

ارائه روابطی جهت تخمین شار حرارتی بحرانی جریان مادون سرد نانوسیال آلومینا-آب

کیانوش دولتی اصل، یونس بخشان*، احسان عابدینی، سعید نیازی
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

چکیده

در این پژوهش، روابطی برای تخمین شار حرارتی بحرانی ارائه شده است. روابط ارائه شده در این مقاله برای تخمین شار حرارتی بحرانی نانوسیال درون لوله، برای فشارهای ۱۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال و شارهای جرمی $100 < G [kg/m^2.s] < 2500$ اعتبارسنجی شده‌اند. براساس ضرایب همبستگی بدست آمده، مقدار شار جرمی و طول لوله، به ترتیب دارای بیشترین تاثیر در افزایش و کاهش مقدار شار حرارتی بحرانی هستند. برای راحتی در استفاده از روابط، نیازی به محاسبه خواص نانوسیال نیست و تنها با داشتن مقدار غلظت حجمی نانوذره موجود در نانوسیال، مقدار شار حرارتی بحرانی قابل پیش‌بینی است. در این پژوهش دو مدل کلی و دوبخشی ارائه شده است که مدل کلی برای تمام کانال‌ها و مدل دوبخشی دارای دو معادله غیرخطی برای میکرولوله‌ها و لوله‌های با ابعاد بزرگتر است. براساس نتایج بدست آمده، دقت مدل غیرخطی کلی حدود ۱۵٪ و مدل دوبخشی حدود ۳٪ است. همچنین براساس نتایج برای میکرولوله‌ها، مدل غیرخطی دوبخشی دارای حدود ۴٪ خطاست. بیشترین خطای نتایج برای روابط، مربوط به شارهای حرارتی بحرانی کمتر از $400 kW/m^2$ است.

واژه‌های کلیدی: رابطه تخمین، شار حرارتی بحرانی، لوله، مادون سرد، نانوسیال.

