

مدل سازی عددی و بهینه سازی رفتار ایرلیفت پمپ

هنگامه شمس (دانشجوی کارشناسی ارشد)

بدرام حنفی زاده (دانشجوی دکتری)

محمدحسین سعیدی (استاد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

ایرلیفت پمپ دستگاهی است که با بهره گیری از نیروی شناوری ایجاد شده بر اثر تزریق گاز در یک ستون مایع، قادر به پمپاژ مایع مورد نظر یا حتی ذرات جامد موجود در مایع به ارتفاع بالاتر است. در این نوشتار تأثیر پارامترهای مؤثر - نظیر قطر لوله، نسبت شناوری، رژیم جریان و طول لوله - بر عملکرد یک ایرلیفت پمپ، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این تحقیق شرایط و ناحیه‌ی کارکرد بهینه‌ی این پمپ‌ها تعیین شده است. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از این تحلیل عددی با نتایج تجربی موجود نشان دهنده‌ی دقت مطابقت این روش است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش نسبت شناوری و کاهش قطر لوله باعث بهبود عملکرد این پمپ‌ها می‌شود. همچنین افزایش طول لوله تأثیر به سزایی در کارایی این پمپ‌ها ندارد.

h_shams@gsme.sharif.edu
hanafiza.deh@mech.sharif.edu
saman@sharif.edu

واژگان کلیدی: ایرلیفت پمپ، الگوی جریان دوفاز، حل عددی، نسبت شناوری.

مقدمه

بیشتری تجزیه و تحلیل شد. از جمله، در معرفی اصول اولیه‌ی جریان دوفاز و موثمت برای ارزیابی پمپ‌هایی با قطر لوله‌ی نسبتاً کوچک و بالابرنده‌ی کم^[۱] عملکرد ایرلیفت پمپ بررسی، و نرخ حجمی جریان آب برحسب نرخ حجمی جریان گاز برای نسبت‌های شناوری مختلف ترسیم شد و مقدار بهینه‌ی برای دبی هوا در یک قطر لوله‌ی خاص حاصل شد. تحقیقات تجربی دیگر محققین، در خصوص ایرلیفت پمپ‌هایی با قطر کم‌تر از ۱۲ میلی‌متر و بالابرنده‌ی کوچک (بین ۱ تا ۳ متر) با نسبت شناوری بین ۰/۵۵ تا ۰/۷ برای جریان لخته‌ی انجام گرفت.^[۲] در مطالعاتی دیگر، قطر تیوب‌های بالابرنده کمی کوچک‌تر از این قطرها اما با همین نسبت‌های شناوری در نظر گرفته شد.^[۳] همچنین با استفاده از روش غبرنوسانی وزن دار شده به صورت عددی، جریان دوفاز مدل سازی شد.^[۴] این مطالعه معطوف به طراحی ایرلیفت پمپ‌هایی با طول بسیار بلند بوده که در بازپروری سوخت‌های هسته‌ی کاربرد دارند، اما افت فشار اصطکاکی در تیوب، به صورت تقریبی و با استفاده از رابطه‌ی لوکاه-مارتینلی^[۵] تقریب زده شده است.

مطالعه‌های جدیدی که کاربرد ایرلیفت پمپ‌ها را در بازپروری سوخت‌های هسته‌ی مورد ارزیابی قرار داده‌اند^[۶] بیش از کارایی پمپ به بررسی صحت مدل به کار رفته برای آنالیز ایرلیفت پمپ پرداخته‌اند. در سال‌های اخیر نیز از شبیه‌سازی‌های تحلیلی و عددی برای مدل سازی جریان در این پمپ‌ها بهره گرفته شده است.^[۷-۹] در این تحقیق از مدل سازی عددی برای تعیین بهترین شرایط کارکرد ایرلیفت پمپ استفاده شده است. به همین منظور جریان دوفاز آب و هوا در سرعت‌های مختلف در داخل لوله‌ی قائم مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مدل سازی با نتایج مدل‌های معتبر^[۱۰-۱۲] مقایسه شده است.

ایرلیفت پمپ وسیله‌ی است که از نیروی شناوری برای پمپاژ مایع و جامد بهره می‌برد. پمپاژ آب در این روش براساس تزریق هوا به مایع یا مخلوط جامد - مایع است. این نوع سیستم‌های پمپاژ سیال، در مقایسه با دیگر روش‌های پمپاژ، بازدهی کم‌تری دارند اما دو مزیت عمده‌ی «برخورداری از ساختار ساده» و «نداشتن اجزاء مکانیکی متحرک» این ساختار را برای برخی کاربردهای خاص صنعتی، نظیر پمپاژ مایعات خورنده (آب‌های شنی یا شور) و مایعات گران‌رو (مانند هیدروکربن‌ها در صنعت نفت) مناسب ساخته است.

اساساً جریان داخل ایرلیفت پمپ را می‌توان به صورت یک جریان دوفاز در لوله‌ی قائم مدل کرد. لذا برای توصیف جریان در داخل این پمپ‌ها از تعاریف رژیم‌های مختلف جریان دوفاز - نظیر جریان حبابی، لخته‌ی، حلقوی و آنیولار - استفاده می‌شود. در این پمپ‌ها جریان لخته‌ی حاکم است که طی آن اندازه‌ی حباب‌های گاز تقریباً به اندازه‌ی قطر لوله است. دماغه‌ی حباب به شکل کروی است و گاز موجود در حباب به وسیله‌ی لایه‌ی نازک از مایع که به آرامی به سمت پائین جریان دارد از دیواره‌ی لوله جدا می‌شود. جریان مایع شامل لخته‌هایی است که به طور متوالی حباب‌های گاز را جدا می‌کنند. این لخته‌ها ممکن است محتوی حباب‌های گاز کوچک‌تری باشند که از حباب بزرگ‌تر جدا شده و دنبال آن در حرکت‌اند. طول حباب‌های بزرگ و اصلی ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ی متغیر باشد.

عمل پمپاژ با استفاده از ایرلیفت در اواخر قرن هجدهم و توسط کارل لاشر ابداع شد. به تدریج با افزایش دانش جریان دوفاز، عملکرد این پمپ‌ها با دقت

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۷/۳۰، دوری ۱۳۸۸/۵/۱۳، پذیرش ۱۳۸۹/۲/۴.

