

بررسی تجربی تاثیر نحوه تزریق گاز بر میزان تخلیه پمپ هوا برآ و بهبود عملکرد آن

آذر عجمی

علی سررشته داری*

حسن کیهانی

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

پیچیدگی رفتار جریان‌های دوفاز در یک مجرای عمودی استوانه‌ای و وابستگی میزان جریان مخلوط مایع-گاز خروجی به رژیم الگوی جریان از یک سو و وابستگی این الگو به چگونگی شرایط تزریق گاز به مجرای مذکور مورد تحقیق تجربی قرار گرفته است. عملکرد یک مجرای استوانه‌ای دو فاز که در بسیاری از صنایع به عنوان پمپ هوا برآ شناخته می‌شود، برغم سادگی ساخت و کاربرد آن، رفتاری کاملاً وابسته به شرایط بهره‌برداری دارد. در شرایط تزریق شدت جریان گاز ثابت برای آزمایشهای انجام شده در این تحقیق، تغییر بازده بیش از ۳۲٪ مشاهده می‌شود. به منظور بررسی دقیق عوامل موثر بر این رفتار پمپ هوا برآ و تاثیر الگوی جریان دو فاز در مجرای آن، نتایج تاثیر شدت جریان حجمی گاز تزریقی، نسبت غوطه‌وری لوله تخلیه، قطر لوله و تعداد ورودی هوا بر مقدار شدت جریان خروجی و همچنین عملکرد پمپ به صورت آزمایشگاهی انجام و نتایج تجربی جمع بندی و ارائه شده است. نتایج، نشان دهنده تاثیر قابل توجه هریک از این عوامل بر عملکرد پمپ هوا برآ می‌باشد؛ به‌طوری که در آزمایشهای انجام شده کاهش قطر لوله ورودی تزریق هوا از قطر ۸ به ۵ میلی‌متر، بهبود ۷۵ تا ۸۹ درصدی جریان خروجی را بسته به مقدار نسبت غوطه‌وری لوله تخلیه نشان می‌دهد. افزایش تعداد نقاط تزریق هوا در آزمایشها از یک به سه مجرا نیز سبب کاهش شدت جریان تخلیه به مقداری نزدیک به ۴۰٪ می‌شود. کاهش تعداد ورودی هوا و مجرای تزریق گاز باعث افزایش شدت جریان آب خروجی از پمپ و در نتیجه بهبود عملکرد کلی پمپ در شرایط یکسان تغذیه هوا می‌شود. بر این اساس نتایج مذکور نشان دهنده افزایش کارایی پمپ هوا برآ، در شرایط تمرکز هندسی گاز تزریقی و بهبود شرایط لازم برای شکل‌گیری الگوی جریان اسلاگ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پمپ هوا برآ، بهبود کارایی، جریان دو فاز.

Experimental Study of Gas Injection Parameters on the Performance of Air lift Pump and its Improvement

A. Ajami

A. Sarreshtehdari

H. Keyhani

School of Mechanical Engineering & Mechatronic, Shahrood University OF Technology, shahrood, Iran

School of Mechanical Engineering & Mechatronic, Shahrood University OF Technology, shahrood, Iran

School of Mechanical Engineering & Mechatronic, Shahrood University OF Technology, shahrood, Iran

Abstract

Complex behavior of two phase flow in a vertical cylinder and its dependence on the flow rate of liquid mixture and flow pattern related to injection condition is investigated experimentally. Performance of similar conduit, called Air Lift Pump in many industrial applications, despite its simplicity of construction is highly dependent on operational conditions. As an instance for constant gas injection, Improvement in performance is observed, as much as 32 percent, in this study. The influence of gas injection flow rate, submergence ration, pipe diameter and the number of injection air inlet on the behavior of two-phase flow pattern in the air lift pump is investigated and empirical results are presented. The results indicate a significant impact on the behavior of each of parameters on air lift pump's performance. The reduce of air injection inlet diameter of 8 to 5 mm, give an improvement of 75% to 89% in operational performance, depending on the submergence ration. Also increase the number of air injection holes from one to three, decreased the flow discharge to close to 40%. Thus reducing the number of air injection inlet holes improves the overall performance of the pump in the similar air flow injection rate. The results indicate an increase in air lift pump efficiency, in terms of the geometrical focus of the injected gas and create the faster conditions to achieve to slough flow pattern.

Keywords: Air lift Pump, Efficiency improvement, Two phase flow.

۱- مقدمه

سانتریفوژ) آسیب می‌رساند، استفاده می‌شود. پمپ هوا برآ نیاز به هیچ مکانیزم متحرک مکانیکی برای انتقال سیال ندارد. همچنین این پمپ‌ها علی‌رغم کارایی پایین، در کاربردهایی که استفاده از پمپ‌های معمول مشکل و یا غیرممکن است، نظیر برخی موارد در حوزه‌های نفتی، انتقال سیالات پرخطر (مثل سیالات پرتوزا)، تاسیسات آب و فاضلاب، استخراج معادن دریایی عمیق، طراحی بیوراکتور،

پمپ هوا برآ، ابزاری جهت بالابردن مایعات یا مخلوطی از مایع و جامد به وسیله یک لوله عمودی شناور در مایع، توسط تزریق هوای فشرده به پایین لوله می‌باشد. هوای تزریق شده ضمن حرکت به سمت بالا، مایع و ذرات درون آن را نیز به حرکت درمی‌آورد، شکل ۱. این پمپ‌ها اغلب در چاه‌های عمیق که دارای ناخالصی زیاد هستند و این ناخالصی‌ها به بخش‌های مکانیکی دیگر پمپ‌ها (از قبیل پمپ‌های

استفاده در استخرهای آبی پروری، بدست آوردن توده‌های منگنز از کف اقیانوس‌ها کاربرد دارند.

مبانی تجربی و عملکرد پمپ‌های هوا برآ از حدود سال ۱۸۸۲ معرفی شد، لیکن استفاده عمده و گسترده‌ای از آن تا میانه قرن بیستم گزارش نشده است [۱]. در مقایسه با سایر پمپ‌ها، ویژگی خاص پمپ هوا برآ، سادگی مکانیکی آن و امکان استفاده از آن در محیط‌های خورنده و در حضور ذرات جامد می‌باشد.

در تشریح عملکرد این دسته از پمپ‌ها استپانف [۲]، از یک روش ترمودینامیکی جهت بررسی پمپ هوا برآ استفاده کرد، که قادر به توصیف عملکرد پمپ بصورت فیزیکی نبود. پیکرت [۳]، عملکرد پمپ‌های بالابر بادی را مورد بررسی قرار داد و تئوری جریان‌های دوفاز را توسعه داد. که البته بیشتر مطالعات بر روی لوله‌هایی با قطر ۳۰۰-۲۵ میلی متر و طول ۱۰۰-۱۰ میلی متر بوده است. مدل استنینگ و مارتین [۴]، نقطه شروع تحلیل دلاتو [۵]، بر روی پمپ‌های حبایی است. در مدل استنینگ و مارتین شدت جریان حجمی آب در مقابل شدت جریان حجمی هوا برای نرخ‌های غوطه‌وری^۱ مختلف، ارائه شده است. که نشان می‌دهد که جهت بیشینه کردن شدت جریان آب برای یک قطر لوله مشخص، یک شدت جریان هوای معین وجود دارد. دلاتو در تحقیقش به نمودارهای مشابهی رسید و پمپش در بالاترین شدت پمپاژ جریان آب عمل می‌کرد. شی و همکاران [۶]، از یک روش جدید مبنی بر تکنیک پردازش تصویری عددی جهت اندازه‌گیری پارامترهای جریان در جریان دوفاز مایع-گاز مانند اندازه‌حباب، کسر حجمی گاز و سرعت حباب استفاده کردند. باین وجود این روش قادر به تحلیل مشخصات دیگر جریان دوفاز مانند قطر حباب نبود.

