سال پنجم، شماره ۱، ۱۳۹۷، صفحات ۲۹ تا ۳۶
نشریه آب و توسعه پایدار

2018, Vol.5, No.1, Pages 29 to 36
Journal of Water and Sustainable Development

# نگرشی بر مفهوم بازده انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی

**افشین یوسف گمرکچی[۱*]، عاطفه پرورش ریزی[۲]**

۱-دکتری سازه های آبی، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزي، قزوین، ایران. ۲- استادیار گروه آبیاری و آبادانی. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: a.gomrokchi@areeo.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۰۲
تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۸

## چکیده

در سال‌های اخیر، هزینه انرژی در مقابل سایر هزینه‌های کشاورزی، افزایش بیشتری داشته است. بازنگری شرایط ایستگاه‌های پمپاژ کشاورزی، چگونگی مصرف انرژی در آنها و استفاده از شیوه‌های جدید طراحی به‌منظور افزایش بازده، نقش مهمی در مهار مصرف انرژی خواهد داشت. در این تحقیق روش‌شناسی تعیین بازده انرژی در ایستگاه پمپاژ کشاورزی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا بازده انرژی ایستگاه پمپاژ، باتوجه‌به تأثیر سه عامل بازده ذاتی کارکرد پمپ، بازده مصرف انرژی ناشی از تفاوت توان ورودی و خروجی و پتانسیل تفاوت بازده به دلیل تطبیق و یا عدم تطبیق با منحنی مقاومت سامانه، در یک ایستگاه پمپاژ آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. ارزیابی بازده انرژی ایستگاه پمپاژ بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده دبی و تطبیق آن با منحنی عملکرد پمپ در یک مورد مطالعاتی، نشان دهنده آن است که پمپ موجود در بهترین نقطه کارکرد قرار گرفته است. لیکن به‌دلیل عدم تطابق منحنی مشخصه پمپ و منحنی مقاومت سامانه، شاخص بازده انرژی در طی دوره بهره‌برداری ایستگاه پمپاژ ۲۵ درصد و بازده مصرف انرژی ناشی از تفاوت توان ورودی و خروجی به ایستگاه پمپاژ بر اساس معیار پمپاژ نبراسکا، ۵۲ درصد بوده است. نتایج تحقیق نشان داد بازده کل انرژی مصرفی ایستگاه پمپاژ، با توجه به تأثیر عوامل مورد بررسی ۱۱ درصد برآورد شده که بیشترین مقدار تلفات انرژی در سامانه مورد مطالعه، متأثر از انتخاب ناصحیح پمپ بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** بهترین نقطه کارکرد، شاخص بازده انرژی، معیار نبراسکا، منحنی مقاومت سامانه.

# Introduction to the Concept of Energy Efficiency in Agricultural Water Pumping Stations

**A. Uossef Gomrokchi[1*], A. Parvaresh Rizi[2]**

1- PhD., Hydraulic Structures Engineering, Agricultural Engineering Research Department, Qazvin Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Qazvin, Iran. 2- Assist. Professor of Irrigation & Reclamation Engineering, Department of Agriculture & Natural Resources Campus, University of Tehran, Iran.

*(Corresponding author Email: gomrokchi@gmail.com)

Received: 20-02-2017
Accepted: 08-01-2018

## Abstract

In recent years, energy costs have had a greater increase compared to other agricultural expenditures. Revising the conditions of agricultural pumping stations, their energy consumption, and using new methods to improve efficiency have an important role in saving energy. In this study, the methodology of determining energy efficiency in agricultural pumping stations is investigated. The energy efficiency of the pumping station is studied according to three factors of: inherent efficiency of the pump, the energy consumption efficiency from input and output power differences, and the potential efficiency differences due to the level of similarity of the pump characteristic curve with the system resistance curve. The evaluation of the pump energy and operation efficiency, on a case study, indicates that the pump is operating at the optimum performance based on the results of the comparison between the measured values of discharge and the pump operation curve. However, the energy efficiency index was 25% during pump operation and the energy consumption efficiency from input and output power differences based on the Nebraska pumping criteria was 52% due to the mismatch of the pump characteristic curve with the system resistance curve. Results show that the total efficiency of the consumed energy in the pumping station, based on the aforementioned factors, is estimated at 11% where the greatest amount of energy losses in the studied system was due to the wrong pump selection.

**Keywords:** Best efficiency point, Energy efficiency index, Nebraska criteria, System resistance curve.



DOI: 10.22067/jwsd.v5i1.62786

## مقدمه

اکثر مشکلات سامانه‌های انتقال و توزیع آب، در ایستگاه‌های پمپاژ بروز می‌نماید. مسائلی چون نوسانات ارتفاع آب در فصول مختلف، استهلاك بالای الکتروپمپ‌ها، عدم اعتماد به سرویس منظم و مرتب، نوسانات برق و عدم حفاظت موتورهای الکتریکی در مقابل آنها، مصرف بالای انرژی، مصرف انرژی راکتیو، استهلاك خطوط انتقال و اتصالات مربوطه، ضربه قوچ، عدم امکان مدیریت و کنترل متمرکز ایستگاه‌ها، مشکلات مربوط به کیفیت طراحی و کیفیت تجهیزات به‌کاررفته و شیوه بهره‌برداری، از مسائل عمده و قابل تأمل در ایستگاه‌های پمپاژ بوده است (بهشتیان و همکاران، ۱۳۸۷). از سوی دیگر گذشت زمان و تغییر در شرایط هیدرولیکی سامانه نیز می‌تواند برروی عملکرد ایستگاه پمپاژ، بازده پمپ و بازده کل سامانه تأثیرگذار باشد (طاهری اصل و همکاران، ۱۳۸۸).

