

اصلاح مدل انتقال جرم «نرخ معین» برای  
شبیه‌سازی عددی فرایند چگالش تماس  
مستقیم جت بخار در جریان آب

Original Article

سعید ودادی کلانتر (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف  
علی اسماعیلی (دانشجوی دکتری)  
سامان زارع (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
محمد پسندیده‌فرد\* (استاد)  
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

یکی از مدل‌های انتقال جرم در شبیه‌سازی عددی فرایند چگالش تماس مستقیم در پدیده‌ی تزریق بخار در جریان آب، مدل انتقال جرم نرخ معین است. اما این مدل انتقال جرم برای هر شبیه‌سازی نیازمند یک ضریب تجربی منحصر به فرد است. در این پژوهش، با توجه به نتایج موجود از پژوهش‌های تجربی محققین پیشین، با استفاده از شبیه‌سازی عددی پدیده در نرم‌افزار فلوئنت، تأثیر پارامترهای مختلف جریان آب و جریان بخار، شامل عدد رینولدز جریان آب، دمای آب و نیز شار جرمی جریان بخار ورودی، بر ضریب تجربی مدل انتقال جرم نرخ معین بررسی شده است. با استفاده از نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی، این مدل انتقال جرم اصلاح شده و با ارائه‌ی رابطه‌ی برای تخمین ضریب تجربی موجود در این مدل به صورت تابعی از پارامترهای مؤثر در پدیده، دقت شبیه‌سازی‌ها افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: جریان دوفازی، شبیه‌سازی عددی، چگالش تماس مستقیم، جت بخار.

saeedkalantari89@gmail.com  
ali\_esmaeeli\_67@yahoo.com  
saman.zare@st u.um.ac.ir  
mpfard@um.ac.ir

## ۱. مقدمه

یکی از راه‌های افزایش چشمگیر نرخ چگالش در جریان‌های دوفازی، تزریق بخار سیال به داخل مایع فوق سرد همان سیال است. از جمله کاربردهای این فرایند می‌توان صنایع غذایی، پیش‌گرم‌کن‌های آب تغذیه و سیستم‌های خنک‌کاری راکتورهای هسته‌یی با نام برد. این نوع چگالش را «چگالش تماس مستقیم» می‌نامند، زیرا هیچ مرزی بین ذرات بخار و مایع فوق سرد در این نوع جریان وجود نخواهد داشت. عدم وجود مقاومت حرارتی و مساحت بالای انتقال حرارت بین این دو سیال علت افزایش کارایی این روش در انتقال حرارت و همچنین افزایش نرخ چگالش بخار در مایع مافوق سرد است.

انتقال حرارت بین آب و بخار باعث می‌شود جت توده بخار در ناحیه‌ی ورودی بخار تشکیل شود.<sup>[۱]</sup> چگالش بخار در هنگام تزریق در جریان آب را می‌توان با اندازه‌گیری طول توده‌ی بخار بررسی کرد. هرچه طول توده بخار کوچک‌تر باشد، فرایند چگالش با نرخ بیشتری انجام می‌گیرد.<sup>[۲]</sup> به همین دلیل بررسی عوامل مؤثر بر طول توده بخار تزریق شده، در سال‌های اخیر توسط پژوهش‌گران زیادی، مورد توجه قرار

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۲/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱/۱۴، پذیرش ۱۳۹۶/۱/۲۹.

DOI:10.24200/J40.2018.6415

گرفته است.<sup>[۳-۶]</sup> به منظور بررسی چگونگی انتقال جرم و حرارت بین دو فاز، کارهای تجربی زیادی روی دسته‌بندی مدل‌های مختلف چگالش تماس مستقیم صورت گرفته است. اغلب مطالعات تجربی پیشین روی تزریق بخار آب در یک استخر آب فوق سرد صورت گرفته که یکی از پرکاربردترین نمونه‌های این فرایند است. براساس این پژوهش‌ها، دمای استخر آب، فشار بخار ورودی و دبی آن، از عوامل مؤثر بر طول توده بخار است. چان و همکاران<sup>[۷]</sup> در سال ۱۹۹۶ رژیم‌های مختلف جریان تزریق بخار به داخل یک استخر آب فوق سرد را بررسی کرده و تأثیر این عوامل بر طول توده بخار ورودی را در نتایج خود آورده‌اند. همچنین آن‌ها رابطه‌ی برای تخمین طول توده بخار بر اساس شرایط دیگر آزمایش، ارائه کرده‌اند. در جدول ۱ روابط حاصل از پژوهش‌های تجربی برای طول بی‌بعد توده بخار (نسبت طول توده به قطر نازل) آورده شده است. همانطور که ذکر شد این طول تابعی از شرایط حاکم بر مسئله است.

همچنین در سال‌های اخیر با توجه به هزینه‌بر بودن آزمایش‌های تجربی پژوهش‌های زیادی به منظور شبیه‌سازی عددی این پدیده توسط محققین انجام شده است. پسنگو<sup>[۸]</sup> در سال ۲۰۱۰ تزریق بخار در استخری آب را با استفاده از مدل حجم سیال شبیه‌سازی کرد. او در پژوهش خود برای مدل‌سازی جریان سیال از مدل

جدول ۱. روابط ارائه شده برای طول بی بعد توده بخار در پژوهش‌های تجربی گذشته.

