیری دما، لوله های بادامکی، المنت الکتریکی، پایه های نگهدارنده و منبع تامین الکتریسته می باشد.



شکل۱- شماتیک دستگاه مورد استفاده در آزمایش حاضر

لوله های مورد استفاده در آزمایش دو لوله از جنس فلز مس با خلوص ۹۹/۵ درصد با سطح مقطع بادامکی همانگونه که در شکل۳ نشان داده شده است دارای۳۰۰ میلیمتر طول و قطر معادل(D_{eq}) ۴۷/۷ میلیمتر می باشند، جهت تامین شار حرارتی ثابت از دو المنت حرارتی با مقطع بادامکی، هرکدام با توان حرارتی ۶۰۰ وات و طول ۲۰۰ میلیمتر استفاده شد. المنت های

[1] Persoons
[2] Kitamura

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]

مذکور به گونه ای در لوله ها با سطح مقطع بادامکی جای داده شده است، که فاصله ی سطح المنت در تمامی مقاطع آن تا سطح داخلی لوله به یک اندازه باشد، تا شار حرارتی اعمالی به سطح لوله ها یکسان باشد، از ورق های پشم شیشه به ضخامت ۵۰ میلیمتر در دو انتهای لوله ها جهت عایق کاری استفاده شد تا از هدر رفتن حرارت از دو انتهای لوله جلوگیری شود.

همچنین برای لوله ها با نسبت (L/D_{eq}) بزرگتر از ۴ اثر انتها بر انتقال حرارت ناچیز در نظر گرفته می شود[۲۰]. جهت جلوگیری از ایجاد مقاوت حرارتی توسط هوای محبوس شده بین فضای خالی اندک بین المنت و سطح داخلی لوله، این فضا توسط ذرات اکسید منیزیم پر شده است. از یک استخر آب ساکن(شکل ۴)، که دارای ابعاد ۲۸۰۰ میلیمتر طول و۱۲۰۰میلیمتر عرض و ارتفاع ۸۰۰ میلیمتر می باشد استفاده شده است دلیل استفاده از استخری به این بزرگی نیاز به ثابت ماندن دمای آب در طی آزمایش می باشد و همچنین جلوگیری از اثر دیواره بر انتقال حرارت لوله ها می باشد. بر پایه نتایج ارائه شده در مرجع [۲۱]، فاصله دیواره های استخر می بایست حداقل ۵ برابر قطر معادل لوله در نظر گرفته شود. پایه های نگهدارنده ای درون استخر جهت نصب لوله ها در فواصل مختلف در آرایش عمودی تعبیه شده است. مشخصات ابعادی لوله های بادامکی و هیتر های مورد استفاده در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات ابعادی لوله های بادامکی و هیتر مورد استفاده در آزمایش

	D	d	D/d	l	D_{eq}	L	L/D_{eq}
واحد	$[mm]$	$[mm]$	$[-]$	$[mm]$	$[mm]$	$[mm]$	$[-]$
لوله بادامکی	۴۰	۳۰	۱/۳	۳۵	۴۷/۷	۳۰۰	۶/۳
هیتر	۳۰	۲۲	۱/۳	۲۶	۳۹/۳	۲۰۰	۵/۱

*قطر دایره کوچک تشکیل دهنده بادامک(d)، قطر دایره بزرگ(D)، فاصله مرکز تا مرکز(l) و طول لوله(L) می باشد.



شکل ۲- شماتیک موقعیت قرارگیری لوله بادامکی افقی



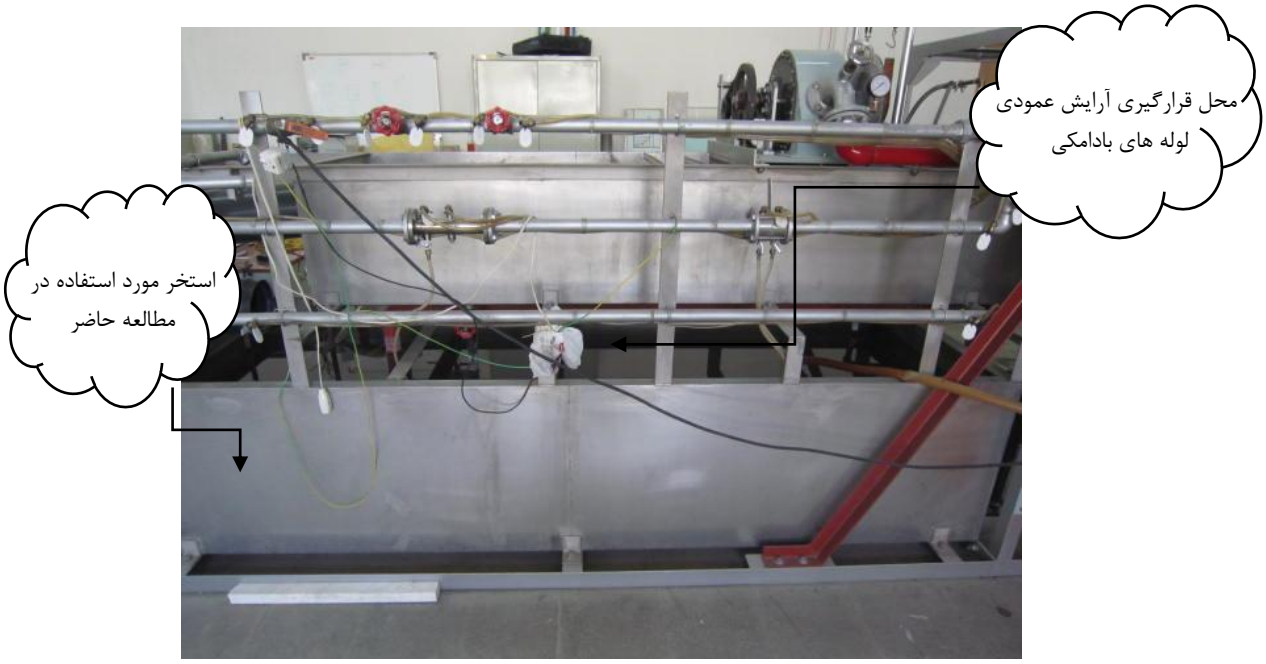
شکل۳- لوله های بادامکی مورد استفاده در آزمایش