معادلات حاکم

که در آن K_{ji} (یا K_{ij}) ضریب مبادله‌ی مومنتم بین فازهاست که چنین تعریف شده است:

$$K_{ji} = \frac{\alpha_i \alpha_j \rho_j f}{\tau_j} \quad (8)$$

f ضریب اصطکاک است و در مدل شیلر-نویوم،^[۱۲] که در این نوشتار مورد استفاده قرار گرفته، طبق معادله‌ی ۹ تعریف شده است:

$$f = \frac{C_D Re}{24} \quad (9)$$

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15 Re^{0.75})/Re & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases}$$

Re عدد رینولدز نسبی است که برای فاز اولیه‌ی i و فاز ثانویه‌ی j چنین محاسبه می‌شود:^[۱۲]

$$Re = \frac{\rho_j |\vec{v}_j - \vec{v}_i| d_j}{\mu_i} \quad (10)$$

τ_j زمان رهایی ذره است و مطابق رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود:^[۱۲]

$$\tau_j = \frac{\rho_j d_j^2}{18\mu_j} \quad (11)$$

\vec{F}_{ift} نیروی بالابرنده است که در اثر گرادیان سرعت موجود در فاز اولیه، بر روی فاز ثانویه تأثیر می‌گذارد. مقدار این نیرو زمانی که فاز اولیه دارای گرادیان سرعت بالاست قابل توجه است، و در غیر این صورت می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. مقدار این نیرو از رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود:^[۱۲]

$$\vec{F}_{ift} = -0.5 \rho_i \alpha_j (\vec{v}_i - \vec{v}_j) \times (\nabla \times \vec{v}_i) \quad (12)$$

که در آن \vec{F}_{vm} نیروی مجازی و هنگامی که فاز ثانویه j نسبت به فاز اولیه‌ی i شتاب بگیرد رخ می‌دهد. اینرسی جرم فاز اولیه در مواجهه با حباب‌ها، نیرویی مجازی بر آن‌ها اعمال می‌کند. هرگاه حرکت حباب‌ها در مقابل فاز مایع دارای شتاب باشد مقدار نیروی مجازی قابل توجه است و از رابطه‌ی ۱۳ محاسبه می‌شود:^[۱۲]

$$\vec{F}_{vm} = 0.5 \alpha_i \rho_i \left(\frac{d_i \vec{v}_i}{dt} - \frac{d_j \vec{v}_j}{dt} \right) \quad (13)$$

معادلات آشفستگی

جریان‌های دوفاز، به‌علت اغتشاش ناشی از تأثیر فازها بر یکدیگر، عمدتاً ماهیت آشفته دارند. در این نوشتار برای مدل‌کردن اثرات آشفستگی جریان، از مدل آشفستگی $k - \epsilon$ برای هر فاز استفاده شده است.^[۱۵] در این مدل مجموعه‌ی معادلات انتقالی k و ϵ برای هر فاز حل می‌شود. این مدل برای جریان‌هایی مناسب است

در این تحقیق از مدل دوفاز اوپلری- اوپلری برای مدل‌کردن جریان ایرلیفت پمپ استفاده شده است. این مدل پیچیده‌ترین مدل جریان چندفاز است که در آن مجموعه‌ی معادلات مومنتم و پیوستگی برای هر فاز حل می‌شود. مزدوج‌کردن این معادلات با استفاده از ضرایب تبدیل فازها و فشار صورت می‌گیرد. معادله‌ی پیوستگی برای فاز i عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = \sum_{j=1}^l \dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij} + S_i \quad (1)$$

که در آن α_i و V_i به ترتیب کسر حجمی و سرعت فاز i است. \dot{m}_{ji} جرم انتقالی از فاز j به فاز i و \dot{m}_{ij} جرم انتقالی از فاز i به فاز j است. از آنجا که انتقال جرم بین فازهای آب و هوا روی نمی‌دهد این عبارت معادل صفر در نظر گرفته شده است. S_i نیز عبارت منبع است و از آنجا که در فاز i چشمه و چاه جرم وجود ندارد لذا تولید جرم نداشته و نتیجتاً این عبارت معادل صفر منظور شده است. با استفاده از بقای مومنتم برای فاز i می‌توان رابطه‌ی ۲ را به دست آورد.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i \vec{v}_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_i + \alpha_i \rho_i \vec{g} + \sum_{j=1}^n (\vec{R}_{ji} + \dot{m}_{ji} \vec{v}_{j,i} + \dot{m}_{ij} \vec{v}_{i,j}) + (\vec{F}_i + \vec{F}_{Lift,i} + \vec{F}_{vm,i}) \quad (2)$$

که در آن $\vec{\tau}_i$ تانسور تنش- کرنش برای فاز i است که با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$\vec{\tau}_i = \alpha_i \mu_i (\nabla \vec{v}_i + \nabla \vec{v}_i^T) + \alpha_i \left(\lambda_i - \frac{2}{3} \mu_i \right) \nabla \cdot \vec{v}_i \vec{I} \quad (3)$$

μ_i و λ_i به ترتیب لزجت برشی و لزجت توده‌ی فاز i هستند. لزجت برشی مجموع لزجت آرام و آشفته است که در جریان آشفته، بخش آرام آن ناچیز است و عملاً می‌توان مقدار لزجت برشی را با لزجت برشی آشفته برابر گرفت ($\mu_i = \mu_{t,i}$). \vec{F}_i نیروی خارجی، $\vec{F}_{vm,i}$ نیروی جرم مجازی، \vec{R}_{ji} نیروی متقابل بین فازها و P فشار مشترک همه‌ی فازها است؛ این بدان معناست که فشار برای هر دو فاز برابر فرض شده است. در رابطه‌ی ۲، \vec{V}_{ji} سرعت بین فازی است که در صورت وجود انتقال جرم بین فازها این‌گونه تعریف می‌شود:

$$if \dot{m}_{ji} > 0 \quad \vec{V}_{ji} = \vec{V}_j \quad (4)$$

$$if \dot{m}_{ji} < 0 \quad \vec{V}_{ij} = \vec{V}_j \quad (5)$$

چنان که در بالا ذکر شد هیچ‌گونه انتقال جرمی بین فازهای آب و هوا روی نمی‌دهد و لذا در این تحقیق مقادیر \dot{m}_{ji} و \dot{m}_{ij} برابر صفر در نظر گرفته شده‌اند. \vec{R}_{ji} نیروی متقابل بین فازهاست و به اصطکاک، فشار، چسبندگی و سایر عوامل بستگی دارد. همواره رابطه‌ی ۶ برای این نیرو برقرار است.

$$\vec{R}_{ji} = -\vec{R}_{ij} \quad \vec{R}_{ii} = 0 \quad (6)$$

در این نوشتار از رابطه‌ی ۷ برای مدل‌سازی نیروی متقابل بین فازها استفاده شده است.