معادله	سال	نام محققین
$\frac{l}{d} = 0.592B^{-0.66} \left(\frac{Ge}{Gm}\right)^{0.344}$	۱۹۹۶	چان و همکاران [۷]
$\frac{l}{d} = 0.2588B^{-1} \left(\frac{Ge}{Gm}\right)^{0.5}$	۱۹۷۲	کرنی و همکاران [۹]
$\frac{l}{d} = 0.503B^{-0.7} \left(\frac{Ge}{Gm}\right)^{0.47}$	۲۰۰۱	کیم و همکاران [۳]
$\frac{l}{d} = \begin{cases} 2.03B^{-0.72} \left(\frac{Ge}{Gm}\right)^{1.71} Re^{-0.19} & 2456 < Re \leq 29473 \\ 11925B^{-0.62} \left(\frac{Ge}{Gm}\right)^{1.61} Re^{-1.01} & 29473 < Re < 117893 \end{cases}$	۲۰۱۳	کیانگ ژو و همکاران [۱۰]

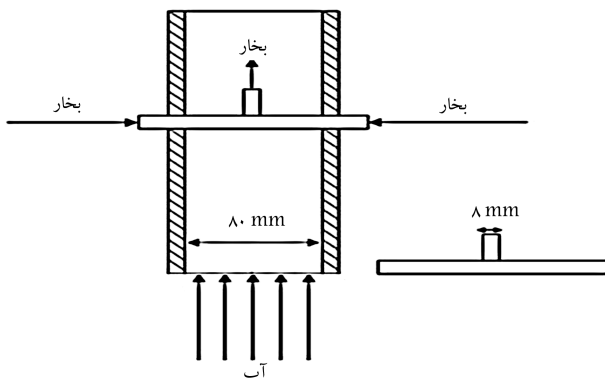
اصلاح شده و با ارائه‌ی رابطه‌ی برای تخمین ضریب ثابت موجود در این مدل، دقت شبیه‌سازی‌های افزایش یافته است.

## ۲. مدل فیزیکی

پدیده‌ی چگالش تماس مستقیم در تزریق بخار در آب به صورت آزمایشگاهی توسط بسیاری از محققین انجام شده است، اگرچه در رابطه با پدیده‌ی تزریق بخار در جریان آب بررسی‌های اندکی صورت گرفته و اطلاعات تجربی کمی موجود است. برای فهم بهتر چگالش بخار در آب و بهبود مدل انتقال جرم، هندسه‌ی بی‌بی توسط کیانگ ژو و همکاران [۱۰] مدل شده بود (شکل ۱)، توسط نرم‌افزار فلونت ورژن ۶٫۲٫۱۶ شبیه‌سازی شد. در این پژوهش، بخار به صورت هم‌مرکز در یک لوله‌ی عمودی آب تزریق می‌شود. بخار آب در دمای ۴۴۰ K و فشار ۴۰۰ kPa با شار جرمی ورودی  $(kg/m^2s)$  متفاوت وارد لوله‌ی عمودی آب می‌شود. آب به صورت پایدار و با دما و سرعت‌های مختلف (رینولدزهای متفاوت) در لوله جریان دارد. قطر نازل بخار ۸ میلی‌متر است.

## ۳. مدل ریاضی

در حل این مسئله از رویکرد دوفازی اولر - اولر استفاده شده است که در نرم‌افزار فلونت [۱۵] فرمول‌بندی شده است. در رویکرد اولر - اولر، چون حجم فاز نمی‌تواند با دیگر فازها اشغال شود، کمیت کسر حجمی فازها تعریف می‌شود. این کسرهای حجمی به صورت تابع پیوسته‌ی بی‌بی از مکان و زمان فرض می‌شود و جمع آنها برابر ۱



شکل ۱. هندسه‌ی مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی.

$k - \epsilon$  استاندارد بهره برد. وی در این زمینه بیان می‌کند که به دلیل ناپایداری شدید پدیده‌ی چگالش بخار در آب، مقادیر پله‌های زمانی و ابعاد شبکه‌بندی باید بسیار کوچک باشد و این امر به شدت زمان حل را بالا خواهد برد. وی مدل خود را با نتایج تجربی محققین پیشین به صورت کمی و کیفی مقایسه کرده است و انطباق بسیار مناسبی در نتایج مشاهده می‌شود.

داهی‌کار و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۰ برای مدل‌سازی تزریق بخار در یک استخر آب از مدل اولرین بهره بردند. همچنین آنها در این پژوهش برای مدل‌سازی جریان سیال از مدل درهم  $k - \epsilon$  استاندارد استفاده کردند. آنها با اضافه کردن مدلی که بتواند گردابه‌های بزرگ را در جریان دوفازی شبیه‌سازی کند، توانستند نتایج کار خود را به نتایج آزمایشگاهی از نظر کمی و کیفی نزدیک‌تر کنند. در شبیه‌سازی‌های انجام شده در مطالعات پیشین توسط دو مدل حجم سیال و یا اولرین اکثر سیال اولیه، یعنی آب، ساکن فرض شده و شبیه‌سازی به صورت تزریق بخار در یک استخر آب صورت گرفته است.

دی بنیس و روکو [۱۲] در سال ۲۰۱۰ به مدل‌سازی عددی انتقال جرم و حرارت در طول یک فرایند تزریق بخار در جریان پیوسته‌ی مواد غذایی مایع پرداختند. آنها در مدل‌سازی جریان دوفازی خود از مدل مخلوط بهره برده و جریان سیال را نیز توسط مدل درهم  $k - \epsilon$  مدل‌سازی کردند.

پاتل و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴ چگالش تماس مستقیم در شار جرمی پایین بخار را با استفاده از نرم‌افزارهای NEPTUNE\_CFD و OpenFOAM به صورت عددی شبیه‌سازی کردند و نشان دادند مدل واگرایی سطح می‌تواند انتقال حرارت بین آب و بخار را به خوبی پیش بینی کند.

لی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۵ با استفاده از مدل‌های VOF و LES چگالش بخار در استخر آب را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. نتایج آنها از نظر کیفی تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان می‌داد. آنها همچنین دریافتند که دمای محوری خط مرکزی با کاهش سرعت محوری در خروجی لوله افزایش می‌یابد.

