

بررسی تاثیرات طراحی اکوانرژی در مصرف انرژی ایستگاه های پمپاژ

فرید خیاطزاده^۱

دانشجوی دکتری

میر بیوک احقاقی^۲

دانشیار

محرم جعفری^۳

دانشیار

در این مقاله مدل ریاضی الکتروپمپ های گریز از مرکز مختلف در ایستگاه های پمپاژ شبیه سازی شده، ضمن بررسی تاثیرات استفاده از سیستم های کنترل با استراتژی کنترل سرعت ثابت، سرعت متغیر با استفاده از درایو فرکانس متغیر و ترکیب آن ها، بازدهی متوسط ایستگاه پمپاژ در شرایط مختلف محاسبه شده است. در ایستگاه های با دو الکتروپمپ نقطه کاری تعیین کننده راندمان متوسط می باشد، در ایستگاه های با سه الکتروپمپ استفاده از سیستم کنترل سرعت $(CS+VS+VS)$ به دلیل هزینه اولیه پایین تر و رفتاری مشابه با $(VS+VS+CS)$ در کنار قابلیت اعتماد بالاتر و هزینه تعمیرات و نگهداری پایین تر پیشنهاد می گردد. به کارگیری سیستم کنترل سرعت متغیر باعث افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصدی و سیستم کنترل ترکیبی باعث افزایش ۵ تا ۱۰ درصدی بازدهی می گردد.

واژه های راهنما: اکوانرژی، درایو فرکانس متغیر، کاهش مصرف انرژی، طراحی بهینه ایستگاه پمپاژ

۱- مقدمه

با توجه به نیاز دائم جوامع بشری به مصرف آب و در نتیجه مصرف دائمی انرژی در این بخش، هرگونه بهینه سازی در آن باعث ایجاد تاثیرات مثبت در قسمت های مختلف تامین انرژی و نهایتاً حتی کاهش مضرات اکولوژیکی صنایع بالادست مانند چرخه های تامین انرژی می گردد. با انجام محاسبات کلی در مورد کاهش هزینه های تمام شده انتقال هر متر مکعب آب از محل چشمه تا محل مصرف در صنایع مختلف، می توان به اهمیت این مهم پی برد. در تحقیقاتی که در کشور اسپانیا انجام گرفته است نشان داده شد که با تنها ۱ درصد استفاده کنندگان از توربین های بازیابی انرژی در بخش صنایع تولید سالانه ۱۱۰۰۰ تن گاز دی اکسید کربن کمتر شده است [۱]. مصرف انرژی در بخش های مختلف صنعتی از جمله انتقال آب به کلان شهرها با روندی افزایشی در حال رشد است و همین امر یکی از مهم ترین عوامل افزایش آلودگی هوا و از بین رفتن منابع زیست

^۱ دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران faridkhayatzadeh@tabrizu.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران ehghaghi@tabrizu.ac.ir

^۳ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران mjafari@tabrizu.ac.ir

محیطی توأم با افزایش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌گردد. افزایش جهانی مصرف انرژی باعث افزایش مصرف انرژی‌های فسیلی از جمله افزایش مصرف گاز به عنوان بیشترین حامل انرژی مورد استفاده با توان تأمین ۴۴ درصد کل انرژی جهان را به دنبال دارد [۲]. در این رابطه افزایش جهانی تولید گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف گاز با افزایش ۱/۷ درصدی در سال ۲۰۱۸ به رکورد تاریخی ۳۳/۱ گیگا تن در سال رسید که به معنی افزایش ۱/۵ درصدی به ازای افزایش ۱ درصدی رشد اقتصاد جهانی می‌باشد [۳].

بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، جنگل‌داری، پرورش ماهی و صنایع مشابه بیشترین مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهند در حالی که در حدود ۸ درصد از کل مصرف آب در بخش صنعت و آب آشامیدنی مصرف می‌گردد [۴]. مصرف آب جهت تولید صنعتی در بخش‌های مختلف بسیار متفاوت می‌باشد اما برای تولید محصولی مشخص توسط کشورهای مختلف با توجه به شاخص‌های تکنولوژی و بهینه‌سازی آن بسیار متفاوت بوده و در عمل علاوه بر نبود اطلاعاتی در مورد آن، تخمین آن نیز بسیار دشوار می‌باشد [۵]، [۶]. بر طبق پژوهش‌های به عمل آمده در سال ۲۰۲۰ در کشور انگلستان، آهنگ رشد سالانه مصرف انرژی در بخش پمپاژ آب و فاضلاب برابر با ۱۰/۸ درصد می‌باشد. همچنین این مطالعه نشان می‌دهد که انرژی مصرفی در بخش پمپاژ آب و فاضلاب رقمی بین ۰/۴۶ تا ۰/۹۲ کیلووات ساعت بر مترمکعب در هر سال می‌باشد که با افزایش راندمان ایستگاه‌های پمپاژ این مقدار روند کاهشی خواهد داشت [۷]. آمار مربوط به مصرف انرژی در آمریکا نشان دهنده مصرف ۴ درصدی کل انرژی مصرفی این کشور در بخش پمپاژ می‌باشد. همچنین آمارهای جهانی نشان دهنده مصرف ۷ درصد کل انرژی در جهان در بخش پمپاژ می‌باشند که حاکی از اهمیت کاهش مصرف انرژی به هر میزان ممکن می‌باشد [۸]. بنابراین بررسی روش‌های مختلف کاهش مصرف انرژی تأثیر مثبتی در بر خواهد داشت. مدل‌سازی دینامیکی کاربرد فراوانی در تحلیل مصرف آب و مصرف انرژی در بخش پمپاژ داشته است که از آن جمله می‌توان به پژوهشی که بر روی شبکه آبرسانی شهر آنتپ در ترکیه با استفاده از یک مدل دینامیکی برای کنترل هیدرولیکی شبکه آبرسانی انجام گرفت، اشاره نمود [۹]. نمونه کاربردهای مختلفی برای مدل‌سازی دینامیکی پمپ‌ها و از جمله پمپ‌های گریز از مرکز وجود دارد که از آن جمله می‌توان به استفاده از آن با هدف عیب‌یابی در پمپ‌های گریز از مرکز اشاره نمود [۱۰]. سیستم کنترل سرعت در موتورهای القایی دور متغیر کوپل شده به پمپ گریز از مرکز را با استفاده از روش کنترل نسبت ثابت ولتاژ به فرکانس را در محیط نرم‌افزار MatLab/SIMULINK شبیه‌سازی شده است [۱۱]. اصول مدل‌سازی الکتروموتورهای آسنکرون را محققانی در کتاب‌های مرجع خود ارائه کرده‌اند [۱۲]، [۱۳] که برای انجام مدل‌سازی باید به زبان برنامه‌نویسی MATLAB/Simulink تبدیل شده و قابل استفاده گردند [۱۴]، [۱۵]. امکان استفاده از پمپ‌های غیر مشابه با اتصال موازی در یک ایستگاه پمپاژ با استفاده از درایوهای فرکانس متغیر میسر است. بنابراین قابلیت انعطاف سیستم آبرسانی بیشتر می‌گردد که باعث افزایش چشمگیری در بازدهی انرژی سیستم می‌شود که این نتایج با اطلاعات تجربی نیز تایید گردیده‌اند [۱۶]. تأثیر چشمگیر رعایت اصول بهره‌برداری در مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ در شبکه جمع‌آوری فاضلاب در شهرهای اروپایی به عنوان یکی از نتایج تحقیق در زمینه مدل‌سازی و بررسی انرژی مصرفی در ایستگاه‌های پمپاژ می‌باشد [۷]. البته تناقض گسترش آبیاری تحت فشار جهت افزایش بازدهی سیستم آبیاری با افزایش مصرف انرژی در این بخش یکی از مسایل مهمی است که در تحقیقات در این حوزه مطرح می‌گردد [۱۷].

