بررسي عددي ناسلت محلي جت‌هاي متقارن در سيستم‌هاي مايع- مايع خروجي از يک نازل

محمد معماري[١]، داريوش باستاني[٢] و ايرج گودرزنيا*[٣]

[١] دانش آموخته کارشناسي ارشد دانشکده مهندسي شيمي و نفت- دانشگاه صنعتي شريف

[٢]دانشيار دانشکده مهندسي شيمي و نفت- دانشگاه صنعتي شريف

[٣]استاد دانشکده مهندسي شيمي و نفت- دانشگاه صنعتي شريف

(تاريخ دريافت ٨٧/١١/١٢ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ٨٩/٤/٢٩ ، تاريخ تصويب ٨٩/٦/١٣)

چکيده

هدف اين مقاله بررسي عددي ناسلت محلي جت متقارن در سيستم‌هاي مايع-مايع است. معادله‌هاي رياضي حاصل از بررسي‌هاي نظري به صورت مدل کامپيوتري نوشته شده است. براي حصول اطمينان از کار اين نرم‌افزار اطلاعات تجربي حاصل از يک مقاله پژوهشي [١] مورد استفاده قرار گرفت. پس از تنظيمات لازم، نرم‌افزار مورد نظر داده‌هاي آزمايشگاهي را با دقت کافي پيش‌بيني کرد و به اين ترتيب از کار نرم‌افزار اطمينان حاصل شد. پس از اطمينان از عملکرد نرم‌افزار تأثير تغييرات در عوامل هيدروديناميکي و عوامل حرارتي بر ناسلت محلي مورد بررسي قرار گرفت و در نهايت معادله‌اي براي پيش‌بيني مقدار عددي ناسلت محلي به صورت تابعي از طول جت ارائه شد.

واژه‌هاي کليدي: جت‌هاي متقارن مايع- مايع، CFD، روش VOF، سطح آزاد، انتقال حرارت، عدد ناسلت

مقدمه

پراکنده‌شدن يک سيال غير قابل امتزاج به داخل سيال ديگر، سطح تماس را افزايش داده و باعث افزايش سرعت انتقال جرم و حرارت بين دو سيال مي‌شود. در اغلب دستگاه‌هاي استخراج مايع- مايع، فاز پراکنده به صورت جت وارد فاز پيوسته مي‌شود و شکستن يک جت به قطره‌ها در سيستم‌هاي مايع- مايع از يک نازل و بررسي هيدروديناميک و انتقال جرم و حرارت آن در مهندسي، بخصوص مهندسي شيمي اهميت ويژه‌اي دارد.

در سرعت‌هاي پايين فاز پراکنده به داخل نازل، قطره‌ها به طور تناوبي از روزنه خارج شده و جت ايجاد نمي‌شود، اين رژيم را قطره‌اي ناميده‌اند. با افزايش سرعت مايع ورودي، حالت جتي اتفاق مي‌افتد. طول جت با افزايش سرعت تا سرعتي که جت به بيشترين طول خود برسد، افزايش مي‌يابد و حالت تقارن خود را حفظ مي‌کند. سپس با افزايش سرعت، شکسته شدن جت در اثر توزيع‌هاي نامتقارن جت انجام شده و طول جت کاهش پيدا مي‌کند. در سرعت‌هاي بالاتر، جريان جت توسط اتمي‌شدن شکسته شده که در اين حالت قطره‌ها به طور غيريکنواخت نزديک نازل تشکيل مي‌شوند.

در تماس مستقيم دو فاز غير قابل امتزاج، ميزان انتقال حرارت به مراتب بيشتر است از حالت مبدل‌هاي معمولي که دو سيال با يکديگر تماس مستقيم ندارند. اين موضوع از مکانيزم انتقال حرارت از ميان سطح مشترک دو فاز در سيستم‌هاي چند فازي قابل توجه خواهد بود. تماس مستقيم و تبادل حرارت يک مايع يا گاز که در داخل مايع ديگر صعود مي‌کند، بازده انتقال حرارت بالايي را نشان مي‌دهد[٢-۴]. اين نحوه تماس در بسياري از کاربردهاي صنعتي نقش بسيار مهمي دارد که مي‌توان از آن جمله پاشش سرمايشي[١]، جت‌هاي ترمومويينگي[٢] و شيت‌هاي[٣] گرم مايع را نام برد.

در برخي از کاربردها که مقدار انتقال حرارت بسيار بالا است و تخمين سرعت انتقال حرارت از يک سيال پراکنده به سيال فاز پيوسته به طور آزمايشگاهي بسيار مشکل است، مدلسازي و شبيه‌سازي جريان سيال و انتقال حرارت به طور همزمان و رديابي مرز بين سيالات چند فازي بهترين راهکار براي اين مشکل است [۵-٨]. عمده مطالعاتي که بر جت مايع-مايع انجام شده است، روي هيدروديناميک و شرايط هم‌دما در دو فاز بوده است [٩-١٧] که مي‌توان آزمايش‌هاي [١٨] را به عنوان يکي از

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۶۱۶۵۴۵۶ ، فاكس : ٦٦٠٢٢٨٥٣ ، Email: Goodarznia@sharif.edu

بارزترين آنها نام برد كه در اين تحقيقات دو فاز در تماس با يكديگر همدما بوده‌اند و بررسي‌هاي كمي بر انتقال حرارت و تأثير آن بر طول جت انجام گرفته است.

