

Research Article

Agricultural Engineering, 47(3) (2024) 375-389

ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2024.47124.1732

ISSN (E): 2588-5944

Design, Construction and Performance Evaluation of a Novel Combinatorial Compressed Air Driven Water Pump

S. Saki ¹, M. E. Khorasani Ferdavani ^{2*}, S. M. Safieddin Ardebili ³ and A. Soltani Mohammadi ⁴

1. Former M.Sc. in Mechanic of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
3. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
4. Professor of Irrigation and Drainage Department, Faculty of water and environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Received: 9 June 2024 Accepted: 6 August 2024 *Corresponding Author: e.khorasani@scu.ac.ir

Abstract

Introduction: Compressed air is a versatile energy source used in various applications. However, pumping water with compressed air requires specific designs. Various designs have been proposed for pumping water using compressed air. Some of these designs include Air jet pumps, air-lift pumps, diaphragm pumps, and hydro-pneumatic pumps (discrete flow). The hydro-pneumatic pump is composed of a chamber with two unidirectional valves for charge and discharge, separated by a well. Additionally, it includes an internal tube connected from the top to the outlet unidirectional valve. As compressed air enters the chamber, it applies pressure on the water surface within the chamber, resulting in the closing of the intake valve and the opening of the outlet valve, facilitating the upward pumping of water through the internal tube. Studies have been carried out in the field of jet pumps and air-lift pumps. However, the notion of enhancing flow rate and efficiency by integrating the pumping mechanisms of these pumps gave rise to the original idea of developing a hybrid water pump with a compressed air driver. The primary goal was to approach the efficiency of a hydro-pneumatic pump and simplify the design, allowing water pumping without needing for sensors or control systems.

Materials and Methods: To assess the compressed air water pump and compare its performance with a hydro-pneumatic pump, a prototype with similar dimensions was constructed. By turning on or off and combining three compressed air nozzles within the pump structure, it was possible to operate the combinatorial compressed air pump in four different modes. During field experiments, the performance, which included measuring input air pressure, flow rate, and water pumping height, was measured. Additionally, the efficiency of the combinatorial compressed air pump was calculated under experimental conditions. Field experiments was conducted using a factorial design in randomized complete blocks. Treated variables included immersion depth (4 levels), inlet air pressure (6 levels), pump types and their working modes (5 levels). Discharge flow rates and water pumping height were measured in four replications. At post processing,



pumping efficiency calculated. Analysis of variance and post-hoc tests were conducted to analyze the significant effects of treatment variables and their interactions to identify the best level for each treatment across different levels of other treatments, interaction slicing was employed. The results were presented in charts and tables.

Results: The variance analysis revealed a significant difference at 1% probability level among pump types, immersion depth, input air pressure, and their interactions on water pump flow rate. Increasing submergence depth led to higher flow rates in the hydro-pneumatic pump, Combinatorial pneumatic pump, Bubble pump, Bubble and Airlift combined pump, and air-lift pump. Additionally, raising input air flow resulted in increased water pumping rates for all types of pumps. The hydro-pneumatic pump exhibited higher flow rates compared to other pumps, attributed to its positive displacement structure. The flow rate in all pumps increased with higher input air pressure due to the increase in air flow. The variance analysis on pump efficiency showed significant differences at 1% probability level in input air pressure levels, Immersion depth, pump type, and their interactions. With increased Immersion depth, pump efficiency rose in the following order: combinatorial pneumatic pump, hydro-pneumatic pump, bubble pump, bubble and airlift combined pump and air-lift pump, and air-lift pump. The combinatorial pneumatic pump showed the most positive impact of immersion depth on efficiency. Immersion depth, inlet air pressure, and pump type significantly impacted discharge rate and pump efficiency. With increased immersion depth and air pressure, discharge and efficiency rose for all pump models and operating modes. The hydro-pneumatic pump achieved higher efficiency and discharge due to its different structure. At 2 m immersion depth, the best performance among all pump models and modes was observed: airlift pump (10.3% efficiency), bubble pump (20.8%), bubble and airlift combined pump (19.3%), pneumatic combined pump (27.1%), and hydro-pneumatic pump (25.2%).

Discussion: While the hydro-pneumatic pump offered superior performance, the compressed air pump's simpler structure and lack of electronic control circuitry present advantages. Future research could explore optimizing the compressed air pump design for improved efficiency while maintaining its structural simplicity. Due to structural differences, the hydro-pneumatic pump exhibits significantly higher efficiency (approximately 54%). It was expected that this efficiency would be maintained with increasing pressure, but due to the limited immersion depth in the experiments and dimensional mismatch of the pump with high input air pressure, we observed a decrease in efficiency at higher pressures. This indicates that for each submergence depth and pump head, there is an optimal pressure that the pump dimensions should be designed to suit.

Keywords: *Water pump, pneumatic combined pump, hydro-pneumatic pump, air-lift pump, bubble pump.*

طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد یک نمونه پمپ آب ترکیبی با محرک هوای فشرده

سارا ساکی^۱، محمد اسماعیل خراسانی فردوانی^{۲*}، سید محمد صفی الدین اردبیلی^۳ و امیر سلطانی محمدی^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۴- استاد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

در این تحقیق یک پمپ آب ترکیبی با محرک هوای فشرده طراحی و ساخته شد که بدون نیاز به حسگر سنجش ارتفاع آب و شیرهای نیوماتیک (مشابه پمپ هیدرونیوماتیک) قادر به پمپاژ آب باشد. پمپ مذکور با پمپ هیدرونیوماتیک از نظر دبی و راندمان مقایسه شد. آزمایشهای میدانی در قالب طرح فاکتوریل در بلوکهای کامل تصادفی انجام و دبی و راندمان پمپاژ آب به عنوان متغیرهای وابسته بررسی شدند. متغیرهای مستقل مورد بررسی شامل عمق غوطه‌وری (چهار سطح)، فشار هوای ورودی (شش سطح)، نوع و مد کاری پمپ (پنج سطح) بودند. آزمایشها در چهار تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که نوع پمپ، عمق غوطه‌وری و فشار هوای ورودی به طور معنی‌داری بر دبی و راندمان پمپ آب تأثیر می‌گذارند. با افزایش عمق غوطه‌وری و فشار هوای ورودی، دبی و راندمان پمپها در هر پنج مدل و مد کاری افزایش یافت. پمپ هیدرونیوماتیک به دلیل ساختار متفاوت خود، دبی بالاتری نسبت به پمپ هوای فشرده ترکیبی داشت. در بین پمپهای مورد بررسی، پمپ هوای فشرده ترکیبی در عمق غوطه‌وری ۲ متر بهترین عملکرد را نشان داد. راندمان این پمپ در حالت‌های مختلف به ترتیب ۱۰/۳ درصد برای حالت عملکرد به صورت پمپ هوارانش، ۲۰/۸ درصد برای پمپ جوششی، ۱۹/۳ درصد برای پمپ ترکیبی جوششی-هوارانش، ۲۷/۱ درصد برای پمپ ترکیبی سه‌حالتی و ۲۵/۲ درصد برای پمپ هیدرونیوماتیک بود. با توجه به راندمان نسی بالاتر، ساختار ساده‌تر و عدم نیاز به مدار الکترونیکی برای راه‌اندازی، پمپ آب با محرک هوای فشرده ترکیبی سه‌حالتی به عنوان روش بهینه برای پمپاژ آب با هوای فشرده انتخاب شد. پمپ ترکیبی سه‌حالتی با عملکرد مطلوب، ساختار ساده و عدم نیاز به تجهیزات الکترونیکی، روشی کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای پمپاژ آب با هوای فشرده ارائه می‌دهد.

