

مدلسازی دینامیک پمپ‌های دور متغیر در سامانه‌های آبیاری تحت فشار با رویکرد به تحلیل مصرف انرژی (مطالعه موردی: سامانه آبیاری کشت و صنعت اشرفیه)

افشین یوسف گمر کچی*، عاطفه پرورش ریزی**

* نگارنده مسئول: بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، قزوین، ایران. تلفن: ۰۳۳۵۸۰۰۳ (۰۲۸). پیام‌نگار: a.gomrokchi@areeo.ac.ir
** به ترتیب: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ و استادیار گروه سازه‌های آبی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۹

چکیده

تغییرات نیاز آبی در دوره رشد گیاه، اختلاف ارتفاع در نقاط آبیگری، تطابق نداشتن ساعات آبیاری، تغییر الگوی کشت و عوامل محیطی دیگر باعث می‌شود تا عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ متأثر از عوامل دینامیکی متعدد باشد. از این‌رو، کارکرد ایستگاه‌های پمپاژ عموماً دینامیکی است یعنی وابسته به زمان است. در این تحقیق، با توجه به قابلیت‌های سامانه‌های پمپاژ دور متغیر در تطبیق با شرایط مختلف بهره‌برداری، رویکرد به استفاده از پمپ‌های دور متغیر در یک کشت و صنعت ۸۵ هکتاری زیتون واقع در استان قزوین بررسی شد. در این راستا، مدل دینامیکی سامانه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۵ سناریوی بهره‌برداری حاکی از کاهش مصرف انرژی به میزان ۱۸ درصد در حالت کنترل دور متغیر، نسبت به حالت دور ثابت است. آزمون تحلیل حساسیت مدل نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل اثرگذار بر مصرف انرژی در سامانه آبیاری مورد مطالعه، میزان فشار خروجی در محل ایستگاه پمپاژ است.

واژه‌های کلیدی

ایستگاه پمپاژ، بهترین نقطه کارکرد، تحلیل حساسیت، مدلسازی

مقدمه

بررسی رفتار مجموعه یا ارزیابی روش‌های مختلف برای هدایت عملکرد آن است (Khayatzadeh & Ghafouri, 2015). از دهه ۸۰ میلادی، محققان به مدلسازی دینامیکی ایستگاه‌های پمپاژ به منظور کنترل، پایش و بهینه‌سازی مصرف انرژی گرایش پیدا کردند (Shemshadi & Veysi, 2012). اکر و همکاران (Eker et al., 2003) شبکه آبرسانی شهر آنتپ در ترکیه را با استفاده از یک مدل دینامیکی بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی تغییرات ارتفاع آب در مخزن انتهایی و دبی ایستگاه پمپاژ، جهت کنترل هیدرولیکی شبکه آبرسانی

مدلسازی دینامیکی بیان یک واقعیت با استفاده از مفاهیم و زبان ریاضی است که می‌توان آن را روشی مناسب برای بررسی عملکرد سیستم معرفی کرد. یکی از مهم‌ترین دلایل گرایش به مدلسازی دینامیک، رفتار متغیر سیستم طی زمان است. در مدلسازی دینامیک می‌توان تأثیر عوامل مختلف را بر عملکرد سیستم بررسی و بهترین روش کنترلی را برای رسیدن به پاسخ مطلوب از سیستم، انتخاب کرد. در واقع، این روش تولید الگویی است از یک مجموعه حقیقی و استفاده از این الگو برای پیش‌بینی و

انرژی در این بخش نیز رشد چشمگیری داشته است. دیاز و همکاران (Diaz *et al.*, 2011)، این مسئله را پارادوکس مدرن‌سازی سامانه‌های آبیاری تحت فشار می‌دانند. تحقیقات این محققان در منطقه آندلس اسپانیا نشان می‌دهد که متوسط مقدار انرژی مورد نیاز برای انتقال هر مترمکعب آب در این شبکه آبیاری تحت فشار برابر 0.41 kWh است. در رویکرد کاربرد سامانه‌های پمپاژ دورمتغیر در سامانه‌های آبیاری تحت فشار، تحقیقات متعددی در نقاط مختلف دنیا انجام شده است.

هنسون و همکاران (Hanson *et al.*, 1996)، با آزمایش‌های میدانی در پنج سایت آبیاری تحت فشار در امریکا نشان دادند که بعد از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ ساعت کارکرد الکتروپمپ دورمتغیر در سال، هزینه‌های مرتبط با اجرای سیستم پمپاژ دورمتغیر در مقایسه با روش استفاده از شیر برای کنترل دستی، قابل توجیه است. مورنو و همکاران (Moreno *et al.*, 2009)، روشی برای بهینه‌سازی منحنی‌های راندمان و مشخصه پمپ در ایستگاه پمپاژ، برای آبیاری درختان زیتون در منطقه لاپینادای اسپانیا ارائه کردند. این محققان با در نظر گرفتن دستی، فشار و توزیع آب در سراسر فصل آبیاری، به‌عنوان سه پارامتر اصلی در طراحی ایستگاه‌های پمپاژ، به بررسی منحنی‌های مشخصه پمپ و سیستم پرداختند، تعداد بهینه پمپ را تعیین و این موضوع را روشن کردند که آیا به پمپ‌های دورمتغیر نیاز هست یا نه و سرانجام استفاده از پمپ‌های دورمتغیر را برای این ایستگاه‌ها پیشنهاد کردند.

این تحقیق برای ارائه قابلیت‌های یک مدل بهره‌برداری و کنترل در ایستگاه پمپاژ با پمپ دورمتغیر در سامانه آبیاری است به‌نحوی که سیستم پمپاژ با نیاز سامانه آبیاری منطبق شود و فشار کاری تعیین شده برای مجموعه الکتروپمپ‌ها ثابت و در مقدار ازپیش تعیین شده باقی بماند. بدین‌منظور یک مدل بهره‌برداری محاسباتی برای تحلیل رفتار دینامیک ایستگاه پمپاژ ارائه شد که در

این شهر به‌کار گرفته شده است. کارستن اسکوموز (Carsten-Skovmose, 2005) مدل دینامیکی الکتروپمپ گریز از مرکز را با هدف عیب‌یابی در این پمپ‌ها ارائه داد. ذوالفقار و همکاران (Zulfiqar *et al.*, 2012) سیستم کنترل سرعت در موتورهای القایی دورمتغیر را با استفاده از روش کنترل مستقیم گشتاور^۱ در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی کردند. غفوری و همکاران (Ghafouri *et al.*, 2012)، به مدلسازی دینامیک الکتروپمپ‌های گریز از مرکز موازی دورمتغیر با کنترل فرکانسی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK پرداختند. در این تحقیق، مدل دینامیک الکتروپمپ گریز از مرکز طبقاتی سه فاز دورمتغیر ارائه و نتایج به‌دست آمده با نتایج واقعی در دوره‌های مختلف مقایسه شده است. یاری (Yari, 2010) سیستم کنترل و پایش هوشمند ایستگاه پمپاژ در مقیاس آزمایشگاهی را طراحی کرد و ساخت. در این تحقیق یک تابلو فرمان هوشمند مجهز به درایو فرکانس متغیر^۲ با قابلیت تغییر دور الکتروموتور طراحی شد و به کمک شبیه‌سازی رایانه‌ای در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK و آزمون‌های آزمایشگاهی، عملکرد سامانه در پاسخ به تغییرات دور پمپ بررسی گردید. نتایج بررسی‌ها نشان داد که سیستم قادر است تا با دقتی قابل قبول هیدروگراف‌های جریان دلخواه را ایجاد کند. کیسر و همکاران (Keyser *et al.*, 2014) انرژی مصرفی ایستگاه‌های پمپاژ در شبکه فاضلاب دو شهر در هلند و اسپانیا را با استفاده از مدلسازی دینامیکی بررسی کردند. در این مدلسازی، شیوه بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ بررسی شده است که منجر به صرفه‌جویی انرژی مصرفی شود.

سامانه‌های آبیاری تحت فشار عمدتاً با هدف بهبود کارایی مصرف آب و افزایش راندمان کاربرد آب در مزرعه به‌کار گرفته شده‌اند، اما با توسعه آنها میزان تقاضا برای

اولیه از مخزن سد سفیدرود و هدایت آن به یک استخر و پمپاژ ثانویه به درون سامانه آبیاری است. به دلیل تپه‌ماهوری بودن زمین، اختلاف ارتفاع زیادی در نقاط آبیاری از لوله‌ها به وجود آمده است.

