

مدل سازی عددی و بهینه سازی رفتار ایرلیفت پمپ

هنگامه شمس (دانشجوی کارشناسی ارشد)

بدرام حنفی زاده (دانشجوی دکتری)

محمدحسن 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 ناحیه ی کارکرد بهینه ی این پمپ ها تعیین شده است. مقایسه ی نتایج به دست آمده از این تحلیل عددی با نتایج تجربی موجود نشان دهنده ی دقت مطلوب این روش است. نتایج نشان می دهند که افزایش نسبت شناوری و کاهش قطر لوله باعث بهبود عملکرد این پمپ ها می شود. همچنین افزایش طول لوله تأثیر به سزایی در کارایی این پمپ ها ندارد.

h_shams@gsme.sharif.edu
hanafizadeh@mech.sharif.edu
saman@sharif.edu

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

مقدمه

ایرلیفت پمپ وسیله یی است که از نیروی شناوری برای پمپاژ مایع و جامد بهره می برد. پمپاژ آب در این روش براساس تزریق هوا به مایع یا مخلوط جامد - مایع است. این نوع سیستم های پمپاژ سیال، در مقایسه با دیگر روش های پمپاژ، بازدهی کمتری دارند اما دو مزیت عمده ی «برخورداری از ساختار ساده» و «نداشتن اجزاء مکانیکی متحرک» این ساختار را برای برخی کاربردهای خاص صنعتی، نظیر پمپاژ مایعات خورنده (آب های شنی یا شور) و مایعات گران رو (مانند هیدروکربن ها در صنعت نفت) مناسب ساخته است.

اساساً جریان داخل ایرلیفت پمپ را می توان به صورت یک جریان دوفاز در لوله یی قائم مدل کرد. لذا برای توصیف جریان در داخل این پمپ ها از تعاریف رژیم های مختلف جریان دوفاز - نظیر جریان حبابی، لخته یی، حلقوی و آنولار - استفاده می شود. در این پمپ ها جریان لخته یی حاکم است که طی آن اندازه ی حباب های گاز تقریباً به اندازه ی قطر لوله است. دماغه ی حباب به شکل کروی است و گاز موجود در حباب به وسیله ی لایه یی نازک از مایع که به آرامی به سمت پائین جریان دارد از دیواره ی لوله جدا می شود. جریان مایع شامل لخته هایی است که به طور متوالی حباب های گاز را جدا می کنند. این لخته ها ممکن است محتوی حباب های گاز کوچکتری باشند که از حباب بزرگتر جدا شده و دنبال آن در حرکت اند. طول حباب های بزرگ و اصلی ممکن است به طور قابل ملاحظه یی 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 پمپ ها با دقت

بیشتری تجزیه و تحلیل شد. از جمله، در معرفی اصول اولیه ی جریان دوفاز و مومنتم برای ارزیابی پمپ هایی با قطر لوله ی نسبتاً کوچک و بالابرنده ی کم^[۱] عملکرد ایرلیفت پمپ بررسی، و نرخ حجمی جریان آب برحسب نرخ حجمی جریان گاز برای نسبت های شناوری مختلف ترسیم شد و مقدار بهینه یی برای دبی هوا در یک قطر لوله ی خاص حاصل شد. تحقیقات تجربی دیگر محققین، درخصوص ایرلیفت پمپ هایی با قطر کم تر از ۱۲ میلی متر و بالابرنده ی کوچک (بین ۱ تا ۳ متر) با نسبت شناوری بین ۵۵/۰ تا ۷۰/۰ برای جریان لخته یی انجام گرفت.^[۲] در مطالعاتی دیگر، قطر تیوب های بالابرنده کمی کوچک تر از این قطر ها اما با همین نسبت های شناوری در نظر گرفته شد.^[۳] همچنین با استفاده از روش غیرنوسانی وزن دار شده به صورت عددی، جریان دوفاز مدل سازی شد.^[۴] این مطالعه معطوف به طراحی ایرلیفت پمپ هایی با طول بسیار بلند بوده که در بازپروری سوخت های هسته یی کاربرد دارند، اما افت فشار اصطکاکی در تیوب به صورت تقریبی و با استفاده از رابطه ی لوکاء-مارتینلی^[۵] تقریب زده شده است.