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

کلمات کلیدی:

پمپ آب،

پمپ هوای فشرده ترکیبی،

پمپ هیدرونیوماتیک،

پمپ هوارانش،

پمپ جوششی

* عهده دار مکاتبات

Email: e.khorasani@scu.ac.ir

مقدمه

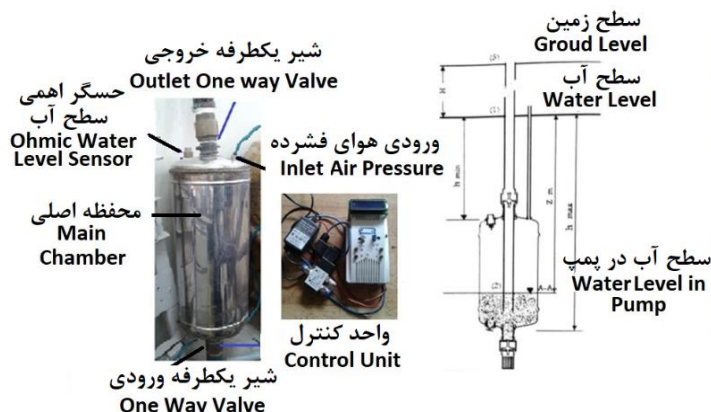
طبیعت، منابع آبی فراوانی را به ارمغان آورده است، اما رشد جمعیت، افزایش تقاضا و تغییر اقلیم، فشار مضاعفی بر این منابع حیاتی وارد می‌کنند. در مناطق روستایی، آب عمدتاً از سفره‌های زیرزمینی استخراج می‌شود. روش‌های سنتی مانند استفاده از نیروی دست یا تلمبه‌های دستی محدود هستند، به همین دلیل موتورهای دیزلی رواج یافته‌اند. گرچه این موتورها حجم آب استخراج شده را افزایش می‌دهند، اما استفاده از سوخت‌های فسیلی، پیامدهای زیست‌محیطی منفی مانند آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به همراه دارد (۳). جهت پمپاژ آب و سیالات مختلف با هوای فشرده طرح‌های مختلفی ارائه شده است. از مهمترین این طرح‌ها می‌توان به پمپ‌های جوششی، پمپ‌های هوارانش، پمپ دیافراگمی و پمپ هیدرونیوماتیک (جریان گسسته) اشاره نمود. مبانی تجربی و عملکرد پمپ‌های جوششی و هوارانش از حدود سال ۱۸۸۲ معرفی شد، لیکن استفاده عمده و گسترده‌ای از آن تا میانه قرن بیستم گزارش نشده است. تحقیقات زیادی در زمینه بدست آوردن پارامترهای عملکردی و ساختارهای مختلف پمپ‌های جوششی هم به صورت شبیه سازی و هم تحقیقات عملی انجام شده است. عمر و صالح (۲۰۲۳) تمام تحقیقات مرتبط قبلی درباره پمپ‌های جوششی، از جمله تحقیقات نظری، عددی و کارهای عملی را به تفصیل مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج ایشان، پمپ‌های جوششی برای عملکرد بهینه در هر ترکیب خاص از ویژگی‌های طراحی یا عملیاتی به شرایط خاصی نیاز دارد. همچنین ایشان نتیجه گرفتند که مدل‌سازی پمپ‌های جوششی در حالات مختلف جریانی هنوز به سطح کافی درک نشده و به عنوان یک دستگاه پمپاژ، عملکرد پمپ‌های جوششی به طور کامل شناخته شده نیست. به نظر می‌رسد که حوزه مطالعات نظری و آزمایشگاهی درباره منحنی‌های ویژگی عملیاتی پمپ‌های جوششی و انتقال جریان می‌تواند به عنوان

قدمی به جلو در درک بهتر از عملکرد صنعتی، کنترل و ارتقاء پمپ‌های جوششی در نظر گرفته شود (۱۰). در مقایسه با سایر پمپ‌ها، ویژگی خاص پمپ آب با هوای فشرده ترکیبی، سادگی مکانیکی آن و امکان استفاده از آن در محیط‌های خورنده و در حضور ذرات جامد می‌باشد (۱). این پمپ بسیار ساده بوده و در نتیجه به عملیات نگهداری زیادی نیاز ندارد. طرز عمل این نوع پمپ مطابق شکل (۲) به این صورت است که قسمتی از لوله رانش در آب چاه فرو می‌رود، هوای فشرده درون لوله دو جداره، روی سطح آب فشار آورده و آنقدر سطح آب را پائین می‌برد تا هوا وارد لوله رانش شده و با آب مخلوط گردد. در نتیجه فشار در دهانه لوله رانش به طور موقت کم شده و سطح آب دوباره بالا می‌رود و قسمتی از لوله رانش را پر می‌کند. جریان مداوم هوا، فشار را در لوله دو جداره مجدداً افزایش داده، این عمل به طور مداوم تکرار می‌شود، بگونه‌ای که آب به طور یکنواخت ولی همراه با هوا به سمت سطح، بالا می‌آید (۶). از مزایای این شیوه پمپاژ سادگی آن می‌باشد. در این دستگاه هیچ قطعه متحرکی در چاه وجود ندارد، جریان هوا مداوم است لذا نیازی به شیر قطع و وصل نبوده و به همین دلیل هزینه سرویس و تعمیر این دستگاه بسیار کم است. مشکلات آب بندی ندارد و برای پمپاژ لجن، سیالات آلوده و همراه با ذرات معلق کاربرد دارد. نوع دیگر پمپ دیافراگمی است که در آن دو دیافراگم بوسیله یک سیلندر نیوماتیک به هم متصل هستند به نحوی که هر کدام بین دو دریچه یکطرفه قرار گرفته‌اند. با ورود هوای فشرده به سیلندر اتصالی دو دیافراگم در وسط، به طور متناوب سیلندر به چپ و راست حرکت کرده و در سمت دیگر دیافراگم‌ها، آب بطور پیوسته پمپاژ می‌شود. طرح این پمپ از نوع جریان گسسته بوده، راندمان بالایی داشته، لیکن طرح پمپ پیچیده و هزینه آن بالا است این مشکل تا حدود زیادی با طراحی پمپ هیدرونیوماتیک جریان گسسته که با استفاده از هوای فشرده عمل پمپاژ را انجام دهد حل شد. خراسانی و

پمپ به همراه واحد کنترل و نمونه ساخته شده آن نشان داده شده است (۷).