شکل ۱ ایستگاه پمپاژ ثانویه و اولیه در محل سامانه آبیاری مورد مطالعه را نشان می‌دهد. از سامانه، با توجه به شرایط اقلیمی و نوع کشت، عمدتاً در ماه‌های اردیبهشت تا شهریور بهره‌برداری می‌شود که حداکثر و حداقل میزان نیاز آبی (بر اساس سند ملی آب کشاورزی)، به ترتیب در دهه سوم تیرماه و دهه سوم اردیبهشت‌ماه است. در این راستا و با توجه به نیاز آبی زیتون و تغییرات ضریب سایه‌انداز گیاهی، دبی مورد نیاز سامانه در دوره بهره‌برداری برآورد شده است.

آن شرایط متفاوت کاری در سامانه آبیاری تحت فشار در دوره بهره‌برداری شبیه‌سازی شده است. همچنین، به منظور بررسی اثر عوامل بهره‌برداری بر مصرف انرژی، آزمون تحلیل حساسیت بر مبنای تغییرات دبی و فشار در محل ایستگاه پمپاژ اجرا شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، کشت و صنعت اشرفیه با مساحت ۸۵ هکتار در بخش مرکزی طارم سفلی استان قزوین است. زمین‌های محدوده طرح که زیر کشت زیتون هستند عمدتاً ناهموار و تپه‌ماهوری‌اند و شیب متوسط آنها ۵/۲۷ درصد است. سیستم آبیاری این محدوده قطره‌ای و شیوه آبیاری زمین‌ها بر مبنای پمپاژ



شکل ۱- ایستگاه پمپاژ ثانویه (الف) و ایستگاه پمپاژ اولیه (ب) در سامانه آبیاری مورد مطالعه

منحنی مقاومت سامانه اصولاً در طراحی ایستگاه پمپاژ نقشی ندارد (Delfan, 2013). منحنی مقاومت سامانه در واقع مقاومت هیدرولیکی سیستم را در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد و در بررسی ارتباط دینامیک سامانه آبیاری و عملکرد ایستگاه پمپاژ نقش بسیار مؤثری دارد. در این تحقیق با تعیین دبی مورد نیاز سامانه در سال‌های مختلف (با رعایت قیود سرعت و فشار مجاز در شبکه آبیاری) و در

در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ برای دور آبیاری سه روزه، مدت زمان آبیاری هر ناحیه طی دوره بهره‌برداری محاسبه و زمان کارکرد ایستگاه پمپاژ، بر اساس آبیاری دو ناحیه در روز، در نظر گرفته شده است. نکته با اهمیت آن است که در طراحی سامانه‌های آبیاری تحت فشار، حداکثر مقادیر نیاز آبی در کل فصل آبیاری یا دوره بهره‌برداری، مبنای طراحی ایستگاه پمپاژ است و

دوره بهره‌برداری در هر سال، افت فشار بر اساس رابطه داری- وایسباخ در شبکه آبیاری محاسبه شده است. همچنین، با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار WATERGEMS در تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آبیاری تحت فشار، مقدار دبی و فشار مورد نیاز در ابتدای محل ایستگاه پمپاژ سامانه محاسبه شده است. یادآوری می‌شود که به دلیل اختلاف ارتفاع موجود در نقاط آبیاری و مساحت اراضی تحت آبیاری در هر نوبت آبیاری، مقدار دبی و فشار در ناحیه‌های مختلف با هم متفاوت است. جدول ۱ دبی و فشار مورد نیاز در محل ایستگاه پمپاژ را در دوره بهره‌برداری سامانه نشان می‌دهد.

جدول ۱- دبی و فشار مورد نیاز در دوره بهره‌برداری

سال بهره‌برداری	ناحیه ۱		ناحیه ۲		ناحیه ۳		ناحیه ۴		ناحیه ۵		ناحیه ۶	
	دبی (لیتر بر ثانیه)	فشار (متر)	دبی (لیتر بر ثانیه)	فشار (متر)	دبی (لیتر بر ثانیه)	فشار (متر)	دبی (لیتر بر ثانیه)	فشار (متر)	دبی (لیتر بر ثانیه)	فشار (متر)	دبی (لیتر بر ثانیه)	فشار (متر)
سال اول	۱۸/۳	۳۸/۶	۱۴/۴	۴۵/۹	۱۲/۲	۴۸	۱۱/۷	۴۸/۷	۱۴/۴	۴۵/۹	۱۸/۳	۳۸/۶
سال دوم	۲۴/۵	۴۰	۱۹/۲	۴۶/۲	۱۶	۴۸/۹	۱۵/۶	۴۹/۵	۱۹/۲	۴۶/۲	۲۴/۵	۴۰
سال پنجم*	۳۰/۵	۴۱/۸	۲۴	۴۸/۴	۲۰/۵	۴۹/۹	۱۹/۴	۵۰/۴	۲۴	۴۸/۴	۳۰/۵	۴۱/۸
سال هشتم**	۳۶/۶	۴۵	۲۹/۷	۵۱/۵	۲۴/۵	۵۷/۴	۲۳/۴	۵۸/۹	۲۹/۷	۵۱/۵	۳۶/۶	۴۵
سال دهم***	۴۲/۸	۵۳/۹	۳۳/۷	۶۴/۵	۲۸/۷	۶۹	۲۷/۳	۷۰	۳۳/۷	۶۴/۵	۴۲/۸	۵۳/۹

* دبی ایستگاه پمپاژ در سال‌های سوم، چهارم و پنجم یکسان و زمان آبیاری در این سال‌ها متفاوت است.

** دبی ایستگاه پمپاژ در سال‌های ششم، هفتم و هشتم یکسان و زمان آبیاری در این سال‌ها متفاوت است.

*** دبی ایستگاه پمپاژ در سال‌های نهم و دهم یکسان و زمان آبیاری در این سال‌ها متفاوت است.

مدلسازی دینامیکی سیستم پمپاژ

تطبیق کارکرد پمپ بر اساس تغییرات سامانه نیز قابل اعمال باشد. به دلیل تغییرات زیاد دبی در مقابل تغییرات کم فشار در دوره آبیاری، پمپ‌ها به صورت موازی استفاده شده‌اند. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر ترکیب و تعداد پمپ‌ها بر مصرف انرژی، پنج سناریوی بهره‌برداری ایستگاه پمپاژ در حالت دورمتغیر و دورثابت مقایسه شده‌اند (برای حذف تأثیر نوع پمپ بر ترکیب‌های در نظر گرفته شده، نوع پمپ و شرکت سازنده در تمامی ترکیب‌های مورد بررسی یکسان اما از نظر میزان دبی و فشار قابل پمپاژ متفاوت بوده‌اند). جدول ۲ سناریوهای مختلف بهره‌برداری ایستگاه پمپاژ را نشان می‌دهد.

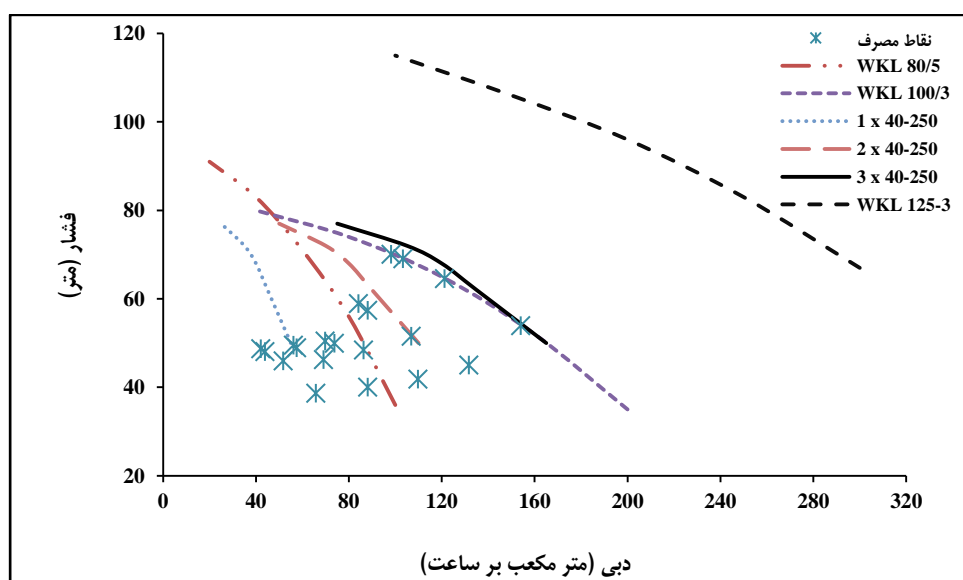
پس از تحلیل هیدرولیکی سامانه آبیاری، داده‌های خروجی نرم‌افزار از طریق لینک با صفحه گسترده EXCEL به مدل تهیه شده در نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK منتقل و پمپ یا پمپ‌های مناسب برای ایستگاه پمپاژ، بر اساس پاسخگویی به نیاز سامانه طی دوره بهره‌برداری، انتخاب شده است. گفتنی است که در انتخاب پمپ علاوه بر نیاز بهره‌برداری در دوره حداکثر مصرف (عمدتاً در طراحی‌های رایج، این عامل صرفاً جهت انتخاب پمپ در نظر گرفته می‌شود)، قابلیت تطبیق با شرایط متغیر بهره‌برداری از نظر دبی و فشار نیز در نظر گرفته می‌شود به نحوی که