مطالعه های جدیدی که کاربرد ایرلیفت پمپ ها را در بازپروری سوخت های هسته یی مورد ارزیابی قرار داده اند^[۶] بیش از کارایی پمپ به بررسی صحت مدل به کار رفته برای آنالیز ایرلیفت پمپ پرداخته اند. در سال های اخیر نیز از شبیه سازی های تحلیلی و عددی برای مدل سازی جریان در این پمپ ها 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 سرعت های مختلف در داخل لوله یی قائم مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مدل سازی با نتایج مدل های معتبر^[۱۰-۱۲] مقایسه شده است.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۷/۳۰، دایری ۱۳/۵/۱۳۸۸، 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-نیمون^[۱۳] که در این نوشتار مورد استفاده قرار گرفته، طبق معادله‌ی ۹ تعریف شده است:

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

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

Re عدد رینولدز نسبی است که برای فاز اولیه‌ی i و فاز ثانویه‌ی j چنین محاسبه می‌شود:^[۱۳]

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

τ_j زمان رهایی ذره است و مطابق رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود:^[۱۳]

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

$\vec{F}_{lift}$ نیروی بالا برنده 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:^[۱۴]

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

که در آن $\vec{F}_{vm}$ نیروی مجازی و هنگامی که فاز ثانویه‌ی 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 جرم مجازی قابل توجه است و از رابطه‌ی ۱۳ محاسبه می‌شود:^[۱۴]

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

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 $\epsilon - k$ 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 ۱ 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.

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

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.

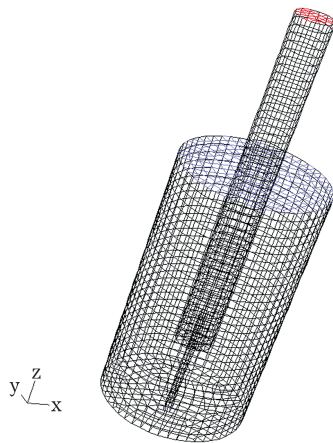
$$\sum_{j=1}^n \vec{R}_{ji} = \sum_{j=1}^n K_{ji} (\vec{v}_j - \vec{v}_i) \quad (7)$$

D_i و D_j قابلیت پخش هستند و σ_{ji} عدد پراشتل پراکندگی 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.

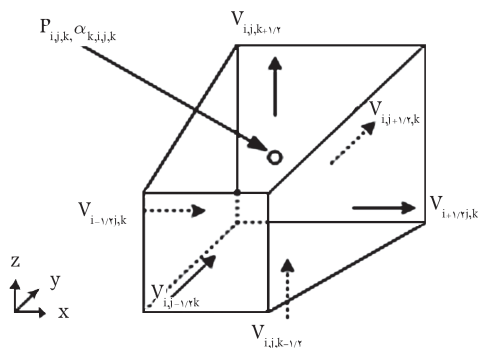
هندسه و شبکه‌بندی

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:

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \varepsilon_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{U}_i \varepsilon_i) = \nabla \cdot \left(\alpha_i \frac{u_{t,i}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_i \right) \\ + \frac{\varepsilon_i}{k_i} \left[C_{1\varepsilon} \alpha_i G_{k,i} - C_{2\varepsilon} \alpha_i \rho_i \varepsilon_i + C_{3\varepsilon} \left(\sum_{l=1}^N K_{li} (c_{li} k_l - c_{il} k_i) \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_{l=1}^N K_{li} (\vec{U}_l - \vec{U}_i) \cdot \frac{\mu_{t,l}}{\alpha_l \sigma_l} \nabla \alpha_l \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{l=1}^N K_{li} (\vec{U}_l - \vec{U}_i) \cdot \frac{\mu_{t,i}}{\alpha_i \sigma_i} \nabla \alpha_i \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

برای بررسی مستقل بودن جواب ها از تعداد مش ها، شبیه سازی در سه حالت با تعداد مش های ۱۵۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۲۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ انجام شده و توزیع فشار در محور لوله با یکدیگر مقایسه شده است (شکل ۲). با توجه به نتایج حاصله، کم ترین تعداد مش که نتایج از آن مستقل باشند ۲۰۰۰۰ است، و لذا تعداد مش به کار رفته برای شبکه بندی این هندسه معادل ۲۰۰۰۰ سلول است. مشخصات مش بندی در جدول ۱ خلاصه شده است.