به منظور ارزیابی عملکرد تزریق هوا به صورت تک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای تحقیقی روی یک نوع پمپ آب با محرک هوای فشرده مشابه انجام شده است. نتایج نشان داد که تزریق هوای فشرده به صورت چند مرحله‌ای راندمان پمپاژ را افزایش می‌دهد (۸). طی تحقیقی دیگر اثر نسبت غوطه‌وری و نحوه تزریق هوا در عملکرد پمپ هوارانش با سه نوع تزریق هوا در پنج سطح افزایش عمق غوطه‌وری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش عمق غوطه‌وری برای جلوگیری از کاهش پمپاژ آب، به تزریق هوای بیشتری نیاز است. مطابق نتایج جریان هوا با نازلی به قطر ۴ میلی‌متر به بیشترین عملکرد منجر شد (۱۱). یک نمونه پمپ هوارانش (ترکیبی از پمپ هوارانش و جوششی) توسط شرکت گیسر ارائه شد (۵). این پمپ برای پمپاژ آب و فاضلاب در تصفیه خانه‌ها و استخرهای پرورش ماهی به صورت مستغرق و یا نصب خارجی در کنار مخازن در چند اندازه مختلف ارائه شده بود. ایده پمپ آب هوای فشرده ترکیبی بر این استوار شد که با ترکیب دو نوع پمپ آب جوششی و هوارانش می‌توان به دبی خروجی و راندمان بالاتری نسبت به هر یک از پمپها به تنهایی دست یافت. از این نوع پمپ می‌توان برای پمپاژ مایعاتی چون آب، ترکیبات صنعتی سیال خورنده و قابل اشتعال در محیطهایی که به برق و یا پمپ‌های الکتریکی معمول دسترسی نیست و یا استفاده از موتورهای الکتریکی خطر آفرین است، استفاده نمود. همچنین بدلیل عدم نیاز پمپ مذکور به پره یا پیستون در تماس با سیال برای پمپاژ ترکیبات سیال خورنده و ساینده نیز مناسب است. این پمپ قادر است با استفاده از هوای فشرده به طور خودکار آب را پمپاژ نماید. به دلیل انعطاف پذیری سیستم انتقال قدرت (هوای فشرده) یکی از کاربردهای آن می‌تواند برای پمپاژ آب از چاه‌های نیمه عمیق در مناطق دور از شبکه برق و به عنوان جایگزینی برای پمپهای پیستونی به همراه توربین‌های بادی آبکش (پر پره، ساونوس و یا نوع داریوس) باشد. برای بررسی اثر هندسه مقطع لوله بالا رونده

همکاران^۱ با هدف استفاده با توربین‌های بادی آبکش طرح این پمپ را با ارائه راهکارهایی جهت خودکار سازی عمل پمپاژ آن باز طراحی و نمونه سازی نمود. طرح مذکور با عنوان پمپ هیدرونیوماتیک صنعتی - کشاورزی به ثبت رسیده است (۷). این پمپ برای پمپاژ به فشار هوا در حد فشار استاتیک ستون آب متناسب با ارتفاع پمپاژ نیاز دارد. طبق نتایج شبیه سازی انجام شده روی کارایی این پمپ با توجه به محدودیت قدرت قابل حصول از توربین‌های بادی می‌توان از این روش برای پمپاژ تا عمقی بین ۵ تا ۴۰ متر (معادل فشار هوایی در حدود ۰/۵ تا ۴ اتمسفر) با نیروی راه انداز توربین بادی استفاده نمود (۶). این پمپ مطابق شکل (۱) از یک محفظه که بوسیله دو عدد سوپاپ یکطرفه ورودی و خروجی از چاه جدا شده تشکیل شده است. همچنین دارای یک لوله درونی است که از بالا به سوپاپ یکطرفه خروجی متصل است. هوای فشرده در هنگام وارد شدن به محفظه بر سطح آب موجود در محفظه فشار وارد کرده که این عمل باعث بسته شدن سوپاپ ورودی در پایین و باز شدن سوپاپ خروجی پمپ در بالا می‌شود، در نتیجه آب از طریق لوله درونی به طرف بالا پمپاژ می‌گردد. قبل از آنکه سطح آب محفظه آنقدر پائین بیاید که هوا وارد لوله درونی شود، بایستی جریان هوای فشرده قطع شده و هوای محبوس در محفظه تخلیه گردد. پس از تخلیه هوای محفظه، فشار ناشی از ارتفاع آب بالای محفظه باعث پر شدن مجدد محفظه از آب می‌گردد. موضوع مهم در پمپ جریان گسسته، قطع و وصل به موقع و به مدت مشخص هوای فشرده می‌باشد. این کار به روشهای مختلف می‌تواند انجام شود. در طرح مذکور از یک کنترلر الکترونیکی به همراه حسگر سطح آب از نوع اهمی برای کنترل سطح مایع در محفظه پمپ و شیرهای نیوماتیک برقی برای قطع و وصل هوای فشرده استفاده گردید. در شکل (۱) نمای برش خورده از این



شکل (۱) پمپ هیدرونیوماتیک، مدار کنترل و مقطع برش خورده پمپ [7]

Figure. (1) The hydro-pneumatic pump, control unit, and pump cross-section [7]

شده و با ساده تر نمودن طراحی، بدون نیاز به حسگرها و سامانه کنترلی قادر به پمپاژ آب باشد. در ادامه ساختار طراحی پمپ، پارامتر و روش ارزیابی شرح داده شده است.

مواد و روش ها

در راستای ارزیابی این پمپ و مقایسه عملکرد آن نسبت به پمپ طراحی شده قبلی (هیدرونیوماتیک) یک نمونه مطابق طرح ارائه شده در شکل (۲) ساخته شد. مراحل ساخت و آماده سازی پمپ در کارگاه گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه شهید چمران اهواز و ارزیابی ها در استخر تحقیقاتی گروه آبیاری و زهکشی، واقع در دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. اساس کار پمپ بر تزریق هوای فشرده به پایین یک لوله مستغرق در آب استوار است. هوای تزریق شده ضمن حرکت به سمت بالا، چگالی مایع درون لوله را کاهش داده و در نتیجه باعث حرکت مایع و ذرات درون آن به سمت بالا می شود، به این نوع پمپ، پمپ جوششی می گویند. در طی آزمایش ها، با باز نمودن شیر کنترل جریان نازل شماره دو پمپ در این مد کاری قرار می گرفت. این نوع پمپ در عین سادگی دارای راندمان کمی بوده و به عمق غوطه وری قابل توجهی به نسبت ارتفاع پمپاژ نیاز دارد. نوآوری پمپ حاضر به استفاده از یک طرح خاص مطابق شکل (۲) شامل یک لوله دوجداره بجای لوله ساده و تزریق هوای فشرده به بالای جداره دوم (نازل شماره یک) علاوه بر تزریق در انتهای لوله وسط (نازل شماره دو) استوار است. لوله بیرونی (۷) از بالا بسته و از پایین باز است که در نتیجه یک فضای بسته در پیرامون لوله