در پژوهشی در مورد مقایسه عملکرد استفاده از شیرهای کنترل فشار نسبت به اجرای سیستم فرکانس متغیر انجام شد، نشان داده شد که بعد از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ ساعت کار، اجرای سیستم فرکانس متغیر توجیه اقتصادی بیشتری دارد [۱۸]. در پژوهشی که منحنی‌های پمپ و سیستم در ایستگاه‌های پمپاژ را مورد بررسی قرار داده بود، با توجه به نیاز سامانه آبیاری، دستورالعملی برای کارکرد پمپ‌ها در زمان‌های مختلف ارائه شد تا پمپ‌ها قابلیت انتقال دبی مورد نیاز و فشار کافی را در زمان نیاز سامانه آبیاری داشته باشند. درنهایت با بررسی این دستورالعمل، تکنیک استفاده از الکتروپمپ‌های سرعت متغیر جهت کاهش مصرف انرژی پیشنهاد گردید [۱۹]. در سال‌های اخیر نیز مدل سازی ایستگاه‌های پمپاژ برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در کارکرد و مصرف انرژی ایستگاه‌های پمپاژ انجام گرفته است. در مطالعه‌ای که در مورد امکان ایجاد سیستم کنترلی با بازخورد گیری همزمان از دبی و فشار خروجی ایستگاه پمپاژ با هدف تعیین بهترین نقطه کاری الکتروپمپ‌ها انجام گرفت، این روش به عنوان یکی از بهترین روش‌ها در طراحی سیستم کنترل تعیین گردید که یکی از مزایای آن کاهش مصرف انرژی به دلیل کارکرد سیستم در بهترین نقطه کاری و راندمان بالا در این نقطه می‌باشد [۲۰].

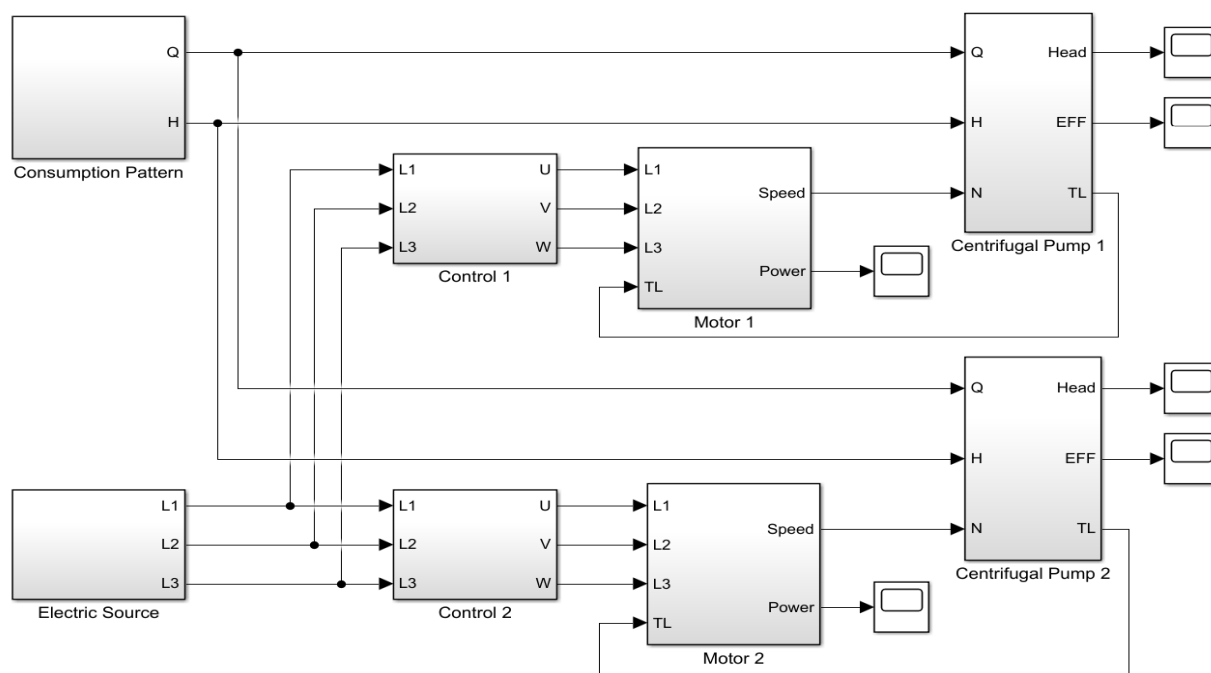
استفاده از مدل سازی در تحقیقاتی در زمینه مقایسه عملکرد استفاده از موتورهای الکتریکی کلاس IE3 و IE4 در بخش پمپاژ آب در توان‌های بین ۲/۲ تا ۲۰۰ کیلووات مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده کاهش عمده در تولید گازهای گلخانه‌ای در استفاده از موتورهای سنکرون IE4 (SyncRM) در مقایسه با موتورهای الکتریکی القایی IE3 (IM) می‌باشد که باعث پیشنهاد استفاده اجباری از موتورهای IE4 در الکتروپمپ‌های با توان ۰/۷۵ تا ۲۰۰ کیلووات می‌گردد [۲۱].

در این مقاله رفتار مدل ریاضی هر الکتروپمپ در ایستگاه پمپاژ در قبال سناریوهای مختلف مصرف آب، میزان مصرف انرژی، سرعت دورانی و بازدهی ایستگاه پمپاژ به عنوان پارامترهای تعیین کننده اکوانرژی مطرح و مورد بررسی قرار گرفته است. تنوع الکتروپمپ‌ها، تعداد الکتروپمپ‌ها در ایستگاه‌های پمپاژ مختلف، تأثیرات ترکیب الکتروپمپ‌های غیر مشابه با استراتژی‌های کنترل سرعت ثابت و سرعت متغیر و ترکیب هم زمان آن‌ها در یک ایستگاه پمپاژ، بررسی تأثیر ترتیب استفاده از سیستم کنترل سرعت متغیر برای الکتروپمپ‌های مختلف با ابعاد و توان متفاوت و تعیین تأثیرات آن در هزینه اولیه ساخت ایستگاه‌های پمپاژ و زمان بازگشت سرمایه استفاده از سیستم کنترل سرعت متغیر از نوآوری‌های این مقاله می‌باشند. ارائه مدل دینامیکی ایستگاه پمپاژ که امکان تسریع در بررسی سناریوهای دلخواه مصرف آب را برای ایستگاه پمپاژ فراهم آورده و راه را برای بررسی تأثیر فاکتورهای متفاوت در ارائه روش‌های مختلف برای کاهش مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ در حال بهره‌برداری نیز از دیگر دستاوردهای نوآورانه این مقاله محسوب می‌شوند.

۲- مدل سازی ریاضی

یکی از مهم‌ترین گزینه‌ها در میان ایده‌های متنوع قابل بیان برای کاهش مصرف انرژی در این بخش طراحی اولیه دقیق و بهینه ایستگاه پمپاژ می‌باشد. به طور کلی ایستگاه‌های پمپاژ تشکیل یافته از چندین الکتروپمپ با اتصال موازی به یکدیگر جهت تامین دبی‌های بالای مصرف می‌باشد. روش طراحی نیز بر اصل تامین دبی توسط چندین الکتروپمپ در حال کار هم زمان استوار می‌باشد که با توجه به نیازهای شبکه مصرف، حساسیت

نسبت به تامین آب به مقدار انرژی قابل دسترس در محل ایستگاه پمپاژ استوار است. بنابراین ایستگاه‌های پمپاژ معمولاً به صورت تامین دبی توسط چند پمپ در حال کار طراحی می‌گردند. اما در این میان تقسیم بندی دبی بین الکتروپمپ‌ها در داخل خود ایستگاه پمپاژ نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق تقسیم بندی بهینه تامین دبی در بین الکتروپمپ‌های خود ایستگاه پمپاژ با تمرکز بر افزایش راندمان به عنوان یکی از پارامترهای مهم در طراحی ایستگاه‌های اکوانرژی تاکید شده است. با توجه به تعداد زیاد ایستگاه‌های پمپاژ در تمامی بخش‌های صنعتی و ساختمانی، اهمیت بالای هر گونه کاهش در مصرف انرژی در این بخش مشهود است. بدون هزینه بودن این روش در کاهش مصرف انرژی، سهولت استفاده برای تمامی انواع ایستگاه‌های پمپاژ و اولویت کاهش مصرف انرژی قبل از مصرف نسبت به بازیابی هزینه بر آن پس از مصرف بر اهمیت و لزوم این تحقیق و نتایج حاصل از آن می‌افزاید. از میان انواع روش‌های مختلف تحلیل رفتاری ایستگاه‌های پمپاژ، استفاده از مدل سازی ریاضی و تحلیل نرم‌افزاری رفتار آن در قبال انواع مختلف سناریوی مصرف به دلیل امکان بررسی جداگانه رفتار هر قسمت بهترین گزینه می‌باشد. شکل (۱) نشان دهنده کلیات مدل سازی دینامیکی انجام یافته برای ایستگاه‌های پمپاژ می‌باشد. فشار و دبی کل مطابق با سناریوی مصرف آب به عنوان ورودی به مدل ایستگاه پمپاژ داده شده و با توجه به نوع ایستگاه و تنوع تعداد الکتروپمپ، سهم از دبی کل و استراتژی کنترل سرعت بین الکتروپمپ‌های موازی ایستگاه تقسیم می‌شود. پارامترهای مصرف انرژی ایستگاه که متصل به منبع الکتریکی سه فاز می‌باشد رصد شده و تغییرات آن‌ها به صورت لحظه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. با توجه به بررسی ایستگاه پمپاژ در حالت پایدار، از نوسانات لحظه‌ای ناشی از تغییرات دبی یا تغییرات سرعت دورانی اغماض شده و در نهایت پارامترهای الکتریکی و هیدرولیکی در حالت پایدار مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بنابراین می‌توان فشار خروجی الکتروپمپ‌ها را به دلیل برابری نهایی در حالت پایدار با فشار کلکتور خروجی ایستگاه پمپاژ به عنوان فشار خروجی ایستگاه مورد مطالعه قرار داد.