جهت اندازه گیری دما در سطح لوله ها از ۱۰ عدد دماسنج مقاومتی (PT-100) با دقت ۰/۱درجه در محدوده ی دمایی مورد آزمایش استفاده شد، دماسنج های مقاومتی در فواصل یکسان از ۰ درجه در انتهای کله ی بزرگ بادامک تا ۱۸۰ درجه

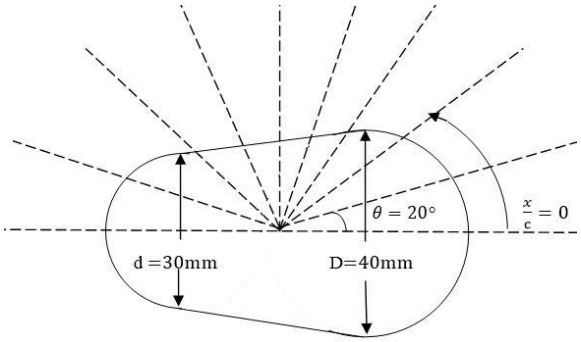
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]

در بالای کله ی کوچک، بر روی سطح لوله ها قرار داده شده است. همانگونه که در شکل۵ دیده می شود محل قرار گیری دماسنج های مقاومتی روی سطح جانبی لوله های مورد آزمایش توسط خط چین مشخص شده است. با توجه به تقارن موجود در پروفیل بادامکی مدل ها، اندازه گیری ها برای نیمی از مقطع انجام شد و شرایط دقیقا برای نیم دیگر یکسان می باشد. دمای آب استخر با استفاده از دو عدد دماسنج مقاومتی در تمام طول آزمایش به صورت پیوسته اندازه گیری شده است.



شکل۴- استخر مورد استفاده در آزمایش حاضر



شکل۵- شماتیک مقطع بادامکی و چگونگی توزیع دماسنج های مقاومتی روی سطح لوله

۲-۱- تحلیل داده های تجربی

یکی از موارد مهم برای تحلیل لوله های بادامکی تعریف پارامتری به نام قطر معادل می باشد. در این مقاله قطر معادل را به صورت زیر همانند روش خان و همکاران[۲۲] انتخاب شده است:

$$D_{eq} = \frac{P}{\pi} \quad (۱)$$

P محیط لوله بادامکی می باشد.

مقدار شار حرارتی تولیدی توسط المنت حرارتی(Q) از رابطه (۲) محاسبه شده است. دمای استخر(T_b) از رابطه (۳) و مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد محلی(h_x) از رابطه (۴) بدست آمده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]

$$Q = V \times I \quad (۲)$$

$$T_b = \frac{T_1+T_2}{2} \quad (۳)$$

$$h_x = \frac{Q}{A(T_w-T_b)} \quad (۴)$$

A مساحت سطح مقطع جانبی لوله، V ولتاژ اعمالی، I شدت جریان عبوری از المنت و T_w دمای دیواره لوله می باشد.
ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین(h) از رابطه (۵) و از رابطه (۶) عدد ناسلت میانگین محاسبه شده است.

$$h = \frac{2}{P}\int_0^{P/2} h_x . dx \quad (۵)$$

x فاصله طولی از نقطه سکون بر روی سطح لوله بادامکی، P محیط لوله و k ضریب هدایت حرارتی می باشد.

$$Nu = \frac{hD_{eq}}{k} \quad (۶)$$

با استفاده از رابطه (۷) و (۸) اعداد رایلی و رایلی اصلاح شده محاسبه شده است.

$$Ra = \frac{g\beta(T_w-T_b)D_{eq}^3}{\nu\alpha} \quad (۷)$$

$$Ra^* = \frac{g\beta Q D_{eq}^4}{A k \nu \alpha} \quad (۸)$$

α, g, β و ν به ترتیب ضریب انبساط حرارتی، شتاب جاذبه، نفوذ حرارتی و لزجت سینماتیکی می باشد.

ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین آرایش عمودی از رابطه زیر (۹) محاسبه شده است.

$$H = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{2} h_i \quad (۹)$$

۳-بحث و نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، انتقال حرارت جابجایی آزاد از یک جفت لوله بادامکی افقی تحت شار حرارتی ثابت مستغرق در استخر آب ساکن به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده شده است. اثرات اعمال شارهای حرارتی ثابت ۵، ۱۰ و ۲۰ کیلووات بر متر مربع، فواصل مرکز تا مرکز ۱/۵، ۲ و ۲/۵ در آرایش عمودی و موقعیت های مختلف (پایین، راست و بالا) بر ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین و محلی در محدوده ی عدد رایلی اصلاح شده $۶/۵\times۱۰^{۸}$ تا $۲/۶\times۱۰^{۹}$ مورد بررسی قرار داده شد.

۳-۱-ارزشیابی دستگاه مورد آزمایش

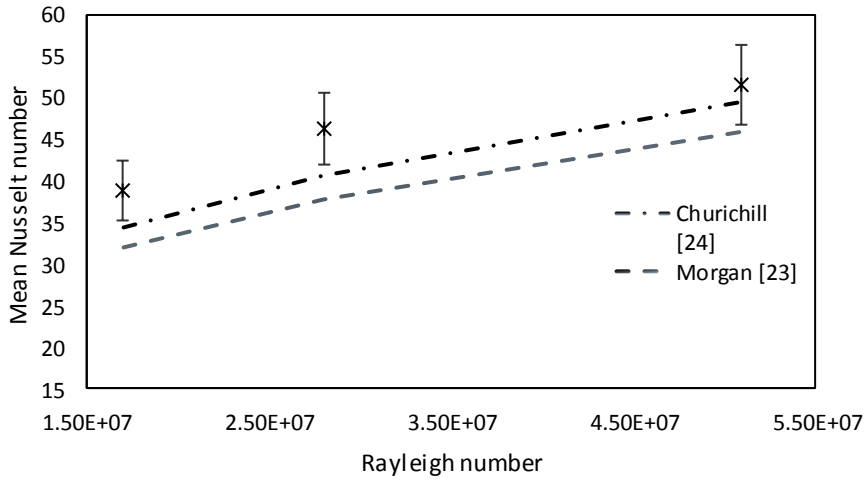
در ابتدا دستگاه مورد استفاده در آزمایش حاضر می بایست مورد ارزشیابی قرار گیرد. از این رو، داده های مربوط به عدد ناسلت میانگین یک لوله بادامکی افقی (تحت موقعیت (الف)، شکل ۲) برحسب عدد رایلی، حاصله از دستگاه حاضر با نتایج بدست آمده از روابط ارائه شده توسط محققان پیشین (۱۰) و (۱۱) مقایسه شده و نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است[۲۳و۲۴]. همانگونه که در شکل۶ نشان داده شده است نتایج بدست آمده در محدوده اعداد رایلی آزمایش با نتایج بدست آمده از روابط (۱۰) و (۱۱) دارای سازگاری خوبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت ۹/۳٪ برای داده های آزمایش حاضر می باشد.

$$Nu = 0.125(Ra_D)^{0.333} \qquad 10^7 < Ra_D < 10^{12} \quad (۱۰)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.378\, Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left[1+(0.559/Pr)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \qquad Ra_D < 10^{12} \qquad (۱۱)$$



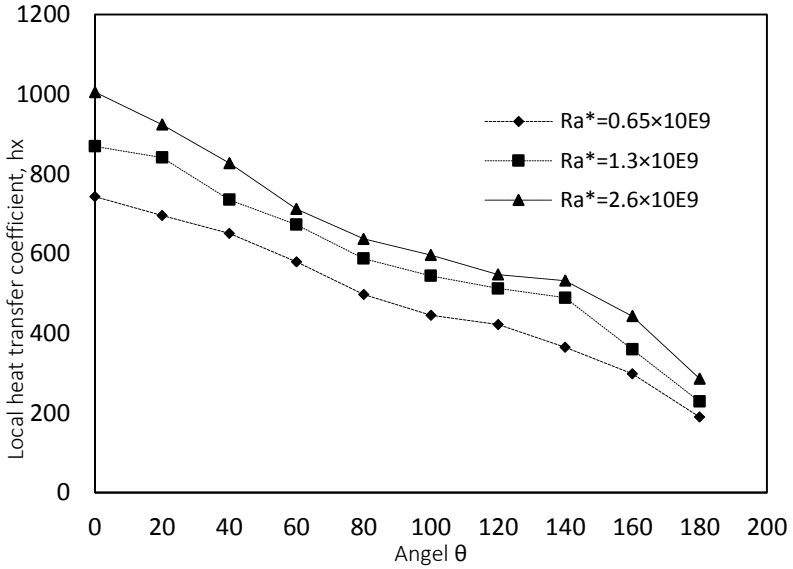
شکل۶- مقایسه نتایج آزمایش حاضر با نتایج روابط (۱۰) و (۱۱)

بخشی از خطای ایجاد شده در داده های آزمایش حاضر را می توان به خطای ذاتی در اندازه گیری دما با استفاده دماسنج های مقاومتی نسبت داد. از سوی دیگر، روابط همبندی که برای ارزشیابی داده های آزمایش مورد استفاده قرار داده شده است برای لوله با مقطع دایره (لوله های رایج) توسط محققان پیشین پیشنهاد شده است و با توجه به استفاده از مقطع بادامکی برای مدل های مطالعه حاضر وجود اختلاف در مقادیر ثبت شده برای عدد ناسلت متوسط لوله های آزمایش، و ناسلت بدست آمده از روابط اجتناب ناپذیر است. عواملی همچون دمای آب استخر آزمایش نیز می تواند منشا اختلاف بین نتایج بدست آمده از آزمایش حاضر و داده های محاسبه شده توسط روابط همبندی باشد.