پمپ جوششی، یک مدل عددی توسعه داده شده است. طبق نتایج افزایش ناگهانی قطر می تواند باعث افزایش راندمان و دیبی شود (۴). به منظور تعیین تأثیر عمق غوطه وری، جریان هوا و خواص فیزیکی ذرات مانند شکل، اندازه و چگالی بر سرعت عمودی ذره، آزمایش های تجربی روی یک پمپ جوششی انجام شد. طبق نتایج با جریان هوای یکسان، حداکثر سرعت ذرات در نسبت غوطه وری نزدیک به ۰/۸۹ بدست آمد (۲). به منظور بررسی ویژگی های هیدرولیکی و جریان دو فازی گاز-مایع در داخل یک پمپ هوا رانش، تأثیر شیوه های مختلف ورود هوا و قطر لوله بالا بر بر راندمان پمپ آب نیوماتیکی ارزیابی شده است. در این تحقیق الگوی جریان دو فازی هوا-آب در لوله بالا بر و ویژگی های حرکت جابج در نازل با استفاده از دوربین سرعت بالا به دست آمد. با تحلیل نظری، مدل تئوری پمپ نیوماتیکی استخراج شد. نتایج تجربی مدل تئوری را تایید کرد. نتایج نشان داد که با ثابت بودن نسبت غوطه وری، با کاهش قطر نازل ورودی هوا راندمان پمپ کاهش یافت. در همان نسبت غوطه وری، هر چه قطر لوله بالا بر کوچکتر باشد، نرخ جریان نهایی مایع بالا بر کمتر و مقدار اوج راندمان بالا بر بیشتر می شود (۱۲). با توجه به مرور منابع مشخص شد که تحقیقاتی در زمینه پمپ های جوششی و هوا رانش انجام شده است. لیکن این ایده که با ترکیب مکانیزم پمپاژ این پمپ ها بتوان به دیبی و راندمان بالاتری دست یافت، ایده اولیه طراحی و ساخت یک پمپ آب ترکیبی با محرک هوای فشرده بود به نحوی که تا حد امکان راندمان به پمپ هیدرونیوماتیک نزدیک

سانتی‌متری درون یکدیگر قرار گرفته و آب بندی شدند. انتهای لوله ۳/۷۵ سانتی متری توسط ورق گالوانیزه کاملاً بسته و آب بندی شد. یک رابط در سر لوله مرکزی به منظور راحتی در اتصال لوله پمپاژ استفاده شد.

یکی از معیارهای قابل استفاده در مقایسه پمپ ها راندمان یا بازده پمپ است. این معیار بیانگر میزان اتلاف انرژی در عمل پمپاژ می باشد. هرچه راندمان پمپ بالاتر باشد، اتلاف انرژی کمتری صورت گرفته است. معمولاً راندمان پمپ (η) را به صورت: نسبت انرژی تحویل داده شده به سیال، به انرژی مصرفی پمپ بیان می کنند [9].

$$\eta = \frac{\rho g h Q_1 \rho_w}{P_a Q_a \rho_a} \quad (1)$$

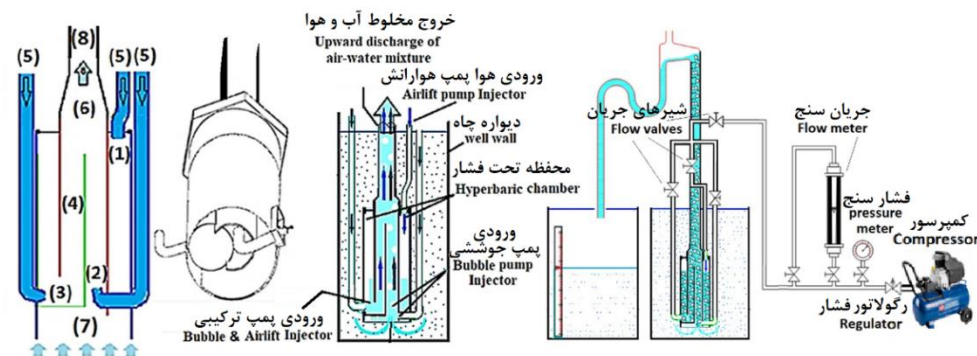
در این رابطه Q_1 دبی خروجی آب (مترمکعب بر ساعت)، Q_a دبی ورودی هوا (مترمکعب بر ساعت)، ρ_a چگالی هوا (کیلوگرم بر مترمکعب)، ρ_w چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، h ارتفاع پمپاژ و P_a فشار هوای ورودی است.

به منظور ارزیابی پمپ در مدهای کاری مختلف (چهار مد کاری) و مقایسه عملکرد آن نسبت به پمپ طراحی شده قبلی (هیدرونیوماتیک) در شرایط فشار (در شش سطح ۱ الی ۶ اتمسفر) و عمق غوطه‌وری (در چهار سطح ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ متر) مختلف از طرح فاکتوریل در قالب بلوک کاملاً تصادفی با چهار تکرار استفاده و تجزیه و تحلیل نتایج با نرم افزار SAS V 9.2 انجام شد. همچنین برای رسم نمودارها از نرم افزار EXCEL V2016 استفاده شد.

نتایج و بحث

طبق نتایج تحلیل تجزیه واریانس طرح آزمایش (جدول ۱)، اختلاف معنی دار در سطح احتمال یک درصد بین نوع پمپ، عمق غوطه‌وری، فشار هوای ورودی و اثرات متقابل آنها بر دبی پمپ آب مشاهده شد. به منظور مشخص نمودن بهترین سطح هر یک از تیمارها در سطوح مختلف تیمار دیگر، با اجرای دستور slice در نرم افزار SAS از روش برش دهی اثرات متقابل استفاده شد. نتایج در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده است.

مرکزی (۶) ایجاد می کند. با این تغییر، هوای فشرده تزریقی به بالای این فضای بسته باعث اعمال فشار به سطح آب در لوله دو جداره و پایین راندن آب محبوس در آن می شود و عملاً ساختار پمپ، ترکیبی از یک پمپ جوششی و یک پمپ هوارانش (مشابه پمپ هیدرونیوماتیک صنعتی - کشاورزی) خواهد بود. در این حالت به دلیل اینکه ورودی پایین لوله مرکزی کوتاه تر از لوله پیرامونی است، آب و به طور کلی سیال مجبور است به لوله مرکزی (۶) وارد شود و با کمک نازل هوای نصب شده در این لوله شماره دو و کاهش چگالی به سمت بالا حرکت می کند. این عمل تا زمانی که سطح آب لوله دو جداره به پایین لوله مرکزی برسد ادامه می یابد. با کاهش سطح آب و رسیدن آن به لبه این لوله، هوای محبوس شده در بالای آن به طور ناگهانی در لوله مرکزی و در زیر ستون آب در حال صعود تخلیه شده و فشار درون محفظه دو جداره به یکباره افت می کند که باعث بالا آمدن مجدد آب در آن می شود. تخلیه ناگهانی هوای فشرده محبوس به درون لوله مرکزی به صعود بهتر آب در لوله خروجی پمپ (۸) کمک می کند. علاوه بر این دو نازل هوای فشرده، بخشی از لوله مرکزی توسط یک محفظه لوله مانند (۴) که از پایین بسته و از بالا باز است، جدا شده که یک نازل (۳) هم در این بخش قرار می گیرد، نازل هوای فشرده این بخش به دلیل ساختار خاص آن، هم در لوله دو جداره (۷) و هم در لوله مرکزی (۶) هوای فشرده را تخلیه نموده که عملاً ترکیبی از دو مد کاری قبلی را ایجاد می کند. در شکل (۲) ساختار داخلی پمپ به صورت یک مقطع برش عرضی نشان داده شده است. چون پمپ هیدرونیوماتیک (شکل ۱) از قبل در دسترس بود، به منظور ایجاد امکان مقایسه مناسب پمپ هوای فشرده ترکیبی در ابعادی مشابه پمپ هیدرونیوماتیک ساخته شد. بدنه اصلی پمپ از یک لوله فولاد گالوانیزه به قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۵۵ سانتی متر ساخته شد. ابتدا و انتهای لوله رزوه شد. دو لوله گالوانیزه به قطر ۵ سانتی متر و ارتفاع ۵۵ سانتی متر به صورت تو در تو مطابق طرح به عنوان لوله مرکزی در بدنه اصلی جایگذاری شدند. لوله خروجی از پمپ از بالا به این لوله از طریق اتصال پلی اتیلن رزوه شد. لوله کناری به قطر ۳/۷۵ و ارتفاع ۳۹ سانتی متر برش خورد و دو لوله با قطر ۵ و ۳/۷۵