شکل ۱- اجزای مدل سازی ریاضی ایستگاه پمپاژ در فضای MATLAB/Simulink

۲-۱- مدل ریاضی الکتروپمپ گریز از مرکز

مدل پمپ گریز از مرکز به عنوان تعیین کننده اصلی رفتار ایستگاه پمپاژ، مهم‌ترین قسمت در مدل‌سازی ریاضی می‌باشد [۲۲]. شکل کلی مدل پمپ گریز از مرکز به صورت رابطه (۱) که رفتار آن با مطابقت بالایی با قوانین تشابه و اطلاعات تجربی ارائه می‌دهد، بیان می‌گردد [۲۳]. با استفاده از رابطه (۳)، گشتاور هیدرولیکی به صورت تابعی از دبی و سرعت دورانی به دست می‌آید [۲۴].

$$H = aQ^2 + bQN + cN^2 \quad (1)$$

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} = T_H \cdot N \quad (2)$$

$$T_L = T_H + B \cdot N = \left(\frac{\gamma}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{Q}{N}\right) \cdot (aQ^2 + bQN + cN^2) + B \cdot N \quad (3)$$

۲-۲- مدل ریاضی منبع الکتریکی

با اعمال گشتاور بار به عنوان ورودی به مدل الکتروموتور سه فاز القایی متصل به مدل منبع الکتریکی مطابق روابط (۴) تا (۶)، مقدار مصرف انرژی الکتریکی به دست می‌آید. توان الکتریکی نهایی مصرفی توسط الکتروپمپ از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد [۱۱].

$$V_{as} = V_m \cos \omega_e \theta \quad (4)$$

$$V_{bs} = V_m \cos \left(\omega_e \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (5)$$

$$V_{cs} = V_m \cos \left(\omega_e \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (6)$$

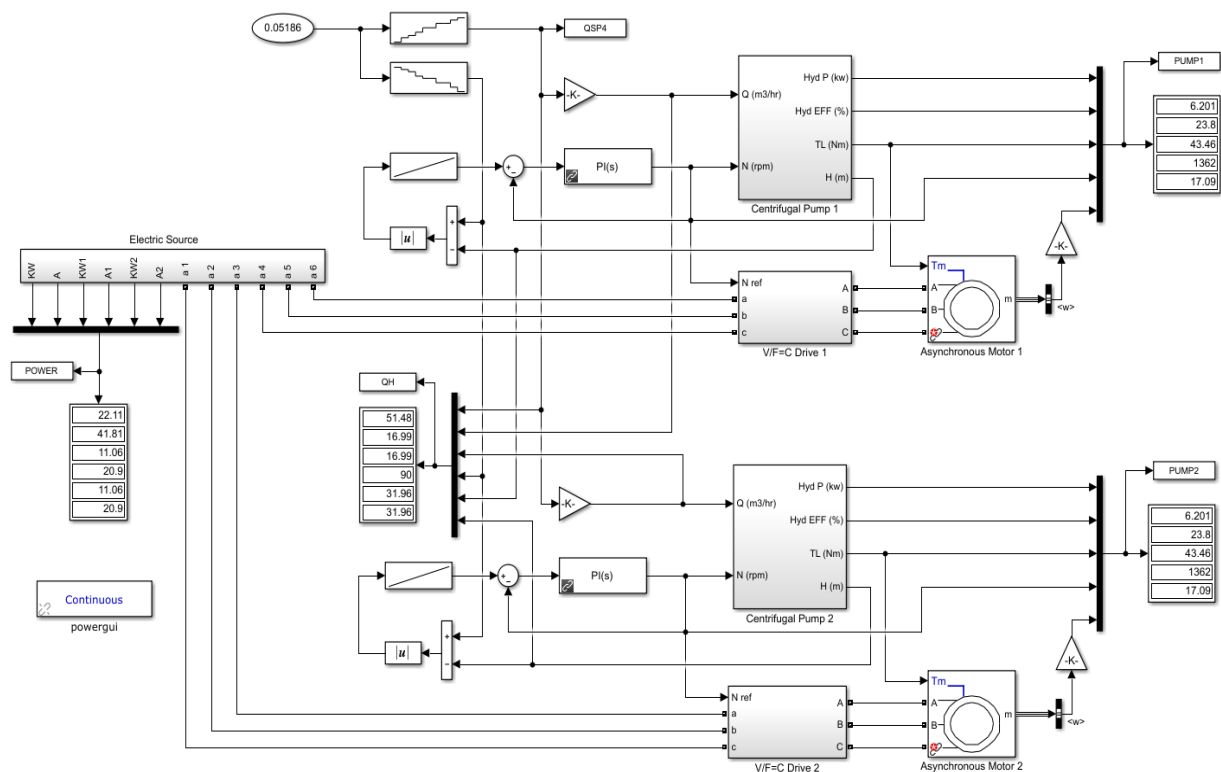
$$P = \sqrt{3} V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (7)$$

با ایجاد روابط فوق به صورت روابط ریاضی در فضای نرم‌افزار MatLab/Simulink تحلیل لحظه‌ای رفتار هر الکتروپمپ در سیستم پمپاژ طراحی شده مشخص می‌گردد. در این تحقیق دو نوع سیستم کنترل در مورد نحوه کنترل سرعت دورانی الکتروموتور و نیز ترکیب آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن‌ها تحلیل شده است. روش اول کنترل سرعت ثابت که بسته به نوع الکتروموتور هیچ گونه کنترلی روی فرکانس و ولتاژ الکتروموتور انجام نمی‌گیرد. در این حالت سرعت دورانی در طول مدت تحلیل در الکتروموتور فارغ از مقدار

مصرف آب در خروجی ایستگاه پمپاژ ثابت در نظر گرفته می‌شود. در روش دوم با پایش فشار خروجی در ایستگاه پمپاژ نسبت به کنترل PID سرعت دورانی الکتروموتور اقدام می‌گردد. دو روش اول و دوم برای تمامی الکتروپمپ‌های ایستگاه پمپاژ به صورت همزمان اجرا می‌گردد. در روش سوم، ترکیبی از دو روش اخیر جهت کنترل سرعت الکتروپمپ‌ها در قبال سناریوی مصرف آب بررسی می‌شود. پارامترهای مورد بررسی در تحلیل نرم‌افزاری شامل فشار هر الکتروپمپ، سرعت دورانی، مصرف انرژی بیشینه، مصرف انرژی در نقطه کاری و راندمان می‌باشند. یکی از مهم‌ترین مباحث مورد بررسی در این تحقیق نحوه تقسیم بندی تامین دبی در بین الکتروپمپ‌های موازی ایستگاه پمپاژ و تاثیر آن در راندمان و مصرف انرژی بر اساس سیستم کنترل آن می‌باشد. معمولاً جهت افزایش ضریب اطمینان طراحی، افزاز دبی کل با درصد بالایی برای هر الکتروپمپ در نظر گرفته می‌شود که منجر به کاهش راندمان در قبال سناریوی مصرف متغیر می‌گردد. بنابراین طراحی بهینه اولیه و نیز بررسی تاثیر استفاده از روش‌های کنترلی مختلف در راندمان بررسی شده است. فارغ از نوع کنترل هر الکتروپمپ در ایستگاه پمپاژ، دبی کل از رابطه (۸) محاسبه می‌گردد [۲۵].

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (8)$$

شکل (۲) نشان دهنده مدل سازی انجام یافته برای بررسی راندمان هر الکتروپمپ در ایستگاه پمپاژ با دو دستگاه الکتروپمپ می‌باشد. با توجه به این شکل باید ابتدا دبی به صورت تابعی از زمان به عنوان ورودی به مدل پمپ گریز از مرکز اعمال شده، سپس فشار، توان هیدرولیکی و راندمان آن محاسبه گردد.