با وجود تلاش‌های صورت گرفته در این زمینه، هنوز مدل مناسبی برای تعیین چگونگی انتقال جرم از فاز بخار به مایع در پدیده‌ی تزریق بخار در آب ارائه نشده است. یکی از مدل‌های ارائه شده برای شبیه‌سازی فرایند انتقال جرم، مدل انتقال جرم با نرخ معین است. اما این مدل نیز نمی‌تواند فرایند مورد نظر را شبیه‌سازی کند زیرا نیازمند ضریب ثابتی است که در شرایط مختلف تغییر خواهد کرد. به همین منظور می‌توان این مدل را یک مدل نیمه‌تجربی نامید. در این مقاله با توجه به نتایج موجود از پژوهش‌های تجربی پیشین، با استفاده از شبیه‌سازی عددی پدیده در نرم‌افزار فلونت، تأثیر پارامترهای مختلف جریان بر طول بی‌بی توده بخار بررسی شده است. با استفاده از نتایج حاصل از این شبیه‌سازی، مدل انتقال جرم نرخ معین

که در آن  $k_t$  نیز هدایت حرارتی جریان درهم است که براساس مدل درهم مورد استفاده تعریف می‌شود. عبارت اول در سمت راست معادله ی ۷ بیان‌گر انتقال حرارت از طریق هدایت، و عبارت  $S_E$  معرف دیگرمنابع تولید انرژی در مخلوط است. در این معادله  $E_q$  برای فاز قابل تراکم به صورت زیر و برای فاز غیر قابل تراکم برابر انتالپی است.

$$E_q = h_q - \frac{p}{\rho_q} + \frac{v_q^2}{2} \quad (9)$$

سرعت نسبی یک فاز نسبت به کل مخلوط را می‌توان از طریق رابطه ی ۱۰ محاسبه کرد:

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n c_k \vec{v}_{qk} \quad (10)$$

در این رابطه  $c_k$  کسر جرمی و  $\vec{v}_{qk}$  سرعت نسبی دو فاز نسبت به یکدیگر بوده و از طریق روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad (11)$$

$$c_q = \frac{\alpha_q \rho_q}{\rho_m} \quad (12)$$

در مدل مخلوط برای تعریف یک عبارت جبری به منظور محاسبه ی سرعت نسبی فازها، فرض می‌شود در یک طول مشخصه ی کوتاه، تعادلی بین فازها برقرار است. این امر که توسط مانینن و همکاران<sup>[۱۶]</sup> در سال ۱۹۹۶ بیان شده، در نهایت رابطه ی سرعت نسبی را به صورت رابطه ی ۱۳ درمی‌آورد:

$$\vec{v}_{pq} = \frac{t_p}{f_{drag}} \bullet \frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_p} \vec{a} \quad (13)$$

که در آن  $t_p$  زمان رهایی یک ذره برابر است با:

$$t_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (14)$$

$d_p$  قطر حباب و  $\vec{a}$  شتاب ذرات فاز ثانویه  $p$  است و چنین تعریف می‌شود:

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{v}_m \bullet \nabla) \vec{v}_m - \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial t} \quad (15)$$

نیروی پسای وارد بر هر ذره که در رابطه ی ۱۳ با  $f_{drag}$  نشان داده شده<sup>[۱۷]</sup> عبارت است از:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 \text{Re}^{0.678} & \text{Re} \leq 1000 \\ 0.10483 \text{Re} & \text{Re} > 1000 \end{cases} \quad (16)$$

در مدل مخلوط با توجه به این که همه ی معادلات حاکم برای مخلوط حل می‌شود، معادله ی کسر حجمی فقط برای فاز ثانویه حل می‌شود. این معادله از معادله ی پیوستگی برای آن فاز به دست می‌آید:

$$\frac{\partial(\alpha_p \rho_p)}{\partial t} + \nabla(\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla(\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (17)$$

است. معادلات بقا برای هر فاز نوشته می‌شود و با توجه به این که در پژوهش مورد نظر جت بخار و آب با یکدیگر به صورت مستقیم در تماس اند و کاملاً اختلاط دارند و قبل از اختلاط نسبت به یکدیگر دارای سرعت نسبی هستند، از این مدل برای مدل جریان دوفازی استفاده می‌شود.

### ۱.۳. بقای جرم

معادله ی بقای جرم که بر کل مخلوط حاکم است در این مدل چنین تعریف می‌شود.

$$\frac{\partial(\rho_m)}{\partial t} + \nabla(\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $\vec{v}_m$  معرف میانگین جرمی سرعت بوده و عبارت است از:

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q \vec{v}_q}{\rho_m} \quad (2)$$

همچنین چگالی کل مخلوط، و برابر است با:

$$\rho_m = \sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q \quad (3)$$

که در آن  $\alpha_q$  بیان‌گر کسر حجمی فاز  $q$  است.

### ۲.۳. بقای اندازه حرکت

معادله بقای اندازه حرکت برای مخلوط را می‌توان از جمع معادلات بقای اندازه حرکت فازهای مختلف به دست آورد:

$$\frac{\partial(\alpha_m \vec{v}_m)}{\partial t} + \nabla(\rho_m \vec{v}_m \bullet \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \left[ \mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T) \right] + \rho_m \vec{g} + \nabla \left( \sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q \vec{v}_{dr,q} \vec{v}_{dr,q} \right) + \vec{F} \quad (4)$$

در اینجا  $\vec{F}$  نشان‌گر نیروهای حجمی و  $\mu_m$  نشان‌گر لزجت مخلوط است که عبارت‌اند از:

$$\mu_m = \sum_{q=1}^n \alpha_q \mu_q \quad (5)$$

همچنین  $\vec{v}_{dr,q}$  سرعت نسبی فاز  $q$ ام نسبت به کل مخلوط است:

$$\vec{v}_{dr,q} = \vec{v}_q - \vec{v}_m \quad (6)$$

### ۳.۳. بقای انرژی

معادله ی بقای انرژی برای مخلوط عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{q=1}^n (\alpha_q \rho_q E_q) + \nabla \cdot \sum_{q=1}^n (\alpha_q \vec{v}_q (\rho_q E_q + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (7)$$