شکل (۲) اجزای ساختمانی پمپ آب هوای فشرده ترکیبی، نحوه اتصال شیرهای وماتیکی و استخر محل آزمایش
Figure (2) Structural components of the combinatorial compressed air driven water pump, connection of pneumatic valves, and test pool

جدول (۱) نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای اعمال شده بر دبی پمپ

Table (1) ANOVA results for the effect of treatments on pump discharge

شاخص P	F آماره	میانگین مربعات خطا	درجه آزادی	منبع
P-value	F	MS	df	Source
0.182	0.34	0.001	3	تکرار Repeat
0	1164.78**	136.6	4	نوع پمپ (a) Pump type (a)
0	752.65**	4.9	3	عمق غوطه وری (b) Immersion depth (b)
0	73.3**	5.3	5	فشار (c) Pressure (c)
0	23.26**	1.92	12	(b) × (a)
0	31.03**	0.65	20	(c) × (a)
0	89.57**	0.17	15	(c) × (b)
0	6.19**	6.19	60	(c) × (b) × (a)
		0	0.092	خطا Error
CV=4.7	R ² =0.996		479	کل Total

ns, * و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می باشد.

هورانش افزایش یافت. این نتیجه با نتایج زو و همکاران^۱ (۲۰۲۰) همخوانی داشت. در تحقیق ایشان هم با افزایش عمق غوطه وری از ۰/۳ تا ۰/۹ متر، دبی خروجی پمپ افزایش یافت (۱۲).

همچنین با افزایش جریان هوای ورودی به پمپ، دبی پمپاژ برای همه پمپهای هورانش و جوششی و ترکیبی افزایش نشان داد. طبق نتایج، پمپ هیدرونیوماتیک نسبت به

نتایج برشدهی (جدول ۲) نشان داد که بین سطوح عمق غوطه وری در همه انواع پمپ (هورانش، جوششی، ترکیبی جوششی، هورانش و ترکیبی از هر سه شیر نیوماتیک و پمپ هیدرونیوماتیک) اختلاف معنی داری در سطح احتمال یک درصد وجود دارد. نتایج مقایسه میانگین سطوح مختلف عمق غوطه وری در هر یک از سطوح نوع پمپ در شکل (۳) نشان داده شده است. با افزایش عمق غوطه وری دبی پمپ به ترتیب در پمپ هیدرونیوماتیک، پمپ ترکیبی نیوماتیک، جوششی و ترکیبی جوششی و

رتبه های بعدی قرار داشتند. بهترین عملکرد در همه پمپ ها در عمق غوطه وری دو متر مشاهده شد، با این وجود پمپ هوای فشرده ترکیبی به دلیل ساختار ساده تر و عدم نیاز به مدار الکترونیکی جهت راه اندازی دارای مزیت بود.

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای اعمال شده بر راندمان پمپ مطابق جدول (۴) نشان داد که راندمان در سطوح فشار هوای ورودی، عمق غوطه وری، نوع پمپ و اثرات متقابل آن دارای اختلاف معنی داری در سطح احتمال یک درصد است.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس برش دهی اثرات متقابل عمق غوطه وری و نوع پمپ روی راندمان مطابق جدول (۵) نشان داد که در هر یک از انواع پمپ های مورد آزمایش، از نظر راندمان بین سطوح عمق غوطه وری مختلف در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی داری وجود دارد.

سایر پمپ ها دبی بیشتری داشت که به دلیل ساختار جابجایی مثبت آن قابل پیش بینی بود.

مطابق جدول (۳) نتایج حاصل از تجزیه واریانس برش دهی اثرات متقابل نشان داد که بین سطوح مختلف فشار هوای ورودی در همه انواع پمپ از نظر دبی آب خروجی اختلاف معنی داری در سطح احتمال یک درصد وجود دارد.

نتایج مقایسه میانگین سطوح مختلف فشار هوای ورودی در هر یک از سطوح نوع پمپ در شکل (۴) نشان داده شده است. در همه پمپ ها با افزایش فشار هوای ورودی، دبی افزایش می یابد. این نتیجه به دلیل افزایش جریان هوای ورودی با افزایش فشار منطبق است و این نتیجه با تحقیقات عنانی (۲۰۲۰)، زو (۲۰۲۰) و کارونیکارن (۲۰۱۷) منطبق است (۲،۵،۱۲).

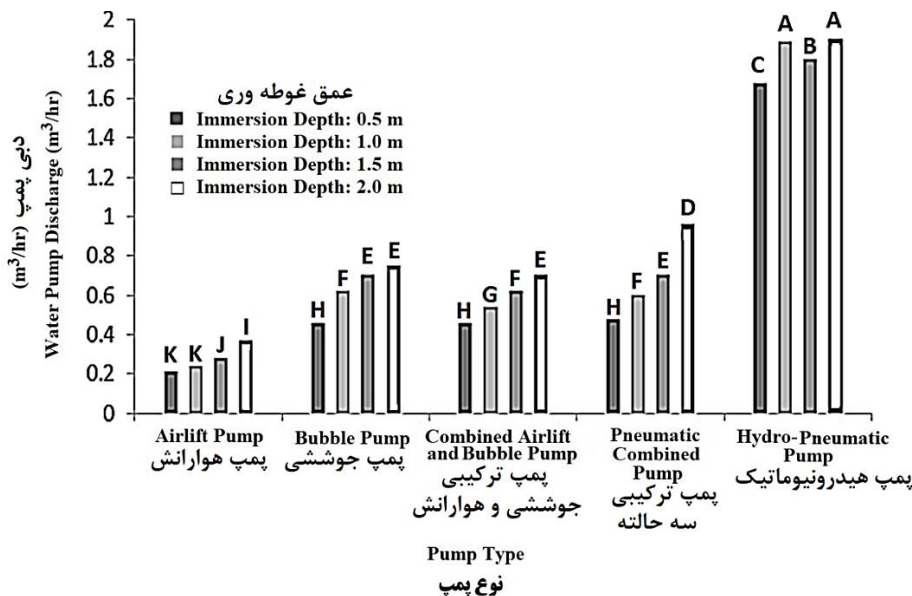
پمپ هیدرونیوماتیک در شرایط یکسان دبی بیشتری داشت. بعد از آن به ترتیب پمپ جوششی، پمپ ترکیبی سه حالت، پمپ ترکیبی جوششی و هوارانش و هوارانش در