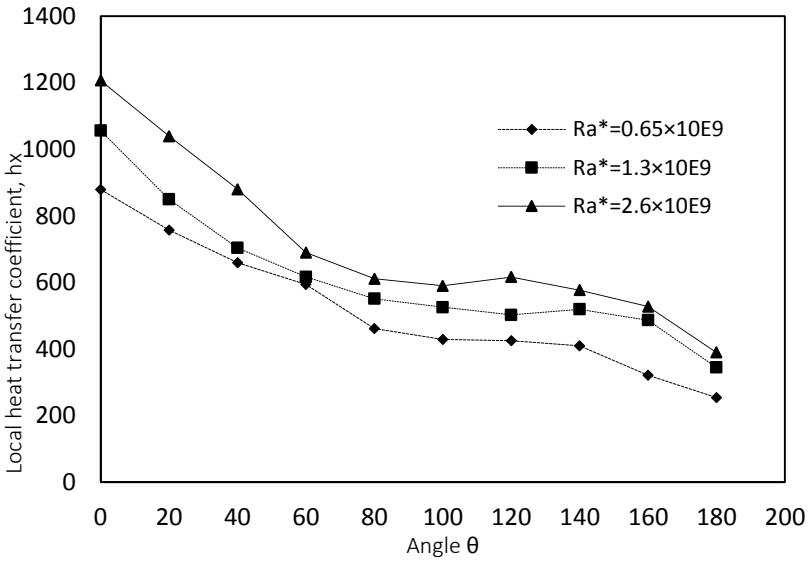
۳-۲- انتقال حرارت از لوله بادامکی تکی

ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد محلی برحسب زاویه قرارگیری دماسنج های مقاومتی روی سطح مقطع بادامکی لوله افقی برحسب موقعیت قرار گیری لوله در محدوده اعداد رایلی اصلاح شده آزمایش در شکل های ۷-۹ نشان داده شده است. بر پایه نتایج بدست آمده، با قرار دادن لوله افقی تکی در حالت های الف و ج (شکل ۲) بیشینه ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی در زاویه صفر درجه یعنی در پایین ترین نقطه در سطح مقطع لوله مشاهده شده است. با حرکت از نقطه مذکور به سمت نقاط با زاویه بیشتر در پیرامون مقطع بادامکی لوله روند کاهشی در میزان انتقال حرارت برای تمامی اعداد رایلی اصلاح شده مورد آزمایش مشاهده شده است که می توان این پدیده را با رشد لایه مرزی حرارتی بر روی سطح لوله مرتبط دانست. در نقطه زاویه صفر روی سطح لوله ضخامت لایه مرزی حرارتی ناچیز بوده در نتیجه کمترین مقاومت حرارتی و بیشترین گردایان دما را شاهد هستیم. از سوی دیگر، در بالاترین نقطه (زاویه ۱۸۰ درجه) کمترین مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی به ثبت رسیده است که می تواند نشان دهنده عبور جریان سیال با دمای بالاتر که به دود حرارتی نیز معروف است در محدوده بالایی سطح مقطع بادامکی لوله باشد. در شرایط یکسان، تغییر موقعیت لوله از حالت (الف) به حالت (ج) منجر به افزایش در میزان ضریب انتقال حرارت آزاد در نقطه سکون(زاویه صفر) می شود که ریشه در عدم تقارن در شکل هندسی مقطع لوله (بادامکی بودن سطح مقطع) دارد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]



شکل۷- ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی برحسب زاویه قرارگیری سنسورها برای لوله بادامکی در موقعیت(الف)

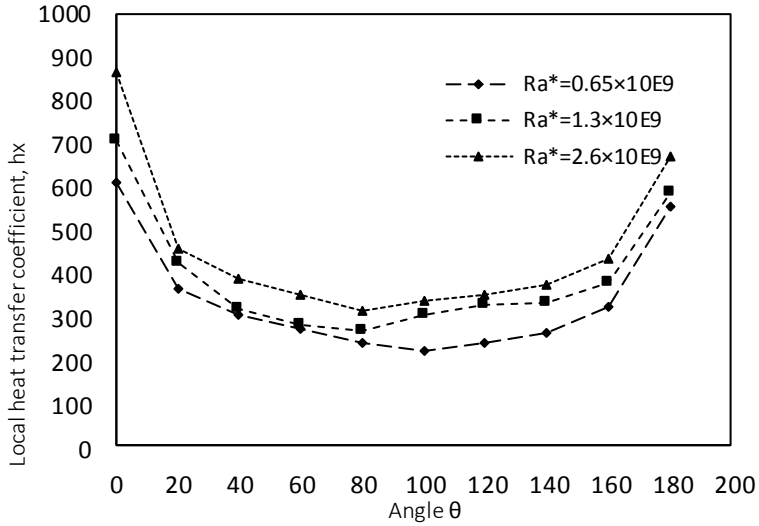


شکل۸- ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی برحسب زاویه قرارگیری سنسورها برای لوله بادامکی در موقعیت (ج)