روش حل عددی

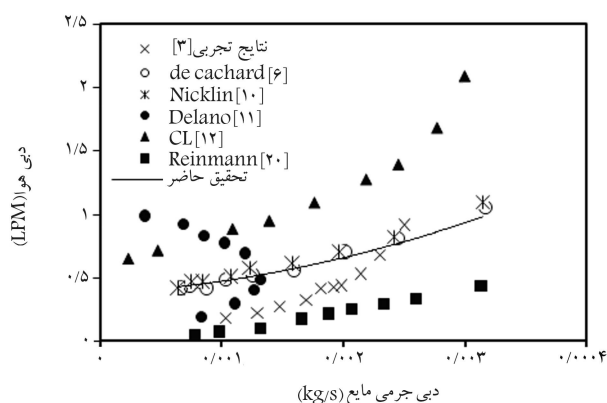
در این تحقیق از روش محاسباتی مبتنی بر قالب حجم کنترل^[۱۷] برای حل عددی معادلات حاکم استفاده شده است. برای هر متغیر، معادله ی گسسته شده برای مقادیر آن متغیر بر روی گره های شبکه، با استفاده از گسسته سازی معادلات حاکم بر روی حجم کنترل مربوطه ایجاد شده است. سپس معادلات گسسته شده منجر به برقراری بقاء بر روی آن حجم کنترل می شوند. معادلات گسسته شده برای فشار و کسر حجمی بر روی حجم کنترل اصلی ساخته شده در حالی که برای معادلات گسسته شده مؤلفه های سرعت از حجم کنترل جابه جا شده در جهت مربوطه استفاده می شود. برای محاسبه ی شارهای نفوذ و جابه جایی از روشی سریع^[۱۸] استفاده شده است. جزئیات بیشتر گسسته سازی را نیز می توان در برخی مطالعات انجام شده^[۱۹] مشاهده کرد. هنگامی که معادلات به صورت گذرا حل می شوند پایداری عددی بسیار بیشتر می شود. در هر بازه ی زمانی سیستمی متشکل از معادلات بقای جرم و مومنت به همراه معادلات انتقال انرژی و اضمحلال آشفتگی حل می شوند. در حلقه های داخلی برای هر معادله از روش حل تکرار استفاده شده و برای محاسبه ی عبارات غیرخطی و مزدوج کردن معادلات، این روش باید در حلقه های خارجی تا زمان رسیدن به شرایط همگرایی برای همه ی متغیرها، تکرار شود. ابتدا عبارات منبع محاسبه می شود و سپس مؤلفه های سرعت برای هر دو فاز از معادلات مومنت مربوطه محاسبه خواهد شد. سپس تصحیح فشار از معادله ی پیوستگی فاز مایع انجام گرفته و کسر حجمی نیز از معادله ی پیوستگی فاز گازی محاسبه می شود. از آنجا که عبارات منبع متشکل از متغیرهای اولیه است، لازم است این عبارت ها بین هر تکرار به روز شوند. انرژی و

اضمحلال آشفتگی مانند مؤلفه های سرعت در حجم کنترل های مجاور دیوار از قانون دیواره محاسبه می شوند. حل معادلات گسسته ی پیوستگی، مومنت و کسر حجمی با استفاده از الگوریتم نمونه^[۱۷] انجام گرفته و حد هم گرایی باقی مانده ها برابر $e - 610$ در نظر گرفته شده است.