جدول (۲) نتیجه برش دهی اثرات متقابل نوع پمپ (a) در عمق غوطه وری (b) بر دبی پمپ آب

Table (2) Slice test results for the interaction effect of pump type (a) and immersion depth (b) on water pump discharge

آماره F	میانگین مربعات خطا MS	مجموع مربعات خطا SS	درجه آزادی df	منبع Source
77.4**	0.11	0.32	3	پمپ هوارانش (a ₁) Airlift pump (a ₁)
271.1**	0.38	1.14	3	پمپ جوششی (a ₂) Bubble pump (a ₂)
177.3**	0.25	0.75	3	پمپ ترکیبی جوششی و هوارانش (a ₃) Bubble and airlift (a ₃)
711.45**	0.998	2.994	3	پمپ ترکیبی سه حالت (a ₄) Pneumatic combined pump (a ₄)
220.74**	0.31	0.93	3	پمپ هیدرونیوماتیک (a ₅) Hydrodynamic (a ₅)

MS، * و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می باشد.



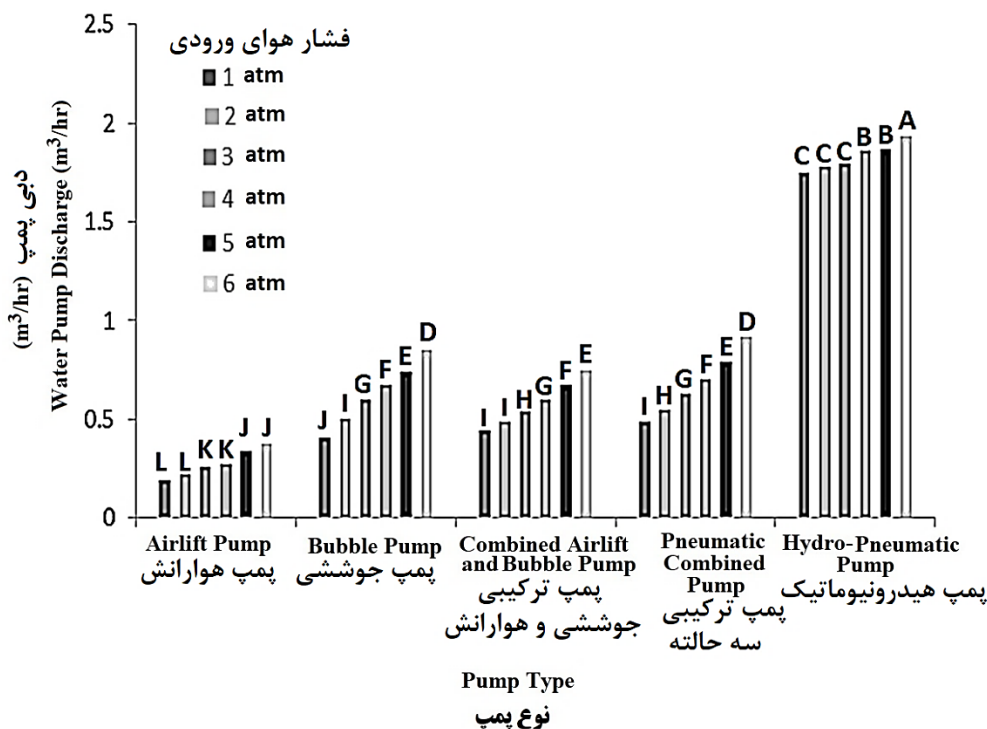
شکل (۳) نمودار اثر نوع پمپ (۱: پمپ هوارانش، ۲: پمپ جوششی، ۳: پمپ ترکیبی جوششی و هوارانش، ۴: پمپ ترکیبی سه حالته و ۵: پمپ هیدرونیوماتیک) و عمق غوطه‌وری بر دبی پمپ آب

Figure (3) Interaction effect of pump type (1: Airlift pump, 2: Bubble pump, 3: Combined airlift and bubble pump, 4: Pneumatic combined pump, and 5: Hydro-pneumatic pump) and immersion depth on water pump discharge

جدول (۳) جدول برش دهی اثر متقابل نوع پمپ (A) در فشار هوای ورودی (C) بر دبی پمپ آب
Table (3) Interaction effect slice table for pump type (A) and inlet air pressure (C) on pump discharge

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات خطا	میانگین مربعات خطا	آماره F
Source	df	SS	MS	F
پمپ هوارانش (a ₁)	5	0.43	0.1	61.79**
Airlift pump (a ₁)				
پمپ جوششی (a ₂)	5	2.03	0.4	289.25**
Bubble pump (a ₂)				
پمپ ترکیبی جوششی و هوارانش (a ₃)	5	1.1	0.2	153.3**
Bubble and airlift (a ₃)				
پمپ ترکیبی سه حالته (a ₄)	5	2.002	0.4	285.45**
Pneumatic combined pump (a ₄)				
پمپ هیدرونیوماتیک (a ₅)	5	0.4	0.1	55.9**
Hydrodynamic (a ₅)				

ns, * و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می باشد.



شکل (۴) مقایسه اثر متقابل نوع پمپ (۱: پمپ هوارانش، ۲: پمپ جوششی، ۳: پمپ ترکیبی جوششی و هوارانش، ۴: پمپ ترکیبی سه حالت و ۵: پمپ هیدرونیوماتیک) و فشار هوای ورودی (شش سطح) بر دبی پمپ

Figure (4) Interaction effect of pump type (1: Airlift pump, 2: Bubble pump, 3: Combined airlift and bubble pump, 4: Pneumatic combined pump, and 5: Hydro-pneumatic pump) and compressor air pressure (six levels) on pump discharge.

جدول (۴) نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای اعمال شده بر راندمان پمپ

Table 4. ANOVA results for the effect of treatments on pump efficiency

F	مجموع مربعات خطا SS	درجه آزادی df	منبع Source
0.08	1.6	3	تکرار Repeat
236.6**	5921.9	3	نوع پمپ (a) Pump type (a)
1030.9**	19351.5	3	عمق غوطه وری (b) Immersion depth (b)
243.98**	7633.5	5	فشار (c) Pressure (c)
23.75**	1783.2	9	(b) × (a)
132.6**	16594.2	15	(c) × (a)
16.26**	1526.1	15	(c) × (b)
		45	(c) × (b) × (a)
		3.2	خطا Error
CV= 21.8	R ² = 0.95	479	کل Total

ns, * و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می باشد.