آواری و همکاران [۷]، عملکرد پمپ هوا برآ را تحت شرایط از پیش تعیین شده بررسی کردند و پارامترهای وابسته را بهبود بخشیدند. آنها بر روی توابع ریاضی عمومی که برای تاسیسات پمپ هوا برآ قابل اجرا هستند، متمرکز شدند. مارگاریز و همکاران [۸]، تبدیل نقشه‌های رژیم جریان را به یک سیستم مختصاتی قابل استفاده برای پمپ هوا برآ بررسی کردند. کار آنها ارایه نقشه‌های بسیار ساده است که بطور مستقیم داده‌های اندازه‌گیری شده و نیز انتقال رژیم جریان را نشان می‌دهد.

کساب و همکاران [۹]، به بررسی تحلیلی و تجربی پمپ‌های هوا برآ با جریان‌های سه فازی پرداختند که مبتنی بر روش حجم کنترل بود؛ و مدلی تئوری جهت پیش بینی عملکرد پمپ هوا برآ در سیستم سه فاز مایع-جامد-گاز می‌باشد. اثر نسبت غوطه‌وری و اندازه ذرات جامد بر روی عملکرد پمپ مورد بررسی قرار گرفته است. حمدی کندیل [۱۰]، با هدف تخمین عملکرد این پمپ تحت شرایط از پیش تعیین شده و بهینه سازی پارامترهای مربوطه به بررسی آن در جریان دو فاز پرداخت. این تحقیق نشان داد که ظرفیت و بازده پمپ تابعی از شدت جریان جرمی هوا، نسبت غوطه‌وری و طول لوله بالابرنده هستند. مطالعه‌های جدیدی که کاربرد پمپ هوا برآ را در بازپروری سوخت‌های هسته ای مورد ارزیابی قرار داده اند [۱۱]، بیش از کارایی پمپ به بررسی صحت مدل بکار رفته برای آنالیز پمپ هوا برآ

پرداخته‌اند. در سال‌های اخیر نیز از شبیه سازی‌های تحلیلی و عددی برای مدل سازی جریان در این پمپ‌ها بهره گرفته شده است، [۱۲-۱۴]. حنفی زاده و همکاران [۱۵] جریان دوفاز مایع-گاز را در یک لوله قائم بصورت عددی شبیه‌سازی کردند. این مدل بر اساس توازن ممنتوم بنا شده و در آن با استفاده از روابط تجربی حاکم بر اصطکاک رژیم‌های مختلف جریان دو فاز آب-هوا و همچنین انتگرال‌گیری و حل عددی معادلات حاصل از تعادل مومنوم در هر سلول می‌توان به دبی خروجی فازها و همچنین توزیع فشار در راستای محور لوله دست یافت. سعیدی و همکاران [۱۶]، از یک تکنیک تصویری جهت ردیابی رژیم جریان دو فاز مایع-گاز در یک پمپ هوا برآ استفاده کردند. آنها سرعت فاز گاز در جریان دو فاز را از داده های گرفته شده توسط دوربین سرعت بالا بدست آوردند. به دنبال تحقیقات قبل، حنفی زاده و همکاران [۱۷]، به مدل سازی عددی رفتار پمپ هوا برآ پرداختند و تاثیر پارامترهای موثر بر عملکرد پمپ را بصورت عددی بررسی کردند که در بیشتر موارد با کارهای تجربی موجود سازگاری خوبی داشت. البته محدودیت‌های مدل‌های اراده شده و وابستگی گسترده به الگو و رژیم جریان سیال زمینه، همچنین شرایط مختلف بهره‌برداری نیاز به تحقیقات بیشتر در خصوص عوامل موثر بر عملکرد پمپ هوا برآ را امری ضروری می‌سازد.

عدم بررسی نحوه تاثیر تزریق گاز در شکل‌گیری جریان دوفاز داخل مجرای پمپ هوا برآ و تاثیر آن بر میزان تخلیه سیال و در نتیجه بازده آن موضوع تحقیق در مطالعه حاضر است. در این کار به منظور شناسایی بهتر عملکرد این نوع از پمپ، تغییرات در مجرا و تعداد نقاط تزریق در دو اندازه برای قطر لوله بالابر و در نرخ‌های غوطه‌وری مختلف، گزارش شده است. در این تحقیق، پس از طراحی و ساخت پمپ بالابرداری، رژیم جریانی که پمپ در آن کارایی بالاتری دارد مشخص شده و سپس به ارزیابی عوامل موثر در کارایی این گونه از پمپ‌ها بصورت تجربی پرداخته شده است. بدین منظور تاثیر عوامل مهمی مانند شدت جریان حجمی گاز تزریقی و تغییر غوطه‌وری لوله بالابرنده، با تغییر الگوی تزریق توسط تعویض قطر لوله هوا و نیز تاثیر تعداد ورودی هوا، بر شدت جریان خروجی مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفته و نتایج آن‌ها ارائه شده است.

۲- معرفی ساختار پمپ هوا برآ و متغیرهای مطرح در آن

پمپ هوا برآ از یک لوله استوانه ای تشکیل شده است که در داخل مایع قرار گرفته و توسط مجرای دیگری گاز (یا هوا) به قسمت پایین آن تزریق می شود. گاز یا هوای تزریق شده به واسطه اختلاف قابل توجه دانسیته در این مجرا بالا آمده، سبب انتقال مایع نیز می شود. با توجه به عملکرد یک پمپ هوا برآ متغیرهای مطرح در این دستگاه، شدت جریان حجمی گاز تزریق شده، شدت جریان مایع تخلیه شده از پمپ، و ابعاد هندسی مجرای تزریق گاز و مجرای مخلوط مایع-گاز می‌باشد. یکی از مهمترین گروه‌های بی بعد گزارش شده در بررسی عملکرد پمپ هوا برآ نسبت غوطه‌وری است. طرحواره یک پمپ هوا برآ و متغیرهای موثر در محاسبه نسبت غوطه‌وری در شکل ۱ نشان داده شده است. رابطه مورد استفاده برای محاسبه مقدار نسبت غوطه‌وری

¹ Submergence ratio

لوله تخلیه از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$H_{sr} = \frac{\text{Submergence Lenght}}{\text{Submergence Lenght} + \text{Lift}} = \frac{H_s}{H_s + H_L} \quad (1)$$

که در این رابطه H_{sr} مقدار نسبت غوطه‌وری لوله تخلیه پمپ هوا برآ، H_s ارتفاع غوطه وری لوله در داخل مایع و H_L ارتفاع لوله تخلیه در بالای سطح آزاد مایع است.