Davis et al [١٨] تأثير سطوح اختلاط بالادستي جريان روي اختلاط حرارت و ممنتوم در جت استوانه‌اي را اندازه‌گيري كردند. آنها مشاهده كردند كه اختلاط روي توزيع سرعت متوسط نزديک خروجي نازل تأثيري ندارند، اما باعث شتاب دادن به شكسته شدن و انتقال حرارت مي‌شوند. Qian et al [١٩] اثر حرارت محفظه آزمايش را روي شكسته شدن يک تزريق كننده گاز كروماتوگرافي مطالعه كردند. Storr و Behnia [٢٠] انتقال حرارت از جت مايع ورودي به هوا را به طور عددي و آزمايشگاهي بررسي كردند كه نتايج عددي آنها با نتايج آزمايشگاهي‌شان تطابق خوبي نداشت. Mashayek و Ashgriz[٢١] ترموموييبنگي را در شكسته‌شدن جت‌هاي مايع به طور عددي بررسي كردند. عمده تحقيقات انجام شده تا به حال بر هيدروديناميک جت‌هاي مايع- مايع بوده است.

در اين مقاله با انجام شبيه‌سازي عددي، مقدار عدد ناسلت محلي را براي جت‌هاي مايع-مايع در زمان جدايش اولين قطره كه دو فاز اختلاف دما دارند، تخمين زده مي‌شود. در ابتدا با شبيه‌سازي جت مايع- مايع همدما براي دو سيستم آب- بوتانول و آب-تولوئن با توجه به نتايج آزمايشگاهي مرجع [١]، دقت شبيه‌سازي انجام داده شده مورد تأييد قرار گرفت. سپس بررسي حرارتي جت مايع انجام شد.

معادلات حاكم بر پديده جت‌هاي مايع- مايع

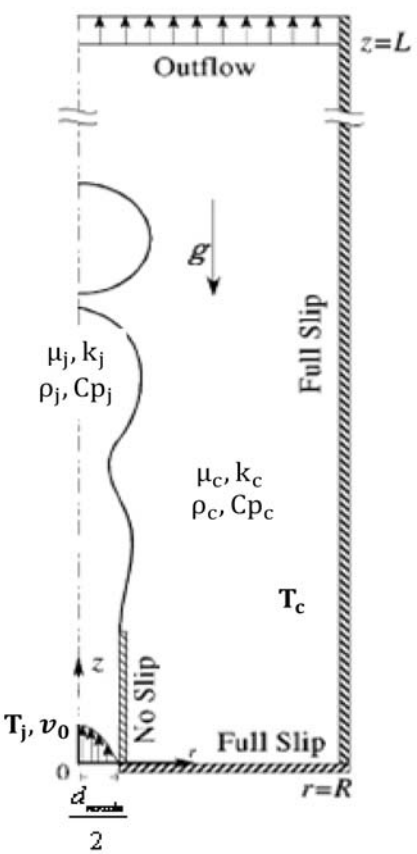
طرحي از پديده تشكيل جت متقارن و شكسته شدن آن به قطره‌ها در شكل (١) نشان داده شده است. در واقع سيال غير قابل تراكم و نيوتني با دانسيته ρ_j و ويسكوزيته μ_j از نازل با سرعت متوسط $v_\circ$ وارد سيال ساكن، غير مخلوط شدني و نيوتني با دانسيته ρ_c و ويسكوزيته μ_c مي‌شود.

براي بررسي اين پديده با استفاده از CFD، ميدان جريان سيال دو فاز غير قابل امتزاج به شكل ميدان سيال تک سيال در نظر گرفته كه خواص سيال بخصوص دانسيته و ويسكوزيته آن در مرز مشترک دو فاز متغير است. با اين فرض معادلات ممنتوم و انرژي به اين ترتيب خواهند بود [٢٢]:

$$\frac{D}{Dt}(\rho \vec{v}) = -\nabla p + \nabla.[\mu(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T)] + \rho \vec{g} + \sigma.\kappa.n.\delta(x - x_{interface}) \quad (١)$$

$$\rho C_p \frac{D}{Dt}(T) = \nabla.[k(\nabla T)] \quad (٢)$$

در معادلات (١) و (٢)، ρ دانسيته سيال، μ ويسكوزيته سيال، σ تنش بين فازي (interfacial tension) دو فاز، κ دومين انحناء سطح مشترک، k ضريب هدايت حرارتي، C_p ظرفيت گرمايي حرارتي، n بردار يكه عمود بر سطح مشترک است. ترم آخر در معادله (١) نشانگر نيروي حاصل از تنش بين فازي است كه تنها در سطح مشترک اتفاق مي‌افتد؛ به همين دليل از تابع دلتا ($\delta(x)$) در سطح مشترک استفاده شده است.



شكل ١: طرحي از پديده تشكيل جت مايع- مايع از يک روزنه و انتقال حرارت به همراه شرايط مرزي در نظر گرفته شده

با استفاده از عبارت‌هاي بدون بعد، زير معادلات (۱) و (۲) را مي‌توان به شکل بدون بعد معادلات (۳) و (۴) نوشت. شرايط مرزي نيز در شکل (۱) براي اين پديده به طور خلاصه بيان شده‌اند.