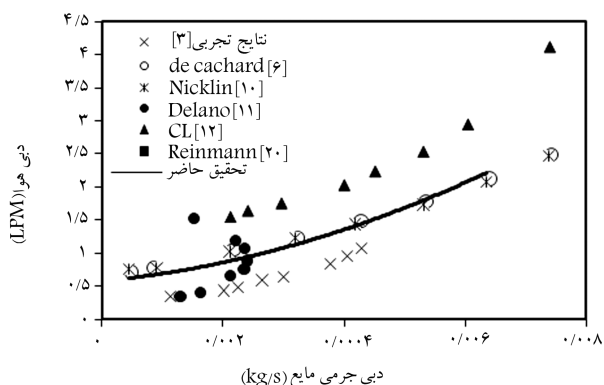
بررسی و تحلیل نتایج

با بررسی نتایج تجربی و نظری می توان دریافت که برای عملکرد ایرلیفت پمپ در یک شرایط کاری معین، کارایی بهینه یی وجود دارد. در ایرلیفت پمپ ها، کارایی به صورت نسبت دبی جرمی مایع به دبی جرمی گاز تعریف می شود. این کارایی در محدوده ی رایج یعنی ۱۰-۱۰۰٪ نمی گنجد. وقتی که این نسبت به بیشترین مقدارش برسد، عملکرد پمپ بهینه است. پارامترهای مؤثر بر کارایی عبارت اند از: نسبت شناوری، قطر لوله، طول لوله و رژیم جریان. در این نوشتار ایرلیفت پمپ هایی با نسبت های شناوری ۰٫۶، ۰٫۸ و ۰٫۱۰، قطرهای ۶mm، ۸mm و ۱۰mm و طول های ۹cm و ۱۸cm مدل شده اند. به منظور دست یابی به رژیم های مختلف جریان، دبی حجمی هوای ورودی از ۰٫۱ تا ۴ LPM تغییر کرده است. بازه ی حدودی تغییرات دبی جرمی آب نیز ۰٫۲۷-۰٫۵۰ (kg/s) به دست آمده است. نتایج تجربی از انجام آزمایش بر نمونه ی دستگاه ایرلیفت پمپ در دانشگاه جیورجیا حاصل شده اند. نتایج حاصله از تحلیل عددی علاوه بر نتایج تجربی، با نتایج حاصل از چند مدل معتبر جریان دو فاز نیز مقایسه شده است.

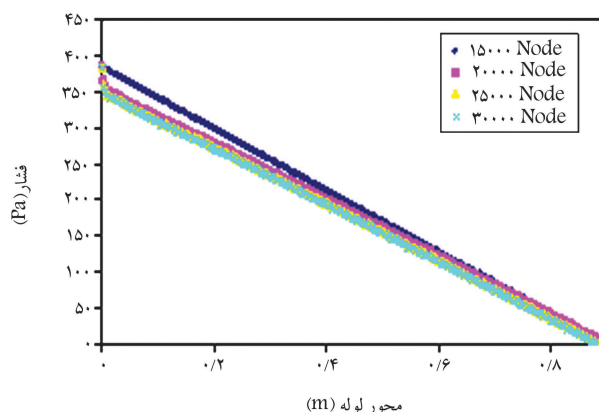
در شکل های ۳ تا ۷، دبی هوا بر حسب دبی جرمی آب برای قطر و نسبت های



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



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



شکل ۲. بررسی استقلال نتایج از تعداد مش ها: فشار در محور لوله بر حسب موقعیت.

جدول ۱. مشخصات مش بندی به کار گرفته شده.

تعداد سلول	تعداد سطح	تعداد گره	کمینه ساین شبکه	بیشینه ساین 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.

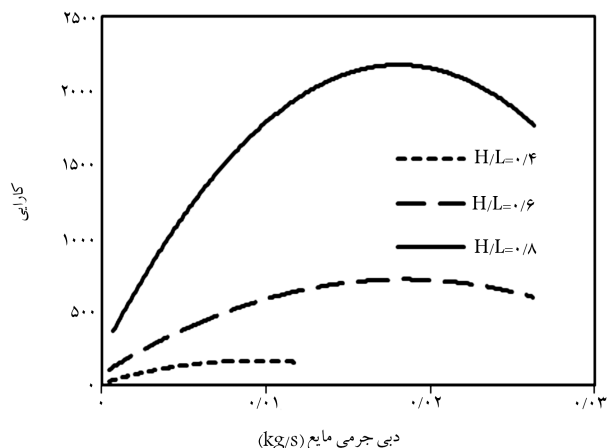
مدل دلانو ظاهراً عملکرد کاملاً متفاوتی نسبت به سایر مدل‌ها دارد، و لذا اگرچه مدل دلانو با بعضی از داده‌های آزمایشگاهی هم‌خوانی دارد، قادر به پیش‌بینی محدوده‌ی کامل جریان لخته‌یی نیست و انتقال رژیم جریان را زود هنگام پیش‌بینی می‌کند.

مدل‌های نیکلین، دی‌کاجارد و دل‌های تقریباً مشابه‌اند. شیب منحنی حاصل از این مدل‌ها با شیب منحنی حاصل از داده‌های تجربی در رژیم جریان لخته‌یی 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.