با افزایش کاربرد پمپ‌ها در بخش کشاورزی (به‌ویژه با توسعه سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار در چند دهه اخیر)، بحث کنترل و تطبیق شرایط ایستگاه پمپاژ با مشخصات هیدرولیکی سامانه، به‌منظور افزایش بازده ایستگاه پمپاژ و مدیریت مصارف انرژی اهمیت زیادی یافته است. در این میان ایستگاه پمپاژ مهم‌ترین بخش یک سامانه آبیاری و در واقع قلب آن محسوب شده که هرگونه ناکارآمدی در آن منجر به پایین آمدن بازده مجموعه خواهد شد. این بخش از سامانه با توجه به خصوصیات ذاتی خود نیاز بیشتری به رویکرد سیستمیک، برای بالا بردن بازده کاری دارد. در محاسبات متداول مهندسی طراحی ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از نمودارهای منحنی مشخصه پمپ‌ها، منحنی مشخصه سامانه و با در نظر گرفتن این مسئله که سیستم در حالت پایدار است صورت می‌گیرد. این درحالی است که سامانه‌های انتقال سیال متأثر از عوامل دینامیکی بسیاری نظیر شرایط متفاوت بهره‌برداری، موقعیت ایستگاه‌های پمپاژ و تعداد پمپ‌های در حال کار است (ویسی و شمشادی، ۱۳۸۷). از سوی دیگر متغیر بودن فشار و دبی مورد نیاز (نقطه کار) در محل ایستگاه پمپاژ باتوجه‌به الگوی کشت، مساحت اراضی در حال بهره‌برداری، تغییرات نیاز آبی در طول دوره فصل رشد، عدم تطابق ساعات آبیاری کشت‌های گوناگون و تعداد آبپاش‌های فعال از دیگر مشکلات عمده در بهره‌برداری ایستگاه‌های پمپاژ در سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار است. بدیهی است عملکرد نامناسب ایستگاه پمپاژ در یک سامانه آبیاری، باعث افزایش مصرف انرژی، کاهش بازده، فرسودگی تجهیزات و تحمیل هزینه‌های اقتصادی مرتبط به بهره‌بردار خواهد شد.

مطالعات انجام شده در کشور هندوستان نشان داد با رعایت استانداردها می‌توان بازده بهره‌برداری ایستگاه پمپاژ را به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش داد (Girish و Shantanu، ۱۹۹۶). در تحقیق دیگری بازده مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آبیاری بارانی دیزلی و برقی برخی از مزارع استان همدان مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ آبیاری بارانی، از معیار پمپاژ نبراسکا استفاده شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها در ۱۷ مزرعه نشان داد که متوسط بازده انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ برقی ۴۶/۶ درصد بوده است (رضوانی و همکاران، ۱۳۸۹). همچنین میانگین بازده ایستگاه‌های پمپاژ آبیاری استان زنجان براساس معیار پمپاژ نبراسکا در پمپ‌های شناور، کف‌کش و گریز از مرکز به‌ترتیب ۳۶، ۲۰/۷ و ۱۱/۵ درصد برآورد شده است. ارزیابی بازده مصرف انرژی در ۲۵ ایستگاه پمپاژ آبیاری ناحیه‌ای از ایالت تگزاس، نشان داد حداقل، حداکثر و میانگین بازده مجموع انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ برقی به ترتیب ۱۷/۵، ۶۸/۵ و ۴۲/۶ درصد بوده است (Fippes و Neal، ۱۹۹۵). در تحقیق دیگری میانگین بازده انرژی پمپ‌های الکتریکی در ایالت‌های مختلف آمریکا بین ۴۵ تا ۵۵ درصد برآورد شده است. نتایج این تحقیق نشان داد ۲۵ درصد انرژی الکتریکی استفاده شده در ایستگاه‌های پمپاژ تنها به‌دلیل پایین بودن بازده ایستگاه تلف می‌شود و از بعد اقتصادی هزینه‌های انرژی، تعمیر و نگهداری یک سامانه پمپاژ در طول عمر آن تا ۲۰ برابر سرمایه‌گذاری اولیه است (Chávez و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین در آنالیز انرژی مصرفی ۲۲ ایستگاه پمپاژ در جنوب اسپانیا، بازده انرژی مصرفی ایستگاه‌های پمپاژ ۵۳ درصد برآورد شده است. فرآیند ممیزی انرژی در این محدوده مطالعاتی نشان داد تا ۱۴ درصد امکان صرفه‌جوئی در مصرف انرژی وجود داشته است (Abadia و همکاران، ۲۰۱۰).