آناليز CFD اين پديده توسط روش VOF (Volume Of Fluid) انجام شده است. در اين روش فرض مي‌شود که تغييرات خواص فيزيکي در سطح مشترک آني نيست و يک تابعيت ملايم دارد؛ به همين دليل از عامل Φ استفاده مي‌شود. اين عامل براي يک فاز مقدار صفر و براي فاز ديگر مقدار يک را دارد، اما مقدار آن در سطح مشترک از صفر تا يک به طور ملايم متغير است. براي تعقيب سطح مشترک از معادله پاره‌اي (۵) استفاده مي‌شود:

$$Fr_j = \frac{v_0^2}{d_{nozzle} g},\ We_j = \frac{\rho_j v_0^2 d_{nozzle}}{\sigma},$$

$$Pe_j = \frac{k_j}{d_{nozzle} v_0 \rho_j Cp_j},\ Pr = \frac{\mu_j Cp_j}{k_j}$$

$$\xi = \frac{r}{d_{nozzle}},\ \zeta = \frac{z}{d_{nozzle}},\ \tau = \frac{v_0}{d_{nozzle}} t,$$

$$\vec{U} = \frac{\vec{v}}{v_0},\ \theta = \frac{T - T_c}{T_j - T_c},\ Re_j = \frac{\rho_j v_0 d_{nozzle}}{\mu_j},$$

$$\frac{D}{Dt}\left(\frac{\rho}{\rho_j}\vec{U}\right) = -\frac{\nabla p}{\rho_j v_\circ^2} + \nabla.\left[\frac{\mu}{\mu_j.Re_j}\left(\nabla\vec{U} + (\nabla\vec{U})^T\right)\right] + \frac{\rho}{\rho_j}\frac{1}{Fr_j} + \frac{\kappa.n.\delta(x - x_{interface})}{We_j} \quad (۳)$$

$$\frac{\rho C_p}{\rho_j C_{p_j}} \frac{D}{D\tau}(\theta) = \nabla.\left[\frac{k}{k_j Pe_j}(\nabla\theta)\right] \quad (۴)$$

$$\frac{D}{D\tau}\phi = 0 \quad (۵)$$

در سطح مشترک در اين مقاله، مقدار ۰/۵ براي Φ در نظر گرفته شده است. با تعريف Φ، مقادير دانسيته بدون بعد و ويسکوزيته بدون بعد و همچنين عامل κ و بردار n به صورت زير در محدوده سطح مشترک تعريف مي‌شود:

$$\frac{\rho}{\rho_j} = \eta\phi + (1-\phi),\qquad \eta = \frac{\rho_c}{\rho_j} \quad (۶)$$

$$\frac{\mu}{\mu_j.Re_j} = \frac{\lambda}{Re_j}\phi + (1-\phi)\frac{1}{Re_j},\quad \lambda = \frac{\mu_c}{\mu_j} \quad (۷)$$

$$\frac{\rho C_p}{\rho_j C_{p_j}} = \gamma\phi + (1-\phi),\qquad \gamma = \frac{\rho_c C_{p_c}}{\rho_j C_{p_j}} \quad (۸)$$

$$\frac{k}{k_j.Pe_j} = \frac{\varepsilon}{Pe_j}\phi + (1-\phi)\frac{1}{Pe_j},\quad \varepsilon = \frac{k_c}{k_j} \quad (۹)$$

$$n = \frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|} \quad (۱۰)$$

$$\kappa = \nabla.n \quad (۱۱)$$

با نوشتن موازنه انرژي براي مقدار حرارت انتقال يافته از بين سطح مشترک بين دو فاز، مي‌توان مقدار عدد ناسلت محلي را براي سطح مشترک به دست آورد:

$$k_j \frac{\partial T}{\partial s} = k_c \frac{\partial T}{\partial s} = h(T_j - T_c) \quad (۱۲)$$

$$Nu = \frac{hd_{nozzle}}{k_j} = \frac{hd_{nozzle}}{k_c} = \frac{d_{nozzle}}{(T_j - T_c)}\frac{\partial T}{\partial s} = \frac{\partial\theta}{\partial S} \quad (۱۳)$$

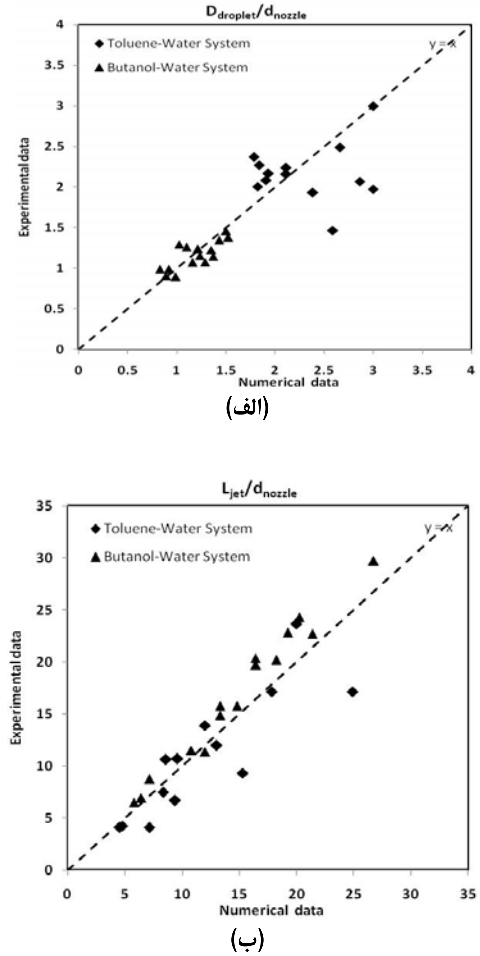
مقايسه نتايج آزمايشگاهي و نتايج عددي حاصل از شبيه‌سازي

براي تأييد و درستي شبيه‌سازي انجام‌شده، نتايج حاصل از آناليز عددي با نتايج آزمايشگاهي[۱] مقايسه شده است. داده‌هاي آزمايشگاهي براي رژيم جتي متقارن از سه نازل با قطرهاي مختلف براي سيستم آب-تولوئن و آب-بوتانول انتخاب شده است.