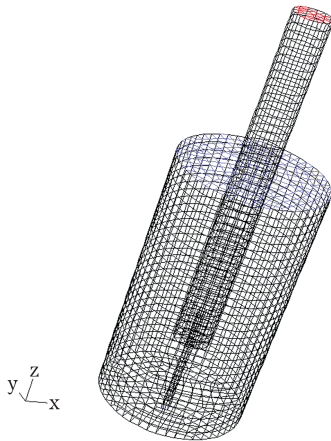
$$\sum_{j=1}^n \vec{R}_{ji} = \sum_{j=1}^n K_{ji} (\vec{v}_j - \vec{v}_i) \quad (7)$$

D_i و D_j قابلیت پخش هستند و σ_{ji} عدد پراشتل پراکنندگی است که برابر 0.75 در نظر گرفته شده است. سرعت توده‌یی از نوسانات اغتشاشی در کسر حجمی نتیجه می‌شود و هنگامی که در ضریب تبادل K_{li} ضرب شود، عبارت تبادل مومتم را برای جریان‌های آشفته اصلاح می‌کند.

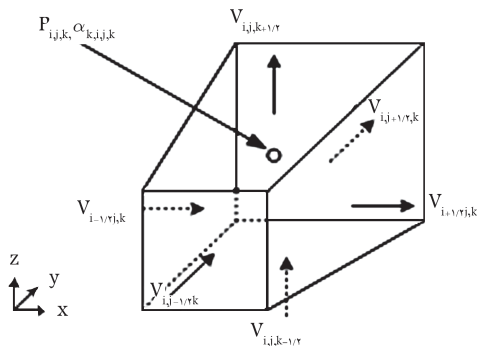
هندسه و شبکه‌بندی

در این تحقیق بازه‌ی حل چنان انتخاب شده که مرزها منطبق بر دستگاه مختصات استوانه‌یی باشند؛ همچنین خطوط مش‌بندی بازه‌ی هندسی را به حجم کنترل‌هایی به شکل شش‌وجهی تقسیم کرده است. شکل ۱ هندسه‌ی ایرلیفت پمپ ساده به همراه مش‌بندی به کار رفته و همچنین شماتیک یک حجم کنترل به همراه گره‌های مربوطه را نشان می‌دهد.

گره‌های اصلی در مرکز حجم کنترل قرار دارند. مقادیر متغیرهای اسکالر نظیر فشار و جزء حجمی در این گره‌های اصلی ذخیره می‌شوند. از شبکه‌بندی جابه‌جا شده برای قراردادن مؤلفه‌های سرعت گسسته‌شده بر روی سطوح حجم کنترل استفاده شده تا از بروز مشکل صفحه‌ی شطرنجی در میدان فشار جلوگیری شود. هندسه‌ی ایرلیفت پمپ شامل لوله‌یی قائم به طول L (لوله‌ی لیفت) در داخل مخزن آب به ارتفاع H است. هوا نیز از طریق لوله‌یی باریک، از بخش زیرین وارد لوله‌ی قائم می‌شود. قطر مخزن 32mm ، قطر لوله‌ی ورودی هوا 1.5mm و طول آن 25cm است.



الف) شماتیک ایرلیفت به همراه شبکه بندی؛



ب) شماتیک حجم کنترل به همراه چیدمان متغیرها. شکل ۱. شماتیک ایرلیفت به همراه حجم کنترل.

که انتقال آشفته‌گی بین فازها چشمگیر باشد. معادلات انتقالی k و ε چنین هستند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i k_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{U}_i k_i) = \nabla \cdot \left(\alpha_i \frac{\mu_{t,i}}{\sigma_k} \nabla k_i \right) + (\alpha_i G_{k,i} - \alpha_i \rho_i \varepsilon_i) + \sum_{l=1}^N k_{li} (c_{li} k_l - c_{il} k_i) - \sum_{l=1}^N k_{li} (\vec{U}_l - \vec{U}_i) \cdot \frac{\mu_{t,l}}{\alpha_l \sigma_l} \nabla \alpha_t + \sum_{l=1}^N k_{li} (\vec{U}_l - \vec{U}_i) \cdot \frac{\mu_{t,i}}{\alpha_i \sigma_i} \nabla \alpha_i \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \varepsilon_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{U}_i \varepsilon_i) = \nabla \cdot \left(\alpha_i \frac{\mu_{t,i}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_i \right) + \frac{\varepsilon_i}{k_i} \left[C_{1\varepsilon} \alpha_i G_{k,i} - C_{\varepsilon\varepsilon} \alpha_i \rho_i \varepsilon_i + C_{\varepsilon\varepsilon} \left(\sum_{l=1}^N K_{li} (c_{li} k_l - c_{il} k_i) - \sum_{l=1}^N K_{li} (\vec{U}_l - \vec{U}_i) \cdot \frac{\mu_{t,l}}{\alpha_l \sigma_l} \nabla \alpha_t + \sum_{l=1}^N K_{li} (\vec{U}_l - \vec{U}_i) \cdot \frac{\mu_{t,i}}{\alpha_i \sigma_i} \nabla \alpha_i \right) \right] \quad (15)$$