۳- دستگاه و روش آزمایش

طرح دستگاه و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. در این دستگاه، هوا و آب خالص به ترتیب به عنوان فاز گاز و مایع بکار برده شده است. دستگاه آزمایش مورد استفاده شامل یک لوله بالابرنده عمودی از جنس پلکسی به طول ۴۸ سانتی متر و قطر ۳ سانتی متر می‌باشد که درون یک مخزن شفاف مکعبی شکل روباز (مخزن شماره ۱)، به طول و عرض ۱۵۰ در ۷۰ سانتی متر و عمق ۱۲ سانتی متر، بصورت عمودی غوطه‌ور می‌باشد. جهت تغییر نسبت غوطه‌وری لوله تخلیه، از یک پایه آلومینیومی استفاده می‌شود که توسط گیره‌هایی که به آن متصلند می‌توان لوله تخلیه را در عمق‌های مختلف درون آب مخزن ثابت نگه داشت و به غوطه‌وری مورد نظر دست پیدا کرد.

سطح مایع در مخزن مورد آزمایش توسط یک ارتفاع سنج مایع به طور دائمی کنترل و در ارتفاعی ثابت نگاه داشته می‌شود و در صورت نیاز، آب توسط یک عدد پمپ از مخزن کمکی (مخزن ۲ در شکل ۲) تامین می‌شود. شدت جریان آب توسط دو عدد شیر کشویی^۱ تنظیم می‌شود که توسط یک دستگاه دی‌سنج استانداردسازی شده با دقت ۰/۵٪ اندازه‌گیری می‌شود. جهت تامین هوای مورد نظر از یک کمپرسور هوا با مخزنی به حجم ۳ مترمکعب استفاده می‌شود که توان تحویل ۸/۲ مترمکعب هوا در هر دقیقه و دستیابی به فشار حداکثر ۷ بار را دارد. جریان هوای کمپرسور با عبور از لوله‌ای به قطر ۵ میلی متر وارد شیرکشویی شده و در نهایت جهت تثبیت فشار وارد رگولاتوری می‌شود. فشار هوا توسط دو فشار سنج، فشار قوی و فشار ضعیف با دقت ۱٪± اندازه‌گیری می‌شود و جریان حجمی هوا توسط یک روماتر با دقت ۱٪ کل مقیاس مدرج شده اندازه‌گیری می‌شود.

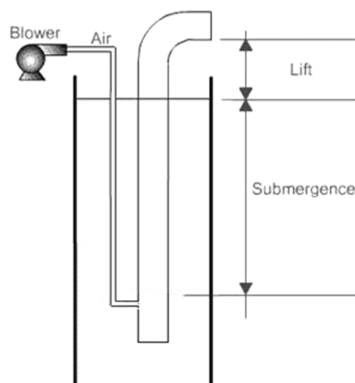
با توجه به اینکه داده‌های حاصل از آزمایش به صورت مستقیم از دستگاه‌های داده برداری ثبت شده است و از طرفی پردازش خاصی برای روابط مورد استفاده در این تحقیق مد نظر نبوده، خطای موجود در نتایج کمی مقاله مبتنی بر خطای اعلام شده دستگاه‌های اندازه‌گیری و در نتیجه عدم قطعیت نتایج نیز مستقیماً مرتبط با این مقادیر می‌باشد.

هوا در فشار ثابتی به درون لوله تخلیه تزریق می‌شود و آب همراه با هوا از طریق لوله بالابرنده به سمت بالا حرکت می‌کند و در قسمت بالای لوله تخلیه از طریق شیب ایجاد شده در خروجی، هوا از آب جدا می‌شود و به اتمسفر تخلیه شده و آب به مخزن کمکی (مخزن ۲) برمی‌گردد.

از خصوصیات مهم پمپ هوا برآ نرخ شناوری^۲ لوله بالابرنده^۳ می‌باشد که نسبت طول غوطه‌وری به کل طول لوله بالابرنده است. در مطالعه حاضر مقادیر مختلف غوطه‌وری از ۳۰ درصد تا ۹۰ درصد، مورد بررسی قرار گرفتند. برای انجام آزمایش‌ها، در هر نرخ شناوری، شدت جریان هوا تغییر داده شد و شدت جریان آب خروجی متناظر با آن اندازه‌گیری شده است. جهت بررسی میزان تاثیر کاهش قطر لوله تزریق هوا در افزایش کارایی پمپ، از دو قطر لوله هوای ورودی مختلف ۸ میلیمتر و ۵ میلیمتر استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی تاثیر افزایش تعداد ورودی هوا بر دبی خروجی آب، سه مکان مختلف بر روی لوله تخلیه تعبیه گشته که لوله هوا به هر سه مکان وارد می‌گردد. جهت تصویر برداری و مشاهده رژیم جریان نیز از یک دوربین دیجیتال CCD با سرعت تصویربرداری ۸۰۰ fps که در فاصله ۰/۵ متری لوله بالابرنده قرار دارد، استفاده شده است.

به منظور اندازه‌گیری دبی جریان گاز مطابق شکل ۲ از فلومتر و برای سنجش میزان آب جمع‌آوری شده، از یک مخزن کاملاً مدرج و شفاف استفاده شده است، به نحوی که به طور مداوم و همچنین با استفاده از فیلم‌های ثبت شده امکان بررسی میزان آب میسر شده است.

در اولین مرحله به منظور تشخیص الگوی جریان نتایج آزمایشگاهی، ثبت داده‌های مربوط به تزریق مقادیر مختلف گاز به پمپ هوا برآ با مشاهده و ثبت رژیم‌های آشکار شده در مجرای تخلیه انجام شده است. این داده‌ها به صورت نمایش اشکال رژیم‌های جریانی در بازه الگوی جریان حبایی تا حلقوی در عکس‌های ثبت شده، شکل ۳، ارائه شده است. در این مرحله بیشترین داده‌های مربوط به شدت جریان حجمی مایع خارج شده از پمپ که در الگوهای جریانی در محدوده اسلاگ تا چارن رخ داد به صورت کمی مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهدات تجربی مربوط به رژیم‌های جریان دوفاز با جایابی نقاط عملکرد جریان دوفاز ارائه شده توسط نقشه الگوی جریان هویت و رابترز مورد بررسی و تأیید قرار گرفت. لازم به ذکر است که مقادیر مختلفی از نسبت‌های غوطه‌وری، از ۴۰ تا ۸۰ درصد، برای این مجموعه از آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، شکل ۴. برای اطمینان از نتایج گزارش شده هر نتیجه حداقل ۳ بار مورد آزمایش قرار گرفته و داده منعکس شده در این تحقیق مقدار متوسط داده‌های ثبت شده می‌باشد.