داشت. دلیل این افزایش راندمان در فشار کمتر، زمان کافی است که در اختیار پمپ برای پر شدن مجدد قرار می‌گیرد. در بین دیگر پمپ‌ها، بیشترین راندمان به ترتیب مربوط به پمپ ترکیبی سه حالته، پمپ ترکیبی جوششی و هوارانش، پمپ جوششی و پمپ هوارانش بود. با افزایش فشار هوای ورودی فراجش مایع درون لوله و آزاد شدن هوا بدون حمل آب به سمت بالا بیشتر شده که باعث کاهش راندمان پمپ می‌گردد. این نتیجه با تحقیقات طالب (۲۰۱۷) و زو و همکاران (۲۰۲۰) منطبق بود (۱۱،۱۲). به دلیل تفاوت ساختاری، پمپ هیدرونیوماتیک راندمان به مراتب بالاتری (حدود ۵۴ درصد در فشار یک اتمسفر) در مقایسه با پمپ‌های دیگر داشت. انتظار می‌رفت این راندمان با افزایش فشار حفظ شود، اما به دلیل محدودیت عمق غوطه‌وری در آزمایش‌ها و ناهماهنگی ابعادی پمپ با فشار بالای هوای ورودی، در فشارهای بالاتر شاهد افت راندمان بودیم. این موضوع نشان می‌دهد که برای هر عمق غوطه‌وری و ارتفاع پمپاژ، فشار بهینه مشخصی وجود دارد که باید ابعاد پمپ متناسب با آن طراحی شود. به دلیل تفاوت‌های ساختاری، نتایج مشابهی در تحقیقات پیشین یافت نشد که نشان‌دهنده ضرورت ادامه تحقیقات در این زمینه است.

نتایج مقایسه میانگین راندمان پمپ در سطوح مختلف عمق غوطه‌وری برای هر یک از انواع پمپ در شکل (۵) نشان داده شده است. با افزایش عمق غوطه‌وری راندمان پمپ به ترتیب در پمپ ترکیبی سه حالته، پمپ هیدرونیوماتیک، جوششی، پمپ ترکیبی جوششی و هوارانش و پمپ هوارانش افزایش یافت. بیشترین تاثیر مثبت عمق غوطه‌وری مربوط به پمپ ترکیبی سه حالته بود. در پمپ هیدرونیوماتیک به نسبت پمپ ترکیبی سه حالته، عمق غوطه‌وری تاثیر کمتری داشت ولی در افزایش سرعت پر شدن محفظه پمپ تاثیر مثبت خود را با افزایش راندمان نشان داده است. در حالی که در چهار نوع پمپ جوششی، هوارانش، ترکیبی و سه حالته به دلیل ساختار عملکرد پمپ‌ها عمق غوطه‌وری اثر مثبت و تعیین کننده‌ای روی راندمان پمپ داشت.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس برش دهی مطابق جدول (۶) نشان داد که بین راندمان پمپ آب پنج نوع پمپ در سطوح فشارهای مختلف اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود دارد.

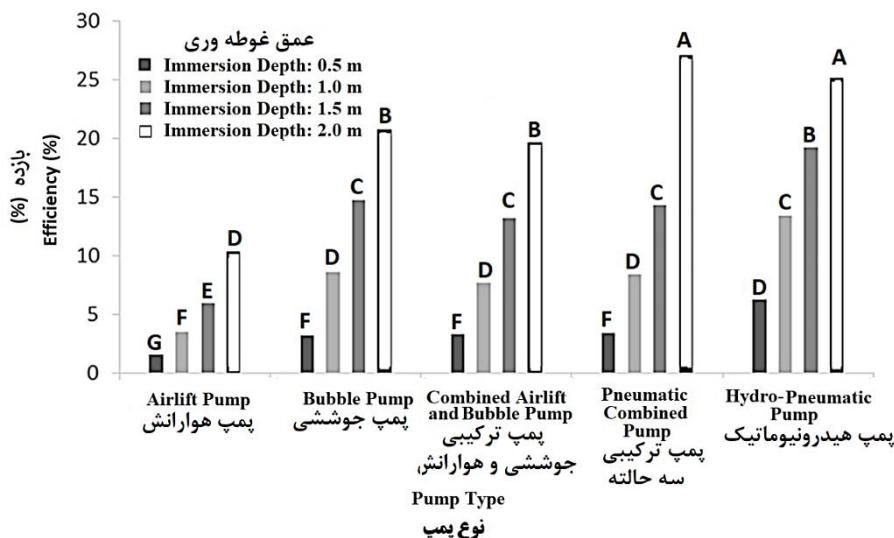
با توجه به شکل (۶) می‌توان نتیجه گرفت در همه پمپ‌ها در فشار یک اتمسفر راندمان بیشتر شده ولی پمپ هیدرونیوماتیک بیشترین راندمان را نسبت به سایر پمپ‌ها

جدول (۵) نتیجه برش دهی اثر متقابل نوع پمپ (a) در عمق غوطه‌وری (b) بر راندمان پمپ

Table (5) Interaction effect slice table for the pump type (a) at the immersion depth (b) on pump efficiency

آماره F	میانگین مربعات خطا	مجموع مربعات خطا	درجه آزادی	منبع
F	MS	SS	df	Source
55.59**	347.9	1043.6	3	پمپ هوارانش (a ₁) Airlift pump (a ₁)
223.21**	1396.7	4190.1	3	پمپ جوششی (a ₂) Bubble pump (a ₂)
191.33**	1197.2	3591.6	3	پمپ ترکیبی جوششی و هوارانش (a ₃) Bubble and airlift (a ₃)
2425.69**	2519.9	7559.6	3	پمپ ترکیبی سه حالته (a ₄) Pneumatic combined pump (a ₄)
253.02**	1583.3	4749.8	3	پمپ هیدرونیوماتیک (a ₅) Hydrodynamic (a ₅)

ns * و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می باشد.



شکل (۵) تأثیر عمق غوطه‌وری بر راندمان پمپ‌ها (۱: پمپ هوارانش، ۲: پمپ جوششی، ۳: پمپ ترکیبی جوششی و هوارانش، ۴: پمپ ترکیبی سه حالتی و ۵: پمپ هیدرونیوماتیک)

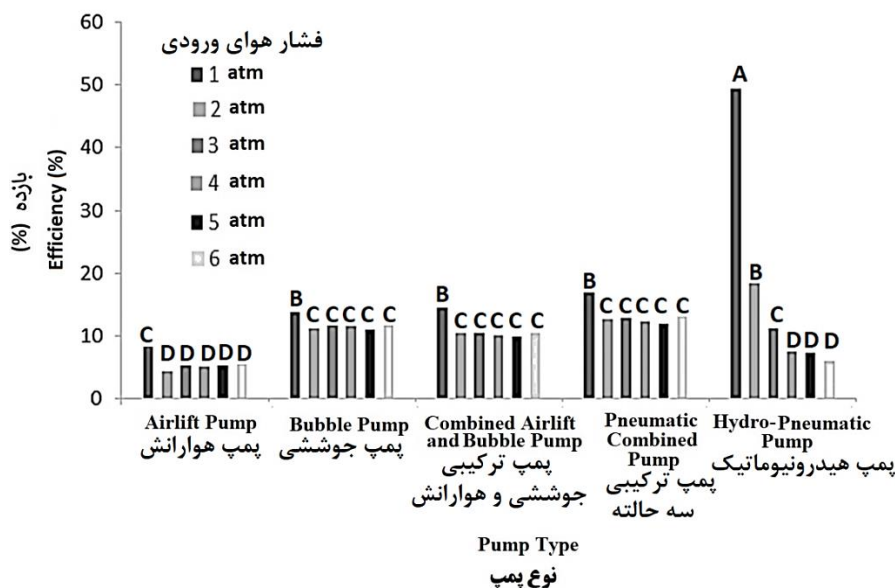
Figure. (5) The effect of the immersion depth on the efficiency of (1: Airlift pump, 2: Bubble pump, 3: Combined airlift and bubble pump, 4: Pneumatic combined pump, and 5: Hydro-pneumatic pump)