نتايج عددي حاصل از شبيه‌سازي با نتايج آزمايشگاهي در شکل‌هاي (۲) مقايسه شده است. در انتخاب داده‌هاي آزمايشگاهي سعي شده است که در هر نازل، همه طول بدون بعد جت در محدوده رژيم جتي متقارن مورد بررسي قرار گيرد.

نمودارهاي شکل (۲) نشان مي‌دهند که اختلاف بين نتايج عددي و آزمايشگاهي کم بوده و مي‌توان به نتايج شبيه‌سازي عددي انجام شده اطمينان کرد.

شکل‌هاي (۳) نشان‌دهنده شکل جت حاصل از نتايج تجربي و نتايج عددي براي سيستم آب-بوتانول و آب-تولوئن براي نازل قطر 1/8 mm است که تأييدکننده تطابق مناسب شکل جت حاصل از شبيه‌سازي عددي و آزمايشگاهي است و درستي شبيه‌سازي انجام شده براي پديده جتي متقارن را نشان مي‌دهد.



شكل ۲: مقايسه نتايج تجربي و نتايج عددي براي (الف) قطر بدون بعد قطره‌ها و (ب) طول بدون بعد جت در سيستم آب- تولوئن و آب- تولوئن با توجه به اطلاعات جدول (۲)

بحث و نتايج

براي بررسي ناسلت محلي و تأثير تغيير اعداد بدون بعد بر تغييرات ناسلت محلي در زمان جدايش اولين قطره در بالاي جت مايع، نتايج بر حسب عوامل هيدوديناميكي و عوامل حرارتي تقسيم‌بندي شده است. عوامل هيدرودیناميكي، روي شكل جت و مقدار انتقال حرارت مؤثرند؛ در حالي كه عوامل حرارتي با توجه به ثابت بودن ويسكوزيته و دانسيته با تغييرات دما در ميزان انتقال حرارت اثر گذارند.

عوامل هيدرودیناميكي عبارتند از عدد رينولدز، عدد وبر، عدد فرود، نسبت دانسيته و ويسكوزيته دو فاز و عوامل حرارتي شامل عدد پرانتل، نسبت ضرايب هدايت حرارتي و ظرفيت‌هاي گرمايي دو فاز هستند. براي آنكه بررسي ناسلت محلي آسان‌تر شود، نقطه‌اي مبنا با مشخصات زير براي همه بررسي‌ها قرار داده و تغيير هر عامل با ثابت بودن بقيه عوامل در نقطه مبنااست.

$$Re_j = 988.771,\ \ Fr_j = 7.761,\ \ We_j = 6.7,$$
$$\eta = 1.149,\ \ Pr_j = 10,\ \ \lambda = 1,\ \ \gamma = 1,\ \varepsilon = 1$$

تغيير عوامل هيدوديناميكي جت متقارن بر ناسلت محلي

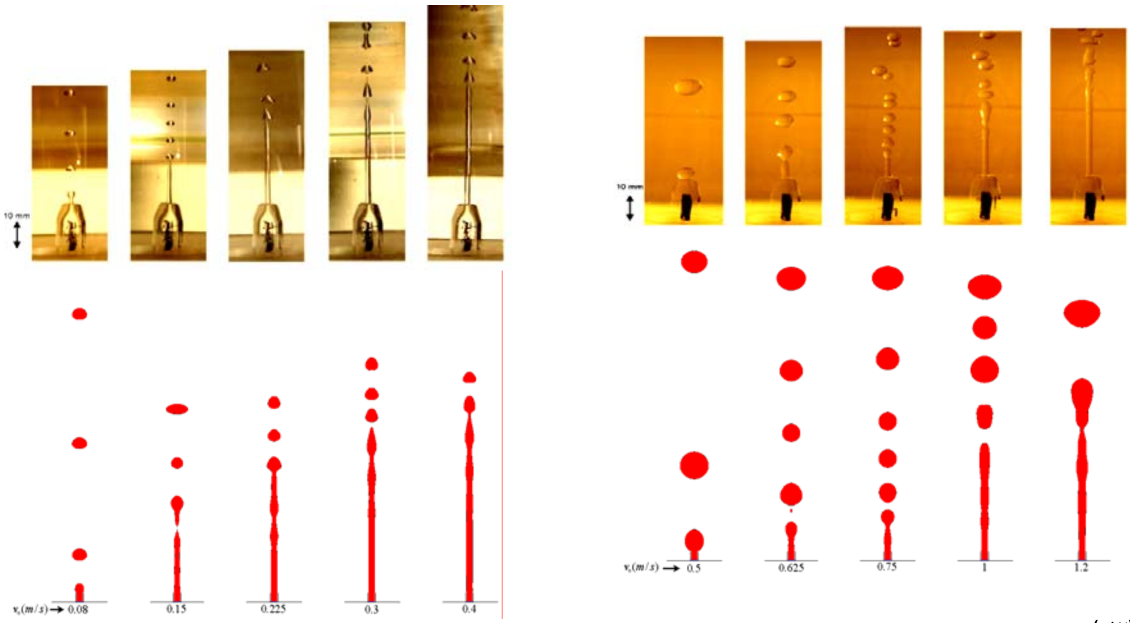
عوامل هيدرودیناميكي كه تأثير بسيار بيشتري را مي‌توان عدد رينولدز، عدد وبر و نسبت دانسيته دو فاز نام برد [۲۳]. با تغيير اين عوامل طول جت، قطر جت و اندازه قطره‌هاي حاصل از جت تغيير خواهند كرد. بر اين اساس سعي شده است كه تغيير اين عوامل و تأثير آن بر ناسلت محلي در شكل (۴) نشان داده شود.