مقدار ضرائب C_{il} و C_{li} مطابق روابط ۱۶ تا ۲۱ تقریب زده می‌شوند: [۱۶]

$$C_{li} = 2, C_{il} = 2 \left(\frac{\eta_i}{1 + \eta_i} \right) \quad (16)$$

$$\eta_{ji} = \frac{\tau_{t,ji}}{\tau_{F,ji}} \quad (17)$$

$$\tau_{F,ji} = \alpha_j \rho_i K_{ji}^{-1} \left(\frac{\rho_j}{\rho_i} + C_\beta \right) \quad (18)$$

$$\tau_{t,ji} = \frac{\tau_{t,i}}{\sqrt{(1 + C_\beta \xi^2)}} \quad (19)$$

$$\xi = \frac{|\vec{v}_{ji}| \tau_{t,i}}{L_{t,i}} \quad (20)$$

$$C_\beta = 1.8 - 1.35 \cos^2 \theta \quad (21)$$

θ زاویه‌ی بین سرعت متوسط حباب و سرعت نسبی متوسط است. گران‌روی آشفته‌گی $(\mu_{t,j})$ برحسب انرژی جنبشی آشفته‌گی فاز j نوشته می‌شود: [۱۵]

$$\mu_{t,i} = \rho_i C_\mu \frac{k_i^2}{\varepsilon_i} \quad (22)$$

زمان مشخصه‌ی انرژی آشفته‌گی گردابه‌ها نیز چنین تعریف می‌شود: [۱۵]

$$\tau_{t,i} = \frac{2}{3} C_\mu \frac{k_i}{\varepsilon_i} \quad (23)$$

ε_i نرخ استهلاك است و مقدار C_μ برابر 0.09 است.

عبارت اصطکاک آشفته‌گی $K_{ji}(\vec{v}_j - \vec{v}_i)$ چنین مدل می‌شود:

$$\sum_{l=1}^N K_{li} (\vec{v}_l - \vec{v}_i) = \sum_{l=1}^N K_{li} (\vec{U}_l - \vec{U}_i) - \sum_{l=1}^N K_{li} \vec{v}_{dr,li} \quad (24)$$

\vec{U}_i و \vec{U}_l سرعت‌های وزنی فازها هستند و \vec{v}_{dr} سرعت توده‌یی برای فاز i است که چنین تعریف می‌شود:

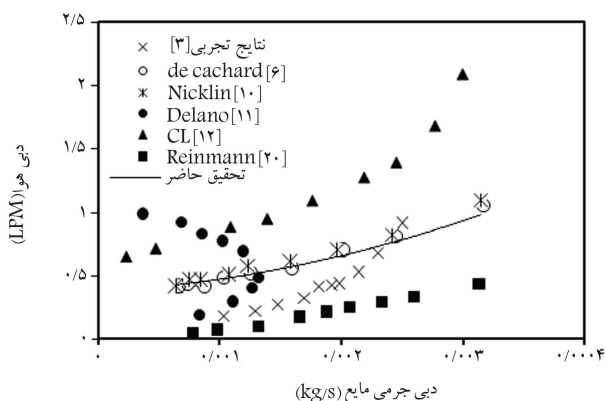
$$\vec{v}_{dr} = - \left(\frac{D_j}{\sigma_j \alpha_j} \nabla \alpha_j - \frac{D_i}{\sigma_i \alpha_i} \nabla \alpha_i \right) \quad (25)$$

اضمحلال آشفته‌گی مانند مؤلفه‌های سرعت در حجم کنترل‌های مجاور دیوار از قانون دیواره محاسبه می‌شوند. حل معادلات گسسته‌ی پیوستگی، مومتم و کسر حجمی با استفاده از الگوریتم نمونه^[۱۷] انجام گرفته و حد هم‌گرایی باقی مانده‌ها برابر $e - 610$ در نظر گرفته شده است.

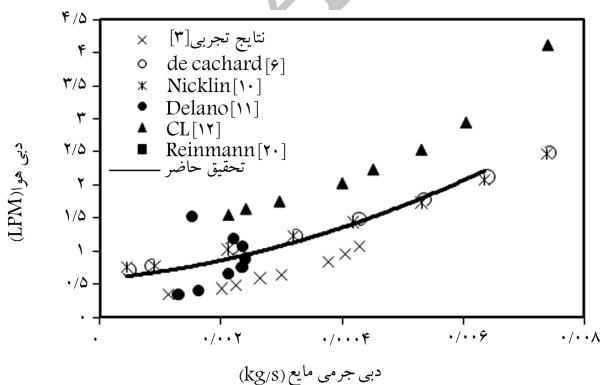
بررسی و تحلیل نتایج

با بررسی نتایج تجربی و نظری می‌توان دریافت که برای عملکرد ایرلیفت پمپ در یک شرایط کاری معین، کارایی بهینه‌ی وجود دارد. در ایرلیفت پمپ‌ها، کارایی به صورت نسبت دبی جرمی مایع به دبی جرمی گاز تعریف می‌شود. این کارایی در محدوده‌ی رانج یعنی 10^{-5} ٪ نمی‌گنجد. وقتی که این نسبت به بیشترین مقدارش برسد، عملکرد پمپ بهینه است. پارامترهای مؤثر بر کارایی عبارت‌اند از: نسبت شناوری، قطر لوله، طول لوله و رژیم جریان. در این نوشتار ایرلیفت پمپ‌هایی با نسبت‌های شناوری 0.16 ، 0.18 ، 0.27 ، قطرهای 6mm ، 8mm و 10mm و طول‌های 9cm و 18cm مدل شده‌اند. به منظور دست‌یابی به رژیم‌های مختلف جریان، دبی حجمی هوای ورودی از 0.1 تا 4 LPM تغییر کرده است. بازه‌ی محدودی تغییرات دبی جرمی آب نیز 0.27 تا 0.5 kg/s به دست آمده است. نتایج تجربی از انجام آزمایش بر نمونه‌ی دستگاه ایرلیفت پمپ در دانشگاه جیورجیا حاصل شده‌اند. نتایج حاصله از تحلیل عددی علاوه بر نتایج تجربی، با نتایج حاصل از چند مدل معتبر جریان دو فاز نیز مقایسه شده است.

در شکل‌های ۳ تا ۷، دبی هوا برحسب دبی جرمی آب برای قطر و نسبت‌های



شکل ۳. دبی هوا برحسب دبی جرمی مایع ($H/L=0.4$, $D=6\text{mm}$).