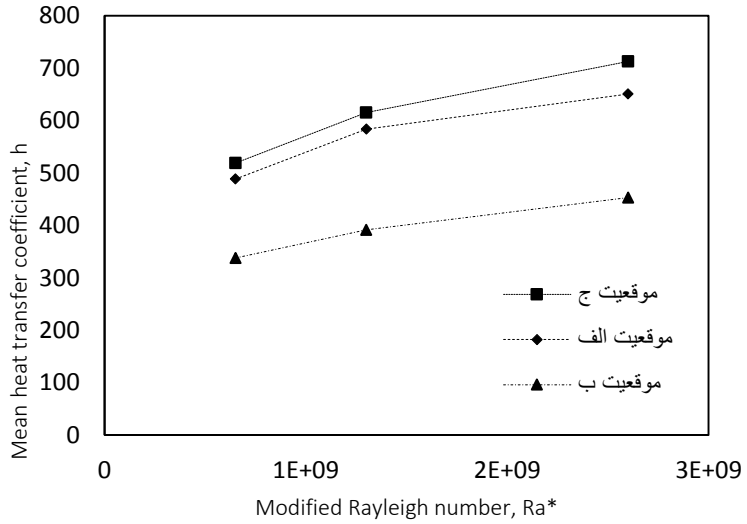
در شکل۹، ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد محلی برحسب زاویه برای حالتیکه لوله افقی در موقعیت (ب) است نشان داده شده است. اندازه گیری ها برای سطح پایینی مقطع بادامکی لوله در اعداد رایلی اصلاح شده آزمایش ارائه شده است. بیشینه ضریب انتقال حرارت محلی در دو انتهای سطح مقطع بادامکی لوله و کمینه انتقال حرارت در محدوده میانی مشاهده شده است. افزایش انتقال حرارت در دو انتهای مقطع لوله را می توان ناشی از نوسان و تغییر سرعت جریان سیال در این نقاط دانست[۲۵]. قرار دادن لوله در موقعیت (ب) منجر به تغییر در چگونگی توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی در سطح لوله شده، بگونه ای که بسیار به توزیع ضریب انتقال حرارت برای یک کانال افقی با سطح مقطع مربعی نزدیک می باشد[۲۶].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]



شکل۹- ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی برحسب زاویه قرارگیری سنسورها برای لوله بادامکی در موقعیت (ب)



شکل۱۰- ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین برحسب عدد رایلی اصلاح شده لوله بادامکی در موقعیت های مختلف

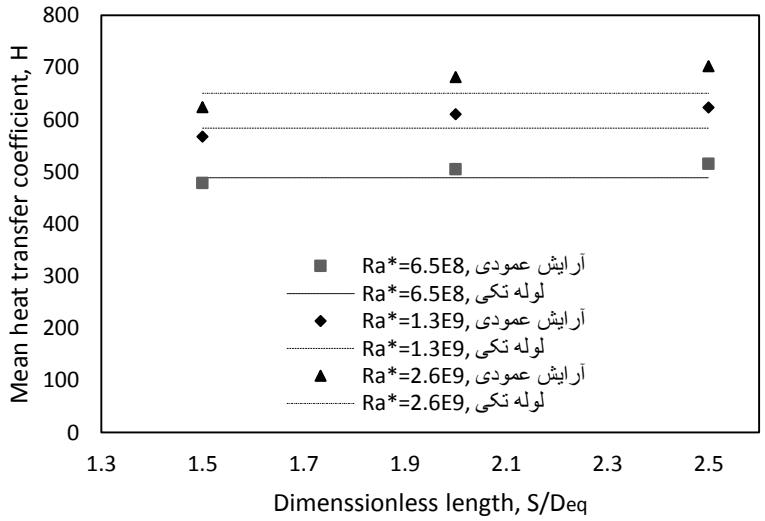
در شکل ۱۰ ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد میانگین برحسب عدد رایلی اصلاح شده برای یک لوله تکی در موقعیت های مختلف نشان داده شده است. در تمامی اعداد رایلی اصلاح شده مورد بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین برای لوله در موقعیت (ج) دارای مقدار بیشتری نسبت به دو حالت (الف) و (ب) می باشد. با افزایش عدد رایلی اصلاح شده از $۶/۵\times۱۰^{۸}$ به $۲/۶\times۱۰^{۹}$ برای لوله در موقعیت (ج) ضریب انتقال حرارت میانگین به میزان۳۷/۳٪ افزایش را نشان می دهد. برای بیشنه عدد رایلی اصلاح شده با تغییر موقعیت لوله بادامکی از (ب) به (الف) ۴۳/۷٪ افزایش در نرخ انتقال حرارت ثبت گردید و این درحالیست که با تغییر موقعیت از (الف) به (ج) ۹/۵٪ افزایش مشاهده شده است. افزایش انتقال حرارت در موقیعت (ج) نسبت به دیگر موقعیت ها را می توان به افزایش گردابه ها و آشفتگی جریان در قسمت بالایی مقطع بادامکی لوله افقی که می تواند منجر به تغییر در رژیم جریان دود حرارتی از آرام به گذرا شود نسبت داد[۲۷]. روند توزیع ضریب انتقال حرارت میانگین بر حسب عدد رایلی اصلاح شده برای لوله افقی بادامکی در سه موقعیت مورد آزمایش تقریبا مشابه می باشند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]