جدول ۲- سناریوهای مختلف بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ

سناریو	تعداد پمپ	نوع پمپ مورد استفاده	روش بهره‌برداری
سناریوی ۱	۲	WKL 80/5 - WKL 100/3	پمپ دور ثابت
سناریوی ۲	۲	WKL 80/5 - WKL 100/3	پمپ دورمتغیر
سناریوی ۳	۳	ETA 40-250	پمپ دور ثابت
سناریوی ۴	۳	ETA 40-250	پمپ دورمتغیر
سناریوی ۵ (وضعیت موجود بهره‌برداری)	۱	WKL 125/3	پمپ دور ثابت

در این سناریوها از پمپ اول در سال اول و از ترکیب پمپ اول و دوم در سال دوم تا هشتم و از ترکیب سه پمپ در سال‌های نهم و دهم بهره‌برداری می‌شود. سناریوی چهارم مانند سناریوی سوم با رویکرد به استفاده از پمپ دورمتغیر طراحی شده است. در سناریوی پنجم وضعیت موجود ایستگاه پمپاژ بررسی شده است. شکل ۲ نقاط مصرف برای بازه ۱۰ ساله بهره‌برداری سامانه و منحنی عملکرد پمپ در سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد.

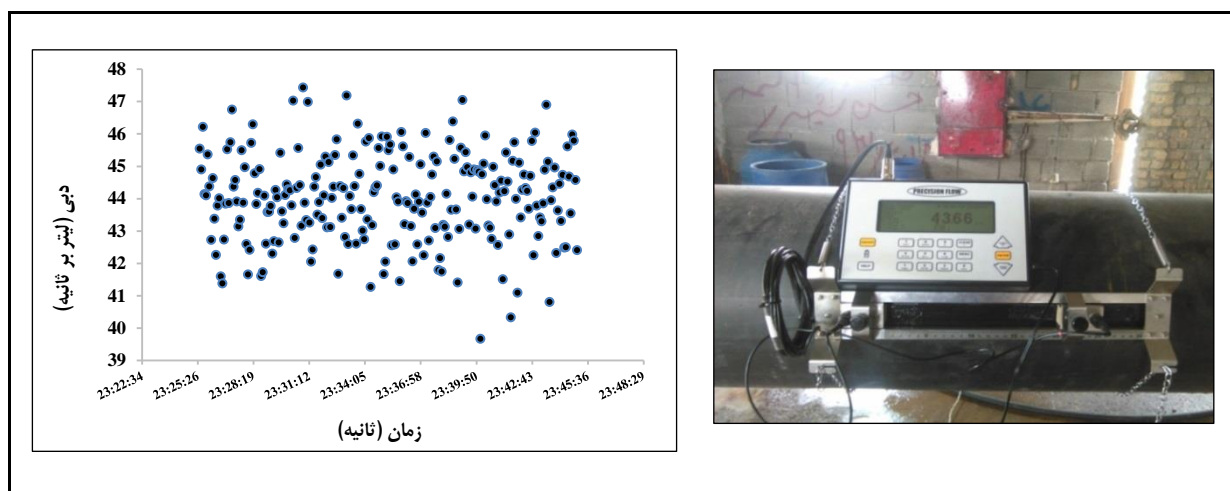
در سناریوی اول با توجه به حداقل و حداکثر مقدار دبی، پمپ‌ها به نحوی انتخاب شده‌اند که پمپ اول طی سال‌های اول و دوم و پمپ دوم طی سال‌های سوم تا دهم مورد استفاده قرار گیرند. سناریوی دوم نیز مانند سناریوی اول و با رویکرد استفاده از پمپ دورمتغیر، جهت تطبیق با شرایط متفاوت دبی و فشار در نواحی آبیاری مورد بررسی قرار گرفته و به همین ترتیب در سناریوهای سوم و چهارم ترکیب سه پمپ به صورت موازی طی دوره بهره‌برداری بررسی شده است.



شکل ۲- منحنی عملکرد الکتروپمپ و نقاط مصرف برای بازه ۱۰ ساله بهره‌برداری

اندازه‌گیری شد (شکل ۳). همچنین، فشار خروجی در محل ایستگاه کنترل مرکزی با استفاده از یک دستگاه فشارسنج عقربه‌ای اندازه‌گیری شده است.

برای ارزیابی وضعیت موجود بهره‌برداری، از یک دستگاه دبی‌سنج اولتراسونیک استفاده و پس از آزمون و کالیبراسیون، دبی لحظه‌ای ایستگاه پمپاژ ثبت و



شکل ۳- پایش و ثبت دبی لحظه‌ای در محل ایستگاه پمپاژ

ریکاتی است (Gopal, 1984). در فرآیند مدل‌سازی دینامیک ایستگاه پمپاژ، مدل

$$H = aQ^2 + bQn + cn^2 \quad (1)$$

پمپ به دو بخش مدل مکانیکی و مدل هیدرولیکی تقسیم شده است. بخش مکانیکی پمپ شامل محور پمپ و محور الکتروموتور و کوپلینگ و بخش هیدرولیکی شامل پروانه‌های مونتاژ شده روی محور پمپ است که انرژی مکانیکی ورودی توسط الکتروموتور را به انرژی هیدرولیکی تبدیل می‌کند؛ بنابراین، ورودی‌های مدل پمپ، سرعت دورانی الکتروموتور متصل شده به پمپ و دبی مصرفی شبکه‌اند و خروجی‌های مدل گشتاور بار و فشار تولیدی پمپ هستند. در بخش مدل هیدرولیکی پمپ از رابطه ۱ استفاده شده است که شکلی از معادله

که در آن، H = فشار خروجی پمپ (متر)؛ Q = دبی پمپ (مترمکعب بر ساعت)؛ n = سرعت دورانی الکتروپمپ بر حسب دور در دقیقه) و a و b و c = ضرایب‌های ثابت در دور نامی برای منحنی عملکرد الکتروپمپ هستند که این ضرایب‌ها برای پمپ‌های انتخابی در جدول ۳ محاسبه شده‌اند.

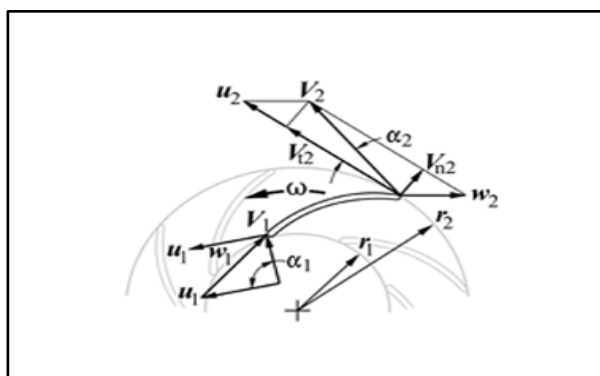
جدول ۳- مشخصات ضرایب منحنی عملکرد پمپ

اینرسی موتور کیلوگرم در مترمربع	ضرایب ثابت منحنی عملکرد پمپ			دور نامی (دور در دقیقه)	قدرت (کیلووات)	مدل الکتروپمپ
	c	b	a			
۰/۱۸۳	4.22222E-05	-7.093E-05	-0.0048	۱۵۰۰	۲۲	WKL 80/5
۰/۳۷	3.63556E-05	-9.333E-07	-0.0012	۱۵۰۰	۳۷	WKL 100/3
۱/۷	5.89774E-05	-3.014E-05	-0.0005	۱۵۰۰	۹۰	WKL 125/3
۰/۱۴۲	8.26033E-06	0.0001919	-0.0186	۳۰۰۰	۱۸/۵	ETA40-250

که در آن،
 $T_P =$ گشتاور هیدرولیکی (نیوتن.متر)؛ و $e d$
 $f =$ ضریب‌های ثابت. گشتاور بار تولید
 شده توسط الکتروموتور باید علاوه بر گشتاور
 هیدرولیکی بر گشتاور اصطکاکی سیال و سطح تماس
 با پمپ نیز غلبه کند. بر این اساس، گشتاور اصطکاکی
 با توجه به مشخصات هندسی پره و بردار مثلث سرعت
 پمپ (شکل ۴) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه
 شده است.