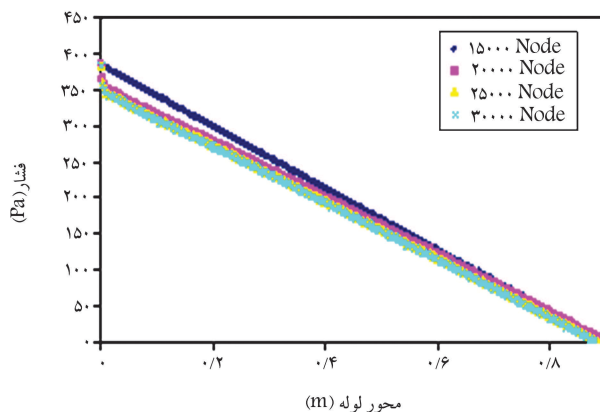


شکل ۴. دبی هوا برحسب دبی جرمی مایع ($D=8\text{mm}$, $H/L=0.4$).

برای بررسی مستقل بودن جواب‌ها از تعداد مش‌ها، شبیه‌سازی در سه حالت با تعداد مش‌های 15000 ، 20000 و 25000 انجام شده و توزیع فشار در محور لوله با یکدیگر مقایسه شده است (شکل ۲). با توجه به نتایج حاصله، کم‌ترین تعداد مش که نتایج از آن مستقل باشند 20000 است، و لذا تعداد مش به کار رفته برای شبکه‌بندی این هندسه معادل 20000 سلول است. مشخصات مش‌بندی در جدول ۱ خلاصه شده است.

روش حل عددی

در این تحقیق از روش محاسباتی مبتنی بر قالب حجم کنترل^[۱۷] برای حل عددی معادلات حاکم استفاده شده است. برای هر متغیر، معادله‌ی گسسته‌شده برای مقادیر آن متغیر بر روی گره‌های شبکه، با استفاده از گسسته‌سازی معادلات حاکم بر روی حجم کنترل مربوطه ایجاد شده است. سپس معادلات گسسته‌شده منجر به برقراری بقاء بر روی آن حجم کنترل می‌شوند. معادلات گسسته‌شده برای فشار و کسر حجمی بر روی حجم کنترل اصلی ساخته‌شده در حالی که برای معادلات گسسته‌شده مؤلفه‌های سرعت از حجم کنترل جابه‌جا شده در جهت مربوطه استفاده می‌شود. برای محاسبه‌ی شارهای نفوذ و جابه‌جایی از روشی سریع^[۱۸] استفاده شده است. جزئیات بیشتر گسسته‌سازی را نیز می‌توان در برخی مطالعات انجام شده^[۱۹] مشاهده کرد. هنگامی که معادلات به صورت گذرا حل می‌شوند پایداری عددی بسیار بیشتر می‌شود. در هر بازه‌ی زمانی سیستمی متشکل از معادلات بقای جرم و مومتم به همراه معادلات انتقال انرژی و اضمحلال آشفته‌گی حل می‌شوند. در حلقه‌های داخلی برای هر معادله از روش حل تکرار استفاده شده و برای محاسبه‌ی عبارات غیرخطی و مزدوج کردن معادلات، این روش باید در حلقه‌های خارجی تا زمان رسیدن به شرایط همگرایی برای همه‌ی متغیرها، تکرار شود. ابتدا عبارات منبع محاسبه می‌شود و سپس مؤلفه‌های سرعت برای هر دو فاز از معادلات مومتم مربوطه محاسبه خواهد شد. سپس تصحیح فشار از معادله‌ی پیوستگی فاز مایع انجام گرفته و کسر حجمی نیز از معادله‌ی پیوستگی فاز گازی محاسبه می‌شود. از آنجا که عبارات منبع متشکل از متغیرهای اولیه است، لازم است این عبارات بین هر تکرار به‌روز شوند. انرژی و



شکل ۲. بررسی استقلال نتایج از تعداد مش‌ها: فشار در محور لوله برحسب موقعیت.

جدول ۱. مشخصات مش‌بندی به‌کار گرفته شده.

تعداد سلول	تعداد سطح	تعداد گره	کمینه سائز شبکه	بیشینه سائز شبکه
۲۰۰۰۰	۶۳۴۵۰	۲۳۸۳۱	2.1849×10^{-6}	1.953×10^{-5}

مایع به صفر می‌رسد و در قطرهای کوچک موجد مشکل هم‌گرایی است. به دلیل این ناهمسانی و تناقض، این مدل در شکل‌های بعدی مورد بررسی قرار نگرفته است.

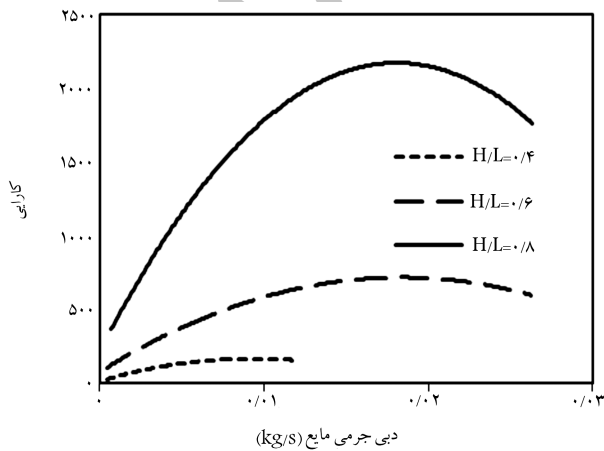
مدل دلانو ظاهراً عملکرد کاملاً متفاوتی نسبت به سایر مدل‌ها دارد، و لذا اگرچه مدل دلانو با بعضی از داده‌های آزمایشگاهی هم‌خوانی دارد، قادر به پیش‌بینی محدوده‌ی کامل جریان لخته‌بی نیست و انتقال رژیم جریان را زود هنگام پیش‌بینی می‌کند.