شکل ۲- جزئیات شبیه سازی مدل الکتروپمپ در فضای نرم‌افزار MatLab/Simulink

ترکیب کردن الکتروپمپ‌های مختلف با دبی‌های متفاوت در شبیه‌سازی امکان پذیر بوده و دبی هر الکتروپمپ به صورت درصدی از دبی کل محاسبه و به بلوک پمپ گریز از مرکز اعمال می‌گردد. بلوک مربوط به درایو فرکانس متغیر ما بین دو بلوک منبع الکتریکی و موتور آسنکرون سه فاز قرار گرفته و فرکانس انرژی الکتریکی اعمال شده به موتور الکتریکی را با توجه به سرعت مبنای تعیین شده توسط کنترل کننده PID و الگوریتم کنترل نسبت ثابت ولتاژ به فرکانس تعیین می‌کند. منبع الکتریکی شامل فیلتر سلفی - خازنی بوده و مقدار توان الکتریکی مصرفی هر الکتروپمپ و توان مصرفی کل ایستگاه پمپاژ را محاسبه و نشان می‌دهد. بلوک موتور آسنکرون سه فاز شامل دسته روابط شبیه‌سازی موتور در محورهای d و q بوده و با اعمال گشتاور بار در ورودی آن سرعت دورانی الکتروموتور را تعیین می‌نماید [۱۱]. در حالت پایدار سرعت دورانی شفت موتور و سرعت مبنای تعیین شده توسط درایو فرکانس متغیر با هم برابر می‌باشند. بنابراین سرعت مبنای عنوان سرعت ورودی پمپ گریز از مرکز در نظر گرفته شده و مطالعات در حالت پایدار انجام یافته است. درایو فرکانس متغیر در حالت کنترل دور متغیر (VS) به ترکیب کنتاکتورهای ستاره - مثلث در حالت کنترل سرعت ثابت (CS) تبدیل می‌شوند. سرمایه اولیه مورد نیاز برای استفاده از درایوهای فرکانس متغیر بسیار بالا می‌باشد، بنابراین در ایستگاه‌های پمپاژ بعضاً از ترکیب دو سیستم (CS) و (VS) نیز استفاده می‌شود که این موضوع و تاثیر آن بر راندمان در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. انتخاب در مرحله اول ایستگاه پمپاژ با دو الکتروپمپ موازی در نظر گرفته شده و در مراحل بعدی نتایج تحقیقات برای تعداد بیشتر الکتروپمپ‌ها نیز بررسی می‌شود. سناریوی مصرف بر اساس تامین نیاز آبی ۱۰ ساله مزارع زیتون به عنوان نمونه مورد بررسی به مدل اعمال می‌گردد. طراحی ایستگاه‌های پمپاژ از نظر تعداد الکتروپمپ‌های موازی می‌تواند متفاوت باشد، به طوری که برای نقاط کاری مشابه می‌توان از ایستگاه‌های پمپاژ با تعداد متفاوت الکتروپمپ استفاده نمود. بنابراین در این تحقیق تاثیر هم زمان انتخاب تعداد الکتروپمپ و سیستم کنترل سرعت دورانی در راندمان بررسی شده است. مشخصات مدل‌های ریکاتی برای الکتروپمپ‌ها در جدول (۱) آمده است.

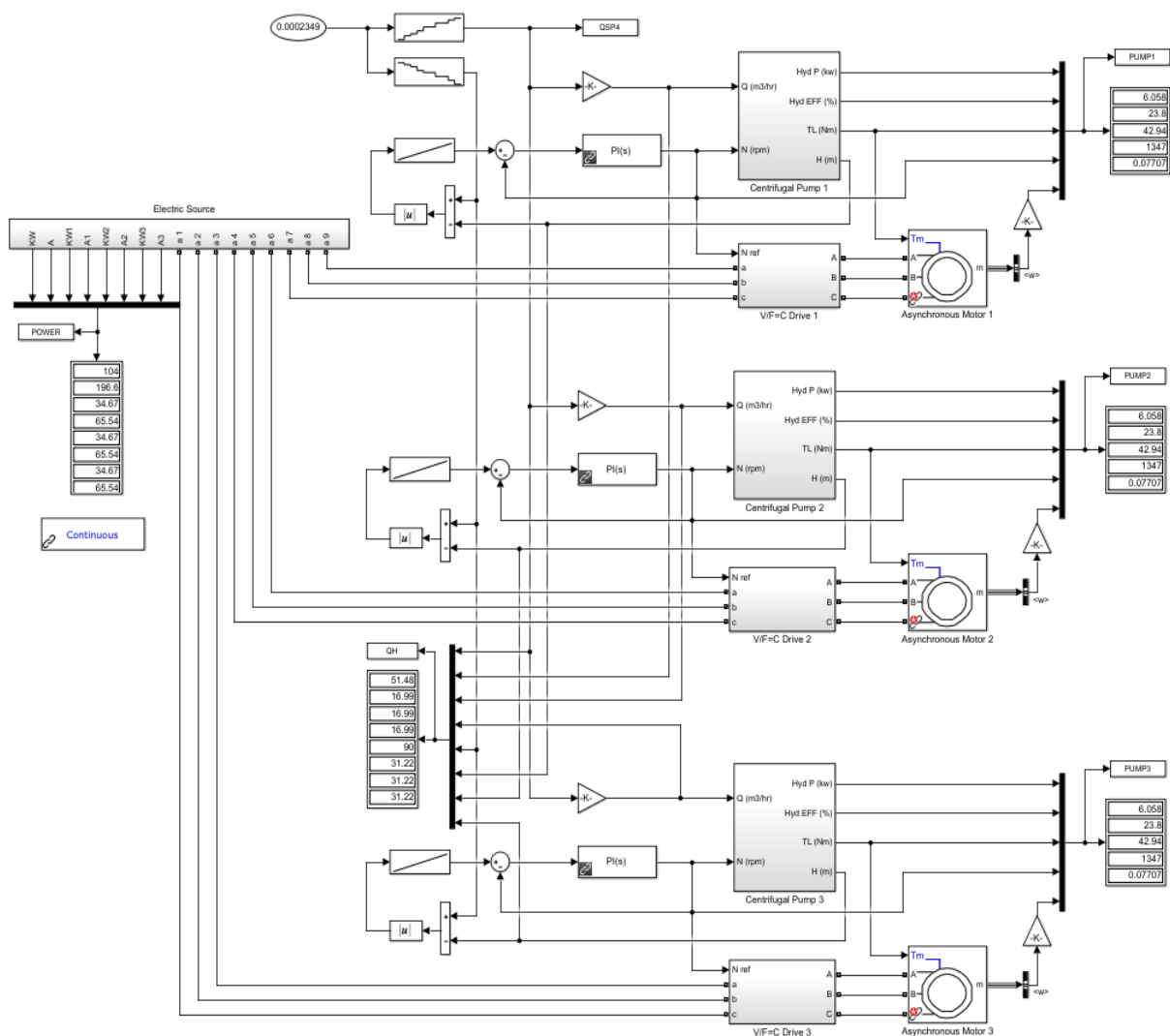
در این جدول ضریب‌های ثابت مدل هر الکتروپمپ و توان اسمی الکتروموتور آن مشخص شده است. الکتروموتورها از نوع تک جفت قطب با ولتاژ اسمی ۴۰۰ ولت و فرکانس اسمی ۵۰ هرتز می‌باشند. با توجه به فشارهای نسبتاً بالا در نقاط کاری مختلف از الکتروپمپ‌های طبقاتی افقی استفاده شده است. نام‌گذاری بر اساس استانداردهای نام‌گذاری الکتروپمپ‌ها به صورت سائز دهانه خروجی الکتروپمپ بر حسب میلیمتر، تعداد طبقات و توان اسمی الکتروموتور کوپل شده انجام یافته است [۲۶]. عمده‌ترین تفاوت بین سیستم‌های کنترل سرعت ثابت و سرعت متغیر در استفاده از کنترل کننده PID در بالادست مدل الکتروموتور می‌باشد [۲۷].

[۲۸]. در حالت سرعت متغیر، از فشار خروجی سیستم به عنوان بازخورد جهت تعیین سرعت مبنای الکتروموتور استفاده می‌شود. با وجود اینکه می‌توان با استفاده از دبی سنج نیز اقدام به تعیین سرعت مبنای نمود ولی به دلایل اقتصادی در عمل نیز از بازخورد فشار به جای دبی استفاده می‌گردد. بنابراین در این تحقیق جهت تطابق بیشتر مدل با ایستگاه‌های پمپاژ در حال بهره برداری، از فشار به عنوان بازخورد سیستم کنترل سرعت متغیر استفاده می‌شود [۲۹]. اختلاف فشار هر الکتروپمپ با فشار مورد نیاز در نقطه کاری مورد نظر به عنوان ورودی به کنترل کننده PID اعمال شده و با استفاده ضرایب ۱، ۰/۵ و صفر به عنوان ضرایب تناسبی، انتگرالی و مشتق گیر، سرعت مبنای برای درایو فرکانس متغیر توسط کنترل کننده PI تعیین می‌گردد.