با توجه به شكل (۵ a-h) مقدار ناسلت با افزايش در طول جت، كاهش مي‌يابد. دليل كاهش مقدار ناسلت محلي با افزايش طول جت را مي‌توان كاهش مقدار سرعت و آشفتگي و همچنين كم شدن مقدار گراديان دمايي در جهت عمود بر سطح مشترک دانست.

وجود موج و ايجاد موج بر جت باعث ايجاد نوسان و افزايش مقدار ناسلت مي‌شود؛ به طوري كه با ايجاد موج و افزايش قطر جت مقدار تاسلت محلي كم شده و با كاهش قطر جت، ناسلت افزايش مي‌يابد. اما در مكان جدايش قطره از بالاي جت متقارن، مقدار ناسلت، افت شديد كرده و به صفر ميل مي‌كند؛ در حالي كه جلوي قطره در حال تشكيل، مقدار ناسلت افزايش زياد دارد.

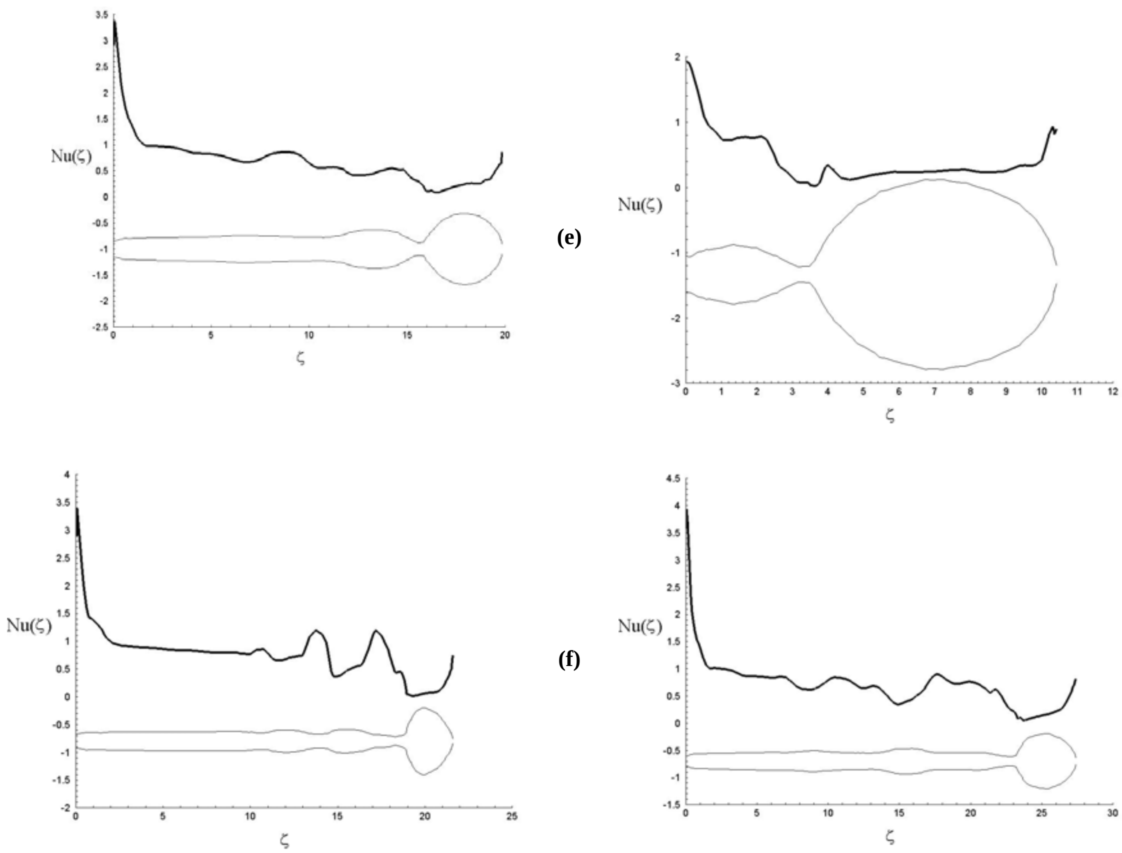
در واقع در مكان جدايش، مقدار گراديان دما و سرعت به كمترين مقدار خود يعني صفر مي‌رسند، اما با اينكه جلوي قطره سرعت مقدار كمي دارد، گراديان دما در جهت طولي جت (عمود بر سطح مشترک) بيشترين مقدار خود را دارد.