مدل‌های نیکلین، دی‌کاجارد و دل‌های تقریباً مشابه‌اند. شیب منحنی حاصل از این مدل‌ها با شیب منحنی حاصل از داده‌های تجربی در رژیم جریان لخته‌بی یکسان است، مقدار داده‌ها نیز فاصله‌ی زیادی با داده‌های تجربی ندارند. روند کلی نتایج به دست آمده از تحلیل عددی مشابه نتایج تجربی است و با مدل‌های نیکلین و دی‌کاجارد تطابق بیشتری دارد. علت اختلاف نتایج با نتایج تجربی را می‌توان در بررسی نکردن اثرات کشش سطحی و جرم مجازی، و نیز تقریب‌های به‌کار رفته در مدل عددی به‌خصوص در مدل‌سازی اثرات اصطکاک فازها بر روی دیواره و اثر متقابل فازها بر یکدیگر و همچنین نوسانات تصادفی ناشی از حرکت حباب در فاز مایع دانست.

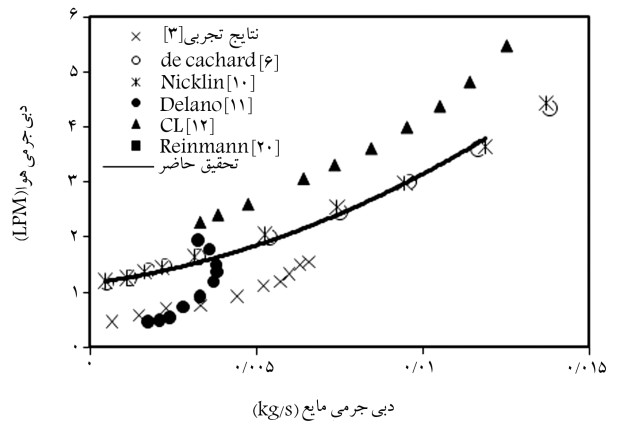
مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر کارایی، نسبت شناوری است. چنان که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، برای نسبت شناوری‌های بزرگ، کارایی ایرلیفت پمپ به‌مراتب بیشتر است. این نتیجه کاملاً منطقی است، به طوری که اگر نسبت شناوری افزایش یابد و به مقدار حدی ۱ برسد، بدون نیاز به تزریق هوا عمل پمپ کردن فاز مایع انجام‌پذیر خواهد بود. با افزایش نسبت شناوری دقت کلیه‌ی مدل‌ها بهتر شده و نتایج حاصل از آن‌ها به نتایج تجربی نزدیک‌تر می‌شوند. علت این امر را می‌توان کاهش طول لیفت (ناحیه‌ی حاوی جریان دوفاز) و در نتیجه کاهش تقریب‌های به‌کار رفته در مدل‌سازی دانست.

پارامتر دیگر مؤثر بر کارایی پمپ قطر لوله است، لذا می‌توان برای یک دبی جرمی مایع و نسبت شناوری معین، مقدار بهینه‌ی این پارامتر را برای این پمپ‌ها محاسبه کرد. شکل ۹ تأثیر قطر لوله‌ی بالابرنده در پمپ را بر کارایی آن نشان می‌دهد. چنان که از شکل ۷ مشخص است، قطرهای کم‌تر از ۶mm کارایی بالاتری نسبت به پیش‌بینی مدل‌ها دارند (در نزدیکی نسبت شناوری ۰/۴).

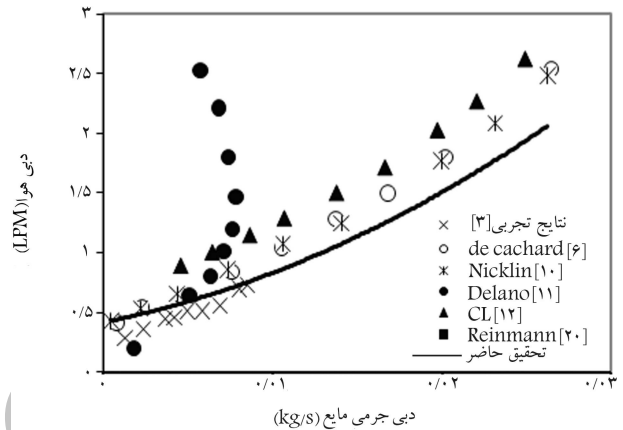
علت این موضوع تأثیر بیشتر کشش سطحی در قطرهای کم و نوسانات تصادفی در نسبت‌های شناوری پایین است که هیچ‌یک از مدل‌های عددی و دوفاز به‌طور



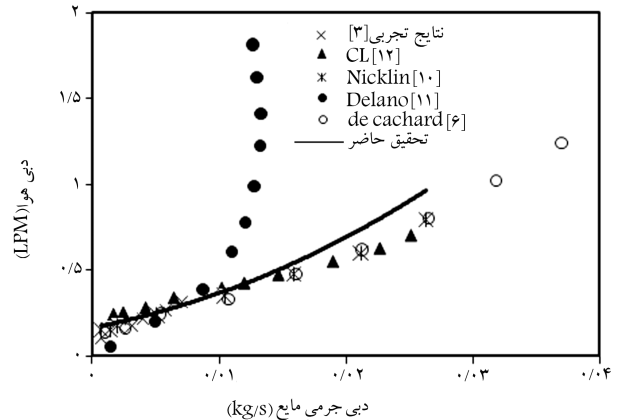
شکل ۸. مقایسه‌ی تأثیر نسبت شناوری: کارایی برحسب دبی جرمی مایع.



شکل ۵. دبی هوا برحسب دبی جرمی مایع (D=۱۰, H/L=۰/۴).

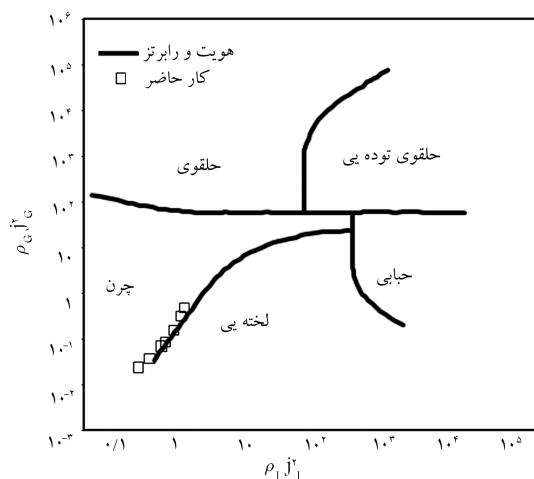


شکل ۶. دبی هوا برحسب دبی جرمی مایع (D=۱۰, H/L=۰/۶).