ایمیل نویسنده مسئول: bakhshan@hormozgan.ac.ir

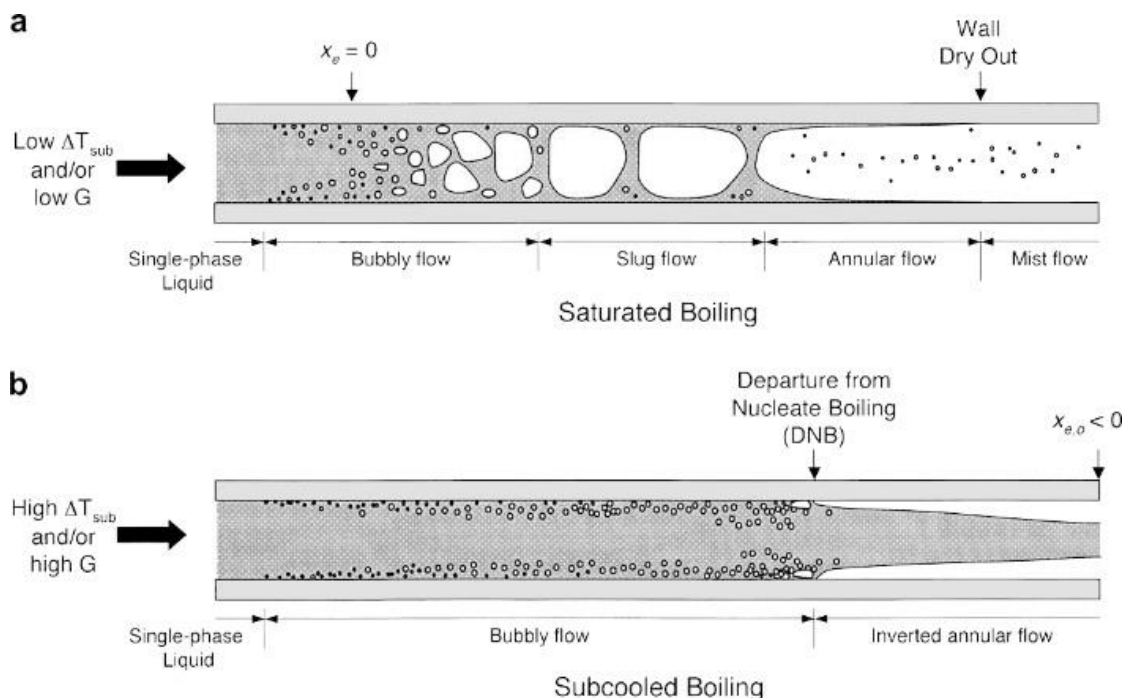
۱-مقدمه

شار حرارتی بحرانی در سیستم‌هایی که شار حرارتی توسط یک سطح به سیال منتقل می‌شود، به عنوان محدود کننده شار حرارتی در نظر گرفته می‌شود چرا که در صورت افزایش بیش از حد مقدار شار حرارتی بحرانی، مایع موجود در نزدیکی دیواره به بخار تبدیل شده و سبب کاهش میزان دفع حرارت از سطح شده و دمای سطح بصورت ناگهانی و به شدت افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به تخریب سطح گرم کننده شود. به همین دلیل نیاز است که مقدار شار حرارتی بحرانی برای سیالات مختلف مورد بررسی قرار گیرد. بسته به شرایط کاری جریان سیال، جوشش جریان سیال می‌تواند بصورت جوشش مادون سرد^۱ و یا جوشش اشباع^۲ باشد (شکل ۱ [۱]). در جوشش مادون سرد در صورت اعمال شار حرارتی بسیار زیاد، تقریباً از همان ابتدای لوله، حباب‌های بخار بر روی سطح گرم کننده تشکیل می‌شود و هسته مرکزی جریان سیال بصورت مایع با دمای کمتر از دمای اشباع باقی می‌ماند [۲]. با عبور جریان سیال در طول لوله، مقدار کسر حجمی بخار در کنار سطح گرم کننده به مرور افزایش می‌یابد تا جایی که تمام سطح را بخار فرا می‌گیرد و سبب می‌شود که مقدار دفع حرارت از سطح گرم کننده به جریان سیال بشدت کاهش یابد و دمای سطح افزایش یابد. برای تخمین مقدار شار حرارتی بحرانی روابط متنوعی براساس آزمایش‌های تجربی مختلف تحت شرایط کاری متنوع ارائه شده

است تا با استفاده از آنها بتوان از محدوده کاری سیستم‌ها و عدم رسیدن به شار حرارتی بحرانی، اطمینان حاصل کرد. روابط ارائه شده برای شار حرارتی بحرانی به دو دسته شار حرارتی جوشش جریان و شار حرارتی بحرانی جوشش استخری تقسیم می‌شوند. از سال ۱۹۵۱ میلادی [۳] تا کنون ده‌ها رابطه برای تخمین شار حرارتی بحرانی جریان سیال مادون سرد ارائه شده است که برخی از آنها به شرایط ورودی لوله وابسته هستند و برخی از آنها علاوه به شرایط ورودی به شرایط خروجی نیز وابسته هستند. مزیت اینکه رابطه مورد استفاده تنها به شرایط ورودی وابسته باشد این است که چون نمی‌توان شرایط خروجی لوله را از پیش تعیین کرد، پس خطای زیادی ممکن است در نتایج بوجود بیاید؛ اما اگر بتوان شرایط خروجی جریان سیال را به نحوی بدست آورد، می‌توان انتظار داشت که رابطه مورد نظر، مقدار شار حرارتی بحرانی را با دقت بسیار بالاتری تخمین بزند. بیشترین روابط ارائه شده برای تخمین شار حرارتی بحرانی، برای جریان سیال آب ارائه شده است. پارامترهای مختلفی بر مقدار شار حرارتی بحرانی جریان سیال مادون سرد لوله تاثیرگذار است، از جمله طول لوله. اگر فرض شود که جریان سیال ورودی به لوله دارای دمایی خاص است، پس نیاز به مقدار حرارتی مشخص دارد تا جوشش اتفاق بیفتد. همچنین مقدار شار حرارتی برابر مقدار کل حرارت تقسیم بر مساحت سطح لوله است، پس با افزایش طول لوله و به طبع آن سطح لوله،

¹ Subcooled boiling

² Saturated boiling



شکل ۱: مکانیزم شار حرارتی بحرانی جوشش جریان سیال درون لوله (a) سیال اشباع (b) سیال مادیون سرد [۱]

جریان مادیون سرد آب، مدلی را برای تخمین شار حرارتی بحرانی ارائه نمودند. برای استفاده از مدل ارائه شده مقدار ضریب اصطکاک درون لوله، زبری سطح و زاویه تماس سیال و سطح نیز مورد نیاز است. کیم و همکارانش [۸] در سال ۲۰۰۹ برای اندازه‌گیری مقدار شار حرارتی بحرانی جریان سیال آب و نانوسیال آلومینا-آب اقدام نمودند. آنها سپس لوله تحت آزمایش را مورد بررسی قرار دادند و توانستند مقدار زاویه تماس سیال و سطح را اندازه‌گیری و با استفاده از آن مقادیر مورد نیاز برای مدل سلاتا و همکاران را بدست آوردند. آنها اعلام کردند که مقدار شار حرارتی بحرانی جریان نانوسیال نسبت به جریان آب حدوداً ۵۰٪ بیشتر است که با بررسی مدل سلاتا و همکارانش نیز به نتیجه‌ای مشابه دست یافتند.