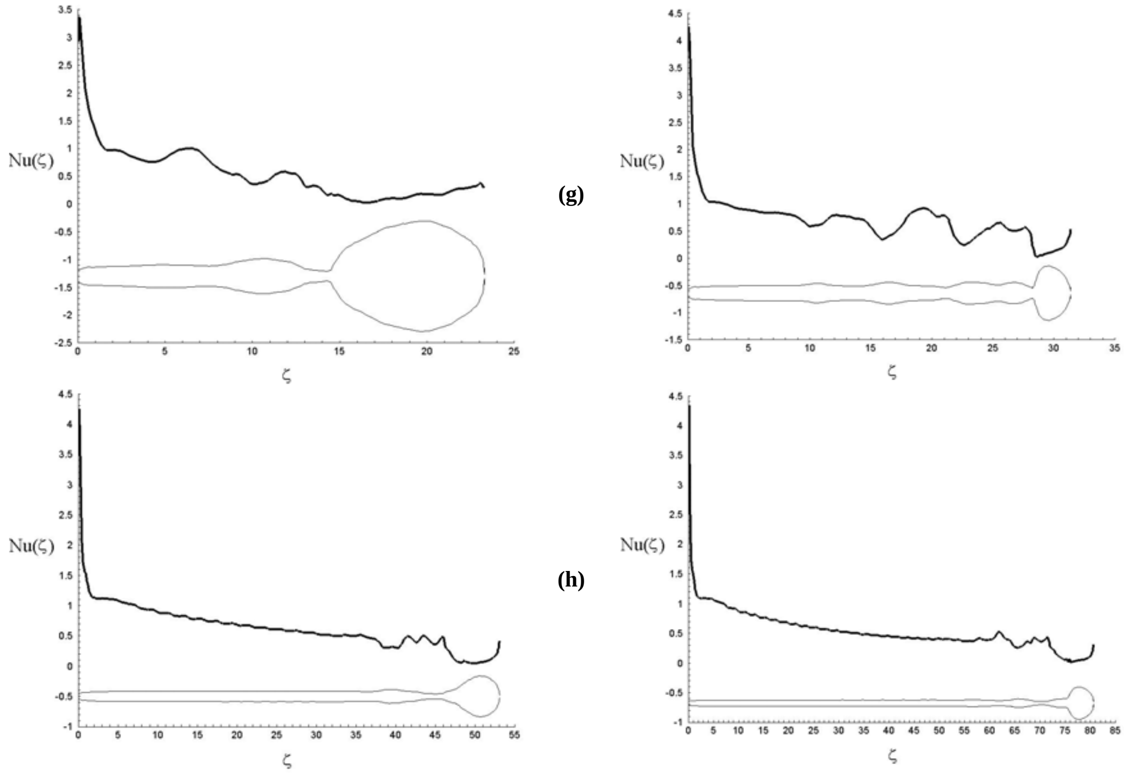
تغييرات ناسلت در ابتداي نازل و با اندازه تقريبي قطر نازل بسيار زياد است، اما با افزايش طول، مقدار ناسلت خیلی كند كاهش مي‌يابد و مي‌توان براي اين فاصله تا نقطه انتهايي كه قطره تشكيل مي‌شود و با در نظر نگرفتن نوسان‌های ناسلت، مقدار ۰/۷۵ تا ۰/۲۵ را براي آن پيشنهاد كرد.



(الف) (ب)

شکل ۳: مقايسه‌اي شماتيکي بين نتايج عددي (تصاوير رديف پايين) و نتايج آزمايشگاهي (تصاوير رديف بالا) براي (**a**) سيستم آب-تولوئن و (**b**) سيستم آب- بوتانول در سرعت‌هاي مختلف در قطر نازل **mm** ۱/۸





شکل ٤: تغييرات ناسلت محلي با تغيير پارامترهاي هيدروديناميکي و شکل جت
(**a**) نقطه مبنا، (**b**) **η**= ٢، (**c**) **η**= ١/٠١، (**d**) **Re**=٣٠٠، (**e**) **We**=١، (**f**) **We**=١٠، (**g**) **We**=١٥ و (**h**) **Re**=١٥٠٠

تغيير عوامل حرارتي بر ناسلت محلي در جت متقارن

شکل (۵) نشان‌دهنده تغييرات ناسلت محلي با تغييرات عوامل حرارتي پرانتل، نسبت ضريب هدايت حرارتي و ظرفيت گرمايي دو فاز است. همان طور که در اين شکل نشان داده شده است، تغييرات پرانتل و نسبت ضريب هدايت حرارتي دو فاز، تأثير بسيار کمي بر ناسلت محلي دارد، در حالي که تغييرات نسبت ظرفيت گرمايي دو فاز بر پروفايل ناسلت اثرگذاري بالاتري دارد.

در مقادير بيشتر، نسبت ظرفيت گرمايي فاز پيوسته به فاز جت، مقدار ناسلت کاهش مي‌يابد. دليل اين کاهش در اثر افزايش نسبت ظرفيت گرمايي، کاهش گراديان دما در جهت عمود بر سطح مشترک است. در واقع زماني که ظرفيت گرمايي در يک سيال کم است، ميزان تغييرات دمايي آن بالا است و اين سيال زودتر سرد يا گرم مي‌شود. زماني که ظرفيت گرمايي فاز پيوسته بيشتر از فاز پراکنده است، تغييرات دما در فاز جت بيشتر از فاز پيوسته است و مي‌توان پروفايل دما را در جت يکنواخت گرفت، از طرفي فاز پيوسته با تغييرات دما مقاومت بيشتري مي‌کند. در نتيجه زماني که مقدار ظرفيت گرمايي فاز پيوسته بيشتر از فاز پراکنده است، مقدار گراديان دما در سطح مشترک کمتر خواهد بود و ناسلت محلي کاهش بيشتري خواهد داشت.