در ارزیابی بازده مصارف انرژی ایستگاه‌های پمپاژ، بازده پمپ با بازده سیستم پمپاژ عمدتاً یکسان فرض می‌شود، درحالی‌که هرچند این دو عامل از یکدیگر مستقل نیستند ولی می‌توانند کاملاً با یکدیگر متفاوت باشند. هنگامی‌که از بازده یك سامانه صحبت می‌شود مرزهای مورد نظر برای محاسبه بازده، فراتر از پمپ بوده و کل اجزا سامانه را شامل خواهد شد. به‌عبارتی در یك فرایند محاسبه بازده با دیدگاه سامانه‌ای، نه تنها تک‌تک اجزا بررسی می‌شوند بلکه کل سامانه به همراه ورودی و خروجی مورد انتظار آن، مورد مطالعه دقیق قرار می‌گیرند و تمرکز مطالعه از یك جزء مانند پمپ به مجموعه سامانه منتقل می‌شود. لذا هرچند بازده پمپ تأثیر مستقیم در بازده سامانه دارد، ولی علت اصلی پایین بودن بازده سامانه‌های پمپاژ را می‌توان در جای دیگری در مجموعه ایستگاه پمپاژ نیز جستجو نمود. هدف اصلی این تحقیق، روش‌شناسی ارزیابی بازده انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ کشاورزی است. براین‌اساس بازده مصرف انرژی با رویکرد سیستمی و نگرش به رفتار کلی مجموعه، در یک ایستگاه پمپاژ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

بازده کلی یك ایستگاه پمپاژ از یک‌سو تابع طراحی سامانه و بازده تک‌تک اجزا آن بوده و از سوی دیگر به مقدار دبی و فشار مورد نیاز در طول دوره بهره‌برداری وابسته خواهد بود. براین‌اساس بازده انرژی به زمان نیز وابسته خواهد بود. ازاین‌رو طیف وسیعی از عوامل در بررسی بازده مصرف انرژی مؤثر خواهند بود. عوامل مؤثر بر بازده مصرف انرژی در یک ایستگاه به‌طور خلاصه در موارد ذیل قابل بررسی خواهد بود:

۱- منحنی مشخصه سامانه: منحنی مشخصه سامانه در واقع مقاومت هیدرولیکی سامانه را در دبی‌های مختلف نشان داده و در بررسی ارتباط دینامیک (پویا) سامانه آبیاری و عملکرد ایستگاه پمپاژ، نقش اصلی را ایفا می‌کند (دلفان آذری و پرورش ریزی،۱۳۹۴). شبکه مصرف تعیین کننده دبی و فشار در محل ایستگاه پمپاژ است. مقادیر دبی و فشار مورد نیاز سامانه (متغیرهای حالت) به‌صورت پویا و دینامیک بین بخش مصرف و عملکرد ایستگاه پمپاژ ارتباط برقرار خواهد نمود.

۲- محدوده کارکرد مجاز پمپ: بررسی استانداردهای بین‌المللی در خصوص ایستگاه‌های پمپاژ نشان‌دهنده آن است که ارائه دستورالعمل در خصوص بهترین نقطه کاری پمپ (بهترین نقطه کاری پمپ ظرفیتی از پمپ در حداکثر قطر پروانه است که در آن بهترین عملکرد هیدرولیکی، مکانیکی و بهینه‌ترین مصرف انرژی را دارد)، بسیار مورد توجه بوده است. باتوجه‌به اهمیت این موضوع موسسه ASME[1] با همکاری DOE[2] در سال ۲۰۰۹ نسبت به تهیه استانداردی تحت شماره ASME EA-2-2009 نموده است که اولین استاندارد جامع در زمینه ارزیابی مصرف انرژی سامانه‌های پمپاژ محسوب می‌شود. این استاندارد به‌صورت قدم‌به‌قدم مراحل گزارش‌دهی بازده سامانه را شرح داده است. استاندارد API-610[3] بازه ۷۰-۱۲۰ درصد بهترین نقطه کارکرد را به‌عنوان محدوده بهینه کارکرد پمپ، توصیه نموده و استاندارد ASME-B73 بازه ۸۰ تا ۱۱۰ درصد بهترین نقطه کارکرد را توصیه نموده است. جدول (۱) رفتار هیدرولیکی پمپ و تأثیرات وارد بر آن در نقاط مختلف منحنی عملکرد پمپ را نشان داده است.

جدول ۱- رفتار هیدرولیکی پمپ و تأثیرات وارده بر آن در نقاط مختلف منحنی عملکرد پمپ

| ردیف | نقطه کارکرد پمپ | تأثیرات وارده بر پمپ |
|---|---|---|
| ۱ | ۰ تا ۱۰ درصد نقطه BEP | افزایش بیش‌ازحد دمای پمپ |
| ۲ | ۱۰ تا ۲۰ درصد نقطه BEP | کاویتاسیون در جریان پایین |
| ۳ | ۲۰ تا ۴۰ درصد نقطه BEP | طول عمر کم آب‌بند[4] مکانیکی و یاتاقان‌ها |
| ۴ | ۴۰ تا ۵۰ درصد نقطه BEP | کاهش عمر پروانه |
| ۵ | ۵۰ تا ۶۰ درصد نقطه BEP | پدیده بازگشت سیال[5] در قسمت مکش پمپ |
| ۶ | ۶۰ تا ۸۰ درصد نقطه BEP | پدیده بازگشت سیال در قسمت خروجی پمپ |
| ۷ | ۸۰ تا ۱۱۰ درصد نقطه BEP | بهترین و بهینه‌ترین محدوده عملکرد پمپ |
| ۸ | بیشتر از ۱۱۰ درصد نقطه BEP | کاویتاسیون |

۳- تغییرات نقطه کارکرد پمپ: از آنجا که بازده پمپ با دبی آن تغییر می‌کند بنابراین میزان انرژی مصرفی در واحد حجم آب پمپاژ شده در هر پمپ به ازای دبی‌های مختلف پمپاژ متفاوت خواهد بود. یکی از مشکلات عمده ایستگاه‌های پمپاژ در سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار، متغیر بودن فشار و دبی مورد نیاز (نقطه کارکرد) ایستگاه پمپاژ باتوجه‌به الگوی کشت، مساحت اراضی در حال بهره‌برداری، تراکم کشت، فصل آبیاری، روش بهره‌برداری و یا تعداد آبپاش فعال است. براساس منحنی مشخصه پمپ با کاهش دبی پمپ، فشار خروجی افزایش می‌یابد. این افزایش فشار نه‌تنها باعث کارکرد الکتروموتور در بازده پایین می‌شود بلکه امکان آسیب به تأسیسات پمپاژ خصوصاً در مواقع شروع و توقف نیز امکان‌پذیر خواهد بود همچنین به‌دلیل کارکرد غیر بهینه پمپ، موجبات اتلاف انرژی را باعث می‌شود.