هال و موداوار [۱۲] با استفاده از نتایج تجربی رابطه‌ای را ارائه کردند که قادر به تخمین زدن مقدار شار حرارتی بحرانی جریان آب مادیون سرد درون لوله بود. آنها پس از ارائه شکلی کلی برای رابطه خود، اقدام به بررسی نتایج آزمایشگاهی برای تخمین مقدار ضریب معادله خود نمودند. روابط ارائه شده به شرایط ورودی لوله مانند چگالی آب، چگالی بخار، طول و قطر لوله وابسته بود. در برخی روابط نیز از کیفیت خروجی جریان آب نیز استفاده نمودند که دقت نتایج را تا حدودی بهبود می‌بخشید.

لی و موداوار [۱] پس از انجام آزمایش‌هایی در مورد جریان سیال درون میکرولوله‌ها، اعلام نمودند که روابط مورد استفاده برای تخمین شار حرارتی بحرانی جریان سیال درون لوله برای میکرولوله‌ها قابل استفاده نیستند، به همین دلیل ضریبی جدید ارائه شد تا با استفاده از آن بتوان روابط ارائه شده پیشین را برای تخمین شار حرارتی بحرانی جریان سیال درون میکرولوله مورد استفاده قرار داد.

وفایی و ون [۷] با استفاده پس از انجام آزمایش با استفاده از رابطه

مقدار شار حرارتی برای شرایط یکسان ورودی لوله، کاهش می‌یابد که بصورت تجربی نیز این موارد بررسی شده‌اند [۵-۴]. همچنین با افزایش مقدار دمای سیال ورودی به لوله، مقدار کل حرارت مورد نیاز برای شروع جوشش جریان سیال کاهش می‌یابد [۷-۶]. براساس پژوهش‌های پیشین، با افزایش مقدار شار جرمی سیال ورودی به لوله، نیاز است که حرارت بیشتری به جریان سیال داده شود تا به جوشش برسد [۹-۶].

در جریان نانوسیالات، بدلیل وجود نانوذره درون سیال پایه، خواص سیالاتی و حرارتی سیال پایه دچار تغییراتی می‌شود که بر انتقال حرارت جریان نانوسیال تأثیرگذار است. کیم و همکارانش در سال ۲۰۰۸ برای اولین بار تأثیر افزودن نانوذره به سیال پایه بر مقدار شار حرارتی جریان سیال مادیون سرد را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. آنها پس از افزودن نانوذره آلومینا به آب مشاهده کردند که مقدار شار حرارتی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه آب، حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. براساس آزمایش‌هایی که توسط محققین مختلف انجام شده است، افزودن ۰/۰۱٪ حجمی نانوذره به سیال پایه، مقدار شار حرارتی بحرانی را حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد، اما افزایش غلظت نانوذره موجود در نانوسیال، مقدار شار حرارتی را بسیار محدود افزایش می‌دهد [۹-۶]. به عنوان مثال، در نتیجه بررسی وفایی و همکاران مشاهده شده است که افزایش غلظت حجمی نانوذره آلومینا در سیال پایه از ۰/۰۱٪ به ۰/۱٪، مقدار شار حرارتی بحرانی را بین ۱ تا ۱۰ درصد افزایش می‌دهد [۷].

استفاده از داده‌های تجربی برای اندازه‌گیری مقدار شار حرارتی بحرانی بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر است و دارای سختی‌هایی است؛ براین اساس روابطی برای پیش‌بینی مقدار شار حرارتی بحرانی ارائه شده است. سلاتا و همکارانش [۱۱] با استفاده از ۱۸۸۸ داده برای

موجود برای جوشش جریان مادون سرد نانوسیال استفاده شده است تا مدلی در این زمینه ارائه شود. براساس پژوهشی در زمینه شار حرارتی بحرانی، حدود ۷۸٪ از کل آزمایشات با استفاده از آب به عنوان سیال پایه و حدود ۴۲٪ از کل آزمایشات با استفاده از آلومینا به عنوان نانوذره موجود در سیالات پایه مختلف انجام گرفته است [۱۳]. در پژوهش حاضر نیز از نتایج تجربی موجود برای نانوسیال آلومینا-آب جهت ارائه مدلی برای تخمین شار حرارتی بحرانی سیال مادون سرد استفاده شده است.

۲- تحلیل مدل‌ها و نتایج

برای ارائه رابطه همبستگی مقدار شار حرارتی بحرانی جریان مادون سرد نانو سیال آلومینا-آب در لوله، از نتایج تجربی استفاده شده است که شرایط کاری هر یک از آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.