ارائه معادله تقريبي پيش‌بيني کننده ناسلت محلي در جت متقارن

براي آنکه طول جت در ارائه معادله تأثيري نداشته باشد، مقادير ζ تقسيم بر طول بدون بعد جت شده است. از طرفي، از اثر تغييرات قطر جت بر ناسلت که اثري نوساني دارد، صرف‌نظر شده است. با در نظر گرفتن موارد بالا و شکل (۶) معادله (۱۳) براي پيش‌بيني تقريبي ناسلت محلي ارائه شده است:

$$Nu(\zeta) = 2.173\,exp(-41.1\frac{\zeta}{\zeta_{jet}}) + 1.015\,exp(-1.309\frac{\zeta}{\zeta_{jet}}) \qquad (۱۳)$$

مقدار دقت معادله بر مبنای (R-square) براي این معادله نسبت به مقادیر عددي در شکل (۶) برابر ۰/۸۹ است.

نتيجه‌گيري نهايي

نتيجه حاصل از آناليز عددي بر ناسلت محلي جت متقارن در سيستم‌هاي مايع-مايع را مي‌توان به اين ترتيب خلاصه كرد:

۱- روند تغييرات ناسلت محلي با افزايش طول جت كاهشي است و بازه تغييرات از چهار تا صفر است.

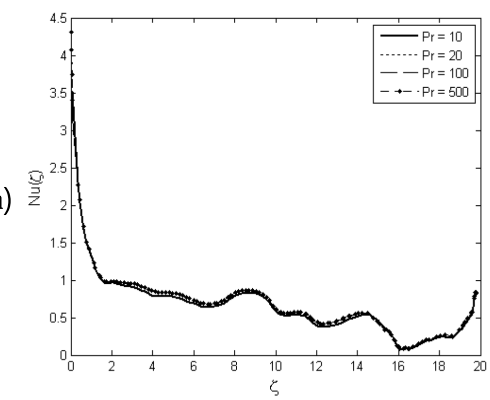
۲- با افزايش قطر جت، مقدار ناسلت كاهش و با كاهش قطر جت مقدار ناسلت افزايش مي‌يابد.

۳- در مكان جدايش قطره از جت، مقدار ناسلت به صفر ميل مي‌كند.

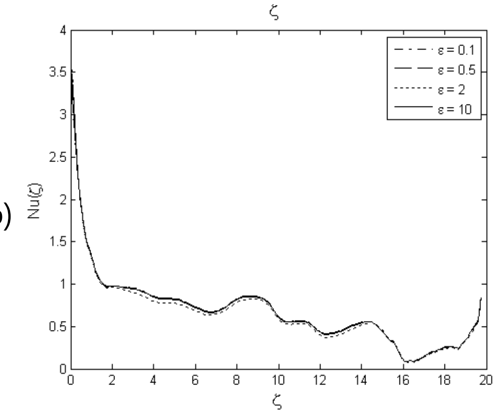
٤- در عوامل حرارتي، نسبت ظرفيت حرارتي دو فاز بسيار تأثيرگذارتر از عوامل ديگر حرارتي است و با افزايش نسبت ظرفيت حرارتي فاز پيوسته به فاز جت، مقدار ناسلت كاهش مي‌يابد.

۵- معادله ارائه شده براي ناسلت محلي تطابق خوبي با نتايج عددي دارد.

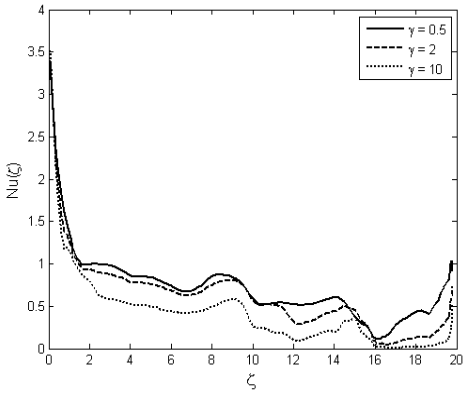
(a)



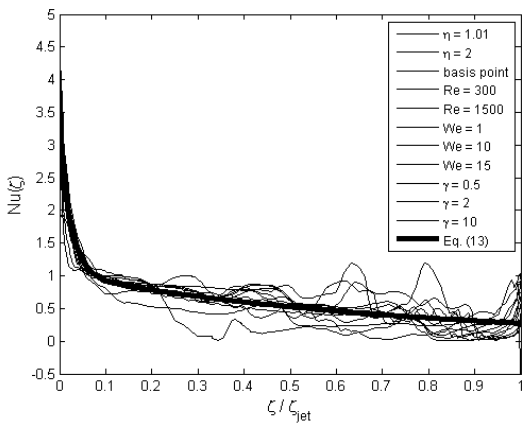
(b)



(c)



شکل ۵: تغيير پارامترهاي حرارتي (**a**) پرانتل، (**b**) نسبت ضريب هدايت حرارتي دو فاز، (**c**) نسبت ظرفيت گرمايي دو فاز بر روي ناسلت محلي



شکل ۶: روند تغييرات ناسلت با تغييرات پارامترهاي هيدروديناميكي و حرارتي و تغييرات پيش بيني كننده براي تمامي حالات در معادله (۱۳)

فهرست علائم

CFD: مکانیک سيالات محاسباتي

Cp_j: ظرفيت گرمايي در فاز جت

Cp_c: ظرفيت گرمايي در فاز پيوسته

d_{nozzle}: قطر نازل

$D_{droplet}$: قطر قطرات

h: ضريب جابجايي حرارتي

L_{jet}: طول جت

Fr: عدد فرود

k_j: ضريب هدايت حرارتي در فاز جت

k_c: ضريب هدايت حرارتي در فاز پيوسته

N: بردار يكه عمود بر سطح مشترک

Nu: عدد ناسلت

P: فشار

Pe_j: عدد بدون بعد پکلت

Pr_j: عدد بدون بعد پرانتل

Re: عدد رینولدز

T: دما

U: بردار بدون بعد سرعت

V: بردار سرعت

$v_\circ$: سرعت متوسط سیال ورودي به نازل

VOF: حجم سیال

s: بردار راستاي عمود بر سطح مشترک

S: بردار راستاي عمود بر سطح مشترک بدون بعد

We: عدد وبر

ρ_j: دانسیته فاز پراکنده (سبک)