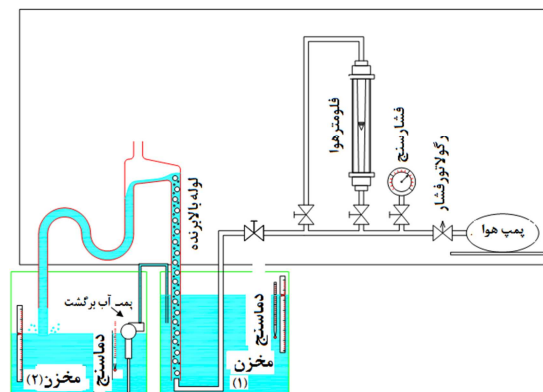


شکل ۱- پمپ هوا برآ و متغیرهای موثر در نسبت غوطه‌وری

^۲ Submergence Ratio

^۳ riser tube

^۱ global valve



شکل ۲- طرحواره تجهیزات و مدار آزمایشگاهی

در مرحله بعدی از آزمایش‌ها تاثیر شدت جریان هوا بر کارایی پمپ هواپرا، در نرخ غوطه‌وری های مختلف، با تغییرات شدت جریان هوای تزریقی مورد بررسی قرار گرفته است. و مقادیر شدت جریان هوا در برابر شدت جریان جرمی آب خروجی برای لوله تزریق هوا به قطر ۵ سانتی متر در شناوری‌های مختلف اندازه‌گیری شده‌اند. به منظور بررسی اثر چگونگی الگوی تزریق در ادامه این کار تاثیر قطر هوای تزریقی بر افزایش کارایی پمپ هواپرا با استفاده از دو قطر لوله هوای ورودی تزریق با اندازه ۸ میلیمتر و ۵ میلیمتر استفاده شده است. همچنین تعداد ورودی های تزریق گاز از یک مجرا به ۳ مجرا افزایش داده شده است و تاثیر این کار بر شدت جریان مایع تخلیه شده در شدت گاز تزریقی ثابت مورد آزمایش قرار گرفته است.

۴- ارائه نتایج آزمایشگاهی و بحث

۴-۱- بررسی کیفی اثرشدت جریان هوا، تشخیص الگوهای مناسب پمپ

در اولین مرحله بررسی نتایج آزمایشگاهی، تشخیص الگوی جریان به صورت مشاهده کیفی و برآورد کمی آن توسط نقشه الگو جریان انجام شده است. در این سری از آزمایش‌ها با افزایش تدریجی مقدار گاز تزریق شده به مجرای تخلیه پمپ هواپرا رژیم های اصلی جریان، شامل الگوی حبابی^۱، اسلاگ، چارن^۲ و حلقوی^۳ مشاهده شده؛ که نمونه ای از تصاویر این رژیم‌های جریانی در شکل ۳ نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۴ به عنوان نمونه نشان داده شده است، در شدت جریان هوای خیلی کم (بین ۰ تا ۲ لیتر بر دقیقه)، الگوی جریان حبابی مشاهده می‌شود، که در تجهیزات مورد آزمایش، این جریان امکان پمپ کردن و تخلیه مایع را نشان نمی‌دهد. با افزایش شدت جریان هوا (بین ۲ تا ۴ لیتر بر دقیقه)، حباب‌های تیلور شروع به شکل‌گیری کرده، مایع به سمت بالا هدایت شده و شروع به تخلیه از لوله تخلیه پمپ می‌کند. رژیم جریان قابل مشاهده در ابتدای تخلیه مایع، رژیم اسلاگ بوده و با افزایش شدت جریان هوای تزریقی به لوله، رژیم مشاهده شده بین الگوهای اسلاگ و اسلاگ- چارن به

شدت نوسانی نشان می‌دهد. با افزایش بیشتر در شدت جریان هوا (بین ۱۳ تا ۱۷ لیتر بر دقیقه)، جریان به چارن تحول پیدا کرد. در نهایت در شدت جریان هوای بالاتر، جریان حلقوی (با تزریق گاز بالاتر از ۱۸ لیتر بر دقیقه)، مشاهده می‌شود، البته حضور این نوع از الگوی جریان در شرایط آزمایش نسبت به الگوهای دیگر بسیار ناپایدار است. زیرا با هر اختلال کوچک در شدت جریان هوا، تغییر به جریان چارن مشاهده می‌شود. همچنین سه رژیم اصلی اسلاگ، چارن و حلقوی با بیشترین فشار بیشتری آب را به سمت بالا پرتاب می‌کنند، بنابراین نسبت به جریان حبابی به خصوص در نسبت‌های غوطه‌وری کم، کاربرد بیشتری دارند. بنابر بررسی اولیه و کیفی نتایج با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی و بدون توجه به تحلیل کمی عملکرد پمپ هواپرا در رژیم جریان حبابی فقط محدود به نسب غوطه‌وری‌های بالا است. در نتیجه به نظر می‌رسد ناحیه عملکرد بهینه پمپ، در ناحیه نزدیک به تحول از الگوی جریان اسلاگ به الگوی جریان چارن است. به منظور بررسی مقادیر کمی مشخصات جریان مشاهده شده داده‌های مربوط به بیشترین مقادیر تخلیه مایع در نسبت‌های مختلف غوطه‌وری جمع آوری و بر روی نقشه الگوهای جریان پیشنهاد شده توسط هویت‌ورابرتز [۱۹] در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اطلاعات کمی مستخرج از مشاهدات تجربی منطبق با نواحی رژیم الگوهای جریان دوفاز ارائه شده، توسط هویت و رابرت [۱۹] می‌باشد.

۴-۲- بررسی کمی اثر شدت جریان هوای تزریق شده

جهت بررسی تاثیر شدت جریان هوا بر کارایی پمپ هواپرا، در نسبت غوطه‌وری‌های مختلف، تغییرات شدت جریان مایع تخلیه شده در مقابل شدت جریان هوای تزریقی مورد بررسی قرار گرفت. نمودارهای ارائه شده شکل ۶ و ۷ نشان دهنده شدت جریان جرمی آب در مقابل شدت جریان هوا هستند که برای لوله تخلیه به قطر ۵ سانتی متر در غوطه‌وری‌های ۴۵ درصد و ۷۰ درصد اندازه‌گیری شده- است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش شدت جریان هوا، شدت جریان آب را تا یک نقطه بیشینه افزایش می‌دهد، سپس با افزایش شدت جریان هوا از این نقطه به بعد شدت جریان جرمی آب به مقدار ثابتی میل می‌کند.

با استفاده از مشاهده جریان و نیز نتایج آزمایشگاهی، ملاحظه می‌شود که برای مقادیر کم شدت جریان حجمی هوا (نزدیک به صفر تا ۴ لیتر بر دقیقه)، در تمامی نرخ‌های شناوری، هیچ مقدار آبی بالا نمی‌رود، زیرا نیروی شناوری اعمال شده توسط حباب‌های هوا، برای بالابردن آب کافی نیست، شکل ۴.

با افزایش شدت جریان هوا، رشته حباب اسلاگ در لوله شروع به شکل‌گیری می‌کند که شامل چندین توده هوای کوچکتر بطول ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر است که در طول لوله توزیع شده است، (شکل ۳ ب). بزرگترین حباب در قسمت بالای لوله واقع می‌باشد، حال آنکه کوچکترین حباب در قسمت پایین لوله است. رشته حباب اسلاگ به آرامی به طرف بالا حرکت می‌کند، برای چند ثانیه هیچ حبابی از لوله خارج نمی‌شود، زیرا هوا برای مدت کوتاهی در قسمت پایین لوله انباشته می‌شود. توزیع حباب‌ها دوباره پس از چند ثانیه تکرار می‌شود.