۳-۳- دو لوله بادامکی در آرایش عمودی

در شکل ۱۱ ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین آرایش عمودی شامل دو لوله افقی بادامکی در موقعیت (الف) برحسب فواصل مرکز تا مرکز ۱/۵، ۲ و ۲/۵ برابر قطر معادل لوله نشان داده شده است. جهت هرچه بیشتر روشن شدن تاثیر فواصل مرکز تا مرکز بین لوله ها در آرایش بر میزان انتقال حرارت کل آرایش عمودی نسبت به حالتیکه فقط یه لوله تکی داریم نتایج مربوط به لوله تکی نیز در شرایط یکسان در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نرخ انتقال حرارت برای لوله پایینی در آرایش عمودی(شکل ۱، لوله شماره ۱) همانند لوله تکی بوده و قرار دادن لوله در آرایش عمودی تاثیری بر میزان انتقال حرارت آن ندارد از این رو تغییرات در میزان انتقال حرارت کل آرایش عمودی تنها وابسته به تغییرات در نرخ انتقال حرارت از لوله بالایی در آرایش می باشد. نتایج مشابهی توسط مراجع [۱۳و ۱۸] گزارش شده است.

در فاصل مرکز تا مرکز ۱/۵ میزان ضریب انتقال حرارت جابجایی کل آرایش عمودی نسبت به لوله تکی اندکی کاهش را نشان می دهد که می توان آن را به اثر برخورد دود حرارتی لوله پایینی به بخش پایینی لوله بالایی در آرایش نسبت داد چراکه دوده حرارتی دارای دمایی بالاتر از دمای سیال پیرامون لوله بالایی بوده از این رو منجر به کاهش گردایان دما پیرامون لوله و در نتیجه نرخ انتقال حرارت شده است. ضریب انتقال حرارت میانگین آرایش عمودی برای بیشنه و کمینه اعداد رایلی اصلاح شده به ترتیب ۴/۱٪ و ۳/۵٪ کاهش را نسبت به لوله تکی در شرایط یکسان نشان می دهد. نرخ انتقال حرارت میانگین کل آرایش عمودی به شدت به فاکتور فاصله مرکز تا مرکز لوله ها در آرایش وابسته است بگونه ای که افزایش فاصله لوله ها در آرایش از ۱/۵ به ۲ و ۲/۵ برابر قطر معادل لوله بادامکی برای تمامی اعداد رایلی اصلاح شده منجر به افزایش در میزان ضریب انتقال حرارت میانگین کل آرایش عمودی نسبت به لوله تکی شده است.



شکل۱۱- ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین برحسب فاصله بین لوله ها در آرایش عمودی

تاثیر فاکتور فاصله بین لوله ها بر میزان انتقال حرارت کل آرایش را می توان به اثرپذیری پارامترهای سرعت و دمای دود حرارتی از فاکتور فاصله و تاثیر مستقیم آن بر میزان انتقال حرارت لوله بالایی در آرایش عمودی مرتبط دانست. در تحلیل اثر دود حرارتی می توان به تحقیقات گبهارت[۲۸] اشاره داشت، وی بیان می کند که برای دود حرارتی بالای یک منبع تولید حرارت، سرعت خط مرکزی دود حرارتی با توان پنجم فاصله از منبع تولید حرارت نسبت مستقیم دارد. از سوی دیگر دمای دود حرارتی در خط مرکزی آن با نسبت معکوس سه پنجم فاصله از منبع در ارتباط است. از این رو می توان دید که با افزایش فاصله بین لوله ها سرعت دوده حرارتی افزایش داشته و منجر به ایجاد جریان سیال با سرعت بالاتر در اطراف لوله بالایی در

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]

آرایش شده که می تواند با اعمال انتقال حرارت اجباری پیرامون لوله بالایی افزایش نرخ انتقال حرارت در لوله بالایی را بهمراه داشته باشد.

قرار دادن لوله ها در فاصله مرکز تا مرکز ۲/۵ برابر قطر منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین آرایش عمودی نسبت به لوله تکی به ترتیب برای بیشترین و کمترین عدد رایلی اصلاح شده آزمایش ۷/۹٪ و ۵/۶٪ شده است. افزایش عدد رایلی اصلاح شده منجر به افزایش در ضریب انتقال حرارت میانگین آرایش در تمامی موارد شده است.

۴-عدم قطعیت آزمایش

عدم قطعیت ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد محلی در آزمایش حاضر با استفاده از روش ارائه شده در مرجع [۲۹] محاسبه شده است. این روش بر مبنای تشخیص عدم قطعیت ها در اندازه گیری های تجربی مقدماتی مختلف بنا شده است.