۴- بازده انرژی مصرفی سایر تجهیزات ایستگاه پمپاژ شامل موتور الکتریکی، درایو.

۵- طراحی ایستگاه پمپاژ و نحوه مدیریت آن و برنامه‌ریزی آبیاری (Rocamora و همکاران، ۲۰۱۳).

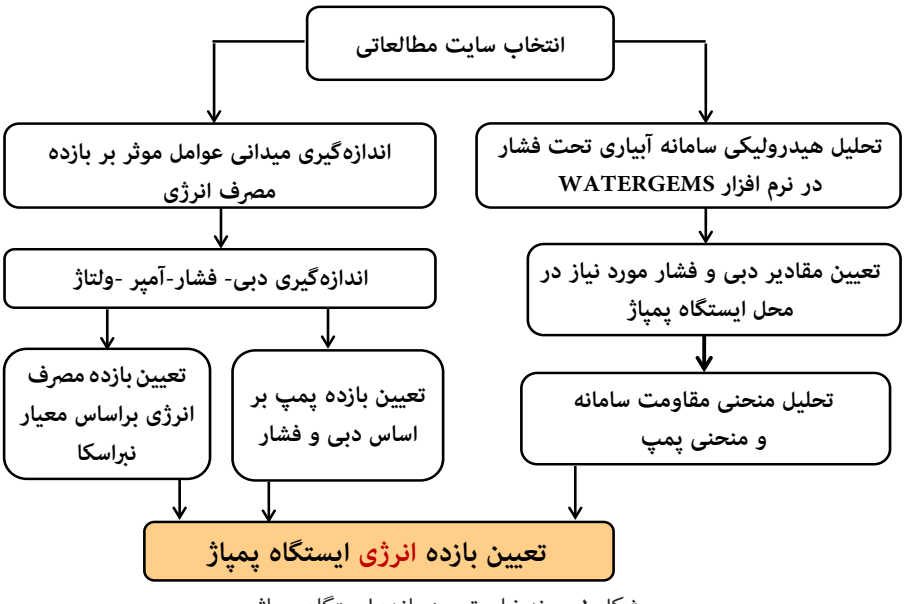
۶- نقاط بحرانی از دیدگاه بازده مصرف انرژی (González Perea و همکاران،۲۰۱۴): نقاط بحرانی در محدوده کارکرد ایستگاه پمپاژ، شامل نقاطی است که از نظر تأمین هد و یا میزان دبی مورد نیاز در نقطه آبگیری تفاوت محسوسی با سایر نقاط داشته و به‌همین‌دلیل باعث کارکرد پمپ در بازده پائین تر از محدوده مجاز خواهد شد.

۷- مشخصه‌های منبع تأمین انرژی (تغییرات ولتاژ برق مصرفی، آمپر، توات راکتیو، ضریب ترانس جریان).

۸- شیوه راه‌اندازی و بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ: در صورت کاربرد روش صحیح در راه‌اندازی پمپ‌ها علاوه بر بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ، اهدافی چون صرفه‌جوئی در مصرف انرژی، کاهش استهلاك وسایل الکتریکی و مکانیکی، افزایش عمر مفید پمپ تحقق خواهد یافت.

۹- نحوه کنترل جریان در محل ایستگاه پمپاژ: معمولاً به‌ندرت سیستم پمپاژی یافت می‌گردد که مقدار جریان آن در طول زمان ثابت باشد. در اکثر سامانه‌ها مقدار جریان مورد نیاز در شبانه‌روز، در طول هفته یا فصل تغییر می‌کند و ایستگاه‌های پمپاژ کشاورزی نیز به‌واسطه تغییرات نیاز آبی در طول دوره رشد، تراکم کشت، نوع کشت از این امر مستثنی نخواهند بود. طراحی ایستگاه پمپاژ ضمن آنکه بایستی پاسخگوی مقدار بیشینه جریان مورد نیاز باشد، بایستی بسته به ماهیت سامانه و مشخصات آن از روش‌های مناسبی برای کنترل جریان استفاده نماید که در زمان نیاز به جریان کم، کمترین تلفات انرژی را به همراه داشته باشد. بررسی‌های انجام شده بر روی سامانه‌های مختلف پمپاژ نشان می‌دهد یکی از بیشترین پتانسیل‌های کاهش مصرف انرژی مربوط به اصلاح روش کنترل جریان بوده است (Hydraulic Institute، ۱۹۹۹). استفاده از شیرهای کنترل جریان و خط By pass که بیشترین تلفات انرژی را به همراه دارند در بسیاری از ایستگاه‌های پمپاژ مورد استفاده قرار گرفته است. در عوض استفاده از پمپ‌های دور متغیر و یا پمپ‌های موازی که هرکدام کاربرد خاص خود را دارند، به‌علت عدم آگاهی طراحان و یا هزینه اولیه بالاتر در سامانه‌های آبیاری کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

براین‌اساس عوامل متعددی بر بازده ایستگاه پمپاژ تأثیرگذار بوده و بررسی جامع بازده ایستگاه پمپاژ در یک سامانه آبیاری امری هزینه‌بر، طولانی مدت و کاملاً تخصصی است. در این تحقیق یک مفهوم ترکیبی بازده مصرف انرژی در ایستگاه پمپاژ در قالب یک اندازه‌گیری میدانی تشریح شده است. بازده انرژی، ترکیبی از تأثیر منحنی مقاومت سامانه، منحنی مشخصه پمپ و مشخصه‌های منبع تأمین انرژی می‌باشد. در شکل (۱) روند نمای تعیین بازده ایستگاه پمپاژ نشان داده شده است.