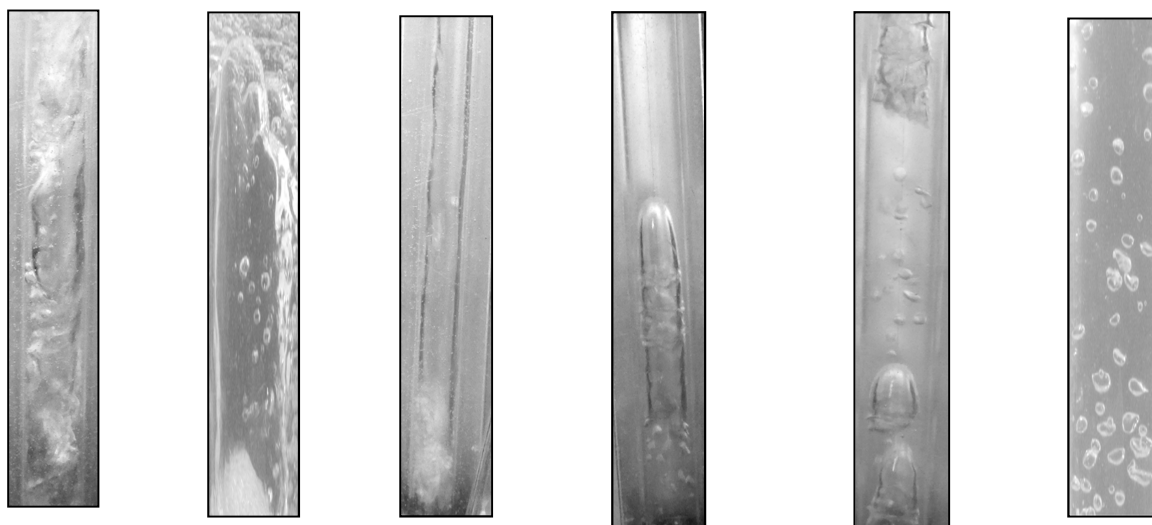
¹ Bubbly Flow

² Churn Flow

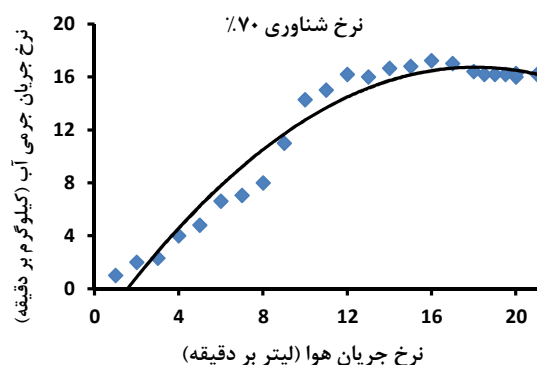
³ Annular Flow

لیتر بر دقیقه افزایش می‌یابد و جریان تخلیه مایع شروع می‌شود. دلیل انتقال رژیم جریان از حبابی به اسلاگ، این است که همان‌طور که جریان گاز افزایش می‌یابد، حباب‌ها به یکدیگر نزدیکتر شده و برخورد رخ می‌دهد. بنابراین تعدادی از برخوردها منجر به شکل‌گیری تزریقی از ۱۰ تا ۱۴ لیتر بر دقیقه بوده، الگوی مشاهده شده جریان، در رژیم جریان اسلاگ-چارن است. بعلاوه با توجه به این نمودار و نتایج مشابه برای نسبت‌های دیگر غوطه‌وری، بیشینه شدت جریان آب تخلیه شده، هنگامی مشاهده می‌گردد که الگوی جریان اسلاگ-چارن است.

فشار هوا در نقطه تزریق بین یک تا دو کیلوپاسکال نوسان میکند و این به‌خاطر انباشتگی هوا تا شکل‌گیری اسلاگ است تا به فشار کافی جهت غلبه بر نیروی وزن ناشی از ستون آب برسد و به طرف بالا حرکت کند. سپس با افزایش تدریجی و آرام، شدت جریان هوا تا ۷ توده‌های اسلاگ می‌شود. برای نسبت غوطه‌وری ۷۰ درصد، در شکل ۷ ملاحظه می‌شود که مقدار تخلیه آب به‌صورت قابل توجهی برای شدت جریان حجمی هوا در نزدیکی مقدار ۱۲ لیتر بر دقیقه افزایش می‌یابد. در این شرایط، هر افزایش کوچکی در شدت جریان هوا، سبب می‌شود شدت جریان آب به سرعت افزایش یابد. شایان ذکر است که در این شرایط که شدت تخلیه افزایش پیدا می‌کند مقدار گاز



شکل ۳- الگوهای جریان‌های مشاهده شده (الف) حبابی، (ب) حبابی به اسلاگ، (ج) اسلاگ، (د) اسلاگ به چارن، (ه) چارن، و (و) حلقوی



شکل ۷ - نمودار شدت جریان هوا در مقابل شدت جریان آب برای نسبت غوطه‌وری ۷۰٪ (قطر لوله هوا ۵ میلی‌متر)

همان‌طور که در نمودار شکل ۴، ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، برای تمامی نسبت‌های غوطه‌وری، شدت جریان آب با افزایش شدت جریان هوا تا رسیدن به مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و سپس با افزایش شدت جریان هوا، شدت جریان آب خروجی ثابت باقی می‌ماند. نتایج این بخش از تحقیق تطابق خوبی با داده‌های نیکلین [۲۰] دارد.

افزایش بیشتر شدت جریان هوا سبب شکسته شدن الگوهای منظم توده‌های هوا در رژیم اسلاگ شده و الگوی جریان به سمت جریان چارن با الگوی بسیار ناپایدار پیش می‌رود.

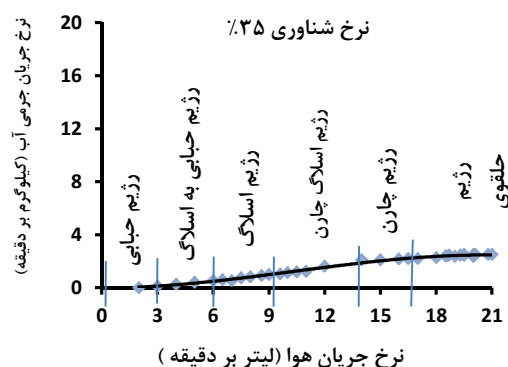
ناحیه جریان اسلاگ-چارن ناحیه مهمی است. در این ناحیه مقدار آب تخلیه شده در یک محدوده کوچک از شدت جریان هوا یعنی ۱۶ تا ۲۰ لیتر بر دقیقه تقریباً ثابت باقی می‌ماند؛ لیکن افزایش بیشتر جریان هوا باعث اندکی کاهش در شدت جریان خروجی می‌شود، در این حال رژیم جریان از اسلاگ-چارن به الگوی حلقوی تغییر می‌یابد. این انتقال به دلیل افزایش سرعت گاز ایجاد شده و اندازه حرکت آن جهت قرارگیری مایع بصورت لایه ای بر روی دیواره لوله می‌باشد.