در جدول ۲ ضریب همبستگی پیرسون شار حرارتی بحرانی با دیگر متغیرهای تاثیرگذار بر مقدار شار حرارتی بحرانی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که قطر لوله، طول لوله و شار جرمی بیشترین تاثیر و کسر حجمی نانوذره، کمترین تاثیر را بر مقدار شار حرارتی بحرانی دارد. همچنین افزایش طول لوله و دمای سیال ورودی سبب کاهش مقدار شار حرارتی می‌شود، اما دیگر پارامترها مقدار شار حرارتی بحرانی را افزایش می‌دهند. نکته قابل ذکر در جدول ۲ این است که در این پژوهش تنها به بررسی نانوسیال آلومینا-آب پرداخته شده است و آب خالص مورد بررسی قرار نگرفته است به همین دلیل تاثیر افزایش کسر حجمی نانوذره موجود در نانوسیال بسیار کم است، در حالیکه تاثیر افزودن نانوذره به آب خالص تاثیر بسیار زیادی در افزایش شار حرارتی بحرانی دارد که یک نمونه آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

همانطور که نشان داده شده است، افزودن نانوذره به سیال پایه آب، می‌تواند مقدار شار حرارتی بحرانی را تا حدود ۵۰٪ افزایش دهد، اما میزان افزایش شار حرارتی بحرانی با افزایش مقدار غلظت نانوذره موجود در نانوسیال پایه (نانوسیال با غلظت کسر حجمی ۰/۰۱٪)، افزایش چشمگیری ندارد.

برای بدست آوردن روابط همبستگی نیاز است که تعدادی متغیر ورودی به روابط داشته باشیم که براین اساس از شار جرمی، دمای ورودی سیال، طول لوله، قطر لوله و کسر حجمی نانوذره آلومینا در

ارائه شده توسط لی و موداوار [۱]، نتایج تجربی و تخمین زده شده را با یکدیگر مورد مقایسه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که در صورت استفاده از روابط تخمین شار حرارتی بحرانی برای میکرولوله، مقدار خطای مطلق میانگین برای جریان سیال آب حدود ۲۴٪ و برای جریان نانوسیال آلومینا-آب حدود ۳۰٪ خواهد بود. آنها برای این منظور، ضریبی براساس عدد وبر^۱ (We_d) را در رابطه تخمین مقدار شار حرارتی بحرانی جایگذاری نمودند که عبارت است از [۱]:

$$CHF_{\text{microchannel}} = CHF \times We_d^C \quad (1)$$

$$We_d = \frac{G^2 D}{\sigma \rho_f} \quad (2)$$

که CHF مقدار شار حرارتی بحرانی براساس مدل‌های موجود است و $CHF_{\text{microchannel}}$ مقدار شار حرارتی بحرانی میکرولوله. C یک ضریب است که براساس شرایط کاری تعیین می‌شود. G شار جرمی، D قطر لوله، σ ضریب کشش سطحی و ρ_f چگالی سیال مایع هستند.

مدل‌هایی که پیشتر برای تخمین مقدار شار بحرانی ارائه شده است برای جریان سیال آب بوده‌اند و تاکنون رابطه‌ای برای تخمین شار حرارتی بحرانی جریان نانوسیال ارائه نشده است. روابط پیشین با در نظر گرفتن متغیر یا ضرایب خاصی برای جریان نانوسیال نیز قابل استفاده بوده‌اند. به عنوان مثال مدل سلاتا و همکارانش [۱۱] می‌باشد که در آن از زاویه تماس سطح و زبری سطح استفاده شده است و کیم و همکارانش [۸] اعلام کرده‌اند که با نتایج تجربی همخوانی دارد. وفایی و ون [۷] برای تخمین مقدار شار حرارتی بحرانی جریان سیال درون میکرولوله از رابطه‌ای استفاده نمودند که برای جریان سیال آب ارائه شده بود. آنها برای اینکه بتوانند مدل مذکور را برای جریان نانوسیال استفاده نمایند، ضریبی را در رابطه تغییر دادند و اعلام کردند که میانگین خطای مطلق برای مقادیر بدست آمده، حدود ۳۰٪ است [۷].

براساس مطالعات انجام شده در زمینه شار حرارتی بحرانی، مشاهده شده است که آزمایشات بسیار اندکی بر شار حرارتی بحرانی جریان نانوسیال مادون سرد انجام گرفته است که تقریباً تمام آنها در دهه اخیر بوده است. به همین دلیل مدلی قابل اعتماد برای تخمین مقدار شار حرارتی بحرانی جریان نانوسیال مادون سرد نیز ارائه نشده است. به همین دلیل، در پژوهش حاضر از داده‌های تجربی

جدول ۱: شرایط کاری اندازه‌گیری شار حرارتی بحرانی جریان نانوسیال مادون سرد

پارامتر	کیم و همکاران [۸]	کیم و همکاران [۶]	وفایی و ون [۷]	ونگ و همکاران [۴]
شار جرمی	1500, 2000, 2500	100, 200, 300	650-1630	150-350
دمای سیال ورودی	300	323, 348	293, 328	298
طول لوله	100	500	306	500, 600
قطر لوله	5.53	10.98	0.51	6, 8
کسر حجمی نانوذره	0.001, 0.01, 0.1	0.001, 0.01, 0.1	0.001, 0.01, 0.1	0.1
فشار کاری	100	100	100	400, 800
	G [kg/m ³]			
	T_{in} [K]			
	L [mm]			
	D [mm]			
	ϕ [%]			
	P [kPa]			

^۱ Weber number

است.