$k_{eff}$  پارامتر هدایت حرارتی مؤثر مخلوط است و چنین محاسبه می‌شود:

$$k_{eff} = \sum_{q=1}^n \alpha_q (k_q + k_t) \quad (8)$$

### ۴.۳. انتقال جرم

انتقال جرم از یک فاز به فاز دیگر را می‌توان به روش‌های مختلف شبیه‌سازی کرد. به طور کلی هنوز مدلی که بتواند تمامی حالت‌های چگالش و تبخیر را در بر بگیرد، ارائه نشده است. اما می‌توان از یکی از دو رویکرد انتقال جرم تبخیر و چگالش و انتقال جرم نرخ معین بهره برد که در این مسئله از مدل انتقال جرم نرخ معین استفاده شده است. لازم به ذکر است که مدل انتقال جرم با نرخ معین به این معنا نیست که انتقال جرم در طول زمان ثابت است بلکه به کمک این روش می‌توان مقدار جرم انتقالی از یک فاز به فاز دیگر را در طول زمان تماس دو فاز، محاسبه کرد. معادله ۱۸ بر توضیحات فوق صحه می‌گذارد. این مدل برای انتقال نرخ جرمی مشخص از یک فاز به فاز دیگر به کار می‌رود. خاصیت توده‌یی بودن چگالش بخار در استخراج باعث می‌شود استفاده از مدل انتقال جرم با ضریب ثابت توجیه‌پذیرتر باشد؛ و به دلیل سادگی معادلات، سرعت حل عددی و همگرایی آن افزایش یابد. با استفاده از مدل‌های تجربی و حل عددی می‌توان رابطه‌یی برای ضریب ثابت انتقال جرم محاسبه کرد. این مقدار را می‌توان از رابطه‌ی ۱۸ محاسبه کرد:

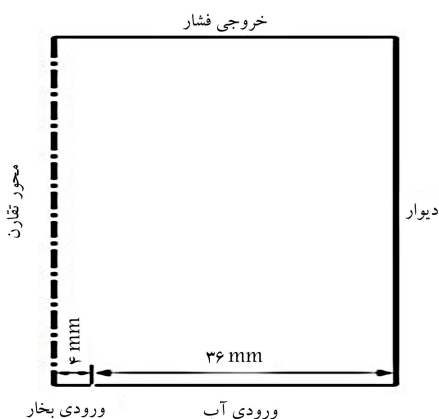
$$\dot{m}_{pq} = \text{Max} [0, \dot{r} \alpha_p \rho_q] - \text{Max} [0, -\dot{r} \alpha_p \rho_q] \quad (18)$$

که در آن  $\dot{r}$  نرخ معین انقباض و انبساط توده ذرات است و از آزمایش‌های تجربی به دست می‌آید.

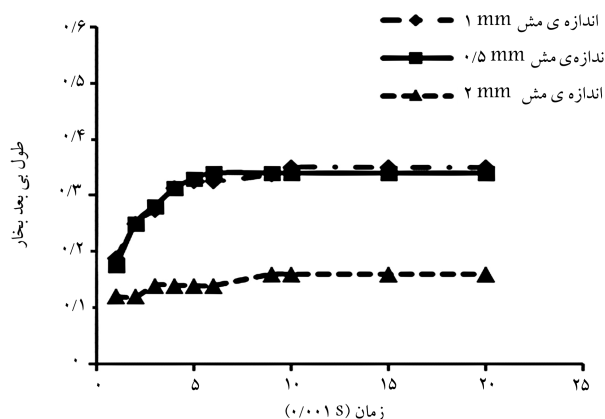
دیواره‌های محفظه نیز دارای شرط مرزی بی‌دررو و بدون لغزش‌اند. تمامی شرایط مرزی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است.

دقت و همگرایی نتایج شبیه‌سازی بستگی به شبکه‌بندی مسئله دارد. در نتیجه اندازه‌ی شبکه‌بندی در این مسئله بررسی شده است. با توجه به این که در حل عددی مسائل دوفازی اندازه مش باید کوچک و از نوع مربعی باشد، در حل این مدل از اندازه مش ۱ میلی‌متر استفاده شده است. بدین ترتیب محدوده‌ی حل به  $625^\circ$  سلول تقسیم می‌شود. از آنجا که مسئله را باید به صورت ناپایا و با بازه‌های زمانی کوچک حل کرد، اندازه‌ی هر گام زمانی  $1 \times 10^{-6}$  ثانیه است. شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی استقلال نتایج از شبکه‌ی حل است و بنابراین می‌توان با اطمینان خوبی از شبکه‌ی حل استفاده کرد.

به دلیل ماهیت دوفازی بودن پدیده و با توجه به برهم‌کنش‌های دوفازی، برای رسیدن به جواب مطلوب و همگرا، مش‌بندی با ابعاد بسیار کوچک مورد نیاز است. هرچه ابعاد مش بندی بزرگ‌تر شود فاصله از جواب واقعی بیشتر خواهد شد تا جایی که امکان دارد حل عددی واگرا شود. به همین علت با افزایش ابعاد مش از ۱ میلی‌متر به ۲ میلی‌متر، اختلاف بین مقادیر طول بی‌بعد بخار بسیار چشمگیر می‌شود. بنابراین تغییرات کوچک در ابعاد مش بندی می‌تواند باعث ایجاد خطای زیاد در حل عددی شود. البته با کوچک‌تر شدن ابعاد مش بندی از ۱ میلی‌متر به  $0.5$  میلی‌متر تغییرات چندانی در مقادیر طول بی‌بعد بخار به وجود نمی‌آید. بنابراین مش بندی با ابعاد ۱ میلی‌متر حل عددی را به جواب مطلوب همگرا می‌کند.



شکل ۲. شرایط مرزی مسئله.



شکل ۳. طول بی‌بعد توده بخار به دست آمده از شبیه‌سازی عددی برای اندازه شبکه‌ی مختلف.