μ_j: دانسیته فاز پیوسته (سنگین)

ρ_c: دانسیته فاز پیوسته

μ_c: ویسکوزیته فاز پیوسته

σ: کشش بین فازي

κ: گرادیان بردار یکه عمود بر سطح مشترک

ζ: طول بدون بعد در جهت ارتفاع

ζ_{jet}: طول بدون بعد جت

ξ: طول بدون بعد در جهت شعاع

τ: زمان بدون بعد

λ: نسبت ویسکوزیته فاز پیوسته به فاز پراکنده

Φ: پارامتر ردیاب سطح مشترک

η: نسبت دانسیته فاز پیوسته به فاز پراکنده

θ: دماي بدون بعد

γ: نسبت ظرفیت گرمایي فاز پیوسته به فاز جت

ε: نسبت ضریب هدایت حرارتي فاز پیوسته به فاز جت

نمادها را می‌توان در هر یک از سیستم‌های علمی و مهندسی به طور هماهنگ در نظر گرفت.

مراجع

1- Bastani, D. and Memari, M. (2008). "Experimental investigation Liquid-Liquid Jets and determination of its hydrodynamic characteristics." *12th Iranian Chemical Engineering Congress*.

2- Fossa, M. (1995). "A simple model to evaluate direct contact heat transfer and flow characteristics in annular two-phase flow." *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 16: 272-279.

3- Mitrovic J. and Stephan K. (1996). "Mean fluid temperature in direct contact heat exchangers without phase change." *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 39(13):2245-2750.

4- Shahihi, M. K. and Ozbelge, T. A. (1995). "Direct contact heat transfer between two immiscible liquids flowing in a horizontal concentric annulus." *Int. J. Multiphase Flow*, 21(6):1025-1036.

5- Oh, S., Nguyen, H. D. and Paik, S. (2000). "A legendre-spectral element method for flow and heat transfer about an accelerating droplet." *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 33:59-79.

6- Feng, Z. and Michaelides, E. (2000). "A numerical study on the transient heat transfer from a sphere at high Reynolds numbers." *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 43:219-229.

7- Rider, W. J. and Kothe, D. B. (1998). "Reconstructing volume tracking." *J. of Compt. Physics*, 141: 112-152.

8- Scardovelli, R. and Zaleski, S. (1999). "Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow." *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 3 1:567-603.

9- Tomotika, S. (1935). "On the instability of a cylindrical thread of a viscous liquid surrounded by another viscous fluid." *Proceedings of the Royal Society of London a* 150, 322–337.

10- Rayleigh, J.W.S. (1879). "On the instability of jets." *Proceedings of the London Mathematical Society*, 10, 4–13.

11- Kitamura, Y., Mishima, H. and Takahashi, T. (1982). "Stability of jets in liquid–liquid systems." *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 60, 723–731.

12- Teng, H., Kinoshita, C.M. and Masutani, S.M. (1995). “Prediction of droplet size from breakup of cylindrical liquid jets.” *International Journal of Multiphase Flow*, 21, 129–136.

13- Das, T.K., (1997a). “Prediction of jet breakup length in liquid–liquid systems using the Rayleigh–Tomotika analysis.” *Atomization and Sprays*, 7, 549–559.

14- Bright, A. (1985). “Minimum drop volume in liquid jet breakup.” *Chemical Engineering Research and Design*, 63, 59–66.

15- Das, T.K. (1997b). “Prediction of jet breakup length in liquid–liquid systems using the Rayleigh–Tomotika analysis.” *Atomization and Sprays*, 7, 549–559.

16- Richards, J.R., Beris, A.N. and Lenhoff, A.M. (1993). “Steady laminar flow of liquid–liquid jets at high Reynolds numbers.” *Physics of Fluids*, A 5, 1703–1717.

17- Hirt, C.W., Nichols, B.D. (1981). “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries.” *Journal of Computational Physics*, 39, 201–225.

18- Skelland, A.H.P. and Johnson, K.R. (1974). “Jet Break-up in Liquid-. Liquid Systems.” *Can. J. Chem. Eng.*, 52,732-738.

19- Davis, M. R. and Rerkshanandana, P. (1991). “The influence of large eddies on thermal mixing.” *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 34(7):1633-1647.

20- Qian, J., Polymeropoulos, C. E., Ulisse, R. (1992). “Liquid jet evolution from a gas chromatographic injector”. *J. of Chromatography*, 609:269-276.

21- Storr, G. J. and Behnia, M. (2000). “Comparisons between experiment and numerical simulation using a free surface technique of free-falling liquid jets.” *Experimental Thermal and Fluid Science*, 22:79-91.

22- Shunji, H., Jiro, K., Shiro, M., Museok, S. and Grétar, T. (2007). "Breakup mode of an axisymmetric liquid jet injected into another immiscible liquid.” *Chemical Engineering Science*, 61, 3986 – 3996

23-Memari, M. and Bastani, D. (2009), “Numerical simulation of axisymmetric jet of dispersion phase to continue phase form a nozzle.” *Iranian Journal Chemical and Chemical Engineering*. (submitted)

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1-Spray Cooling
2- Thermocapilary Jet
3- Sheet