جدول ۱- مشخصات الکتروپمپ‌های مورد استفاده در طراحی و مدل سازی ایستگاه پمپاژ

Model	a	b	c
40-3-15kw	-0.1741	9.12E-04	1.37E-05
40-5-22kw	-0.2946	1.60E-03	2.27E-05
50-3-18.5kw	-0.0201	5.20E-05	1.39E-05
50-5-30kw	-0.0335	8.95E-05	2.30E-05
50-6-37kw	-0.0424	1.55E-04	2.75E-05
65-2-22kw	-0.0074	4.88E-05	1.25E-05
65-3-37kw	-0.0124	1.25E-04	1.83E-05
65-4-45kw	-0.0159	1.42E-04	2.47E-05
80-2-55kw	-0.0017	-3.99E-05	1.79E-05
80-3-75kw	-0.004	3.23E-05	2.47E-05

* تمامی الکتروپمپ‌ها از سری WKL می‌باشند [۲۲]



شکل ۳- شبیه‌سازی سیستم پمپاژ با سه دستگاه الکتروپمپ در فضای نرم‌افزار MatLab/Simulink

جدول ۲- مشخصات الکتروپمپ‌های ایستگاه پمپاژ با دو الکتروپمپ با سناریوی اول

Year	Flow (m ³ /hr)	Head (m)	50 + 50	55 + 45	60 + 40	65 + 35	
1	51.48	90	2P1: (50-3) + (50-3)	2P3: (50-3) + (50-3)	2P6: (65-2) + (40-3)	2P10: (65-2) + (40-3)	
2	61.92	89			2P7: (50-3) + (50-3)		
3	68.40	88			2P2: (65-2) + (65-2)	2P4: (65-2) + (50-3)	2P8: (65-2) + (50-3)
4	77.40	86					
5	83.50	85					
6	88.60	85					
7	93.20	83					
8	99.70	83	2P5: (65-2) + (65-2)	2P9: (65-2) + (65-2)	2P11: (65-2) + (50-3)		
9	106.56	81					
10	111.60	79					

* تمامی الکتروپمپ‌ها از سری WKL می‌باشند.

جدول (۲) نشان‌دهنده دبی و فشار در نقاط کاری مورد نظر در بازه ۱۰ ساله سناریوی اول می‌باشد. رفتار مدل الکتروپمپ‌های هر ایستگاه پمپاژ با الکتروپمپ‌های مشخص شده در قسمت مربوطه در قبال نقاط کاری یکسان بررسی شده است. در حالت ایستگاه پمپاژ متشکل از دو دستگاه الکتروپمپ، دبی در چهار حالت مختلف بین الکتروپمپ‌ها تقسیم شده و رفتار هر الکتروپمپ به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین مطابق جدول (۲)، تعداد ۱۱ ایستگاه پمپاژ با ترکیب الکتروپمپ‌های مختلف در برابر نقاط کاری مختلف برای هر الکتروپمپ مورد بررسی قرار گرفته است. برابر بودن فشار کاری الکتروپمپ‌ها با مدل‌های مختلف و سهم از تامین دبی کل متفاوت در کنار سیستم کنترل سرعت ثابت یا متغیر حالات مختلف بررسی رفتار انواع الکتروپمپ‌ها در شرایط مختلف کاری را به دست می‌دهد.

جدول (۳) ترکیب الکتروپمپ‌های متفاوت در قبال سناریوی مصرف اول با سه دستگاه الکتروپمپ را نشان می‌دهد. تعداد ۸ ایستگاه پمپاژ با ترکیب الکتروپمپ‌های مشابه یا مختلف با سهم از دبی کل متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل (۳) نشان‌دهنده شبیه سازی ایستگاه پمپاژ با سه دستگاه الکتروپمپ موازی در فضای نرم‌افزار Matlab/Simulink می‌باشد. با توجه به این شکل، سرعت مبنای خروجی کنترل کننده PI، با توجه به اختلاف فشار تولیدی توسط الکتروپمپ و فشار نقطه کاری که توسط سناریوی مصرف تعیین می‌شود، محاسبه و به مدل کنترل کننده سرعت الکتروپمپ اعمال می‌گردد.

جدول ۳- مشخصات الکتروپمپ‌های ایستگاه پمپاژ با سه الکتروپمپ با سناریوی اول

Year	Flow (m ³ /hr)	Head (m)	33 + 33 + 33	40 + 30 + 30	50 + 25 + 25
1	51.48	90	3P1: (40-3) + (40-3) + (40-3)	3P3: (40-3) + (40-3) + (40-3)	3P7: (50-3) + (40-3) + (40-3)
2	61.92	89		3P4: (50-3) + (40-3) + (40-3)	
3	68.40	88	3P2: (50-3) + (50-3) + (50-3)	3P5: (50-3) + (50-3) + (50-3)	
4	77.40	86			
5	83.50	85			
6	88.60	85			
7	93.20	83			
8	99.70	83		3P6: (65-2) + (50-3) + (50-3)	3P8: (65-2) + (50-3) + (50-3)
9	106.56	81			
10	111.60	79			

* تمامی الکتروپمپ‌ها از سری WKL می‌باشند.

در حالت پایدار و زمانی که الکتروپمپ در حال تامین دبی ایستگاه پمپاژ می‌باشد، این اختلاف فشار نزدیک به صفر بوده و الکتروپمپ با سرعت دورانی تعیین شده توسط کنترل کننده PI در حال کار می‌باشد.

$$\eta_T = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \eta_i}{Q_T} \quad (9)$$

راندمان متوسط ایستگاه پمپاژ با الکتروپمپ‌های موازی مطابق رابطه (۹) محاسبه شده و نتایج آن به صورت نموداری بررسی می‌گردد. در ایستگاه پمپاژ با دو دستگاه الکتروپمپ راندمان در چهار حالت مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالت اول هر دو الکتروپمپ با سیستم کنترل سرعت ثابت، در حالت دوم و سوم یکی از الکتروپمپ‌ها با سیستم کنترل سرعت متغیر و در حالت چهارم هر دو الکتروپمپ با سیستم کنترل سرعت متغیر شبیه‌سازی شده‌اند. با توجه به تمایز الکتروپمپ‌ها در تقسیم بندی سهم تامین دبی کل، حالت‌های دوم و سوم نشان‌دهنده تاثیر سیستم کنترل و ابعاد الکتروپمپ در راندمان آن می‌باشد. مطابق اطلاعات مندرج در جدول (۳)، در حالت اول هر سه الکتروپمپ با سیستم کنترل سرعت ثابت کنترل شده، در حالت دوم تا پنجم ترکیب هر دو سیستم کنترل مورد بررسی قرار گرفته و در حالت ششم هر سه الکتروپمپ با سیستم کنترل سرعت متغیر کنترل می‌شوند. جهت افزایش اعتبار و قابلیت اطمینان نتایج به دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها و همچنین استقلال رفتار مدل سازی ریاضی از سناریوی مصرف آب، ایستگاه‌های پمپاژ با نقاط کاری متفاوت در قبال سناریوی دوم نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جزئیات ایستگاه‌های پمپاژ در قبال سناریوی دوم با دو الکتروپمپ در جدول (۴) و سه الکتروپمپ در جدول (۵) آمده است.

جدول ۴- مشخصات ایستگاه پمپاژ با دو الکتروپمپ با سناریوی دوم

Year	Flow (m ³ /hr)	Head (m)	50 + 50	55 + 45	60 + 40	65 + 35		
1	73.08	152	2P1: (50-5) + (50-5)	2P4: (50-5) + (50-5)	2P9: (65-4) + (50-5)	2P12: (65-4) + (50-5)		
2	88.31	150	2P2: (65-4) + (65-4)	2P5: (65-4) + (50-5)			2P10: (65-4) + (65-4)	2P13: (65-4) + (65-3)
3	97.44	148		2P6: (65-4) + (65-4)	2P11: (80-3) + (65-4)	2P14: (80-3) + (50-5)		
4	110.64	147		2P7: (80-3) + (65-4)				
5	118.76	145			2P3: (80-3) + (80-3)	2P8: (80-3) + (80-3)		
6	124.85	144						
7	132.97	144						
8	142.10	143						
9	150.22	142						
10	164.43	140						

* تمامی الکتروپمپ‌ها از سری WKL می‌باشند.