در بخش مدل مکانیکی پمپ، با توجه به کوپلینگ
 مکانیکی بین الکتروموتور و پمپ گریز از مرکز، گشتاور بار
 - شامل گشتاور هیدرولیکی پمپ و گشتاور اصطکاکی بین
 سیال و پمپ - به مدل وارد شده است. گشتاور
 هیدرولیکی پمپ گریز از مرکز را می‌توان با رابطه‌ای
 مشابه با مدل پمپ، برحسب دبی و سرعت دورانی آن
 محاسبه کرد (رابطه ۲).

$$T_P = dQ^2 + eQn + fn^2 \quad (2)$$



شکل ۴- مثلث‌های سرعت در الکتروپمپ گریز از مرکز

که در این دو رابطه،
 $h =$ ضخامت مقطع پره؛ $\rho =$ چگالی سیال؛ $\alpha_2(r) =$ زاویه
 بین سرعت نسبی و امتداد مماس بر پره؛ r_1 و $r_2 =$ شعاع
 در مقطع به ترتیب خروجی و ورودی پمپ.
 بنابراین گشتاور اصطکاکی به صورت رابطه ۶ قابل
 تعریف است.

$$T_{friction} = B.n \quad (6)$$

رابطه ۷ بیانگر نحوه محاسبه گشتاور بار با استفاده
 از مدل پمپ و رابطه ۸ بیان قانون دوم نیوتن برای
 الکتروموتور و پمپ است. رابطه ۸ بیانگر نحوه

$$T_{friction} = J_{MV}.n. \frac{d\omega_o}{dt} - K_Q.n. \frac{dQ}{dt} \quad (3)$$

که در آن،
 $T_{friction} =$ گشتاور اصطکاکی (نیوتن.متر) است و
 ضریب‌های J_{MV} و K_Q از رابطه‌های ۴ و ۵ و با توجه به
 هندسه پره پمپ محاسبه شده که در شکل ۴ نشان داده
 شده است (Chee-Mun, 1997).

$$J_{MV} = 2\pi h \rho \int_{r_1}^{r_2} r^3 dr \quad (4)$$

$$K_Q = \rho \int_{r_1}^{r_2} r \cot(\alpha_2(r)) dr \quad (5)$$

لحظه‌ای موتور در بخش مدل دینامیکی به دست آمده است و به عنوان خروجی مدل الکتروموتور وارد مدل پمپ شده که به همراه دبی مصرفی مطابق داده‌های جدول ۱ و با استفاده از رابطه ۱، فشار خروجی پمپ تعیین شده است. با توجه به فشار در خروجی پمپ، با فیدبک‌گیری و طراحی یک کنترل‌کننده PID^۱ بر اساس مقادیر فشار مورد نیاز سامانه، سرعت دورانی محاسبه شده است. در تعیین سرعت دورانی پمپ، محدودیت سرعت مجاز در پمپ‌های دورمتغیر بر اساس استاندارد (API 610) نیز لحاظ شده است (Anon, 2008). شکل ۵ نشان‌دهنده مدل دینامیک یک دستگاه الکتروپمپ گریز از مرکز با کنترل دورمتغیر است.

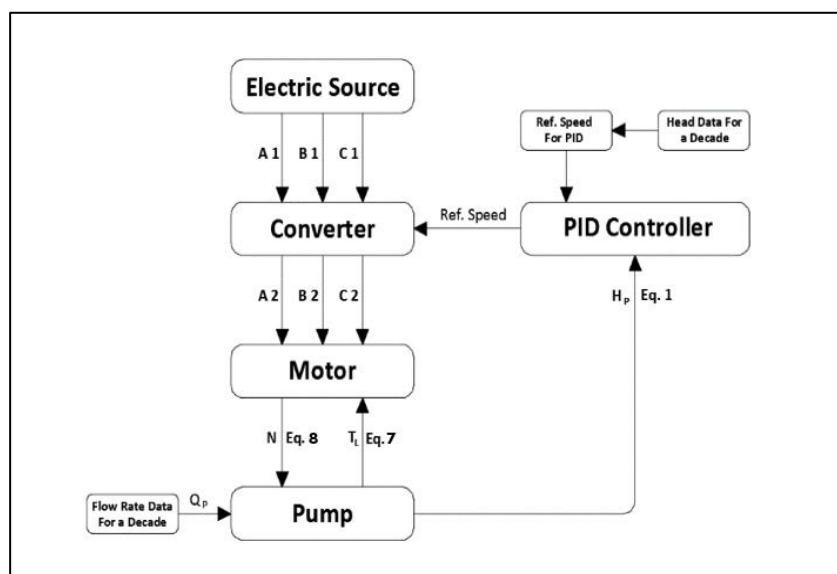
محاسبه سرعت دورانی موتور در بخش مدل دینامیکی است.

$$B.n + T_P = T_{\text{friction}} + T_P = T_L \quad (7)$$

$$T_e - T_L = I (\pi/30) (dn/dt) \quad (8)$$

که در آن‌ها،

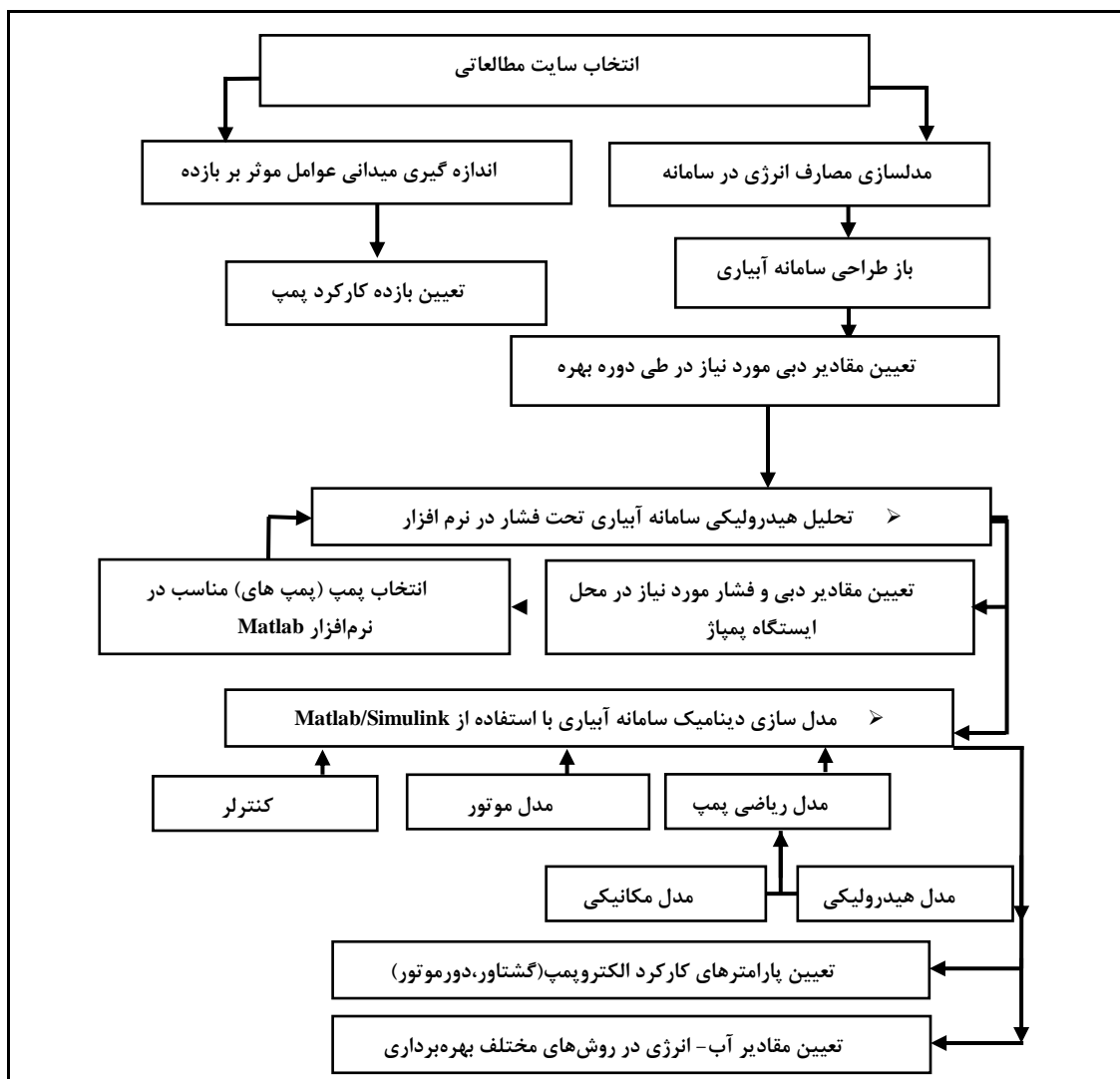
T_e = گشتاور الکتریکی موتور (نیوتن.متر)؛ و I = اینرسی موتور (کیلوگرم مترمربع). اینرسی موتور جزء مشخصات اولیه موتور است که بر اساس مشخصات فنی موتور الکتریکی (جدول ۳) تعیین می‌شود. با انتگرال‌گیری لحظه‌ای از رابطه ۸، سرعت دورانی