در برخی روابط همبستگی پیشین همچون روابط هال و موداوار (۲۰۰۰) [۱۲] و لی و موداوار (۲۰۰۹) [۱] که هر دو برای آب خالص تعریف شده‌اند، از داده‌های خروجی لوله نیز استفاده شده بود که در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، سبب بروز خطای بسیاری در نتایج بدست آمده برای مقدار شار حرارتی خواهد شد. به همین دلیل در این پژوهش تنها از داده‌های ورودی لوله استفاده شده است تا بصورت ساده‌تری بتوان مقدار شار حرارتی بحرانی را تخمین زد. مدل‌های بدست آمده با استفاده از روش کمترین مربعات^۱ در جدول زیر نشان داده شده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۳ برای شرایط فشار کاری ۱۰۰ تا ۸۰۰ کیلوپاسکال، شار جرمی $100 < G \left[\frac{kg}{m^2.s} \right] < 2500$ ، $0.00051 < T_{in}[K] < 348$ ، $0.1 < L[m] < 0.5$ ، $D[m] < 0.00533$ و $0.1 < \phi[\%] < 0.001$ مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

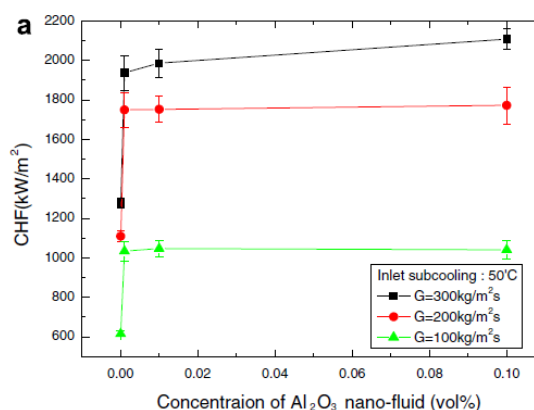
همانطور که در مقدمه نیز ذکر شده است لی و موداوار [۱] برای اینکه بتوانند از مدل‌های موجود برای میکرولوله‌ها استفاده نمایند از ضریب عدد وبر استفاده نمودند. در این پژوهش نیز برای تعریف مدل ۳ از دو رابطه استفاده شده است، یک رابطه مربوط به لوله‌های معمولی که همان مدل ۲ است و یک رابطه برای میکرولوله‌ها که حاصل ضرب مدل ۲ در عدد وبر است.

در شکل ۳ مقدار شار حرارتی تخمین زده شده توسط مدل‌های پژوهش حاضر با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند که مدل ۲ دارای بیشترین دقت است چراکه دارای دو رابطه برای تخمین شار حرارتی بحرانی در میکرولوله‌ها و لوله‌های بزرگتر بصورت اختصاصی است. در صورت نیاز به استفاده از یک رابطه برای تمام لوله‌ها در شرایط کاری مشخص شده، می‌توان از مدل ۱ استفاده نمود که دارای دقت حدود ۱۵٪ و در محدوده دقت روابط تخمین شار حرارتی بحرانی با استفاده از عدد وبر (مدل ۳) هستند.

در شکل ۴ مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده برای شار حرارتی بحرانی در میکرولوله نشان داده شده است. مقدار میانگین خطای مطلق بدست آمده توسط وفایی و ون برابر ۳۰٪ بوده است [۷]،

جدول ۲: ضریب همبستگی شار حرارتی بحرانی جریان نانوسیال با دیگر متغیرها

پارامترها	ضریب همبستگی متغیرها با شار حرارتی بحرانی
شار جرمی	G
دمای سیال ورودی	T_{in}
طول لوله	L
قطر لوله	D
چگالی مایع پایه	ρ_{bf}
چگالی بخار	ρ_v
کسر حجمی نانوذره	ϕ
فشار کاری	P