جدول ۵- مشخصات ایستگاه پمپاژ با سه الکتروپمپ با سناریوی دوم

Year	Flow (m ³ /hr)	Head (m)	33 + 33 + 33	40 + 30 + 30	50 + 25 + 25
1	73.08	152	3P1: (50-6) + (50-6) + (50-6)	3P5: (50-5) + (50-6) + (50-6)	3P9: (50-5) + (40-5) + (40-5)
2	88.31	150	3P2: (50-5) + (50-5) + (50-5)	3P6: (50-5) + (50-5) + (50-5)	3P10: (65-4) + (40-5) + (40-5)
3	97.44	148		3P7: (65-4) + (50-5) + (50-5)	3P11: (50-5) + (50-5) + (50-5)
4	110.64	147			
5	118.76	145		3P4: (65-4) + (65-4) + (65-4)	3P8: (65-4) + (65-3) + (65-3)
6	124.85	144			
7	132.97	144			
8	142.10	143			
9	150.22	142			
10	164.43	140			

* تمامی الکتروپمپ‌ها از سری WKL می‌باشند.

۳- بحث و نتایج

در این تحقیق ۱۱ ایستگاه پمپاژ با دو الکتروپمپ و ۸ ایستگاه پمپاژ با سه الکتروپمپ در قبال سناریوی اول مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین جهت اعتبار بخشی به نتایج به دست آمده، مطالعات روی سناریوی مصرف دوم با ۱۵ ایستگاه پمپاژ متشکل از دو الکتروپمپ و ۱۲ ایستگاه پمپاژ با سه الکتروپمپ تکرار شده که نتایج آن به صورت جداول و نمودارها بیان شده است. در مجموع ۶۸۰ نقطه کاری مطابق دو سناریوی مصرف در ایستگاه‌های پمپاژ متشکل از دو و سه الکتروپمپ و ۱۷۲۰ نقطه کاری مختلف برای ۱۰ الکتروپمپ با مشخصات مندرج در جدول (۱) مدل سازی و توسط نرم‌افزار MatLab/Simulink شبیه سازی و رفتار پارامترهای مختلف آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۶- راندمان هیدرولیکی ایستگاه پمپاژ با دو الکتروپمپ با ترکیب سیستم‌های کنترل سرعت ثابت و سرعت متغیر

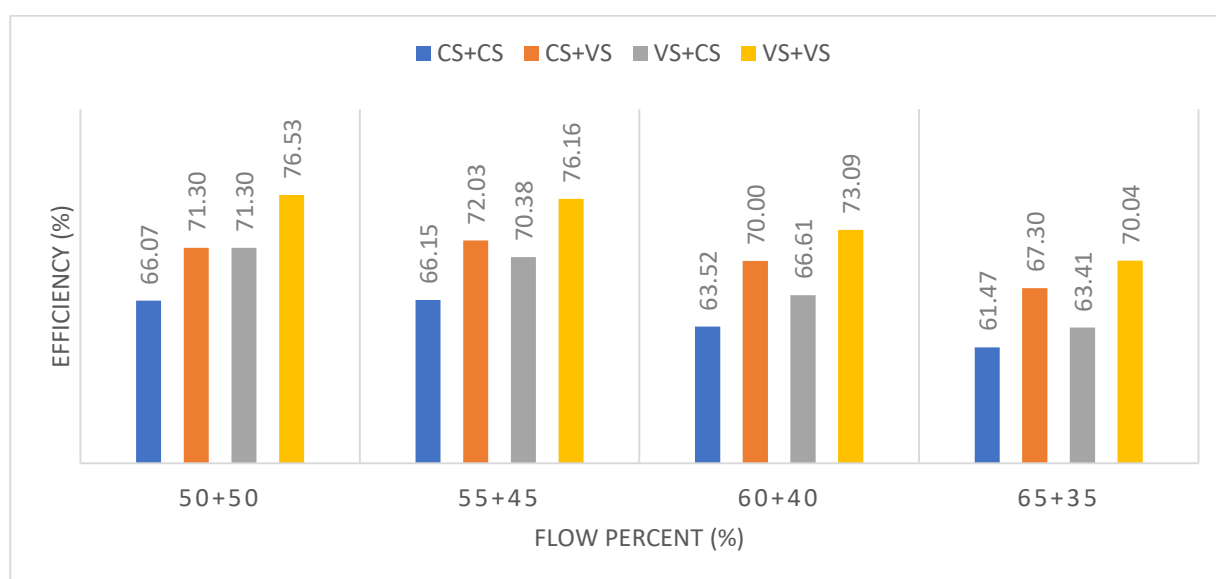
EFF	50+50	55+45	60+40	65+35	EFF	50+50	55+45	60+40	65+35
CS+CS	61.50	61.20	56.25	56.40	SA+SA	77.91	64.79	63.93	66.86
	64.80	64.45	63.45	57.00		76.76	76.54	75.25	59.34
	65.90	65.45	64.50	63.05		74.89	75.96	73.61	77.47
	66.10	65.75	65.70	65.25		71.70	73.33	78.53	79.49
	65.70	66.35	66.60	66.30		68.13	78.91	78.29	79.60
	65.90	66.65	67.25	66.95		78.28	76.97	75.67	77.62
	66.70	66.65	67.25	67.15		79.82	77.27	76.25	77.96
	67.60	67.35	67.45	67.45		78.97	74.48	72.65	75.18
	68.30	67.85	66.95	67.15		78.86	79.71	77.56	74.43
	68.20	67.90	67.05	66.60		80.01	80.17	77.90	74.04
VS+CS	69.71	68.63	62.07	60.71	CS+SA	69.71	70.51	58.11	61.65
	70.78	68.79	66.30	57.38		70.78	72.51	72.40	58.61
	70.40	68.25	64.95	67.31		70.40	72.20	73.16	72.78
	68.90	66.15	70.74	68.92		68.90	71.06	73.49	74.88
	66.91	72.08	71.07	69.24		66.91	69.97	73.83	75.65
	72.09	71.63	70.33	68.66		72.09	69.42	72.59	75.66
	73.26	71.78	70.96	68.62		73.26	68.63	72.54	76.13
	73.28	71.20	69.12	67.42		73.28	74.36	70.98	74.46
	73.58	71.44	68.29	66.41		73.58	75.27	76.22	73.33
	74.11	71.41	68.34	65.74		74.11	75.90	76.61	72.95

جدول (۶) نشان دهنده راندمان متوسط هر ایستگاه پمپاژ با دو دستگاه الکتروپمپ با ترکیب سیستم کنترل سرعت ثابت و سرعت متغیر در قبال سناریوی مصرف اول مطابق با مشخصات ایستگاه‌های پمپاژ مندرج در جدول (۲) می‌باشد. در ایستگاه‌های پمپاژ با دو دستگاه الکتروپمپ، چهار حالت تقسیم بندی ۵۰، ۵۵، ۶۰ و ۶۵ درصدی دبی کل ایستگاه بین الکتروپمپ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت‌های تقسیم بندی غیر از ۵۰ درصدی، تفاوت ترتیب کارکرد الکتروپمپ‌ها نیز به دلیل تفاوت در مدل‌ها و توان الکتروپمپ‌ها و تاثیر مستقیم آن در استراتژی کنترل سرعت مورد بررسی قرار گرفته است. راندمان هر الکتروپمپ در قبال نقطه کاری متناظر با استراتژی کنترل سرعت مندرج در جدول (۶) محاسبه شده، راندمان متوسط ایستگاه پمپاژ از رابطه (۹) محاسبه شده و در جدول (۶) درج گردیده است.