شکل ۵- دیاگرام بلوکی مدل پمپ دورمتغیر در نرم‌افزار MATLAB

است. با توجه به عملکرد الکتروپمپ در دوره‌های پایین‌تر از سرعت نامی الکتروپمپ، نظر به ایجاد شرایط متوازن جهت ایجاد امکان مقایسه با حالت کارکرد در دور نامی، از افزایش تلفات انرژی ناشی از کاهش بازده قطعات مکانیکی الکتروپمپ نیز صرف‌نظر شده است.

در هر سناریو بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ، مدل نشان داده شده در شکل ۵ در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ روند نمای فرآیند مدل‌سازی دینامیک در سامانه آبیاری مورد مطالعه نشان داده شده است. ساده‌سازی‌ها در فرآیند مدل‌سازی شامل ثبات رفتار الکتروپمپ در بازه ۱۰ ساله بهره‌برداری از سیستم



شکل ۶- روند نمای کلی مدل دینامیک ایستگاه پمپاژ

ابتدایی و انتهایی پارامتر مورد نظر هستند. شاخص حساسیت می‌تواند به صورت نسبی نیز بیان شود (رابطه ۱۰):

$$S_R = \frac{\partial O/O}{\partial I/I} \quad (10)$$

از آنجا که انرژی مصرفی پمپ (E)، تابعی از فشار خروجی پمپ (H) و دبی پمپاژ شده (Q) است، شاخص حساسیت معادل هیدرولیکی^۱ (Vatankhah et al., 2008) بر اساس تغییرات فشار به صورت رابطه ۱۱ تعریف شده است (این رابطه به طور مشابه برای دبی نیز قابل تعمیم است):

تحلیل حساسیت انرژی مصرفی در پمپ‌های دور متغیر

شاخص حساسیت عبارت است از نسبت تغییرات خروجی به تغییرات ورودی (Renault & Hemakumara, 1999). شاخص حساسیت برای هر سازه که جزئی از یک سامانه است، به صورت رابطه ۹ تعریف شده است:

$$S = \frac{\partial O}{\partial I} \approx \frac{O_2 - O_1}{I_2 - I_1} \quad (9)$$

که در آن، S = شاخص حساسیت، O = پارامتر خروجی، I = پارامتر ورودی؛ و زیرنویس‌های ۱ و ۲ نیز مربوط به مقادیر

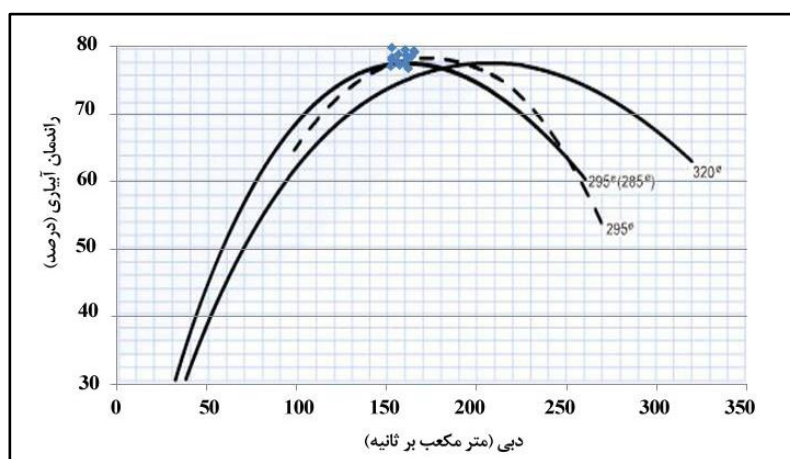
است (شکل ۷). با توجه به مقدار دبی اندازه‌گیری شده و دبی مورد نیاز سامانه، میزان دبی پمپاژ شده، پنج تا هفت درصد بیش از نیاز واقعی در دوره پیک مصرف ثبت شده است اما مقدار فشار (هد) ثبت شده در محل ایستگاه پمپاژ با فشار مورد نیاز سامانه اختلاف زیادی دارد به نحوی که فشار ثبت شده در محل خروجی ایستگاه پمپاژ در بازه ۹۹-۹۳ متر متغیر اندازه‌گیری شده است در صورتی که حداکثر فشار مورد نیاز طی دوره بهره‌برداری بر اساس نتایج مدل هیدرولیکی سامانه، ۷۰ متر بوده است. یادآوری می‌شود که بازه اندازه‌گیری شده در این مرحله صرفاً مرتبط است با شرایط کارکرد پمپ بدون در نظر گرفتن منحنی مقاومت سامانه، و از این رو نمی‌تواند بیانگر پتانسیل تلفات مصرف انرژی در سامانه مورد مطالعه باشد. در بخش مدلسازی دینامیک، پتانسیل تلفات انرژی نیز برآورد شده است.

$$\bar{S} = \frac{\int_{E_1}^{E_2} dE/E}{\int_{H_1}^{H_2} dH/H} = \frac{\ln(E_2/E_1)}{\ln(H_2/H_1)} \quad (11)$$

انرژی مصرفی پمپ‌های دورمتغیر بر اساس تغییر دور متفاوت است، بر این اساس و به منظور شناخت پارامترهای اثرگذار در انرژی مصرفی، آزمون تحلیل حساسیت اجرا شد. در این تحقیق با استفاده از نتایج خروجی مدل، حساسیت معادل هیدرولیکی بر مبنای تغییرات دبی و فشار طی سال‌های مختلف بهره‌برداری بررسی شده است.

نتایج و بحث

برای ارزیابی وضعیت موجود بهره‌برداری، همان‌گونه که اشاره شد، دبی و فشار خروجی پمپ اندازه‌گیری شده است. بررسی وضعیت موجود بر اساس دبی پایش شده و منحنی عملکرد پمپ نشان می‌دهد که پمپ موجود، (WKL125/3)، در بهترین نقطه کارکرد خود قرار گرفته



شکل ۷- منحنی عملکرد پمپ و دبی پایش شده در محل ایستگاه پمپاژ

جدول‌های ۵ و ۶ گشتاور تولیدی موتور در شرایط بهره‌برداری با پمپ دورمتغیر نشان داده شده است. جدول‌های ۷ و ۸ نتایج محاسبات گشتاور بار در سناریوهای بهره‌برداری با پمپ دورمتغیر را نشان می‌دهند. همچنین، در جدول ۹ نتایج خروجی مدل در سناریوی بهره‌برداری با پمپ دور ثابت اشاره شده است.