۴-۳- بررسی تغییر نسبت غوطه‌وری

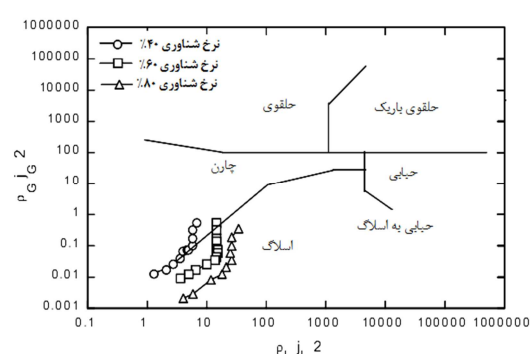
یکی از مهمترین عوامل موثر بر کارایی پمپ هوا برآ، نسبت غوطه‌وری است. در ادامه بررسی آزمایشگاهی و به منظور بررسی کمی تاثیر این کمیت بر عملکرد پمپ هوا برآی موجود، آزمایشهای در نسبت غوطه‌وری‌های مختلف فراهم شد. اندازه گیری‌های انجام شده در این آزمایشها در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ منحنی‌های عملکرد پمپ هوا برآ هنگامی که نسبت غوطه‌وری افزایش می‌یابد، به سمت بالا جابجا می‌شود و هرچند تمامی منحنی‌های عملکرد در نسبت‌های مختلف غوطه‌وری روند یکسانی دارند، لیکن بسته به اندازه مجرای تزریق هوا، تغییرات مختلفی در شدت جریان مایع خروجی ایجاد می‌کند که در بخش بعد به صورت دقیق‌تر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۴- بررسی کارایی پمپ بالابرادی

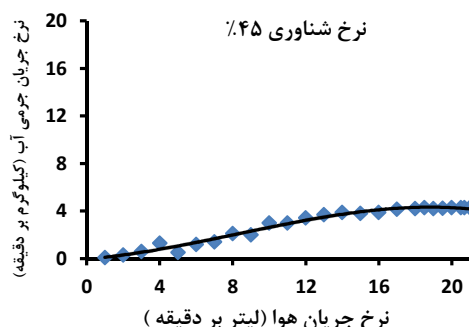
بر اساس رابطه ای که نیکلین [۲۰] برای تعریف کارایی پمپ هوا برآ ارائه نمود، می‌توان بازده این دستگاه را بر اساس رابطه (۲) برآورد نمود.



شکل ۴ - نمودار شدت جریان هوا در مقابل شدت جریان آب برای غوطه‌وری ۳۵٪ (قطر لوله هوا ۵ میلی‌متر)

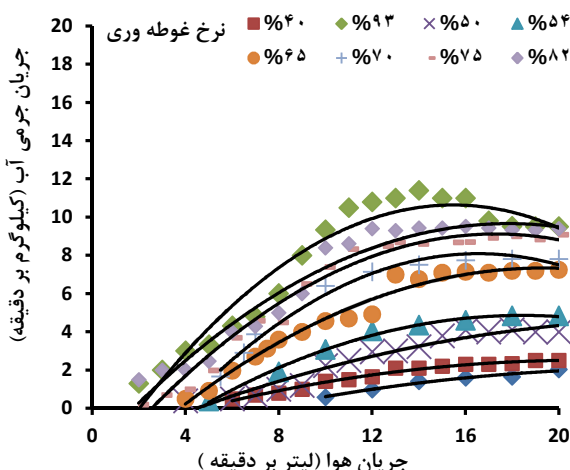


شکل ۵- توزیع نتایج آزمایشگاهی از محدوده بازده بالا در الگوی رژیم جریان هویت و رابرتز [۱۹]

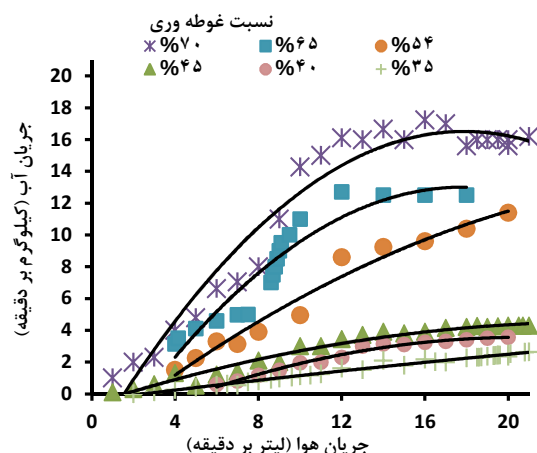


شکل ۶ - نمودار شدت جریان هوا در مقابل شدت جریان برای نسبت غوطه‌وری ۴۵٪ (قطر لوله هوا ۵ میلی‌متر)

که با افزایش نسبت غوطه‌وری، تاثیر کاهش قطر هوای ورودی بر افزایش شدت آب خروجی، افزایش می‌یابد. به نحوی که در تزریق گاز با شدت جریان حجمی ۲۰ لیتر بر دقیقه، بهبود ۲ کیلوگرم بر دقیقه تخلیه مایع برای نسبت غوطه‌وری ۴۰٪ به مقداری نزدیک به ۱۲ کیلوگرم بر دقیقه، برای نسبت غوطه‌وری ۸۲٪ می‌رسد.



شکل ۸- نمودار تغییرات شدت جریان جرمی آب با جریان هوا در مقادیر مختلف نسبت غوطه‌وری (برای لوله هوا به قطر ۸ میلی متر)



شکل ۹- نمودار تغییرات شدت جریان جرمی آب با جریان هوا در مقادیر مختلف از نسبت غوطه‌وری (برای لوله هوا به قطر ۵ میلی متر)

با محاسبه مقدار تغییرات متوسط جریان جرمی مایع با تغییر نسبت غوطه‌وری، مقدار ۷۵٪ بهبود برای لوله تزریق هوای ۸ میلیمتری به دست می‌آید. این مقدار برای لوله تزریق هوای ۵ میلیمتری برابر ۸۹٪ است. مقادیر حاصل، بهبود کلی نتایج حاصل از جریان تزریق گاز با مجرای کوچکتر را به صورت کمی تأیید می‌کند.

$$\eta = \frac{\rho g Q_L (L - H_S)}{P_a Q_a L n \frac{P_{in}}{P_a}} \quad (2)$$

که در این رابطه Q_L شدت تخلیه آب، Q_a شدت جریان حجمی هوا، P_{in} فشار تزریق هوا، ρ دانسیته مایع و P_a فشار اتمسفر است.

منحنی بازده در مقابل شدت جریان حجمی هوای تزریق شده برای نسبت غوطه‌وری ۵۰ درصد در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که شدت جریان حجمی هوا افزایش می‌یابد، بازده به سرعت از صفر تا ماکزیمم مقدار ۳۵.۴٪ در جریان حجمی هوایی برابر با ۲ تا ۴ لیتر بر دقیقه افزایش می‌یابد و سپس با افزایش شدت جریان حجمی هوا، کارایی پمپ کاهش می‌یابد.