جدول ۲- عدم قطعیت پارامتر های مورد استفاده در آزمایش

شماره	ابزار ها/ پارامتر ها	متغیر ها	دقت
۱	دمای سطح لوله و دمای بالک آب	$T_b T_w$,	۰/۱ °C
۲	ولتاژ	V	۱ V
۳	جریان	I	۰/۱ A
۴	قطر معادل	D_{eq}	۰/۰۰۱ m
۵	طول	L	۰/۰۱ m

$$h_x=\frac{Q}{\pi D_h L(T_b-T_s)} f(T_s,T_b,\frac{Q}{A_s})=f(T_s,T_b,V,I,D_h,L)$$

$$w_h= f(w_{T_s},w_{T_b},w_V,w_I,w_{D_h},w_L)$$

$$w_h=\left[\left(\frac{\delta h}{\delta V}w_V\right)^2+\left(\frac{\delta h}{\delta I}w_I\right)^2+\left(\frac{\delta h}{\delta I}w_{D_h}\right)^2+\left(\frac{\delta h}{\delta I}w_L\right)^2+\left(\frac{\delta h}{\delta T_s}w_{T_s}\right)^2+\left(\frac{\delta h}{\delta T_b}w_{T_b}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}\times 100$$

$$\frac{w_h}{h}=\left[\left(\frac{w_V}{V}\right)^2+\left(\frac{w_I}{I}\right)^2+\left(\frac{w_{D_h}}{D_h}\right)^2+\left(\frac{w_L}{L}\right)^2+\left(\frac{w_{T_s}}{T_s-T_b}\right)^2+\left(\frac{w_{T_b}}{T_s-T_b}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}=$$

$$[(0.0090^2)+(0.0735^2)+(0.0209^2)+(0.05^2)+(0.0148^2)+(0.0148^2)]^{\frac{1}{2}}=9.3\%$$

۵- نتیجه گیری

انتقال حرارت جابجایی آزاد از لوله های افقی با سطح مقطع بادامکی در یک آرایش عمودی درون آب در محدوده اعداد رایلی اصلاح شده ۶/۵×۱۰^{۸} تا ۲/۶×۱۰^{۹} بصورت تجربی مورد مطالعه قرار داده شده است. اثرات تغییر موقعیت لوله بادامکی (شکل ۲) برضریب جابجایی محلی و میانگین و همچنین تاثیر فاکتور فاصله مرکز تا مرکز بین لوله ها (۱/۵، ۲ و۲/۵) بر نرخ انتقال حرارت در آرایش عمودی مورد بررسی قرار داده شده است. مهمترین نتایج بدست آمده عبارت اند از:

- تحت شرایط یکسان و در محدوده اعداد رایلی اصلاح شده مورد آزمایش، ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی و میانگین یک لوله بادامکی افقی تحت موقعیت (ج) بیشتر از موقعیت های (الف) و (ب) می باشد.
- افزایش عدد رایلی اصلاح شده منجر به افزایش در نرخ انتقال حرارت از لوله های بادامکی در تمامی موقعیت ها شده است.
- ضریب انتقال حرارت محلی برای لوله افقی با مقطع بادامکی تحت موقعیت های (الف) و (ج) دارای بیشنه مقدار خود در زاویه صفر بوده و کمینه این مقدار در زاویه ۱۸۰ ثبت گردید. این درحالیست که تحت موقعیت (ب) این روند توزیع ضریب انتقال حرارت محلی پیرامون لوله برقرار نیست.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]

- در یک آرایش عمودی از دو لوله افقی با مقطع بادامکی نرخ انتقال حرارت جابجایی از لوله بالایی بطور موثری به فاصله مرکز تا مرکز لوله ها از یکدیگر وابسته است. تغییرات در نرخ انتقال حرارت جابجایی از لوله پایینی در آرایش عمودی نسبت به لوله تکی در شرایط یکسان ناچیز می باشد.

مراجع

1. Stig Grafsrønningen, and Atle Jensen, Natural convection heat transfer from three vertically arranged horizontal cylinders with dissimilar separation distance at moderately high Rayleigh numbers, International Journal of Heat and Mass Transfer, 57 (2013) 519–527.
2. Ally Javadpour, An empirical study on heat transfer and friction factor of a pseudoplastic nanofluid under magnetic field, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, (2020) 139:673–683.
3. Suhil Kiwan, HamzehAlwan, NisrinAbdelal, An experimental investigation of the natural convection heat transfer from a vertical cylinder using porous fins, Applied hermal Engineering, (2020) Volume 179, 115673
4. Ally Javadpour, Mohammad Najafi, Korosh Javaherdeh., Effect of magnetic field on forced convection heat transfer of a non-Newtonian nanofluid through an annulus: an experimental study, Heat and Mass Transfer, (2018) 54:3307–3316.
5. E.R.G. Eckert, E.E. Soehngen, Studies on heat transfer in laminar free convection with the Mach–Zehnder interferometer, AF Technical Report, 5747, USAF Air Material Command,Wright-Paterson Air Force Base, Ohio, 1948.
6. J. Lieberman, B. Gebhart Interaction in natural convection from an array of heated elements, experimental, Internatinal Journal of Heat Mass Transfer, (1969)12:1385-1369.
7. G.F. Marsters, Array of heated horizontal cylinders in natural convection, Int. j. Heat Mass Transfer, (1972)15:921-933.
8. E.M. Sparrow, J.E. Niethammer, Effect of vertical separation distance and cylinder-to-cylinder temperature imbalance on natural convection for a pair of horizontal cylinders, J. Heat Transfer, (1981)10:3638-644.
9. E.M. Sparrow, Effect of traverse misalignment on natural convection from a pair of parallel, vertically stacked, horizontal cylinders, Journal of Heat Transfer, (1983)10:5241-247.
10. R.G. Hunter, J.c. Chato, Natural convection heat transfer from parallel, horizontal cylinders, ASHRAE ,93767, 1987.
11. S. Kazemzadeh Hannani, M .S. Sadeghipour and M. Nazaktabar, Natural convection heat transfer from horizontal cylinders in a vertical array confined between parallel walls, sharif university of technology, (2011) P.O.box,11:365-9567.
12. M. Sadegh Sadeghipour, M. Asheghi, Free convection heat transfer from arrays of vertically separated horizontal cylinders at low Rayleigh numbers, International Journal of Heat Mass Transfer, (1994) 37:103-109.
13. Olivier Reymond, Darina B.Murray, Tadhg S.O'Donovan, Natural Convection Heat Transfer from two Horizontal Cylinders, Experimental Thermal and Fluid Science,(2008) 32:1702-1709.
14. R. Chouikh, A. Guizani, M. A. belghith, Numerical study of the laminar convection flow around an array of two horizontal isothermal cylinders, International Communication Heat Mass Transfer, (1999) 26:329-338.
15. G. Cesini, M.Paroncinia, G.Cortellab, M.Manzan, Natural convection from a horizontal cylinder in a rectangular cavity, International Journal of Heat and Mass Transfer, (1999) 42(10):1801-1811.
16. T. Yousefi, M. Ashjaee, Experimental study of natural convection heat transfer from vertical array of isothermal horizontal elliptic cylinders, Experimental Thermal and Fluid Science, (2007) 32:240-248.
17. M.Alipour, R.Hosseini, A.Rezania, Radius ratio effects on natural heat transfer in concentric annulus, Experimental Thermal and Fluid Science, (2013)15875-4413.
18. Tim Persoons Ian M.O'Gorman, David B.Donoghue, GerryByrne, Darina B.Murray, Natural convection heat transfer and fluid dynamics for a pair of vertically aligned isothermal horizontal cylinders, International Journal of Heat and Mass Transfer, 54 (2011) 5163–5172.
19. K. Kitamura, A.Mitsuishi, T.Suzuki, F.Kimura, Fluid flow and heat transfer of natural convection induced around a vertical row of heated horizontal cylinders, International Journal of Heat and Mass Transfer, 92 (2016) 414–429.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]