جهت تحلیل مصارف انرژی در سناریوهای مورد بررسی، از مدل دینامیکی پمپ استفاده شده است. با توجه به آنکه مصرف انرژی در پمپ‌های دورمتغیر بر اساس تغییر دور متفاوت است، بر این اساس ابتدا مقادیر محاسباتی دور پمپ در دوره بهره‌برداری تعیین شد که به نتایج آن در جدول ۴ اشاره شده است. همچنین، در

جدول ۴ - تغییرات سرعت دورانی الکتروپمپ‌ها در ایستگاه پمپاژ با پمپ دورمتغیر (دور در دقیقه)

نوع پمپ	سال اول			سال دوم			سال پنجم			سال هشتم			سال دهم	
	سناریوی ۲	سناریوی ۴	WKL 80/5	سناریوی ۲	سناریوی ۴	WKL 80/5	سناریوی ۲	سناریوی ۴	WKL 100/3	سناریوی ۲	سناریوی ۴	WKL 100/3	سناریوی ۲	سناریوی ۴
	تعداد	40-250		تعداد	40-250		تعداد	40-250		تعداد	40-250	تعداد	40-250	تعداد
ناحیه ۱	۲	۲۳۱۲	۱۲۴۳	۲	۲۵۶۷	۱۴۳۰	۲	۲۸۶۳	۱۲۴۵	۲	۲۸۶۳	۳	۲۷۷۷	۱۵۰۷
ناحیه ۲	۱	۲۸۵۸	۱۲۲۴	۲	۲۵۰۴	۱۳۳۹	۲	۲۷۱۰	۱۲۵۷	۲	۲۷۱۰	۳	۲۹۵۲	۱۵۰۵
ناحیه ۳	۱	۲۷۱۷	۱۲۰۲	۱	۳۰۵۱	۱۲۸۸	۲	۲۶۱۹	۱۲۴۷	۲	۲۶۱۹	۳	۲۹۴۴	۱۵۰۱
ناحیه ۴	۱	۲۶۹۳	۱۲۰۰	۱	۳۰۲۵	۱۲۸۵	۲	۲۵۹۶	۱۲۴۵	۲	۲۵۹۶	۳	۲۹۴۱	۱۴۹۹
ناحیه ۵	۱	۲۸۵۸	۱۲۲۴	۲	۲۵۰۴	۱۳۳۹	۲	۲۷۱۰	۱۲۵۷	۲	۲۷۱۰	۳	۲۹۵۲	۱۵۰۵
ناحیه ۶	۲	۲۳۱۲	۱۲۴۳	۲	۲۵۶۷	۱۴۳۰	۲	۲۸۶۳	۱۲۴۵	۲	۲۸۶۳	۳	۲۷۷۷	۱۵۰۷

جدول ۵ - گشتاور تولیدی موتور (نیوتن.متر) در سناریوی ۲ بهره‌برداری (پمپ دور متغیر)

نوع پمپ	سال اول	سال دوم	سال پنجم	سال هشتم	سال دهم
	WKL80/5	WKL80/5	WKL100/3	WKL100/3	WKL100/3
ناحیه ۱	۹۶/۲۳	۱۲۷/۲۷	۱۶۲/۴۸	۱۹۰/۱۴	۲۳۷/۹۹
ناحیه ۲	۹۳/۳۷	۱۱۱/۶۶	۱۶۵/۵۴	۱۸۸/۲۸	۲۳۷/۲۰
ناحیه ۳	۸۹/۹۸	۱۰۳/۳۸	۱۶۲/۸۴	۱۹۲/۵۹	۲۳۶/۱۱
ناحیه ۴	۸۹/۶۸	۱۰۲/۹۰	۱۶۲/۳۰	۱۹۴/۵۴	۲۳۵/۴۶
ناحیه ۵	۹۳/۳۷	۱۱۱/۶۶	۱۶۵/۵۴	۱۸۸/۲۸	۲۳۷/۲۰
ناحیه ۶	۹۶/۲۳	۱۲۷/۲۷	۱۶۲/۴۸	۱۹۰/۱۴	۲۳۷/۹۹

جدول ۶- گشتاور تولیدی (نیوتن-متر) هر موتور الکتریکی در سناریوی ۴ بهره‌برداری (پمپ دورمتغیر)

سال اول	سال دوم	سال پنجم	سال هشتم	سال دهم	نوع پمپ
ETA40-250	ETA40-250	ETA40-250	ETA40-250	ETA40-250	ناحیه ۱
۳۵/۰	۴۳/۱	۵۳/۷	۴۶/۳	۶۲/۶	ناحیه ۲
۵۳/۵	۴۱/۱	۴۸/۱	۵۸/۶	۵۷/۱	ناحیه ۳
۴۸/۳	۶۰/۹	۴۴/۹	۵۴/۸	۵۶/۷	ناحیه ۴
۴۷/۵	۵۹/۹	۴۴/۱	۵۴/۴	۵۶/۶	ناحیه ۵
۵۳/۵	۴۱/۱	۴۸/۱	۵۸/۶	۵۷/۱	ناحیه ۶
۳۵/۰	۴۳/۱	۵۳/۷	۴۶/۳	۶۲/۶	

جدول ۷- گشتاور بار (نیوتن.متر) در سناریوی ۲ بهره‌برداری (پمپ دورمتغیر)

سال اول	سال دوم	سال پنجم	سال هشتم	سال دهم	نوع پمپ
WKL80/5	WKL80/5	WKL100/3	WKL100/3	WKL100/3	ناحیه ۱
۹۴/۹۳	۱۲۵/۷۷	۱۶۱/۱۷	۱۸۸/۷۳	۲۳۶/۴۱	ناحیه ۲
۹۲/۰۹	۱۱۰/۲۵	۱۶۴/۲۳	۱۸۶/۸۸	۲۳۵/۶۳	ناحیه ۳
۸۸/۷۲	۱۰۲/۰۴	۱۶۱/۵۴	۱۹۱/۱۷	۲۳۴/۵۴	ناحیه ۴
۸۸/۴۳	۱۰۱/۵۵	۱۶۱/۰۰	۱۹۳/۱۱	۲۳۳/۸۹	ناحیه ۵
۹۲/۰۹	۱۱۰/۲۵	۱۶۴/۲۳	۱۸۶/۸۸	۲۳۵/۶۳	ناحیه ۶
۹۴/۹۳	۱۲۵/۷۷	۱۶۱/۱۷	۱۸۸/۷۳	۲۳۶/۴۱	

جدول ۸- گشتاور بار (نیوتن.متر) هر الکتروپمپ در سناریوی ۴ بهره‌برداری (پمپ دورمتغیر)

سال اول	سال دوم	سال پنجم	سال هشتم	سال دهم	نوع پمپ
ETA40-250	ETA40-250	ETA40-250	ETA40-250	ETA40-250	ناحیه ۱
۳۲/۶	۴۰/۵	۵۰/۷	۴۳/۵	۵۹/۷	ناحیه ۲
۵۰/۵	۳۸/۴	۴۵/۲	۵۵/۵	۵۴/۰	ناحیه ۳
۴۵/۵	۵۷/۷	۴۲/۲	۵۱/۷	۵۳/۷	ناحیه ۴
۴۴/۷	۵۶/۷	۴۱/۴	۵۱/۴	۵۳/۶	ناحیه ۵
۵۰/۵	۳۸/۴	۴۵/۲	۵۵/۵	۵۴/۰	ناحیه ۶
۳۲/۶	۴۰/۵	۵۰/۷	۴۳/۵	۵۹/۷	

جدول ۹- پارامترهای عملکرد ایستگاه پمپاژ در سناریوی بهره‌برداری با پمپ دور ثابت (سناریوی ۱)

سال بهره‌برداری	گشتاور اصطکاکی (نیوتن.متر)	گشتاور بار (نیوتن.متر)	گشتاور موتور (نیوتن.متر)
سال اول	۱/۵۷	۱۳۸/۵۶	۱۴۰/۱۳
سال دوم	۱/۵۷	۱۳۸/۵۶	۱۴۰/۱۳
سال پنجم	۱/۵۷	۲۳۴/۱۰	۲۳۵/۶۷
سال هشتم	۱/۵۷	۲۳۴/۱۰	۲۳۵/۶۷
سال دهم	۱/۵۷	۲۳۴/۱۰	۲۳۵/۶۷

ایستگاه پمپاژ است، یکی از مهم‌ترین عوامل تلفات انرژی در این روش بهره‌برداری است، به‌نحوی که در وضعیت موجود، به‌رغم پمپاژ دبی یکسان با سناریوهای دیگر، مصرف انرژی بیش از ۶۰ درصد نسبت به سایر روش‌های بهره‌برداری افزایش یافته است هرچند بر اساس مقدار دبی و فشار ثبت شده، پمپ در بهترین نقطه کارکرد خود قرار داشته است.

در رویکرد استفاده از پمپ دورمتغیر، نسبت به روش بهره‌برداری با پمپ دور ثابت، مصرف انرژی ۱۶ تا ۱۸ درصد کاهش یافته است. از سوی دیگر، در روش بهره‌برداری با پمپ دور ثابت، تغییر نوع پمپ (پمپ فشارقوی و پمپ گریز از مرکز) بر مصرف انرژی اثرگذار است به‌نحوی که با تغییر نوع پمپ، مصرف انرژی نیز تغییر یافته است در حالی که در روش بهره‌برداری با پمپ دورمتغیر، نوع پمپ اثر قابل توجهی بر کاهش مصرف انرژی نداشته است. با توجه به حجم آب پمپاژ شده و میزان انرژی مصرفی، انرژی مصرفی جهت انتقال هر مترمکعب آب با استفاده از پمپ دورمتغیر به‌طور میانگین $0/۳۳ \text{ kwh}$ و در روش بهره‌برداری با پمپ دور ثابت $0/۴ \text{ kwh}$ بوده است. این شاخص در وضعیت موجود ایستگاه پمپاژ $۱/۰۲ \text{ kwh}$ است.