### ۴. شبیه‌سازی عددی

با استفاده از فرمول بندی حجم محدود، شبیه‌سازی دوبعدی تقارن محوری برای مدل کردن پدیده‌ی چگالش تماس مستقیم در تزریق بخار در آب انجام شده است. در این شبیه‌سازی از الگوریتم SIMPLE استاندارد برای گران روی (ویسکوزیته) و روش ضمنی برای گسسته‌سازی زمان استفاده شده است. همچنین روش گسسته‌سازی بالادست مرتبه اول برای فرمول بندی ناپایا به کار گرفته شده است. برای تمامی حل‌ها به جز حل انرژی، مجموع باقی‌مانده کم‌تر از  $1 \times 10^{-6}$  به عنوان معیار همگرایی در نظر گرفته شده است. این مقدار برای معادله‌ی انرژی برابر  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. مشخصات سیال‌ها و جریان براساس آنچه در شبیه‌سازی استفاده شده است در جدول ۲ نشان داده شده است.

همان‌طور بیان شد، حل دوبعدی تقارن محوری حول محور مرکزی محفظه‌ی استوانه‌یی اعمال شده است. شرط مرزی شار جرمی برای ورودی بخار و آب در نظر گرفته شده و به سطح بالایی شرط مرزی خروجی فشار اختصاص داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای جریان و سیال در شبیه‌سازی عددی و تجربی.

شبیه‌سازی CFD	پژوهش تجربی	
۰٫۴	۰٫۷ – ۰٫۲	فشار ورودی بخار (MPa)
۱۷۰	۱۷۰ – ۱۱۰	دمای ورودی بخار (°C)
۵۰۰ – ۲۰۰	۵۰۰ – ۱۵۰	شار جرمی بخار (kg/m <sup>3</sup> s)
۱۱۷۸۹۳ – ۸۳۵۱	۱۱۷۸۹۳ – ۸۳۵۱	عدد رینولدز جریان آب
۵۰ – ۲۰	۷۰ – ۲۰	دمای آب (°C)
۸	۸	قطر نازل ورودی بخار (mm)
۸۰	۸۰	قطر لوله عمودی (mm)

## ۵. نتایج

با توجه به تحقیقات پیشین محققین، طول بی‌بعد توده بخار (نسبت طول توده به قطر نازل) وابسته به پارامترهایی از قبیل رینولدز آب، شدت جریان بخار ورودی، دمای آب و همچنین دمای بخار ورودی است. البته دمای بخار ورودی در طول این آزمایش ثابت در نظر گرفته می‌شود. با توجه به معادله ۱۸، نرخ انتقال جرم از فاز بخار به مایع با ضریب ثابت  $\dot{m}$  رابطه‌ی مستقیم دارد. در معادله‌ی مذکور تمامی متغیرها به جز  $\dot{m}$  از حل عددی به دست می‌آید. اما برای تعیین مقدار  $\dot{m}$  باید از نتایج تجربی استفاده شود. بنابراین به دست آوردن رابطه‌ی برای  $\dot{m}$  این امکان را فراهم می‌کند تا در شرایط مختلف، نرخ انتقال جرم از فاز بخار به مایع بدون نیاز به مراجعه به نتایج تجربی محاسبه شود. در حقیقت  $\dot{m}$  بیان‌گر دبی حجمی ماده‌ی منتقل شده از فاز بخار به فاز مایع است. این امر را می‌توان از بررسی رابطه‌ی جرم منتقل شده (رابطه‌ی ۱۸) استنباط کرد.

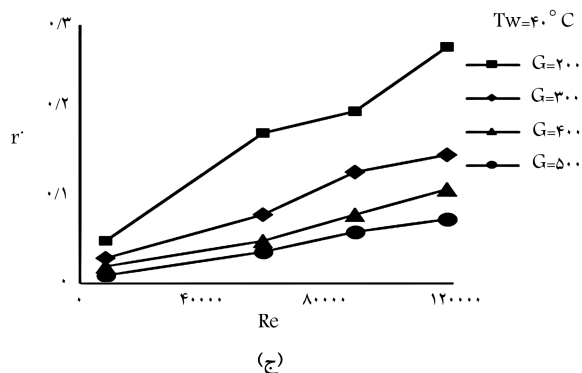
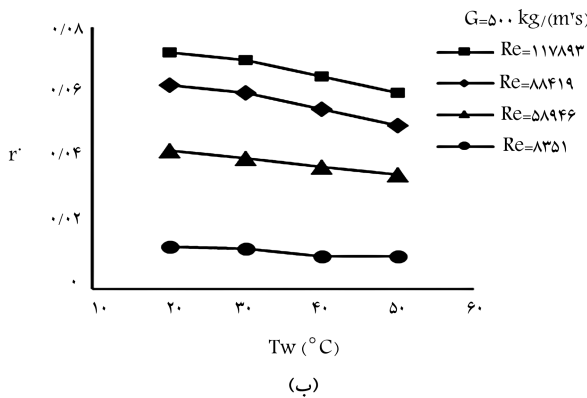
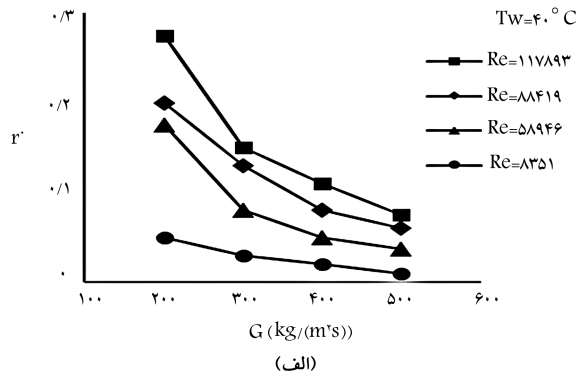
روش کار برای تعیین مقادیر  $\dot{m}$  برای استفاده در حل عددی، چنین است که برای هر مسئله با استفاده از روش سعی و خطا آنقدر ضرایب ثابت تغییر داده می‌شود تا مقدار طول بی‌بعد حل عددی با طول بی‌بعد در پژوهش کیانگ ژو<sup>[۱۰]</sup> یکسان شود. به طور متوسط برای هر یک از داده‌ها، حدود ۵ بار شبیه‌سازی پدیده به‌وسیله‌ی روش عددی انجام شده است. در حقیقت با این کار، ضریب تجربی مدل انتقال جرم مورد نظر برای هر شبیه‌سازی به دست می‌آید. در شکل ۴ مقادیر ضرایب ثابت به دست آمده برای استفاده در حل عددی نشان داده شده است.