20. Alan Quarmby, and A.A.M. AL-Fakhri, Effect of finite length on forced convection heat transfer from cylinder, International Journal of Heat Transfer, 23(1980) 463-469.
21. Mohamed A.Atmane, Victor S.S.Chan, Darina B.Murray, Natural convection around a horizontal heated cylinder: the effects of vertical confinement, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46 (19) (2003) 3661–3672.
22. Khan.W.A, J. R. Culham, and M. M. Yovanovich, Fluid flow around and heat transfer from elliptical cylinders: analytical approach, Journal of thermophysics and heat transfer, (2005)19:178-185.
23. V.T. Morgan, The overall convective heat transfer from smooth circular cylinder, in: Irvine, Hartnett (Eds.), Advances in Heat Transfer, Vol. 11, Academic Press, New York, 1975, pp. 199–264. S. W.
24. Churchill and H. H. S. Chu, Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder, International Journal of Heat Mass Transfer, vol. 18, pp.1049–1053, 1975.
25. H. M. Badr, Laminar natural convection from an elliptic tube with different orientations, Journal of Heat Transfer, Nov.1997, Vol. 119.
26. Samy M. Elsherbiny, Mohamed A.Teamah, Atef R.Moussa, Natural convection heat transfer from an isothermal horizontal square cylinder, Alexandria Engineering Journal (2017) 56, 181–187.
27. Mohamed E. Ali, and Hany Al-Ansary, Experimental Investigations on Natural Convection Heat Transfer Around Horizontal Triangular Ducts, Heat Transfer Engineering, (2010) 31:5, 350-361.
28. B. Gebhart et al., Steady laminar natural convection plumes above a horizontal line heat source, International Journal Heat and Mass Transfer. 13 (1970) 161–171.
29. Holman,jack.philip, Experimental methods for engineers, McGraw-Hill, 1966.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]

چکیده انگلیسی:

Natural convection heat transfer of pair of horizontal cam tubes in vertical array submerged in a water tank: An experimental investigation

Ali JavadPour, Mohammad Najafi*

1- Mechanical engineering , Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: February 2021, Accepted: August 2021

Abstract

In the present study, the steady-state natural convection heat transfer from a vertical array of a pair of horizontal cam cross-sectional tubes under constant heat flux submerged in water is experimentally investigated. The experiment is carried out for the modified Rayleigh number range of 6.5×〖10〗^8 to 2.6×〖10〗^9, and a dimensionless tube spacing range of 1.5, 2.0, and 2.5. The effects of the modified Rayleigh number, cam tube orientation, and dimensionless spacing on the heat transfer rate from the individual tube and the vertical tube array are studied. Based on the results obtained, the effect of thermal plume on the heat transfer rate from the upper cam tube in the vertical array is strongly dependent on the dimensionless spacing. Under fixed conditions, the mean convection coefficient of the single horizontal cam tube with the downward orientation is higher than that of the other orientations for all the modified Rayleigh numbers considered.

Key words: Natural convection, Horizontal cam tubes, Vertical array.

*corresponding author: **Mohammad36najafi@gmail.com**

Cite this article as: Ali JavadPour, Mohammad Najafi, Natural convection heat transfer of pair of horizontal cam tubes in vertical array submerged in a water tank: An experimental investigation. Journal of Energy Conversion, 2021, 8(2), 1-14.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.2.8]