به‌همین ترتیب در سناریوی ۳ (بهره‌برداری با پمپ دور ثابت)، گشتاور اصطکاکی، گشتاور بار و گشتاور موتور برای هر الکتروپمپ، به‌ترتیب برابر $۳/۱۴$ ، $۵۵/۷۸$ و $۵۸/۹۲$ نیوتن.متر بوده است. بر اساس نتایج خروجی مدل، کلیه شاخص‌های مکانیکی پمپ دورمتغیر (گشتاور بار، گشتاور اصطکاکی، گشتاور موتور الکتریکی) نسبت به پمپ دور ثابت کاهش یافته که از یک‌سو انعطاف‌پذیری سامانه را در تطبیق با شرایط مختلف بهره‌برداری نشان می‌دهد و از سوی دیگر به‌دلیل کاهش ضربه‌های مکانیکی، باعث افزایش طول عمر مفید پمپ و تجهیزات مکانیکال می‌شود.

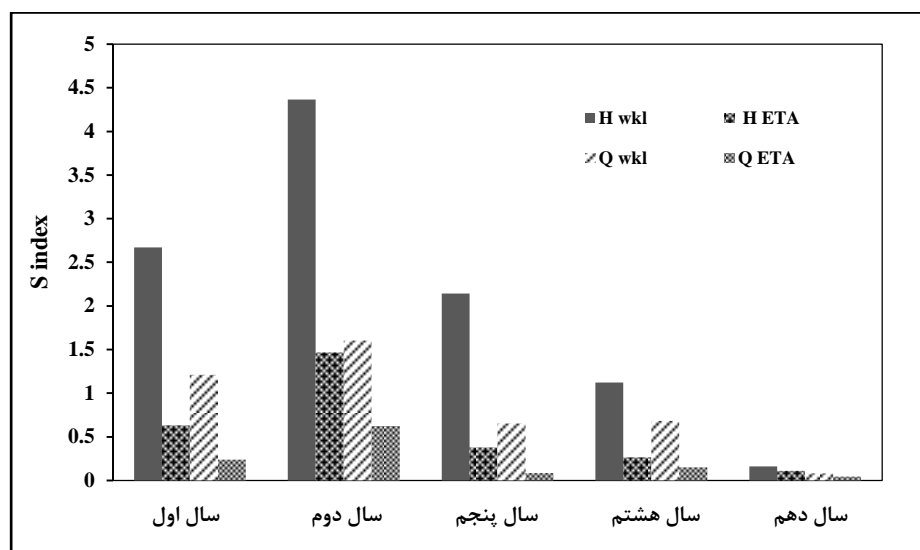
در جدول ۱۰ انرژی مصرفی سناریوهای مختلف بهره‌برداری، بر اساس نتایج خروجی مدل، نشان داده است. نتایج تحلیلی انرژی مصرفی در یک دوره بهره‌برداری ده ساله سامانه نشان‌دهنده آن است که میزان انرژی مصرفی در روش بهره‌برداری با سیستم کنترل دور، کمتر از میزان انرژی مصرفی در سایر روش‌های بهره‌برداری است. بررسی وضعیت موجود بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ نیز نشان‌دهنده آن است که فشار اضافی جریان در محل ایستگاه پمپاژ که به‌دلیل تطابق نداشتن منحنی مشخصه سامانه و منحنی پمپ و انتخاب ناصحیح پمپ در

جدول ۱۰- انرژی مصرفی در سناریوهای مختلف بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ

سال بهره‌برداری	زمان کارکرد پمپ (ساعت)	حجم آب پمپاژ شده (مترمکعب)	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳	سناریوی ۴	سناریوی ۵
سال اول	۱۹۹۰	۱۰۳۱۶۲	۴۳۷۸۰	۴۳۹۳۶	۳۶۸۱۵	۳۲۰۳۱	۱۷۹۱۰۰
سال دوم	۱۸۴۰	۱۲۷۱۸۱	۴۰۴۸۰	۳۲۰۰۸	۶۸۰۸۰	۴۴۹۷۲	۱۶۵۶۰۰
سال سوم	۱۷۳۰	۱۴۸۸۴۹	۶۴۰۱۰	۶۳۸۹۰	۶۴۰۱۰	۴۷۰۶۲	۱۵۵۷۰۰
سال چهارم	۱۹۲۰	۱۶۵۱۹۷	۷۱۰۴۰	۷۰۹۰۷	۷۱۰۴۰	۵۲۲۳۰	۱۷۲۸۰۰
سال پنجم	۲۰۲۸	۱۷۴۴۸۹	۷۵۰۳۶	۷۴۸۹۶	۷۵۰۳۶	۵۵۱۶۸	۱۸۲۵۲۰
سال ششم	۱۷۸۰	۱۹۰۳۱۸	۶۵۸۶۰	۴۰۶۸۸	۶۵۸۶۰	۵۸۸۸۷	۱۶۰۲۰۰
سال هفتم	۱۸۹۰	۲۰۲۰۷۹	۶۹۹۳۰	۴۳۲۰۲	۶۹۹۳۰	۶۲۵۲۶	۱۷۰۱۰۰
سال هشتم	۱۹۵۰	۲۰۸۴۹۴	۷۲۱۵۰	۴۴۵۷۴	۷۲۱۵۰	۶۴۵۱۱	۱۷۵۵۰۰
سال نهم	۱۷۸۰	۲۱۵۸۸۶	۶۵۸۶۰	۶۶۴۹۲	۹۸۷۹۰	۹۴۱۴۹	۱۶۰۲۰۰
سال دهم	۱۸۴۰	۲۲۳۱۶۳	۶۸۰۸۰	۶۸۷۳۳	۹۷۳۲۳	۹۷۳۲۳	۱۶۵۶۰۰
جمع		۱۷۵۸۸۱۸	۶۳۶۲۲۶	۵۴۹۳۲۶	۷۱۹۰۳۴	۶۰۸۸۵۹	۱۶۸۷۳۲۰

بلو و همکاران (Bello et al., 2010)، صرفه‌جویی در میزان انرژی مصرفی در صورت استفاده از سیستم کنترل دور را ۳۶/۴ درصد و لامادالنا و خیلا (Lamaddalena & Khila, 2012)، این مقدار صرفه‌جویی را در سامانه‌های آبیاری تقاضامدار، در بازه ۲۷ تا ۳۵ درصد برآورد کرده‌اند. هنسون و همکاران (Hanson et al., 1996)، به این نتیجه رسیده‌اند که استفاده از سیستم کنترل دور متغیر پمپ‌ها، باعث صرفه‌جویی ۳۲ تا ۵۶ درصدی انرژی در ایستگاه پمپاژ شده است. رئیسین (Raesian, 2012) این مقدار را ۴۹ درصد برآورد می‌کند. دلفان (Delfan, 2013) میزان صرفه‌جویی انرژی را در بازه ۴۴ تا ۵۴ درصد برآورد کرده است. خدرا و همکاران (Khadra et al., 2016) با تحلیل مصرف انرژی در یک سامانه آبیاری تحت فشار در جنوب ایتالیا به این نتیجه رسیدند که با استفاده از قابلیت‌های پمپ دورمتغیر می‌توان در مصرف انرژی تا ۴۹ درصد صرفه‌جویی کرد.

آزمون تحلیل حساسیت مدل نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل اثرگذار بر مصرف انرژی در سامانه آبیاری مورد مطالعه، میزان فشار خروجی در محل ایستگاه پمپاژ است. این عامل در همه سال‌های بهره‌برداری، بیشترین تأثیر را بر مصرف انرژی، در مقایسه با تغییرات دبی، داشته است. هرچند حساسیت مدل در سال‌های مختلف متفاوت بوده است. شکل ۸ نتایج ارزیابی حساسیت مدل مصرف انرژی در سناریوهای بهره‌برداری با پمپ دور متغیر را نشان می‌دهد. تغییرات شاخص حساسیت نشان‌دهنده آن است که با تطابق هرچه بیشتر منحنی عملکرد سامانه و منحنی پمپ، از حساسیت مدل کاسته می‌شود. از سوی دیگر، نتایج تحلیل حساسیت میزان انرژی مصرفی در سال‌های مختلف بهره‌برداری، نشان‌دهنده آن است که پمپ‌های گریز از مرکز (سناریوی چهارم بهره‌برداری) حساسیت کمتری به تغییرات فشار و دبی در مقایسه با پمپ‌های فشارقوی (سناریوی دوم بهره‌برداری) دارند.