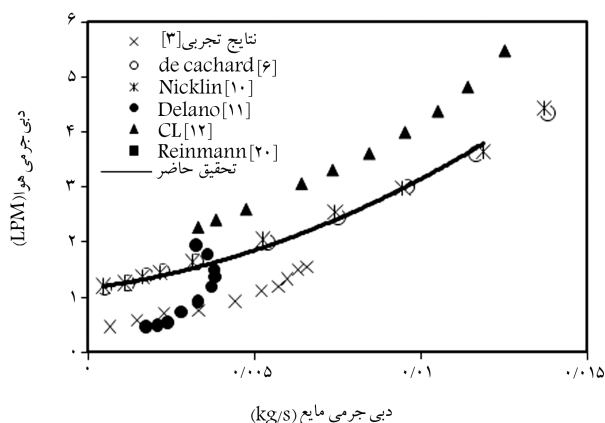
مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر کارایی، نسبت شناوری است. چنان که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، برای نسبت شناوری‌های بزرگ، کارایی ایرلیفت پمپ به‌مراتب بیشتر است. این نتیجه کاملاً منطقی است، به‌طوری که اگر نسبت شناوری افزایش یابد به مقدار حدی ۱ برسد، بدون نیاز به تزریق هوا عمل پمپ کردن فاز مایع انجام‌پذیر خواهد بود. 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).

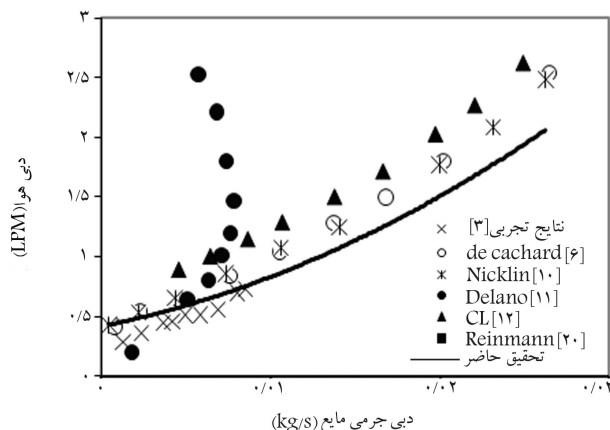
علت این موضوع تأثیر بیشتر کشش سطحی در قطرهای کم و نوسانات تصادفی در نسبت‌های شناوری پایین است که هیچ‌یک از مدل‌های عددی و دوفاز به‌طور



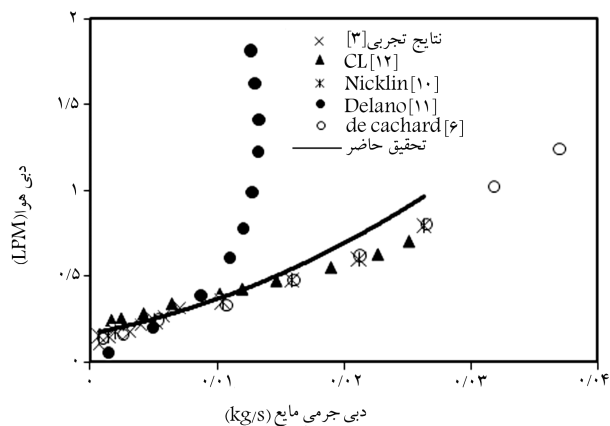
شکل ۸. مقایسه‌ی تأثیر نسبت شناوری: کارایی برحسب دبی جرمی مایع.



شکل ۵. دبی هوا برحسب دبی جرمی مایع ($D=1^\circ$, $H/L=0/4$).

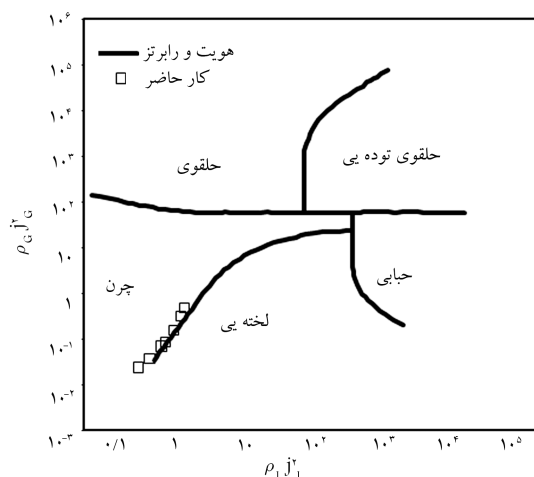


شکل ۶. دبی هوا برحسب دبی جرمی مایع ($D=1^\circ$, $H/L=0/6$).