شکل ۱- روند نمای تعیین بازده ایستگاه پمپاژ

براین‌اساس بازده انرژی مصرفی ایستگاه پمپاژ، به‌صورت رابطه (۱) تعریف شده است:

$$E_E=E_{ES}\times E_{EP}\times E_{EO} \quad (1)$$

که در آن، $E_E$: بازده انرژی ایستگاه پمپاژ(درصد)، $E_{ES}$: بازده انرژی مرتبط با منحنی مقاومت سامانه (درصد)، $E_{EP}$: بازده انرژی مرتبط با توان ورودی و خروجی به پمپ و $E_{EO}$: بازده انرژی مرتبط با منحنی مشخصه عملکرد پمپ است.

باتوجه‌به روند نمای اشاره شده در شکل (۱) بازده ایستگاه پمپاژ در سایت منتخب ارزیابی شده است. در شکل‌های (۲ و ۳) اندازه‌گیری دبی و ولتاژ در محل ایستگاه پمپاژ نشان داده شده است. شبکه مصرف در ایستگاه پمپاژ مورد مطالعه یک سامانه آبیاری تحت‌فشار ۸۵ هکتاری با کشت محصول زیتون در استان قزوین بوده که در سال دهم پس از بهره‌برداری قرار دارد.

شکل ۲- پایش دبی لحظه‌ای در محل ایستگاه پمپاژ با استفاده از دبی سنج اولتراسونیک

شکل ۳- اندازه‌گیری مقادیر مرتبط با مصارف انرژی در تابلو برق ایستگاه پمپاژ

به‌منظور ارزیابی تأثیر منبع انرژی، بر بازده ایستگاه پمپاژ، از معیار پمپاژ نبراسکا استفاده شده است (New و Schneider، ۱۹۸۸). معیار نبراسکا در ارزیابی بازده انرژی مصرفی ایستگاه‌های پمپاژ، به دو عامل توان تولید شده و توان خارج شده از پمپ، به ازای واحد انرژی مصرفی وابسته است. توان تولید شده در موتورهای الکتریکی، با اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل و شدت جریان الکتریکی، بر اساس رابطه (۲) محاسبه شده است.

$$P_i = 3\times V\times I\times \cos\varphi \qquad (۲)$$

در این رابطه، $P_i$: توان مصرفی (کیلووات)، V: اختلاف پتانسیل (ولت)، I: شدت جریان (آمپر) و cosφ: ضریب توان مصرف‌کننده الکتریکی است (مقدارcosφ به همراه دیگر مشخصات روی موتورهای الکتریکی حك شده است).

برای محاسبه توان خارج شده از پمپ از رابطه (۳) استفاده شده است.

$$P_{out} = (Q\times H)/102 \qquad (۳)$$

در این رابطه، $P_{out}$: توان خارج شده از پمپ (کیلووات)، Q: دبی (لیتر بر ثانیه)، H: بار دینامیک کل (متر) است.

براین‌اساس عملکرد انرژی مصرفی در ایستگاه پمپاژ ($P_R$) از نسبت توان خارج شده پمپ به توان مصرفی محاسبه خواهد شد و سپس درجه همخوانی معیار ایستگاه پمپاژ ($PR_R$) که نسبت بازده مصرف انرژی ایستگاه پمپاژ به مقدار معیار ایستگاه پمپاژ نبراسکا است، محاسبه شده است. معیار پمپاژ نبراسکا برای توان موتور الکتریکی به ازای واحد انرژی مصرفی ۰/۸۸ (اسب بخار ساعت به کیلووات ساعت)، برآورد شده است (New و Schneider، ۱۹۸۸).

باتوجه‌به آنکه تحلیل هیدرولیکی سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار، به‌ویژه سامانه‌هایی با مساحت زیاد و با توپوگرافی نامنظم و غیریکنواخت، پیچیدگی‌های خاصی خواهد داشت و این امر از طریق محاسبات دستی به‌سادگی امکان‌پذیر نیست، لذا به‌منظور تحلیل هیدرولیکی یکپارچه سامانه، از امکانات نرم‌افزار WaterGEMS استفاده شده است. مدل نرم‌افزاری WaterGEMS که جهت طراحی هیدرولیکی شبکه‌های آب شهری تهیه و ارائه شده است، با تمهیدات خاصی می‌تواند در زمینه طراحی هیدرولیکی شبکه آبیاری تحت‌فشار نیز استفاده شود (Ilie، ۲۰۱۳). در نرم‌افزارهایی مانند EPANET یا برنامه‌هایی که در محیط Excel تهیه شده، هرچند دقت محاسبات قابل اعتماد است، لیکن به دلیل محدودیت ناشی از عدم توانایی برنامه در نمایش پلان شبکه، تحلیل عملکرد هیدرولیکی ایستگاه پمپاژ، درک عوارض و توپوگرافی از روی نقشه‌ها، قابلیت ناحیه بندی و تحلیل همزمان شبکه در شرایط مختلف بهره‌برداری، قابلیت اعمال تغییرات (همانند افزایش زبری، تغییر نوع پمپ، تغییر الگوی نیاز آبی) در طول دوره بهره‌برداری و دیگر محدودیت‌های موجود، نرم‌افزار WaterGEMS برتری کاملاً محسوس نسبت به آنها را دارد. به‌این‌دلیل استفاده از آن در تحلیل شبکه‌های آبیاری تحت‌فشار در حال توسعه است. هرچند این نرم‌افزار در فرآیند مدل‌سازی با محدودیت‌هایی همراه می‌باشد که عمده‌ترین آن متن‌باز نبودن نرم‌افزار است.