شکل ۸ - تحلیل حساسیت مصرف انرژی در سال‌های مختلف بهره‌برداری سامانه

نتیجه‌گیری

باید در نظر گرفته شود تا بتوان پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف انرژی را برآورد کرد. انتخاب ناصحیح پمپ مقدار قابل توجهی از تلفات انرژی در سامانه را به همراه دارد. به عبارتی دیگر، انتخاب صحیح پمپ نقش مؤثرتری در کاهش تلفات انرژی در مقایسه با استفاده از پمپ دور متغیر دارد. از سوی دیگر، مفهوم حساسیت هیدرولیکی و نتایج تحلیلی آن نشان می‌دهد که مدیریت فشار خروجی در سامانه نقش مؤثرتری در کاهش مصرف انرژی در مقایسه با کنترل دبی دارد. بر همین اساس، به‌کارگیری پمپ‌های دورمتغیر در مزارع ناهموار (با بازه تغییرات ارتفاعی زیاد در نقاط آبیاری)، در مقایسه با مناطق هموار، توجه فنی بیشتری خواهد داشت هرچند در کاربرد و توصیه این روش بهره‌برداری عوامل متعددی مانند نوع کشت، سطوح کشت، نحوه جانمایی شبکه، نحوه مدیریت سامانه، تغییرات بازده پمپ، و به‌خصوص شرایط توپوگرافی بسیار مؤثرند و نمی‌توان رویکردی کلی را به‌کار برد که از این روش بهره‌برداری استفاده بشود یا استفاده نشود.

در این تحقیق، برای طراحی مدل دینامیک بهره‌برداری پمپ دورمتغیر، از مدلسازی اجزای مختلف یک ایستگاه پمپاژ شامل پمپ، موتور الکتریکی، مدل هیدرولیکی شبکه مصرف استفاده و تأثیرات متقابل هریک از عوامل بر مصرف انرژی ایستگاه پمپاژ بررسی شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که مصرف انرژی در رویکرد استفاده از پمپ دورمتغیر، نسبت به روش بهره‌برداری با پمپ دور ثابت (در صورت طراحی و بهره‌برداری دقیق)، ۱۶ تا ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. این نتایج با اعمال محدودیت شرایط کاری پمپ، موتور الکتریکی، گشتاور بار، و گشتاور اصطکاکی محاسبه شده است. همچنین، نتایج ارزیابی مصرف انرژی نشان می‌دهد که علاوه بر پایش وضعیت بهره‌برداری پمپ (از نظر قرارگیری محدوده کارکرد پمپ در حوالی نقطه بهینه کارکرد)، تلفات انرژی در تطبیق داشتن یا تطبیق نداشتن منحنی عملکرد پمپ و منحنی مقاومت سامانه نیز

مراجع

- Anon. 2008. Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries, API 610.
- Bello, M. A., Marti'nez-Alzamora, F., Bou-Soler, V. and Bartoli'-Ayala, H. J. 2010. Methodology for grouping intakes of pressurised irrigation networks into sectors to minimise energy consumption. *Biosystems Eng.* 105, 429-438.
- Carsten-Skovmose, K. 2005. Fault detection and isolation in centrifugal pumps. Ph. D Thesis. Aalborg University.
- Chee-Mun, O. 1997. Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULINK. Prentice Hall. PTR. New Jersey.
- Delfan, M. 2013. Modeling of variable speed pumps in operation of irrigation systems. M. Sc. Thesis. Faculty of Agricultural Engineering and Technology. Tehran University. Karaj. Iran. (in Persian)
- Diaz, R. J. A., Pérez-Urrestarazu, L., Camacho-Poyato, E. and Montesinos, P. 2011. The paradox of irrigation scheme modernization: more efficient water use linked to higher energy demand. *J. Agric. Res.* 9(4): 1000-1008.
- Eker, I., Grimble, M. J. and Kara, T. 2003. Operation and simulation of city of Gaziantep water supply system in Turkey. *J. Renew. Energ.* 28, 901-916.
- Ghafouri, J., Khayatzadeh, F. and Khayatzadeh, A. 2012. Dynamic modeling of variable speed centrifugal pump utilizing MATLAB/SIMULINK. *J. Sci. Eng. Invest.* 1(5): 121-138.
- Gopal, M. 1984. Modern Control System Theory. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Hanson, B., Weigand, Z. and Orloff, S. 1996. Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives. *J. Irrig. Drain. Eng.* 122(3): 91-104.
- Keyser, W., Amerlinck, Y., Urchegui, G., Harding, T., Maere, T. and Nopens, I. 2014. Detailed dynamic pumping energy models for optimization and control of wastewater applications. *J. Water Climate Change.* 5 (3): 299-314.
- Khadra, R., Moreno, M. A., Awada, H. and Lamaddalena, N. 2016. Energy and hydraulic performance-based management of large-scale pressurized irrigation systems. *Water Resour. Manage.* 30(10): 3493- 3506.
- Khayatzadeh, F. and Ghafouri, J. 2015. Dynamical modeling of frequency controlled variable speed parallel multistage centrifugal pumps. *Archive Mech. Eng.* 62, 347-362.
- Lamaddalena, N. and Khila, S. 2012. Energy saving with variable speed pumps in on-demand irrigation systems. *J. Irrig. Sci.* 30, 157-166.
- Moreno, M. A., Planells, P., Co'rcoles, J. I., Tarjuelo, J. M. and Carri'ón, P. A. 2009. Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations. *Biosystems Eng.* 102, 95-105.
- Raeisian, Z. 2012. Investigation and design of pumping stations variable speed pumps. M. Sc. Thesis. Faculty of Agricultural Engineering and Technology. Tehran University. Karaj. Iran. (in Persian)

- Renault, D. and Hemakumara, H. M. 1999. Irrigation offtakes sensitivity. *J. Irrig. Drain. Eng.* 125(3): 131-136.
- Shemshadi, M. and Veysi, F. 2012. The optimum dimension of water storage tanks in urban water supply systems using a dynamic model. *J. Water Waste Water.* 4(88): 129-134. (in Persian)
- Vatankhah, A. R., Kouchakzadeh, S. and Hoorfar, A. 2008. Developing effective sensitivity indicator for irrigation network components. *J. Appl. Agric. Res.* 3(1): 17-36.
- Yari, A. 2010. Developing an intelligent control and monitoring system of pumping plants. Technology Incubator Center Science and Technology Park University of Tehran. (in Persian)
- Zulfiqar, A. S., Khalil, A., Waheed, S. and Aziz, A. 2012. MATLAB simulation of a variable speed controller for a three phase induction motor. 26th IEEEEP Students' Seminar. Pakistan Navy Engineering College. National University of Sciences and Technology. Islamabad, Pakistan.



Dynamic Modeling of Variable Speed Pumps in Pressurized Irrigation System Considering Energy Consumption Analysis (Case Study: Ashrafieh Agro-Industry Irrigation System)

A.Uossef-Ghomrokchi* and A. Parvaresh-Rizi

* Corresponding Author: Ph. D. Student in Hydraulic Structures Engineering, Agricultural Engineering Research Department, Qazvin Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Qazvin, Iran.
Email: a.gomrokchi@areeo.ac.ir

Received: 24 July 2016, Accepted: 30 May 2017

Variable water requirement in growing season, altitude difference in hydrant points, incompatibility in irrigation hours, cropping pattern alternation as well as other environmental factors are conducive to dynamical factors to influence the operation of pumping stations. Thus, pumping stations have dynamic or time-dependent operation. In this study, we examined operation of variable speed pumps in an olive plantation of 85 ha in Ashrafiyeh agro-industry complex located in Qazvin province, considering various utilizing condition. In this regard, the dynamic model of the pumping station is developed and presented using MATLAB/SIMULINK software. The results inferred from five operation scenario's simulations represent 18 percent reduction in energy consumption of controlled pumping station with variable speed mode compared to constant speed mode operation. Moreover, the analysis of the results from hydraulic sensitivity index in variable speed pumps indicated that the highest amount of model sensitivity to pressure difference occurs during utilization time.

Key Words: Best Efficiency Point, Modeling, Pumping Station, Sensitivity Analysis