منحنی‌های بازده برای نسبت‌های مختلف غوطه‌وری دیگر نیز، روند یکسانی مشابه آنچه در شکل ۱۰ آمده است، دارند.

نکته مهم در نمودارهای بازده آن است که برای همه مقادیر نسبت غوطه‌وری، مقدار بیشینه بازده الزاماً در بیشینه مقدار شدت جریان هوای تزریق شده، رخ نمی‌دهد.

نتایج محاسبه بازده برای چند نسبت مختلف غوطه‌وری در جدول ۱ ارائه شده است. اختلاف بین بازده محاسبه شده در میزان غوطه‌وری ۱۰٪ تا ۷۴٪ افزایش بازده ۳۲ درصدی را نشان می‌دهد که تاثیر قابل توجه این کمیت در کارایی پمپ هوا برآ را نشان می‌دهد. با افزایش نسبت غوطه‌وری، افزایش بازده طبق رابطه ۲ به بیش از ۳۲٪ می‌رسد.

جدول ۱- مقایسه کمی نتایج بازده در نسبت غوطه‌وری ۳۰ تا ۷۴ درصد

نسبت غوطه‌وری %	30	40	57	67	74
مقدار بازده %	10	32	38	40	42
اختلاف بازده	0%	22%	28%	30%	32%

۴-۵- بررسی اثر قطر مجرای هوای تزریقی

جهت بررسی تاثیر قطر هوای تزریقی بر افزایش کارایی پمپ هوا برآ، از دو قطر لوله هوای ورودی ۸ میلیمتر و ۵ میلیمتر استفاده شده است. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، نمودارهای شدت جریان آب در برابر شدت جریان هوا برای دو قطر لوله ورودی هوا با نسبت غوطه‌وری ۴۰٪ و ۸۲٪ نشان داده شده است.

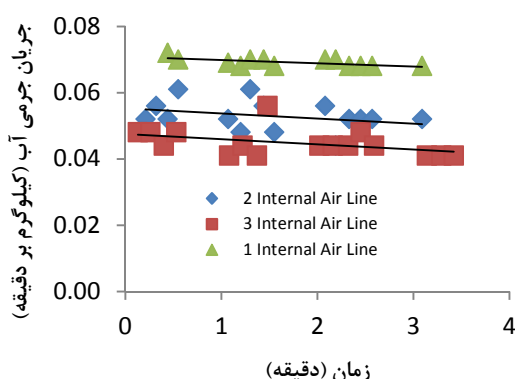
با مشاهده هر یک از نمودارهای ارائه شده ۱۱ و ۱۲ آشکار می‌شود که برای یک لوله تخلیه ثابت، در نسبت غوطه‌وری ثابت، کاهش قطر مجرای تزریقی هوا باعث افزایش در شدت جریان آب خروجی شده است. این امر را می‌توان ناشی از تاثیر کوچکتر شدن اندازه حباب‌های هوای تزریق شده در برقراری الگوی نزدیکتر به جریان اسلاگ در طول بیشتری از لوله دانست، که با توجه به نیروهای بین انواع رژیم های جریان دوفاز بین حباب ها با اشکال مختلف و سیال مایع، سبب شکل گیری مقادیر مختلفی از نیروهای درگ، غوطه‌وری و به طور کلی نیروهای بین گاز - مایع می‌شود، که در نتیجه دبی های مختلف جریانی را ایجاد می‌کند.

همچنین با بررسی همزمان نمودار شکل ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود

در این مرحله از تحقیق، تعداد مجرای ورودی هوا از یک مجرا به دو و سپس به سه مجرای هم ارتفاع و هم اندازه بر روی لوله تخلیه تغییر یافت. در این آزمایش‌ها، هر یک از سه جایگاه مجرای تزریق گاز توسط شیرهای کنترلی، مقدار هوای ورودی به لوله تخلیه را به میزان برابر تامین می‌کنند.

نمودار شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد مجراهای تزریق گاز به ازای گاز ثابت ورودی، مقدار خروجی مایع کاهش می‌یابد. در این شکل بیشترین شدت جریان مایع خروجی مربوط به یک ورودی هوا می‌باشد. کاهش دبی جرمی مایع از حدود 0.07 به مقدار 0.05 کیلوگرم بر دقیقه (کاهش در مقدار جریان خروجی نسبی مایع به میزان 40%)، بین مجرای منحصربفرد و مجرای سه‌گانه تزریق گاز، اهمیت این تحقیق و همچنین تمرکز گاز تزریقی به پمپ هوا برآ را نشان می‌دهد.

بنابر این می‌توان با مشاهدات حاصل از نتایج این بخش چنین جمع‌بندی کرد که خروجی گاز از یک مجرا که سبب شکل‌گیری توده ابتدایی متمرکزتری از گاز است، شرایط شکل‌گیری الگوی جریان اسلاگ را از ابتدای مجرای تخلیه سهولت بخشیده، عامل بهبود در میزان تخلیه مایع در پمپ هوا برآ می‌شود.

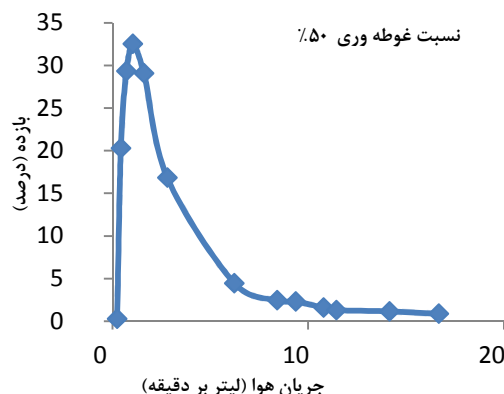


شکل ۱۳- نمودار مقایسه شدت جریان جرمی آب خروجی در طول زمان با افزایش تعداد ورودی هوا در شدت هوای تزریق شده ثابت 8 لیتر بر دقیقه

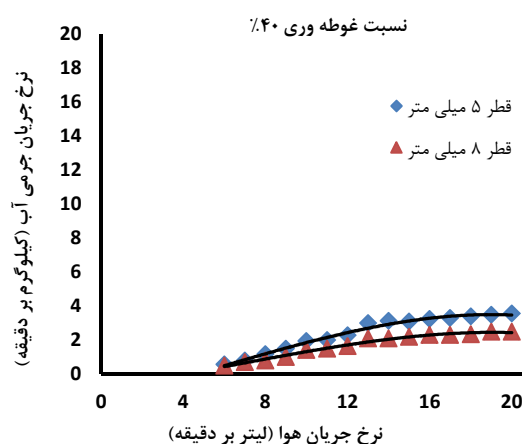
۵- نتیجه‌گیری

نمونه‌ای از پمپ هوا برآ، به منظور بررسی تأثیر الگو و نحوه تزریق گاز بر عملکرد و کارایی آن مورد تحقیق تجربی قرار گرفته است. در این تحقیق علاوه بر بررسی کیفی و کمی عوامل معمول در این دسته از پمپ‌ها نظیر مقدار گاز و نسبت غوطه‌وری، تأثیر تغییر قطر لوله در شرایط مختلف ورودی گاز و نسبت غوطه‌وری، همچنین تأثیر تعداد ورودی‌های تزریق گاز به پمپ هوا برآ بررسی شده است.