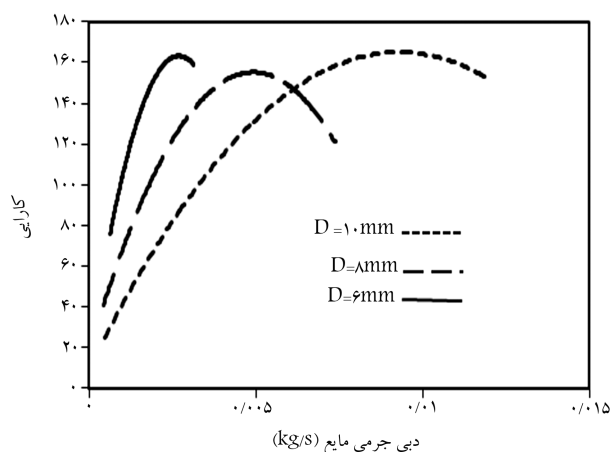


شکل ۷. دبی هوا برحسب دبی جرمی مایع (D=۱۰, H/L=۰/۸).

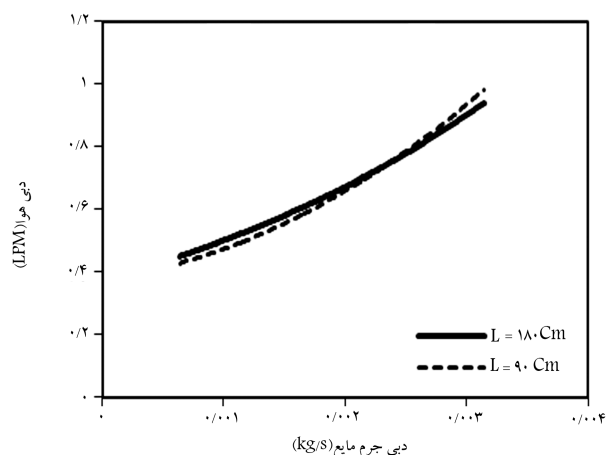
شناوری مختلف ترسیم شده است. در شکل ۳ نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج تجربی و نیز مدل‌های دیگر [۱۰، ۱۱، ۱۲] مقایسه شده است. نتایج تجربی حاکی از آن است که در دبی‌های کم، بر اثر افزایش دبی هوا، دبی آب نیز افزایش خواهد یافت اما به تدریج با افزایش بیشتر دبی هوا، رژیم جریان از لخته‌بی به چرن انتقال یافته و تغییر در دبی آب ایجاد نمی‌شود. روند کلی نتایج تجربی در نتایج مدل عددی و سایر مدل‌های دوفاز (به جز دلانو) حفظ شده است، اما از آنجا که هیچ‌یک از مدل‌ها قادر به پیش‌بینی انتقال رژیم جریان نبودند شیب تند در انتهای آن‌ها مشاهده نمی‌شود. در مدل راینمن، [۲۰] نرخ جریان هوا سریع‌تر از نرخ جریان



شکل ۱۱. نقشه رژیم جریان برای $D=6\text{mm}$.



شکل ۹. مقایسه‌ی تأثیر قطر: کارایی برحسب دبی جرمی مایع.

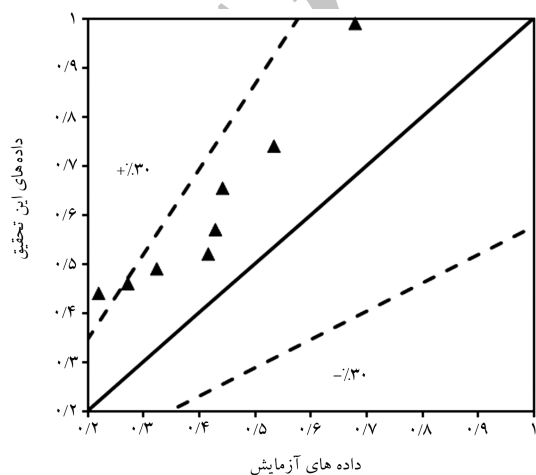


شکل ۱۰. مقایسه‌ی تأثیر طول: دبی هوا برحسب دبی جرمی مایع.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور تعیین شرایط عملکرد بهینه‌ی ایرلیفت پمپ با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام شده است. مقایسه‌ی نتایج حاصله با نتایج تجربی و چند مدل دیگر جریان دو فاز نشان می‌دهد که تحلیل انجام‌گرفته روند کلی جواب‌ها را به درستی پیش‌بینی کرده و خطای مدل در بیشتر موارد کم‌تر از ۳۰٪ نسبت به داده‌های تجربی است (شکل ۱۲).

نتایج مدل عددی حاضر با مدل‌های نیکلین و دی‌کاپارد تطابق بیشتری دارد. علت اختلاف نتایج با نتایج تجربی را می‌توان در نادیده‌گرفتن اثرات کشش سطحی و جرم مجازی، و نیز تقریب‌های به‌کار رفته در مدل عددی به‌خصوص در مدل‌سازی اثرات اصطکاک فازها بر روی دیواره و اثر متقابل فازها بر یکدیگر و همچنین نوسانات تصادفی ناشی از حرکت حباب در فاز مایع دانست. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که با افزایش نسبت شناوری و کاهش قطر لوله‌ی لیفت، کارایی ایرلیفت پمپ افزایش می‌یابد. رژیم جریان مطلوب در ایرلیفت پمپ جریان لخته‌یی است و این پمپ‌ها پیش از آن که جریان از لخته‌یی به چرن انتقال یابد دارای بیشترین کارایی هستند.



شکل ۱۲. مقایسه خطای نتایج کار حاضر با نتایج تجربی.

کامل قادر به شبیه‌سازی آن‌ها نیستند. لذا با افزایش قطر لوله دقت تمامی مدل‌ها بهتر می‌شود. در این نوشتار همچنین تأثیر پارامتر طول لوله بر عملکرد ایرلیفت پمپ نیز با مدل‌سازی دو لوله با قطر ۶mm، با طول‌های ۹۰cm و ۱۸۰cm مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۱۰).