در این تحقیق منحنی مقاومت سامانه در طول یک دوره ۱۰ ساله بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ محاسبه شده است (باتوجه‌به آنکه ایستگاه پمپاژ مورد مطالعه در سال دهم بهره‌برداری قرار گرفته از این‌رو بازه ۱۰ ساله جهت تحلیل منحنی مقاومت سامانه انتخاب شده است). پس از تعیین منحنی مقاومت سامانه و اخذ میزان ساعات کارکرد سالانه ایستگاه پمپاژ، پتانسیل تلفات انرژی با توجه به منحنی مشخصه پمپ و منحنی مقاومت سامانه تعیین شده است. رابطه تعیین انرژی مورد نیاز نیروی محرکه برای پمپاژ یک مقدار مشخص دبی با یک هد مورد نظر که اساس محاسبه میزان مصرف انرژی قرار می‌گیرد براساس رابطه (۴) محاسبه شده است:

$$E = \frac{T.\gamma.Q.H}{100\times\eta} \qquad (۴)$$

در این رابطه E: انرژی مورد نیاز (کیلووات ساعت)، T: ساعات کارکرد سالانه، Q: کل آبدهی مورد نیاز (مترمکعب بر ثانیه)، H: کل فشار مورد نیاز (متر)، γ: وزن مخصوص سیال برحسب (نیوتن بر مترمکعب)، η: بازده پمپ (درصد) است.

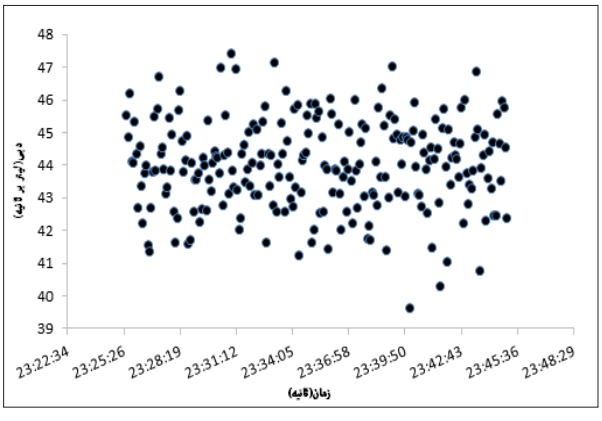
در نهایت به‌منظور بررسی ارتباط بین انرژی مصرفی و حجم آب پمپاژ شده در ایستگاه پمپاژ، شاخص بازده انرژی ایستگاه پمپاژ (PEE)[۶]، بر اساس رابطه (۵) محاسبه شده است (Diaz و همکاران، ۲۰۱۱).

$$\text{PE efficiency}(\%) = \frac{\frac{V}{3.6}.H}{75.E_a}.\ 0.736\ .\ 100 \qquad (۵)$$

که در آن V: حجم آب پمپاژ شده برحسب (مترمکعب)، H: هد تولید شده توسط پمپ (متر)، $E_a$: انرژی مصرفی پمپ (کیلووات ساعت) است. مهمترین مزیت تأثیر این شاخص در بازده ترکیبی ایستگاه پمپاژ، قابلیت تحلیل بازده انرژی در حالت راه‌اندازی دور متغیر پمپ می‌باشد (یوسف گمرکچی و پرورش ریزی، ۱۳۹۵).

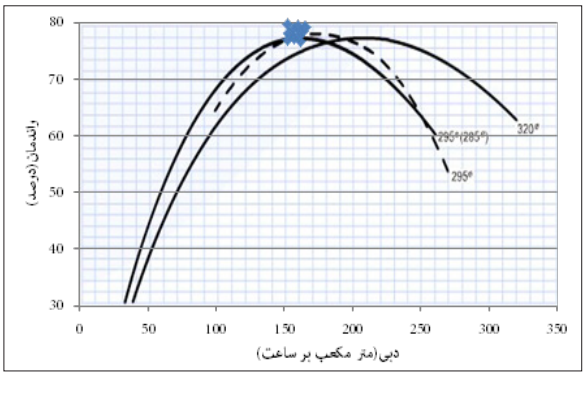
## نتایج و بحث

به‌منظور ارزیابی بازده ایستگاه پمپاژ مقادیر دبی، فشار، ولتاژ جریان و آمپر برق مصرفی اندازه‌گیری شده است. شکل (۴) تغییرات دبی در محل ایستگاه پمپاژ، در یک نوبت اندازه‌گیری را نشان داده است.