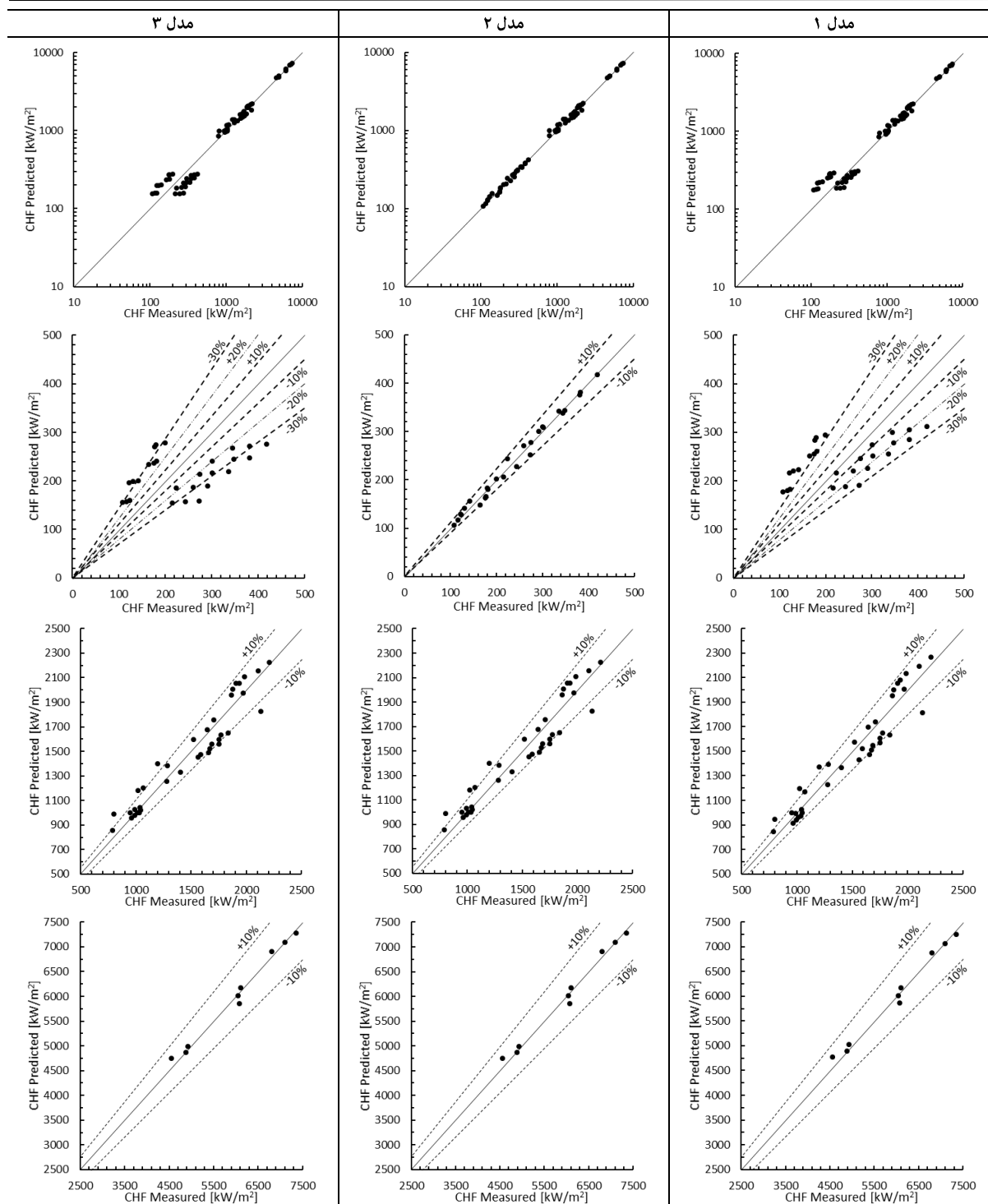
شکل ۲: تاثیر مقدار کسر حجمی نانوذره بر شار حرارتی بحرانی [۶]

آب استفاده شده است. پیش از این برای برخی خواص نانوسیال همچون چگالی، روابطی ارائه شده است [۱۴] که بستگی به چگالی سیال پایه و چگالی نانوذره دارد که در صورت استفاده از آنها، رابطه همبستگی می‌تواند پیچیده و دشوار شود که به همین دلیل در این پژوهش از چگالی آب به عنوان سیال پایه استفاده شده است و چگالی نانوذره آلومینا در ضرایب روابط همبستگی مستتر شده

جدول ۳: مدل‌های پیشنهادی برای تخمین مقدار شار حرارتی بحرانی جریان نانوسیال مادون سرد آلومینا-آب