چنان که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، طول لوله تأثیر به‌سزایی بر عملکرد ایرلیفت پمپ ندارد و عملکرد آن مستقل از طول لوله است. با توجه به تحلیل‌های انجام‌گرفته می‌توان نتیجه گرفت که برای یک قطر و یک نسبت شناوری خاص، کارایی بهینه‌یی برای کارکرد پمپ وجود دارد.

کارکرد پمپ در محدوده‌ی رأس منحنی‌ها موجب بیشترین کارایی در آن شرایط طراحی خاص می‌شود. عملاً دیده شده است که رأس منحنی بسیار نزدیک به محلی است که رژیم جریان لخته‌یی به چرن انتقال می‌یابد؛ در واقع این نقطه دقیقاً قبل از ایجاد جریان چرن قرار دارد و به‌محض این که رژیم جریان تبدیل به چرن می‌شود کارایی به‌سرعت کاهش می‌یابد. به‌همین منظور نتایج بر روی نقشه‌ی رژیم جریان هویت و رابرتز رسم شده است (شکل ۱۱). اگرچه این نقشه تقریبی است، می‌توان مشاهده کرد که جریان مدل‌شده در محدوده‌ی رژیم جریان لخته‌یی - چرن قرار دارد. لذا معیار انتقال می‌تواند عامل تعیین‌کننده‌ی شرایط عملکرد بهینه‌ی ایرلیفت پمپ باشد.

S : ترم چشمه

t : زمان [s]

ν : سرعت [m/s]

حروف یونانی

α : کسر حجمی گاز

θ : زاویه [R]

λ : لزجت بالکی [kg/ms]

μ : لزجت برشی [kg/ms]

ρ : چگالی [kg/m³]

$\bar{\tau}$: تانسور تنش - کرنش [kg/ms²]

ε : ترم اضمحلال آشفتگی [m²/s²]

σ : عدد پراتل پراکنندگی

ϕ : متغیر

زیر نویس ها

i : اولیه

z : ثانویه

L : مایع

علائم و نمادها

C : ثابت

$C_{\mu}, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}$: ضرایب مدل آشفتگی

D : قطر [m]

D_i : قابلیت پخش

F : نیرو [kgm/s²]

g : شتاب جاذبه [m/s²]

H : عمق آب [m]

I : تانسور واحد

K : ضریب تبادل مومنتم بین فازی [kg/m³s]

k : انرژی آشفتگی [m²/s²]

L : طول لوله [m]

LPM : لیتر بر دقیقه

\dot{m} : نرخ جرمی جریان [kg/s]

p : فشار [Pa]

Re : عدد رینولدز

منابع

1. Stenning, A.H., and Martin, C.B. "An analytical and experimental study of air-lift pump performance", *Trans. ASME J. Eng. Power*, **90**, pp. 106-110 (1986).
2. Kouremenos, D.A., and Staicos, J. "Performance of a small air-life pump", *Int. J. Heat Fluid Flow*, **6**, pp. 217-222 (1985).
3. White, S.J. *Bubble Pump Design and Performance*, MS Thesis, Georgia Institute of Technology (2001).
4. Clark, N.N., and Dabolt, R.J. "A general design equation for air lift pumps operating in slug flow", *AIChE Journal*, **32**(1), pp. 56-64 (1986).
5. Lockhart, R.W., and Martinelli, R.C. "Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes", *Chem. Eng. Prog.*, **45**, pp 39-48 (1949).
6. De Cachard, F., and Delhay, J.M. "A slug-churn model for small diameter airlift pumps", *International Journal of Multiphase Flow*, **22**(4), pp. 627-649 (1996).
7. Darbandi, M.; Saidi, M.H., and Hanafizadeh, P. "A numerical approach to simulate two-phase flow in air-lift pumps", *The International Conference on Computational Methods*, ICM2007, Japan, April 5-7 (2007).
8. Kassab, S.Z.; Kandil, H.A.; Warda, H.A., and Ahmedb, W.H. "Experimental and analytical investigations of air-lift pumps operating in three-phase flow", *Chemical Engineering Journal*, **131**, pp. 273-281 (2007).
9. Hanafizadeh, P., and Saidi, M.H. "Integral solution for gravity driven gas-liquid two phase flow", FD2008-1211 paper, the 11th Fluid Dynamics Conference, Tehran, Iran, May 28-30, (2008).
10. Nicklin, D.J.; Wilkes, M.A., and Davidson, M.A. "Two-phase flow in vertical tubes", *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **40**, pp. 61-68 (1962).
11. Delano, A.D. "Design analysis of the einstein refrigeration cycle", PhD Dissertation, Georgia Institute of Technology (1998).
12. Chexal, B.; Lellouche, G.; Horowitz, J., and Healzer, J. "A void fraction correlation for generalized applications", *Progress in Nuclear Energy*, **27**(4), pp. 255-295 (1992).
13. Schiller, L., and Naumann, Z. "A drag coefficient correlation" *Ver. Deutsch. Ing.*, 77:318 (1935).
14. Drew, D.A., and Lahey, R.T. In *particulate two-phase flow*, Butterworth-Heinemann, Boston, pp. 509-566 (1993).

15. Launder, B.E., and Spalding, D.B. *Lectures in mathematical models of turbulence*, Academic Press, London, England (1972).
16. Csanady, G.T. "Turbulent diffusion of heavy particles in the atmosphere", *J. Atmos. Science*, **20**, pp. 201-208 (1963).
17. Patankar, S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*, McGraw-Hill, New York (1980).
18. Leonard, B.P. "A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, **19**, pp. 59-98 (1979).
19. Kelkar, K.M., and Patankar, S.V. "Numerical method for the prediction of two-fluid flows in domains with moving boundaries", *Numerical Methods in Multiphase Flows*, ASME, **185**, pp. 169-174 (1994).
20. Reinemann, D.J.; Parlange, J.Y., and Timmons, M.B. "Theory of small-diameter airlift pumps", *Int. J. Multiphase Flow*, **16**, pp. 113-122 (1990).

Archive of SID