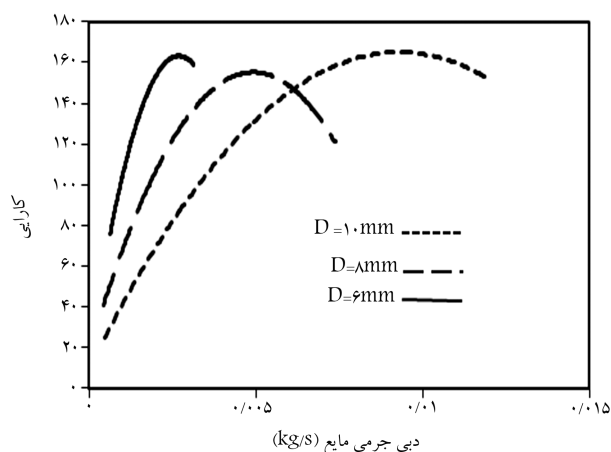


شکل ۷. دبی هوا برحسب دبی جرمی مایع ($D=1^\circ$, $H/L=0/8$).

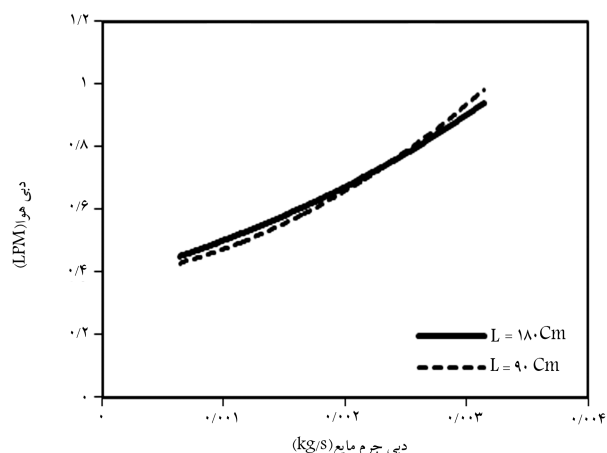
شناوری مختلف ترسیم شده است. در شکل ۳ نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج تجربی و نیز مدل‌های دیگر [۱۰، ۱۲، ۲۰] مقایسه شده است. نتایج تجربی حاکی از آن است که در دبی‌های کم، بر اثر افزایش دبی هوا، دبی آب نیز افزایش خواهد یافت اما به تدریج با افزایش بیشتر دبی هوا، رژیم جریان از لخته‌یی به چرن انتقال یافته و تغییری 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.

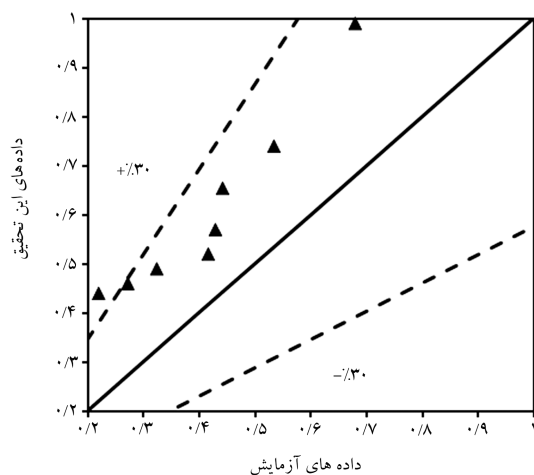


شکل ۱۰. مقایسه‌ی تأثیر طول: دبی هوا برحسب دبی جرمی مایع.

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 به‌کاررفته 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 به محض این که رژیم جریان تبدیل به چرن می‌شود کارایی به‌سرعت کاهش می‌یابد. به همین 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.

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 [$kg\,m/s^2$]

g: شتاب جاذبه [m/s^2]

H: عمق آب [m]

I: تانسور واحد

K: ضریب تبادل مومنتم بین فازی [$kg/m^2\,s$]

k: انرژی آشفتگی [m^2/s^2]

L: طول لوله [m]

LPM: لیتر بر دقیقه

$\dot{m}$: نرخ جرمی جریان [kg/s]

p: فشار [Pa]

Re: عدد رینولدز

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/m^3]

$\bar{\tau}$: تانسور تنش - کرنش [kg/ms^2]

ε : ترم اضمحلال آشفتگی [m^2/s^2]

σ : عدد پراوتل پراکندگی

ϕ : متغیر

زیر نویس ها

i: اولیه

j: ثانویه

L: مایع

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. Engs.*, **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).