مدل	مدل تابع	رابطه همبستگی	میانگین خطای مطلق [%]
1	رابطه غیرخطی	$CHF = G^{0.730136} \times T_{in}^{-0.872658} \times L^{0.333988} \times D^{1.324218} \times \rho_{bf}^{1.039079} \times \phi^{0.011563} \times 1224.770837 + 133.98$	14.9%
2	رابطه غیرخطی دویخشی	Microchannels: $CHF = (G^{0.730136} \times T_{in}^{-0.872658} \times L^{0.333988} \times D^{1.324218} \times \rho_{bf}^{1.039079} \times \phi^{0.011563} \times 1224.770837 + 133.98) \times We_d^{0.121}$ Other Channels: $CHF = G^{0.730136} \times T_{in}^{-0.872658} \times L^{0.333988} \times D^{1.324218} \times \rho_{bf}^{1.039079} \times \phi^{0.011563} \times 1224.770837 + 133.98$	3.0%
3	رابطه غیرخطی دویخشی با عدد وبر	Microchannels: $CHF = (G^{0.730136} \times T_{in}^{-0.872658} \times L^{0.333988} \times D^{1.324218} \times \rho_{bf}^{1.039079} \times \phi^{0.011563} \times 1224.770837 + 133.98) \times We_d^{0.121}$ Other Channels: $CHF = G^{0.730136} \times T_{in}^{-0.872658} \times L^{0.333988} \times D^{1.324218} \times \rho_{bf}^{1.039079} \times \phi^{0.011563} \times 1224.770837 + 133.98$	14.7%

¹ Least Squares Method



شکل ۳: مقایسه مقدار شار حرارتی بحرانی مادون سرد تخمین زده شده و تجربی براساس جدول ۱

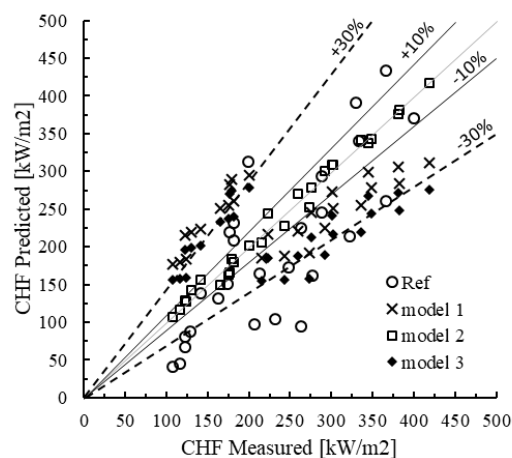
این پژوهش و نتایج تجربی (براساس جدول ۱) نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در شرایط مختلف، خطای محاسباتی وجود دارد که نشان دهنده عدم وابستگی خطا به شرایطی خاص است و مدل‌های ارائه شده را می‌توان برای شرایط مختلف و با خطای قابل قبول، مورد استفاده

در حالیکه خطای مطلق بدست آمده توسط مدل‌های ۱، ۲ و ۳ در پژوهش حاضر بترتیب حدود ۳۵٪، ۴٪ و ۳۶٪ است. در شکل ۵ اثر شار جرمی، دمای سیال ورودی، طول لوله، قطر لوله، کسر حجمی نانوذر موجود در نانوسیال (ϕ) و فشار کاری بر نسبت مقدار شار حرارتی بحرانی بدست آمده توسط مدل ۲ در

بررسی شده در این پژوهش دارای میانگین خطای مطلق کمتر از ۲۰٪ بوده‌اند که بیشترین خطا مربوط به نتایج میکرولوله‌ها بوده‌اند. براین اساس پیشنهاد می‌شود که از مدل غیرخطی دوبرخی ارائه شده در این مقاله استفاده شود که دارای یک رابطه برای میکروکانال‌ها و یک رابطه برای لوله‌های با قطر بزرگتر است که در این حالت مقدار میانگین خطای مطلق نتایج به حدود ۳٪ رسیده است. همچنین با توجه به اینکه در این پژوهش فقط به بررسی نانوسیال آلومینا-آب پرداخته شده است و نتایج شار حرارتی بحرانی جریان آب خالص در نظر گرفته نشده است، براساس ضرایب همبستگی بدست آمده، کسر حجمی نانوذره دارای کمترین تاثیر بر مقدار شار حرارتی بحرانی است.

۴- مراجع

- [1] J. Lee and I. Mudawar, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 3341-3352, (2009).
- [2] D. Hall and I. Mudawar, International Journal of Heat and Mass Transfer, 43, 2573-2604, (2000).
- [3] F.C. Gunther, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 73, 115-123, (1951).
- [4] Y. Wang, K. Deng, J. Wu, G. Su and S. Qiu, International Journal of Heat and Mass Transfer, 122, 212-221, (2018).
- [5] L. Wojtan, R. Revellin and J.R. Thome, Experimental Thermal and Fluid Science, 30, 765-774, (2006).
- [6] T. Kim, Y. Jeong and S. Chang, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 1015-1022, (2010).
- [7] S. Vafaei and D. Wen, Chemical Engineering Research and Design, 92(11), 2339-2351, (2014).