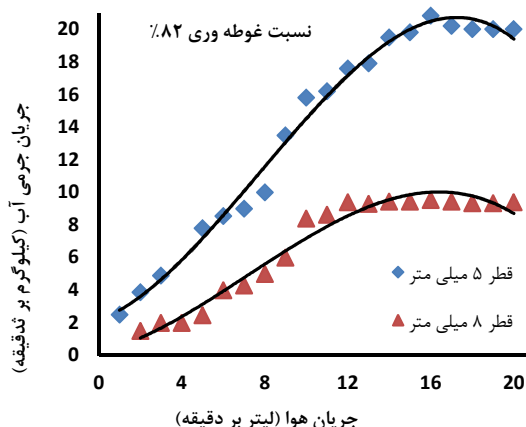
مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با ایجاد چهار رژیم جریانی اصلی حبایی، اسلاگ، چارن و حلقوی در لوله تخلیه، عملکرد مناسب این پمپ در رژیم‌های جریانی اسلاگ و اسلاگ / چارن رخ می‌دهد. عملکرد پمپ هوا برآ در رژیم جریان حبایی فقط محدود به نسبت غوطه‌وری‌های بالا است در حالی‌که رژیم‌های دیگر جریان در نسبت‌های مختلف غوطه‌وری، قادر به تخلیه مایع می‌باشند. کاهش قطر مجرای تزریق هوا در نمونه مورد آزمایش و محدوده‌های



شکل ۱۰- تغییرات بازده با شدت جریان هوا در نسبت غوطه‌وری 50% درصد



شکل ۱۱- شدت جریان هوا در برابر شدت جریان جرمی آب برای دو قطر ورودی هوای مختلف برای شدت غوطه‌وری 40%



شکل ۱۲- شدت جریان هوا در برابر شدت جریان جرمی آب برای دو قطر ورودی هوای مختلف برای نسبت غوطه‌وری 82%

۴-۶- بررسی اثر تعداد مجرای ورودی هوا

پس از مشاهده تأثیر قابل توجه اندازه مجرای تزریق گاز در پمپ هوا برآ و به منظور بررسی بیشتر تأثیر الگوی هندسی تزریق بر کارایی این پمپ، تغییر در تعداد مجرای تزریق هوا مورد بررسی قرار گرفت.

Simulation and Optimization of airlift pump, sharif journal, (In Persian), pp.111-118, 2010.

[18] Kouremenos D. A. and Staicos J., Performance of a small air-lift pump, Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 6, pp. 217-222, 1985.

[19] Hewitt G.F. and Roberts Studies of two-phase flow patterns by simultaneous x-ray and flash photography. AERE-M 2159, HMSO.1969.

[20] Nicklin D.J., The air lift pump theory and optimization. Trans. Inst. Chem ENG, 1963.

هوای تزریق شده، بسته به نسبت غوطه وری، باعث افزایش شدت جریان خروجی مایع بین ۷۵٪ تا ۸۹٪ شده است. به علاوه با افزایش نسبت غوطه وری تاثیر کاهش قطر هوای ورودی بر افزایش شدت آب خروجی، افزایش می‌یابد. یعنی کاهش قطر ورودی هوا، باعث افزایش شدت جریان مایع خروجی شده است.

همچنین افزایش تعداد ورودی هوا به پمپ، از ۱ به ۳ مجرا در نمونه مورد آزمایش، میزان مایع خروجی را تا ۴۰٪ کاهش داده است. نتایج اخیر نشان می‌دهد که ایجاد شرایط مناسبتر برای دستیابی سریع جریان دوفاز به الگوی اسلاگ، از جمله ایجاد تمرکز هندسی تزریق از طریق تعداد مجرای کمتر و یا تزریق گاز توسط مجرای با دهانه تنگتر، منجر به بهبود عملکرد پمپ هوا برآ در محدوده آزمایشهای انجام شده می‌شود.

۶- منابع

- [1] Bergeles A. E., Flow of gas-liquid mixture, Chem. Eng., pp. 104-106. 1949.
- [2] Stepanoff A. J., Thermodynamic theory of the air lift pump, ASME Transactions, Vol. 51, pp. 49-55, 1929.
- [3] F. Pickert, The theory of the air-lift pump. Engineering, Vol. 34, pp. 19-20, 1932.
- [4] Stenning A. H., Martin C. B., An analytical and experimental study of air lift pump performance. J. Eng. Power, Trans. ASME 90, pp 106-110, 1968.
- [5] Delano A. D., Design Analysis of the Einstein Refrigeration Cycle. PhD Dissertation, Georgia Institute of Technology, 1998.
- [6] Shi D., Harkisanka A., Quek C., CMAC with fuzzy logic reasoning. Proceedings of the 11th International Conference on Neural Information Processing, pp. 898-903. 2004.
- [7] Awari G. K., Ardhapurkar P. M., Wakde D. G., Bhuyar L.B., Performance analysis of air-lift pump design. J. Mech. Eng. Sci. 218 C, 1155-1161, 2004.
- [8] Samaras V.C., Margaritis D.P., Two-phase flow regime map for air-lift pump vertical upward gas-liquid flow. Int. J. Multiph. Flow 31, 757-766, 2005.
- [9] Kassab S. Z., H. A. Kandil, Warda, W.H. Ahmed, Experimental and analytical investigations of airlift pumps, Chemical Engineering Journal, Vol 131, pp. 273-28, 2007.
- [10] Sadek Z., Kassab A., Hamdy Kandi and Warda H. A., Air-lift pumps characteristics under two-phase flow conditions, International Journal of Heat and Fluid Flow 30, pp.88-98, 2009.
- [11] Cachard F. De and Delhay J. M., A slug-churn mo for small diameter airlift pumps, International Journal of Multiphase Flow, 22(4), pp. 627-649, 1996.
- [12] M.Darbandi, M.H. Saidi, and P.Hana_zadeh, numerical approach to simulate two-phase ow in airlift pumps, The International Conference on Computational Methods, ICMM2007, Japan, April 5-7, 2007.
- [13] Kassab S. Z., Kandil, H.A. Warda, and W.H. Ahmedb, Experimental and analytical investigations of airlift pumps operating in three-phase flow, Chemical Engineering Journal, 131, pp. 273-281, 2007.
- [14] Hana_zadeh P., and Saidi M.H., Integral solution for gravity driven gas-liquid two phase flow, the 11th Fluid Dynamics Conference, Tehran, Iran, May 28-30, 2008.
- [15] P. Hanafizadeh, M. H. Saidi, Simulation of a Gas-Liquid Two Phase Flow in a Vertical Pipe: Analytical-Numerical Approach, Aerospace Mechanics Journal (In Persian), vol 4, pp.33-43, 2010.
- [16] P. Hanafizadeh, S. Ghanbarzadeh, M.H. Saidi, Visual technique for detection of gas-liquid two-phase flow regime in the airlift pump, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol 75, pp. 327-335, 2011.
- [17] shams h., Hanafizadeh P., Saidi M. H., Numerical