نخستین گام در تحلیل نتایج به دست آمده، بررسی کیفی طول توده بخار در شبیه‌سازی و مقایسه‌ی آن با نتایج تجربی است. در شکل‌های ۵ تا ۷ مقایسه‌ی چند نمونه از توده‌های بخار به دست آمده از حل عددی و تجربی نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی در طول توده بخار میان حل عددی حاضر و نتایج تجربی برقرار است. همچنین با توجه به این شکل‌ها می‌توان مشاهده کرد که اختلاف اندکی میان عرض توده بخار در نواحی مختلف در حل عددی و تجربی وجود دارد، با این حال طول توده بخار و نیز مساحت ناحیه‌ی میان دو فاز، که پارامترهای اصلی در میزان چگالش هستند، با دقت خوبی منطبق با نتایج تجربی است.

علت اختلاف در عرض توده بخار را می‌توان ناشی از ثابت بودن کشش سطحی در حل عددی در نظر گرفت. با توجه به این که رینولدز جریان مقدار بالایی است، امکان تغییر کشش سطحی در هنگام حل عددی چندان میسر نیست. اما با توجه به تطبیق مناسب طول و مساحت توده بخار، می‌توان به حل عددی با دقت خوبی اطمینان کرد.

در ادامه، برای تحلیل تأثیر شرایط و پارامترهای مختلف بر نرخ اشباع بخار، طول بی‌بعد توده بخار حاصل از شبیه‌سازی‌های منطبق بر نتایج تجربی با طول بی‌بعد بخار حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از میانگین ضرایب معین انتقال جرم در هر مرحله و اطراف آن بررسی می‌شود. در حقیقت، در نمودارهای شکل ۸، در صورت وجود تطابق میان نتایج شبیه‌سازی‌ها، می‌توان گفت تغییر پارامتر مورد نظر تأثیر چندانی در مقدار ضریب  $\dot{m}$  ندارد. نتایج این بررسی‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.

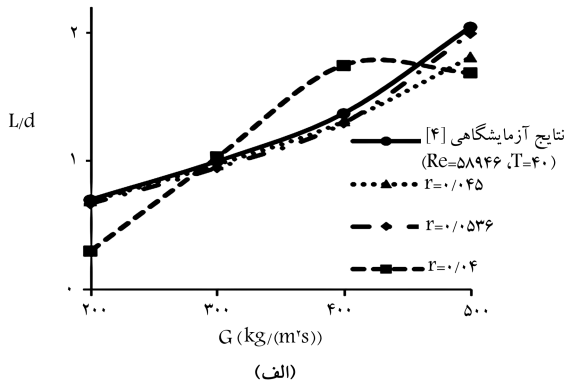
چنان که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار  $G$  طول بی‌بعد توده بخار، به دلیل افزایش دبی جرمی بخار ورودی افزایش می‌یابد (شکل ۸ الف). در  $G$ های بین ۳۰۰ و ۴۰۰ با تغییرات  $\dot{m}$ ، نمودارها با یکدیگر تفاوت چندانی ندارند اما با افزایش مقدار  $G$  تفاوت طول توده بخار در  $\dot{m}$ های مختلف افزایش می‌یابد. به دلیل افزایش میزان شدت بخار ورودی، تغییرات طول بی‌بعد توده بخار در  $\dot{m}$ های



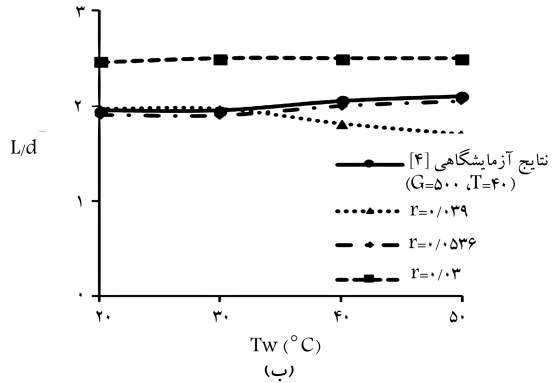
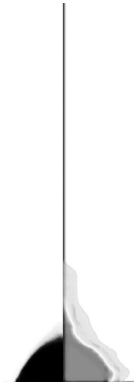
شکل ۴. مقدار ضریب ثابت به دست آمده در شرایط مختلف.



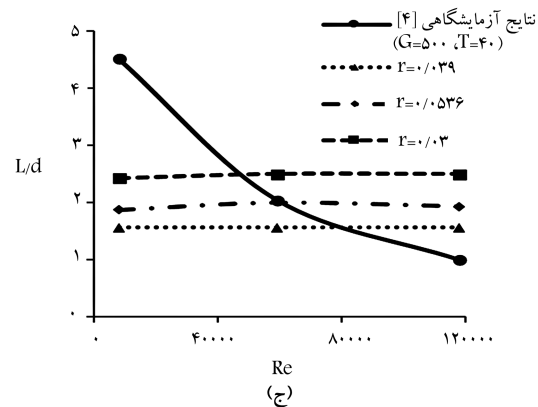
شکل ۵. مقایسه‌ی شماتیک نتایج عددی (راست) و تجربی (چپ) در  $T_w = 20^\circ C$  و  $G_e = 50 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$  و  $Re_w = 8351$ .