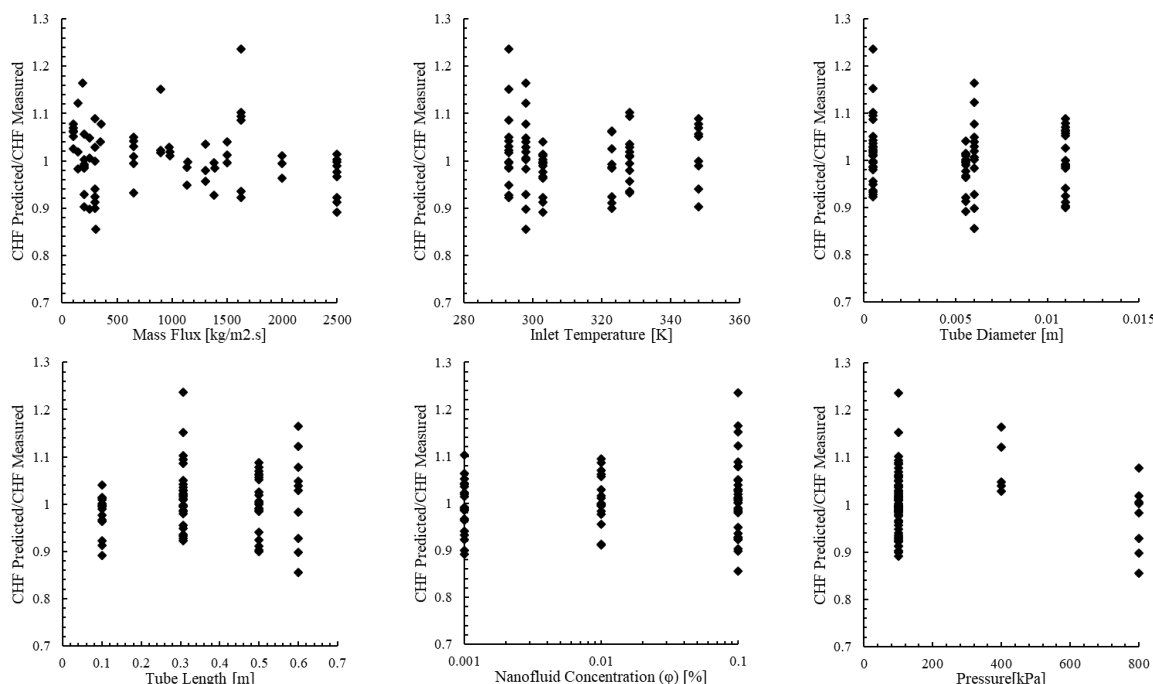


شکل ۴: مقایسه نتایج شار حرارتی بحرانی اندازه‌گیری و تخمین زده شده جریان نانوسیال در میکرولوله

قرار داد. براساس شکل ۵ و شکل ۳، بیشترین خطا مربوط به شارهای حرارتی بحرانی کمتر از ۴۰۰ kW/m² است.

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روابطی برای تخمین مقدار شار حرارتی نانوسیال آلومینا-آب ارائه شده است. مزیت روابط ارائه شده در این مقاله نسبت به روابط پیشین این است که تنها به شرایط کاری و خواص سیال آب در ورودی وابستگی دارد و تنها مقدار کسر حجمی نانوسیال آلومینا به عنوان معیاری برای خواص نانوسیال در رابطه بکار گرفته شده است که سبب می‌شود با اطلاعات مورد نیاز کمتری به رابطه‌ای ساده‌تر دست یافت. تمام روابط غیرخطی



شکل ۵: نسبت مقدار شار حرارتی بحرانی تخمین زده شده (مدل ۳) به تجربی براساس شرایط مختلف



- [8] S. J. Kim, T. McKrell, J. Buongiorno and L.-W. Hu, Heat Transfer, 131, 043204-1-7, (2009).
- [9] S. Vafaei and D. Wen, Journal of Nanoparticle Research, 13, 1063-1073, (2011).
- [10] S. J. Kim, T. McKrell and J. Buongiorno, Journal of Heat Transfer, 130, 044501-1, (2008).
- [11] G.P. Celata, M. Cumo, A. Mariani, M. Simoncini and G. Zummo, International Journal of Heat and Mass Transfer, 37(1), 347-360, (1994).
- [12] D.D. Hall and I. Mudawar, International Journal of Heat and Mass Transfer, 43, 2605-2640, (2000).
- [13] X. Fang, Y. Chen, H. Zhang, W. Chen, A. Dong and R. Wang, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 924-940, (2016).
- [14] Sh.M. Vanaki, P. Ganesan and H.A. Mohammed, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 1212-1239, (2016).