جدول (۶) برش دهی اثر متقابل نوع پمپ (A) در فشار هوای کمپرسور (C) بر راندمان پمپ

Table (6) Cutting table interaction of pump type (A) at compressor air pressure (C) on pump efficiency

آماره F	میانگین مربعات خطا MS	مجموع مربعات خطا SS	درجه آزادی df	منبع Source
0.56**	3.5	17.54	5	پمپ هوارانش (a ₁) Airlift pump (a ₁)
2.5**	15.6	78.1	5	پمپ جوششی (a ₂) Bubble pump (a ₂)
7.69**	48.1	240.4	5	پمپ ترکیبی جوششی و هوارانش (a ₃) Bubble and airlift (a ₃)
8.8**	55.4	275.2	5	پمپ ترکیبی سه حالتی (a ₄) Pneumatic combined pump (a ₄)
754.84**	4723.3	23616	5	پمپ هیدرونیوماتیک (a ₅) Hydrodynamic (a ₅)

ns, * و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می باشد.



شکل (۶) مقایسه اثر متقابل نوع پمپ (۱: پمپ هوارانش، ۲: پمپ جوششی، ۳: پمپ ترکیبی جوششی و هوارانش، ۴: پمپ ترکیبی از هر سه شیر نیوماتیک و ۵: پمپ هیدرونیوماتیک) و فشار هوای ورودی (در ششی سطح) بر راندمان پمپ
Figure. (6) Comparison of the interaction between the pump types (1: Airlift pump, 2: Bubble pump, 3: Combined airlift and bubble pump, 4: Pneumatic combined pump, and 5: Hydro-pneumatic) pump and inlet air pressure on the efficiency

برای حالت کار به صورت پمپ هوارانش، ۲۰/۸ درصد برای پمپ جوششی، ۱۹/۳ درصد برای پمپ ترکیبی جوششی-هوارانش، ۲۷/۱ درصد برای پمپ ترکیبی سه-حالت و ۲۵/۲ درصد برای پمپ هیدرونیوماتیک بود. راندمان پمپ هیدرونیوماتیک در فشار یک اتمسفر تا ۵۴ درصد نیز افزایش یافت. انتظار می‌رفت این راندمان با افزایش فشار حفظ شود، اما به دلیل محدودیت عمق غوطه‌وری در آزمایش‌ها و ناهماهنگی ابعادی پمپ با فشار بالای هوای ورودی، در فشارهای بالاتر شاهد افت راندمان بودیم. پمپ ترکیبی در حالت هر سه شیر نازل باز (سه حالت) بعد از پمپ هیدرونیوماتیک در فشار هوای ورودی یک اتمسفر دارای بیشترین راندمان بود.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز بابت حمایت مالی از این پژوهش در قالب اعتبار ویژه پژوهشی به شماره پیگیری ۹۶/۳/۰۲/۱۶۶۷۰ قدردانی می‌نمایند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک نمونه اولیه پمپ آب هوای فشرده ترکیبی طراحی و ساخته و با پمپ هیدرونیوماتیک از نظر دبی و راندمان مقایسه شد. به منظور ارزیابی مقایسه‌ای، پمپ هوای فشرده ترکیبی در ابعادی مشابه پمپ هیدرونیوماتیک ساخته شد. با فعال یا غیر فعال نمودن و ترکیب سه نازل هوای فشرده نصب شده در ساختار پمپ، چهار مد کاری مختلف برای پمپ هوای فشرده ترکیبی قابل اجرا بود. محدوده عملکرد، شامل فشار هوای ورودی، دبی و ارتفاع پمپاژ آب استخراج و راندمان پمپ هوای فشرده ترکیبی در شرایط آزمایشی مقایسه گردید. طبق نتایج، اثر نوع پمپ، عمق غوطه‌وری و فشار هوای ورودی بر دبی پمپ اثر معنی‌داری داشت و طبق آزمون برش دهی در هر پنج مدل پمپ با افزایش عمق غوطه‌وری و فشار هوای ورودی دبی پمپ‌ها افزایش یافت. در بین پمپ‌های مورد بررسی، پمپ هوای فشرده ترکیبی در عمق غوطه‌وری دو متر دارای بهترین راندمان بود. راندمان این پمپ به ترتیب ۱۰/۳ درصد

References

1. Ajami, A., Sarreshtehdari, A. and Keyhani, H. 2015. Experimental study of gas injection parameters on the performance of airlift pump and its improvement. *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, 46 (4), 171-179. [In Persian with abstract]
2. Enany, P., Shevchenko, O. and Drebenstedt, C. A. 2022. Particle transport velocity in vertical transmission with an airlift pump. *Fluids*, 7(3), 95. <https://doi.org/10.3390/fluids7030095>
3. Goswami, S. and Rai, A. K. 2022. Estimating suitability of groundwater for drinking and irrigation, in Odisha (India) by statistical and WQI methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(5), 502. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10099-4>
4. Hanafizadeh, P., Karimi, A. and Saidi, M. 2011. Effect of step geometry on the performance of the airlift pump. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 38(5), 387-408. <https://doi.org/10.1615/InterJFluidMechRes.v38.i5.10>
5. Karunakaran, S. 2017. Development of geyser pump for lifting solid particles in a continuous rotary dissolver, Unpublished doctoral dissertation. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:218480749>
6. Khorasani F., M. E., Borgheie, S. A. M. and Akram, A. 2006. Using wind energy to pump water with wind turbines. Second Student Conference on Agricultural Machinery Engineering, Karaj. [In Persian with abstract]
7. Khorasani F., M. E., Borgheie, S. A. M., 2015, Hydro-Pneumatic Agri-Industrial Water Pump, IR Patent 86224, Filed. July, 15, 2015 and issued Jan, 20, 2015. [In Persian with abstract]
8. Mohrous, A. 2014. Performance of airlift pumps: Single-stage vs. multistage air injection. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2(1), 28-33. <https://doi.org/10.12691/ajme-2-1-5>
9. Nicklin, D. J. 1963. The airlift pump: Theory and optimization. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 41, 29–39.
10. Omar, I., Saleh, A. A. M. 2023. A Comprehensive Review of Design and Operational Parameters Influencing Airlift Pump Performance. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 10(3), 1063-1073. <https://doi.org/10.18280/mmep.100342>
11. Abou Taleb, F. S., and Al-jarrah, J. A. 2017. Experimental study of an airlift pump. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 7(3), 1679-1680. <https://doi.org/10.48084/etasr.1207>
12. Zuo, J., Li, F., Zhang, N., He, D., Wang, W., and Zhang, J. 2020. Experimental study on hydraulic characteristics of pneumatic lifting pump. *Water*, 12(2), 388. <https://doi.org/10.3390/w12020388>