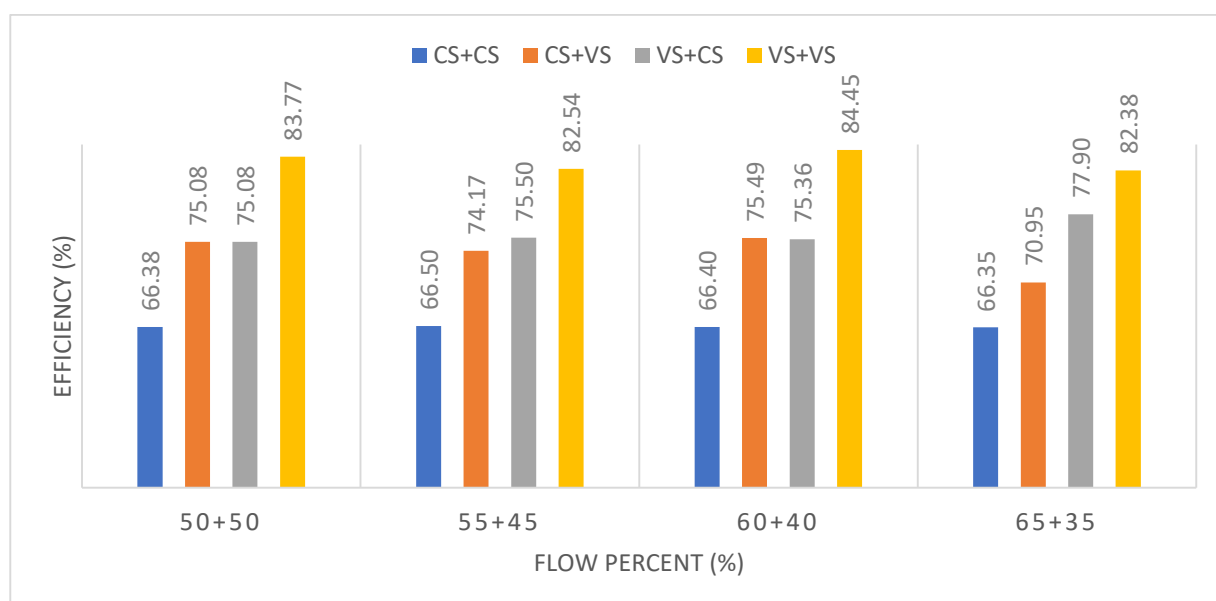
جدول ۷- راندمان هیدرولیکی ایستگاه پمپاژ با دو الکتروپمپ با ترکیب سیستم‌های کنترل سرعت ثابت و سرعت متغیر

EFF	50+50	55+45	60+40	65+35	EFF	50+50	55+45	60+40	65+35
CS+CS	66.60	66.26	64.72	64.55	VS+VS	70.18	69.42	83.69	84.56
	65.20	66.55	66.84	66.69		91.56	79.54	81.16	80.57
	66.30	66.21	67.16	67.07		91.50	90.00	77.30	76.66
	67.40	67.15	66.36	66.53		86.20	85.34	82.77	70.10
	67.30	67.11	66.24	65.65		84.18	82.66	80.17	84.42
	67.30	66.77	65.34	66.33		80.73	80.50	94.44	84.83
	66.90	66.60	66.26	66.94		76.90	76.22	93.67	94.24
	66.10	66.24	67.28	67.73		72.62	88.24	91.38	92.88
	64.90	66.72	67.68	68.23		97.11	87.50	90.30	91.91
66.90	66.68	68.02	68.56	98.38	97.00	86.95	88.13		
VS+CS	68.39	65.67	79.31	79.53	CS+VS	68.39	70.01	69.10	69.58
	78.38	79.37	79.02	76.66		78.38	66.71	68.98	70.59
	78.90	77.45	76.42	73.76		78.90	78.76	68.04	69.97
	76.80	74.58	71.51	68.91		76.80	77.91	77.62	67.72
	75.74	72.63	69.24	84.34		75.74	77.14	77.17	65.73
	74.02	71.30	83.53	84.42		74.02	75.97	76.25	66.73
	71.90	68.56	84.12	84.18		71.90	74.25	75.81	77.00
	69.36	82.29	83.23	83.23		69.36	72.19	75.43	77.38
	81.00	83.06	82.89	82.81		81.00	71.16	75.10	77.32
82.64	81.64	81.68	80.39	82.64	82.04	73.29	76.30		

راندمان متوسط به دست آمده از هر ایستگاه در قبال سناریوی اول در جدول (۶)، بر طبق افراز دبی کل بین دو دستگاه الکتروپمپ با استراتژی های کنترل سرعت مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. در حالت استفاده ترکیبی از سیستم‌های کنترل سرعت یعنی حالت‌های (VS + CS) و (CS + VS)، به دلیل تاثیر نقطه کاری و سری الکتروپمپ‌های مورد استفاده، راندمان کاری به نقاط کاری ایستگاه پمپاژ بستگی دارد. این نتیجه از مقایسه راندمان متوسط در ایستگاه‌های پمپاژ با دو الکتروپمپ در قبال سناریوهای اول و دوم در شکل‌های (۴) و (۵) به دست می‌آید. توان الکتریکی مصرفی هر الکتروپمپ در ایستگاه پمپاژ، سرعت دورانی و سایر پارامترهای مورد بررسی نیز به همین منوال در قبال سناریوی اول تغییر کرده و شرایط کاری مختلف را برای ایستگاه پمپاژ ایجاد می‌کنند که در این میان میتوان با استفاده از بررسی راندمان ایستگاه پمپاژ آمیزه‌ای از تمامی این پارامترها را بررسی نموده و در مورد میزان کارایی پیشنهاد روش‌های کاهش مصرف انرژی در ایستگاه پمپاژ بحث و بررسی نمود.



شکل ۴- راندمان متوسط در ایستگاه‌های پمپاژ با دو دستگاه الکتروپمپ در چهار حالت افراز دبی بین الکتروپمپ‌ها



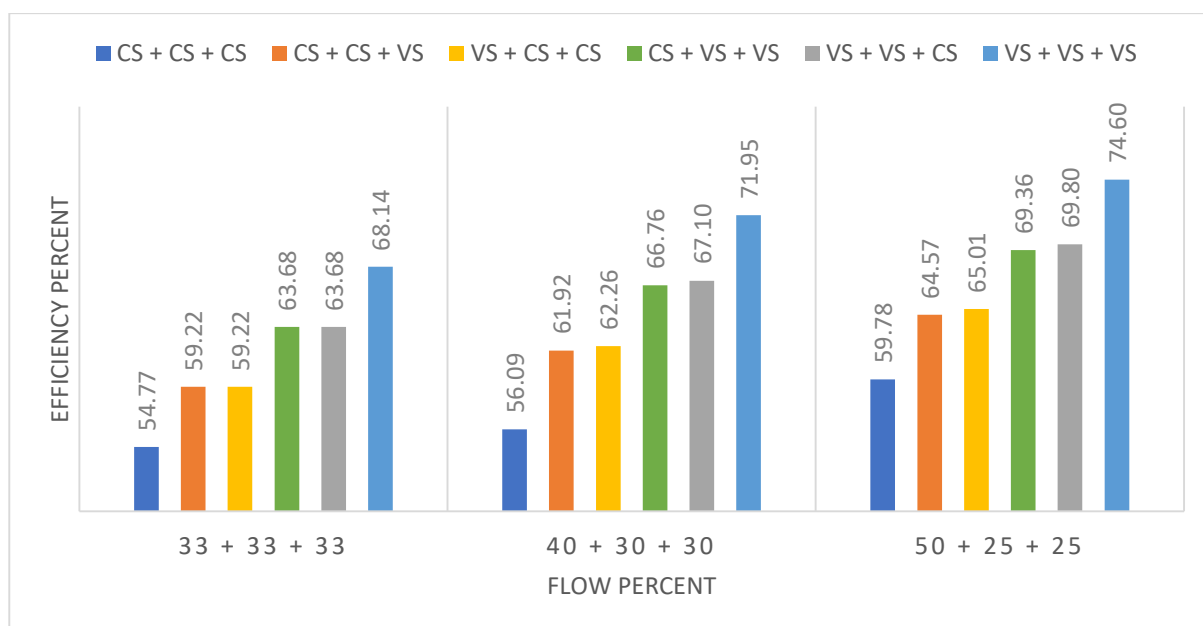
شکل ۵- راندمان متوسط در ایستگاه‌های پمپاژ با دو دستگاه الکتروپمپ در چهار حالت افراز دبی بین الکتروپمپ‌ها

جدول ۸- راندمان هیدرولیکی ایستگاه پمپاژ با سه الکتروپمپ با ترکیب سیستم‌های کنترل سرعت ثابت و سرعت متغیر