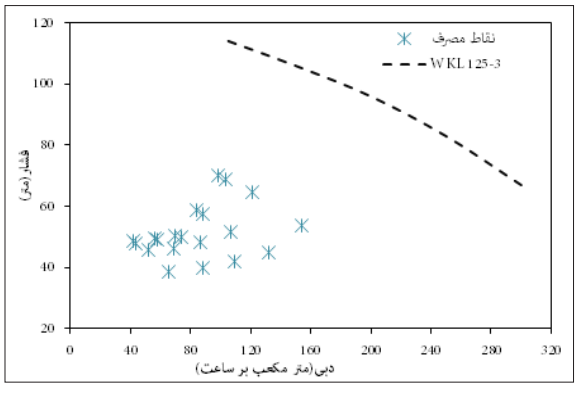

شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده دبی در محل ایستگاه پمپاژ (تیرماه ۹۴)

شایان ذکر است براساس دو نوبت اندازه‌گیری دبی ایستگاه پمپاژ در تیرماه و اردیبهشت‌ماه (با استفاده از دبی سنج اولتراسونیک)، میانگین دبی پمپاژ شده در تیرماه ۴۵ لیتر بر ثانیه و در اردیبهشت‌ماه ۴۸ لیتر بر ثانیه بوده است. ارزیابی بازده ذاتی پمپ بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده دبی و تطبیق آن با منحنی عملکرد پمپ، نشان دهنده آن است که پمپ موجود (WKL125/3) در بهترین نقطه کارکرد پمپ قرار گرفته است. به‌نحوی‌که براساس منحنی عملکرد پمپ (با قطر پروانه ۲۹۵ میلی‌متر)، بازده پمپ در وضعیت موجود بهره‌برداری در حدود ۷۶-۷۸ درصد بوده است (شکل ۵).




شکل ۵- منحنی عملکرد پمپ و مقادیر دبی پایش شده

براساس تحلیل هیدرولیکی شبکه مصرف در نرم‌افزار WaterGEMS نقاط مصرف در بازه ۱۰ ساله بهره‌برداری سامانه محاسبه شده است. شکل (۶) منحنی عملکرد پمپ و نقاط مصرف برای بازه ۱۰ ساله بهره‌برداری را نشان داده است.




شکل ۶- منحنی عملکرد پمپ و نقاط مصرف برای بازه ۱۰ ساله بهره‌برداری

با محاسبه حجم آب پمپاژ شده و انرژی مصرفی پمپ در طی دوره بهره‌برداری، شاخص بازده انرژی ایستگاه پمپاژ (PEE) محاسبه شده است (جدول ۲).

جدول ۲- محاسبه بازده ایستگاه پمپاژ براساس منحنی مقاومت سامانه

| حجم آب پمپاژ شده | انرژی مصرفی پمپ |
|---|---|
| ۱۷۵۸۸۱۸ (متر مکعب) | ۱۶۸۷۳۲۰(کیلووات ساعت) |
| هد تولید شده توسط پمپ | بازده انرژی ایستگاه پمپاژ |
| ۸۸ (متر) | ۲۵(درصد) |

باتوجه‌به مقادیر ثبت شده دبی، فشار، شدت جریان (آمپر) و ولتاژ برق مصرفی، وضعیت موجود بهره‌برداری براساس معیار نبراسکا ارزیابی گردید. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده که در جدول (۳) نشان داده شده، بازده مصرف انرژی ۵۲ درصد محاسبه شده است.

براساس رابطه (۱)، بازده انرژی ایستگاه پمپاژ متأثر از شرایط کارکرد هیدرولیکی پمپ و تفاوت توان ورودی و خروجی به پمپ، ۴۰/۵ درصد بوده است این شاخص بیانگر وضعیت بازده انرژی در وضعیت کنونی ایستگاه پمپاژ می‌باشد. لیکن با احتساب پتانسیل تلفات انرژی به‌دلیل انتخاب ناصحیح پمپ، شاخص بازده انرژی در طول دوره بهره‌برداری ایستگاه پمپاژ کمتر از ۱۱ درصد خواهد بود.

جدول ۳- محاسبه بازده ایستگاه پمپاژ براساس معیار نبراسکا

| شاخص اندازه‌گیری شده | مقدار | شاخص اندازه‌گیری شده | مقدار |
|---|---|---|---|
| میانگین دبی (لیتر بر ثانیه) | ۴۵ | Cosφ | ۰/۸۵ |
| شدت جریان (آمپر) | ۱۶۵ | توان ورودی (کیلووات) | ۸۵/۲ |
| ولتاژ (ولت) | ۳۵۰ | توان خروجی (کیلووات) | ۴۴ |
| ولتاژ نامی (ولت) | ۳۸۰ | درجه عملکرد نسبت به معیار نبراسکا | ۰/۷۸ |
| ارتفاع دینامیکی (متر) | ۹۹ | | |

## نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی شاخص‌های بازده انرژی مصرفی در ایستگاه پمپاژ نشان داد مفهوم بازده انرژی علاوه بر ارتباط دینامیک با سایر اجزا ایستگاه پمپاژ، خود نیز متأثر از سه بخش مجزا است. این سه بخش شامل ۱- بازده ذاتی کارکرد هیدرولیکی پمپ باتوجه‌به مقادیر دبی و فشار در محل ایستگاه پمپاژ ۲- بازده مصرف انرژی متأثر از تفاوت توان ورودی و خروجی به پمپ ۳- پتانسیل تلفات بازده به دلیل تطبیق و یا عدم تطبیق منحنی مقاومت سامانه و منحنی مشخصه پمپ، می‌باشد. نتایج ارزیابی مصارف انرژی نشان داد علاوه بر پایش وضعیت بهره‌برداری پمپ (از نظر قرارگیری محدوده کارکرد پمپ در حوالی نقطه بهینه کارکرد)، تلفات انرژی در تطبیق و یا عدم تطبیق منحنی عملکرد پمپ و منحنی مقاومت سامانه نیز باید در نظر گرفته شود تا بتوان پتانسیل صرفه‌جوئی در مصارف انرژی را برآورد نمود. به‌طوری‌که انتخاب ناصحیح پمپ، مقادیر قابل توجهی از تلفات انرژی در سامانه را به همراه داشته است. نتایج تحقیق نشان داد عوامل متعددی می‌تواند بر بازده مصرف انرژی ایستگاه پمپاژ تأثیرگذار باشد. از این‌رو در تعیین بازده انرژی، تحلیل رفتار هیدرولیکی ایستگاه پمپاژ شرط لازم در ممیزی انرژی بوده اما شرط کافی نیست. لذا بازده کاری پمپ و بازده ایستگاه پمپاژ دو مفهوم کاملاً مجزا خواهند بود. به‌طور مثال به دلیل افت ولتاژ در محل ایستگاه پمپاژ مورد مطالعه (این مشکل یکی از معضلات عمومی در ایستگاه‌های پمپاژ کشاورزی است)، علیرغم قرارگیری نقطه کار پمپ در نقطه بهینه کارکرد بازده مصرف انرژی به‌شدت کاهش یافته است. به عبارتی، بازده مصرف انرژی از ترکیب بازده داخلی (نحوه طراحی، بهره‌برداری و مدیریت سامانه) و بازده خارجی (مقدار ولتاژ برق، میزان لنگر بار) حاصل می‌شود؛ لذا پایش انرژی یک سامانه، باید مبتنی بر کلیه عوامل بهره‌برداری (هیدرولیکی، مکانیکی و منبع انرژی) باشد.

## پی‌نوشت

1- American Society of Mechanical Engineers
2- Department of Energy
3- American Petroleum Institute
4- Seal
5- Recirculation
6- Pumping Energy Efficiency

## منابع


بهشتیان، ع.، سخایی راد، ح. و وجدانی، ن. ۱۳۸۷. بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از راه‌اندازهای نرم (سافت استارتر) و درایوهای کنترل دور. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

دلفان آذری، م. و پرورش ریزی، ع. ۱۳۹۴. کاربرد پمپ‌های دور متغیر در طراحی و بهره‌برداری سامانه‌های تقاضامدار آبیاری. نشریه آب و خاک، ۴۶(۱): ۴۱-۴۸.

رضوانی، م.، جعفری، ع. و امین، س. ۱۳۸۹. بررسی بازده و مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آبیاری بارانی برخی مزارع استان همدان. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۱۱(۴): ۱۹-۳۴.

طاهری اصل، ا. ۱۳۸۸. ممیزی و مدیریت انرژی سیستم پمپاژ چاه‌های آب شرب، مجموعه مقالات هفتمین همایش ملی انرژی، تهران، ایران.

ویسی، ف. و شمشادی، م. ۱۳۸۷. مدیریت مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی. دومین همایش ملی آب و فاضلاب (با رویکرد بهره‌برداری)، تهران، ایران.

یوسف گمرکچی، ا. و پرورش ریزی، ع. ۱۳۹۵. تحلیل هزینه فایده پمپ‌های دور متغیر در سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۴(۱۰): ۵۳۲-۵۴۳.

Abadia R., Rocamora C., Corcoles J.I., Ruiz Canales A., Martinez Romero A. and Moreno M. A. 2010. Comparative analysis of energy efficiency in water users associations. Span. J. Agric. Res. 8(S2):

gy for Sustainable Development, 3(1): 1-17.

Gonzalez Perea R., Camacho Poyato E., Montesinos P. and Diaz J.A. 2014. Critical points: interactions between on-farm irrigation systems and water distribution network. Irrig. Sci., 32: 255–265.

Hydraulic Institute, Euro pump and US DOE. 1999. Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems. US DOE Publication. USA.

Ilie A. 2013. WaterGEMS V8i User's Guide. Bentley Institute. PA, USA.

New L.L. and Schneider A.D. 1988. Irrigation pumping plant Efficiencies-High Plains and Trans-Pecos Areas of Texas. Publication MP-1643. Texas agricultural experiment station, Texas university system, College station. USA.

Rocamora C., Vera J. and Abadía R. 2013. Strategy for Efficient Energy Management to solve energy problems in modernized irrigation: analysis of the Spanish case. Irrig Sci., 31(5): 1139-1158.

134–142.

API Standard 610. 2010. ISO 13709:2009 (Identical), Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural Gas Industries. USA.

ASME. 2009. Energy Assessment for Pumping Systems. USA.

Chávez J.L., Reich D., Loftis J.C. and Miles D.L. 2010. Irrigation pumping plant efficiency. Colorado State University Cooperative. Extension. No.4. 712.

Diaz R.J.A., Camacho Poyato E. and Blanco Perez M. 2011. Evaluation of water and energy use in pressurized irrigation networks in Sothern Spain. J Irrig Drain Eng., 137(10): 644–650.

Fippes G. and Neal B. 1995. Texas irrigation pumping plant efficiency testing program. Department of Agricultural Engineering. Texas Agricultural Extension Service. College Station. TX. USA.

Girish S. and Shantanu D. 1996. Agricultural pumping efficiency in India: the role of standards. Ener-