شکل ۶. مقایسه‌ی شماتیک نتایج عددی (راست) و تجربی (چپ) در  $T_w = 20^\circ C$ ،  $Re_w = 117893$  و  $G_e = 50^\circ kg/m^2s$ .



شکل ۷. مقایسه‌ی شماتیک نتایج عددی (راست) و تجربی (چپ) در  $T_w = 20^\circ C$ ،  $Re_w = 58946$  و  $G_e = 50^\circ kg/m^2s$ .



مختلف محسوس تر است. در میان  $\dot{r}$ های مختلف، هرچه میزان  $\dot{r}$  کم تر باشد، میزان انتقال جرم از فاز بخار به مایع کاهش می یابد و طول توده‌ی بی بعد بخار بیشتر می شود.

شکل ۸. بررسی حساسیت طول بی بعد بخار به دست آمده نسبت به مقدار ضریب ثابت  $\dot{r}$  در شرایط مختلف.

ضرایب ثابت انتقال جرم کم تر از  $10^{-6}$  باشد، تغییرات طول بی بعد توده بخار قابل صرف نظر کردن است.

با توجه به نمودارهای تغییرات طول بی بعد توده بخار در قسمت های قبل، مشخص است که تغییرات ضریب ثابت با طول بی بعد توده بخار متناسب است، لذا برای تعیین رابطه‌ی ضریب ثابت ابتدا روابط مربوط به طول بی بعد توده بخار بررسی می شود. پس از محاسبه‌ی مقدار  $\dot{r}$  بهینه، رابطه‌ی برای تخمین  $\dot{r}$  در شرایط مختلف ورودی، از قبیل اعداد رینولدز آب، شدت جریان بخار و دمای آب ورودی محاسبه شده است. از طرفی با توجه به نتایج، از آنجا که نسبت  $L/d$  متناسب با ضریب  $\dot{r}$  تغییر می کند، می توان رابطه‌ی  $\dot{r}$  را نیز چنین در نظر گرفت:

$$\dot{r} = a \cdot G^\alpha (T_s - T_w)^\beta Re^\gamma \quad (19)$$

همچنین آنتالپی بخار در طول آزمایش ثابت است و آنتالپی و گرمای ویژه ی آب

در شکل ۸ ب، با افزایش دمای جریان آب، طول بی بعد توده بخار در  $\dot{r}$ های مختلف تغییر نمی کند. میزان انتقال جرم میان دو فاز بخار و مایع به اختلاف دمای جریان بخار و آب بستگی دارد (دمای بخار ورودی  $17^\circ$  درجه سانتی گراد) و در بازه مورد نظر این اختلاف تأثیر کمی در تغییرات آنتالپی میان فاز بخار و مایع دارد. در نتیجه اختلاف انتقال جرم بین دو فاز بخار و مایع در حالات مختلف ناچیز است و طول بی بعد توده بخار تقریباً ثابت می ماند.

در شکل ۸ ج، اثر افزایش عدد رینولدز بر طول بی بعد توده بخار قابل چشم پوشی نیست. سرعت نسبی میان دو فاز بخار و مایع با افزایش عدد رینولدز افزایش می یابد و همچنین افزایش عدد رینولدز باعث افزایش میزان آشفتگی جریان می شود و در نتیجه میزان تغییرات انتقال جرم میان این دو فاز افزایش و طول بی بعد توده بخار کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود که چون با تغییر  $\dot{r}$  نتایج شبیه سازی از نتایج تجربی فاصله می گیرد، عدد رینولدز جریان تأثیر قابل توجهی در تعیین  $\dot{r}$  دارد.

با توجه به نمودارها مشخص می شود که با افزایش ضریب ثابت انتقال جرم میزان انتقال جرم افزایش یافته و طول توده بخار کاهش می یابد. همچنین با کاهش ضریب ثابت انتقال جرم میزان انتقال جرم کاهش یافته و طول توده بخار افزایش می یابد. شدت جریان بخار و عدد رینولدز جریان نسبت به دما تأثیر بیشتری در تغییرات ضریب ثابت انتقال جرم دارد. همچنین مشخص می شود که وقتی تغییرات

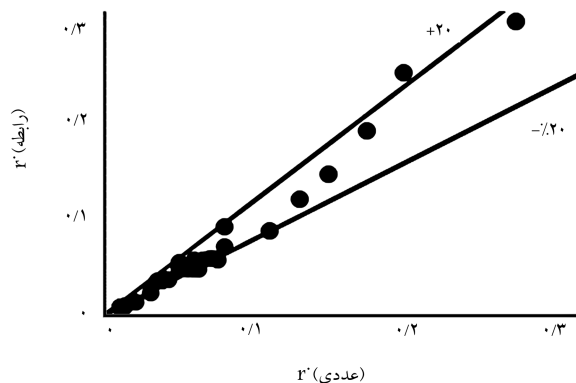
روش ذکر شده، ضرایب و توان‌های معادله‌ی ۱۹ چنین به دست می‌آید:

$$\dot{r} = 1,155G^{-1,78} (T_s - T_w)^{0,72} Re^{0,67} \quad (20)$$

در شکل ۹ مقادیر  $\dot{r}$  تخمین زده شده توسط رابطه‌ی ۲۰ به همراه مقادیر  $\dot{r}$  به دست آمده از حل‌های عددی آورده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، پراکندگی اکثر مقادیر تخمین زده شده برای  $\dot{r}$  از رابطه‌ی ۲۰ در بازه  $\pm 20\%$  نسبت به مقادیر به دست آمده از حل عددی است که نمایانگر تطابق مناسب این رابطه با حل عددی است.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، حل عددی جدیدی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت برای محاسبات مربوط به جریان‌های دوفازی آب - بخار همراه با انتقال جرم در پدیده‌ی تزریق بخار در جریان آب، با استفاده از مدل انتقال جرم با ضریب ثابت معرفی شد. در این مدل، ضریب ثابتی وجود دارد که بر اساس نتایج تجربی به دست می‌آید. در پژوهش حاضر، ابتدا این ضرایب ثابت با استفاده از سعی و خطاهای بسیار و مقایسه با حل تجربی به دست آمده و سپس با توجه به نرخ تغییرات این ضریب با پارامترهای مختلف جریان از جمله شار جرمی بخار ورودی، رینولدز جریان آب ورودی و دمای آب و بخار، رابطه‌ی برای محاسبه‌ی ضریب ثابت مورد نیاز برای حل عددی پیشنهاد شد. نتایج به دست آمده از رابطه‌ی پیشنهادی، با خطای قابل قبولی با نتایج به دست آمده از حل عددی تطابق دارد که نشان می‌دهد می‌توان آن را در روابط انتقال جرم مربوط به این پدیده جایگزین کرد و ضمن بهبود مدل انتقال جرم موجود، نتایج دقیق‌تری در راه‌حل‌های عددی به دست آورد.



شکل ۹. مقایسه‌ی مقادیر  $\dot{r}$  از رابطه‌ی پیشنهادی و مقادیر به دست آمده از حل عددی.

را در بازه دمایی مورد آزمایش تقریباً می‌توان ثابت فرض کرد. بنابراین تأثیرات آن در عدد ثابت معادله لحاظ شده است. به منظور به دست آوردن ضرایب مجهول معادله‌ی ۱۹، برای هر یک از مجهول‌های رابطه یک بازه تغییرات متناسب با جنس پارامتر مورد نظر و تأثیر آن در تغییرات  $\dot{r}$  تعیین می‌شود. سپس با تقسیم این بازه‌ها به بازه‌های کوچک‌تر، مقدار  $\dot{r}$  در تمامی مقادیر این بازه‌ها برای هر یک از مجهولات به دست آمده و باقی‌مانده‌ی آن با توجه به مقدار اصلی  $\dot{r}$  که از سعی و خطا در حل‌های عددی به دست آمده، محاسبه می‌شود. در تکرار بعدی در همسایگی مقادیری از مجهولات که کم‌ترین مقدار باقی‌مانده را دارد، مجدداً بازه‌ی از تغییرات مشخص می‌شود و این کار تا چند مرحله تکرار می‌شود تا مقادیر مجهولات با دقت مناسبی با تکرار قبلی مشابه باشد. بر اساس این روش بهترین مقادیر برای ضرایب مجهول به منظور دست‌یابی به نزدیک‌ترین رابطه به توزیع  $\dot{r}$  به دست خواهد آمد. با توجه به

## منابع (References)

- Bankoff, S.G. and Mason, J.P. "Heat transfer from the surface of a steam bubble in turbulent subcooled liquid stream", *AIChE Journal*, **8**, pp. 30-33 (1962).
- Liang, K.S. and Griffith, P. "Experimental and analytical study of direct contact condensation of steam in water", *Nuclear Engineering and Design*, **147**, pp. 131-146 (1994).
- Kim, H.Y., Bae, Y.Y., Song, C.H. and et al. "Experimental study on stable steam condensation in a quenching tank", *International Journal of Energy Research*, **25**(3), pp. 239-252 (2001).
- Aya, I. and Nariai, H. "Evaluation of heat transfer coefficient at direct condensation of cold water and steam", *Nuclear Engineering and Design*, **17**, pp. 131-146 (1991).
- Petrovic, A. and Calay, R.K. "Three-dimensional condensation regime diagram for direct contact condensation of steam injected into water", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **50**, pp. 1762-1770 (2007).
- Wu, X.Z., Yan, J.J., Shao, S.F. and et al. "Experimental study on the condensation of supersonic steam jet submerged in quiescent subcooled water: Steam plume shape and heat transfer", *International Journal of Multiphase Flow*, **33**, pp. 1296-1307 (2007).
- Chun, M.H., Kim, Y.S. and Park, J.W. "An investigation of direct condensation of steam jet in subcooled water", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **23**(7), pp. 947-958 (1996).
- Pecencko, A. "Numerical simulation methods for phase-transitional flow", PHD Thesis in Technical University of Eindhoven (2010).
- Kerney, P.J., Faeth, G.M. and Olson, D.R. "Penetration characteristics of a submerged steam jet", *AIChE Journal*, **18**(3), pp. 548-553 (1972).
- Xu, Q., Guo, L., Zou, S. Chen, Zhang, X. "Experimental study on direct contact condensation of stable steam jet in water flow in a vertical pipe", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **66**, pp. 808-817 (2013).
- Dahikar, S.K., Sathe, M.J. and Joshi, J.B. "Investigation of flow and temperature patterns in direct contact

- condensation using PIV, PLIF and CFD”, *Chemical Engineering Science*, **65**, pp. 4606-4620 (2010).
12. DeBonis, M.V. and Ruocco, G. “Heat and mass transfer modeling during continuous flow processing of fluid food by direct steam injection”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **37**, pp. 239-244 (2010).
  13. Patel, G., Tanskanen, V. and Kyrki-Rajamaki, R. “Numerical modelling of low-reynolds number direct contact condensation in a suppression pool test facility”, *Annals of Nuclear Energy*, **71**, pp. 376-387 (2014).
  14. Li, S.Q., Wang, P. and Lu, T. “Numerical simulation of direct contact condensation of subsonic steam injected in a water pool using VOF method and LES turbulence model”, *Progress in Nuclear Energy*, **78**, pp. 201-215 (2015).
  15. *ANSYS FLUENT Theory Guide*, ANSYS Inc, Release 14.0, pp.525-528 (2011).
  16. Manninen, M., Taivassalo, V. and Kallio, S. “On the mixture model for multiphase flow”, VTT Publications Technical Research Centre of Finland (1996).
  17. Schiller, L. and Naumann, Z. “A drag coefficient correlation”, *Z. Ver. Deutsch. Ing*, **77**, pp. 318-323 (1935).