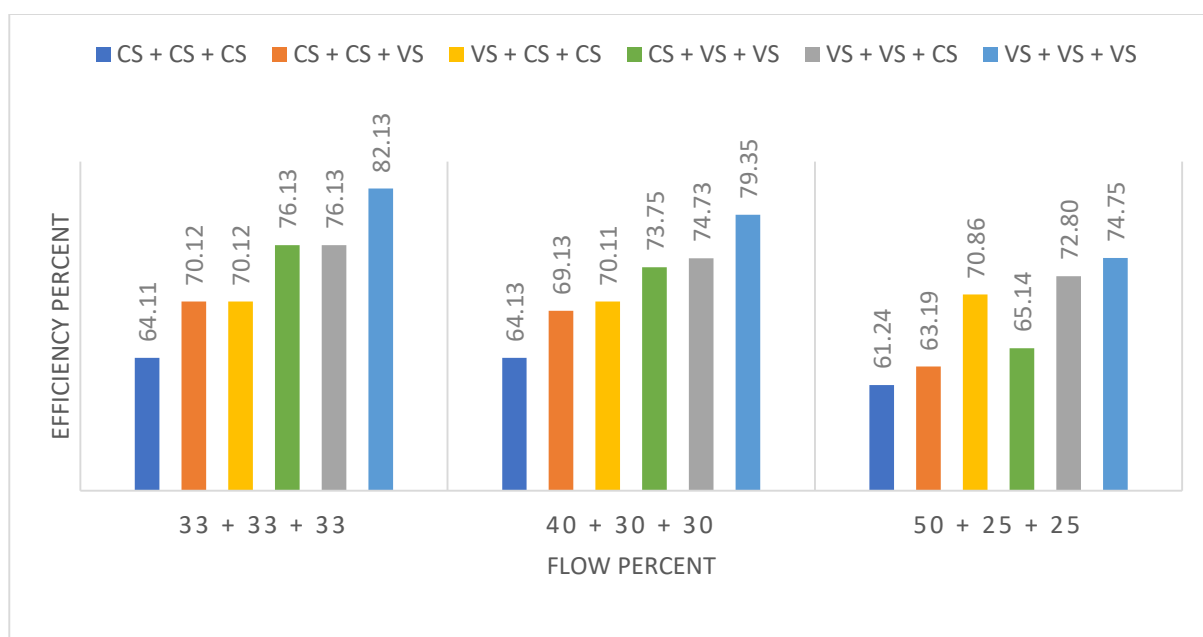
EFF	33+33+33	40+30+30	50+25+25	EFF	33+33+33	40+30+30	50+25+25
CS+CS+CS	46.90	46.90	51.10	CS+VS+VS	55.17	57.51	60.96
	47.90	51.53	52.60		50.25	57.53	63.33
	58.50	52.77	53.17		72.99	55.17	61.68
	61.30	61.00	53.10		76.13	75.99	58.39
	62.70	62.37	52.63		77.18	78.14	57.44
	63.70	63.33	60.70		76.18	77.55	77.20
	64.30	63.83	61.77		77.16	78.50	79.34
	65.10	64.43	63.07		75.72	78.33	80.38
	65.30	64.77	64.10		76.07	78.18	82.26
	65.00	65.17	64.60		76.08	78.82	83.63
CS+CS+VS	51.04	57.51	56.03	VS+VS+CS	55.17	53.44	61.50
	49.07	57.53	57.97		50.25	60.50	61.95
	65.75	55.17	57.42		72.99	59.74	60.42
	68.72	75.99	55.75		76.13	73.69	57.61
	69.94	78.14	55.04		77.18	75.07	55.84
	69.94	77.55	68.95		76.18	74.00	73.07
	70.73	78.50	70.56		77.16	74.69	74.93
	70.41	78.33	71.72		75.72	73.74	75.51
	70.68	78.18	73.18		76.07	77.65	76.70
	70.54	78.82	74.12		76.08	78.37	78.05
VS+CS+CS	51.04	50.16	56.57	VS+VS+VS	59.31	58.75	66.44
	49.07	48.24	56.59		51.42	63.50	67.32
	65.75	58.32	56.16		80.24	60.94	64.68
	68.72	66.68	54.97		83.55	81.18	60.26
	69.94	68.07	53.44		84.42	82.96	58.25
	69.94	68.71	64.83		82.42	81.11	81.32
	70.73	69.56	66.14		83.58	82.02	83.72
	70.41	69.11	66.86		81.02	80.69	84.17
	70.68	69.05	67.62		81.45	84.36	85.78
	70.54	69.17	68.54		81.61	85.19	87.57

جدول ۹- راندمان هیدرولیکی ایستگاه پمپاژ با سه الکتروپمپ با ترکیب سیستم‌های کنترل سرعت ثابت و سرعت متغیر

EFF	33 + 33 + 33	40 + 30 + 30	50 + 25 + 25	EFF	33 + 33 + 33	40 + 30 + 30	50 + 25 + 25
CS+CS+CS	59.50	59.38	57.00	CS+VS+VS	84.63	84.37	61.69
	63.26	63.18	56.70		71.71	72.66	57.46
	64.55	64.64	63.30		72.06	73.38	72.58
	65.54	65.92	65.15		69.92	71.38	73.67
	65.64	66.04	65.70		68.00	71.04	74.52
	65.24	66.14	66.00		66.38	70.16	73.45
	65.64	65.94	66.15		66.46	68.52	72.00
	67.02	65.88	65.95		67.19	66.41	71.20
	65.64	66.72	65.50		83.84	67.77	68.93
65.93	67.76	66.30	83.03	68.47	68.04		
CS+CS+VS	72.06	72.41	59.35	VS+VS+CS	84.63	76.79	61.14
	67.48	68.22	57.08		71.71	70.36	70.26
	68.31	69.13	67.94		72.06	70.01	80.54
	67.73	68.39	69.41		69.92	79.65	78.81
	66.82	68.52	70.11		68.00	79.45	78.55
	65.81	68.17	69.73		66.38	79.08	76.44
	66.05	67.45	69.08		66.46	77.00	74.08
	67.11	66.31	68.57		67.19	74.45	71.83
	74.74	67.30	67.21		83.84	74.72	83.32
74.48	68.03	67.17	83.03	73.30	82.91		
VS+CS+CS	72.06	64.84	58.79	VS+VS+VS	97.20	88.74	63.49
	67.48	65.92	69.88		75.93	74.80	70.64
	68.31	65.76	75.90		75.82	74.26	85.18
	67.73	76.66	74.55		72.11	82.64	83.07
	66.82	76.93	74.14		69.18	81.97	82.96
	65.81	77.09	72.72		66.94	81.07	80.17
	66.05	75.93	71.15		66.87	78.07	77.00
	67.11	74.35	69.21		67.27	74.56	74.46
	74.74	74.26	81.60		92.94	75.19	85.03
74.48	72.87	82.04	91.57	73.74	83.78		



شکل ۶- راندمان متوسط در ایستگاه‌های پمپاژ با سه دستگاه الکتروپمپ در سه حالت افراز دبی بین الکتروپمپ‌ها



شکل ۷- راندمان متوسط در ایستگاه‌های پمپاژ با سه دستگاه الکتروپمپ در سه حالت افراز دبی بین الکتروپمپ‌ها

در ایستگاه‌های پمپاژ با سه الکتروپمپ نیز سه حالت تقسیم بندی برابر $33/3$ درصد برای هر سه الکتروپمپ، 50 درصد با دو الکتروپمپ مشابه 25 درصد و 40 درصد با دو الکتروپمپ مشابه 30 درصد مطالعه شده‌است. نتایج نشان‌گر افزایش راندمان با استفاده از سیستم کنترل سرعت متغیر در تمامی حالات تقسیم‌بندی دبی بین الکتروپمپ‌ها می‌باشد. شکل (۶) نشان‌دهنده راندمان متوسط در ایستگاه‌های پمپاژ مذکور می‌باشد که نشان‌دهنده افزایش راندمان با استفاده از سیستم‌های کنترل سرعت متغیر می‌باشد. با توجه به تطابق کامل نقطه کاری الکتروپمپ و منحنی مشخصه مصرف، بیشترین راندمان ممکن برای تمامی ایستگاه‌های پمپاژ در حالتی که تمامی الکتروپمپ‌ها با سیستم کنترل سرعت متغیر (VS) کار می‌کنند به دست می‌آید.

در سناریوی اول با مقایسه راندمان‌ها در جدول (۶)، می‌توان دریافت که در قبال سناریوی ثابت، استفاده از تقسیم‌بندی ۵۰ درصدی راندمان بالاتری به دست می‌دهد. این در حالی است که در سناریوی دوم که نتایج آن برای ایستگاه‌های پمپاژ با دو الکتروپمپ در جدول (۷) آمده است، به دلیل استفاده از الکتروپمپ‌های بزرگ‌تر راندمان ایستگاه نیز به‌طور چشم‌گیر افزایش یافته است. بنابراین تقسیم‌بندی دبی ۵۵ یا ۶۰ درصدی جهت حصول راندمان بالاتر در هنگام استفاده از الکتروپمپ‌های بزرگ‌تر پیشنهاد می‌شود. همچنین استفاده از سیستم کنترل سرعت متغیر نیز باعث رسیدن به راندمان‌های بالای ۸۰ درصدی می‌گردد.

مطابق نتایج به دست آمده در جدول (۸) و (۹)، در ایستگاه‌های پمپاژ با سه الکتروپمپ علاوه بر افزایش راندمان متوسط ایستگاه به دلیل استفاده از سیستم کنترل سرعت متغیر، استفاده از سیستم کنترل ترکیبی $(VS + VS + VS)$ و $(VS + VS + CS)$ نتیجه بهتری نسبت به $(CS + CS + VS)$ و $(VS + CS + CS)$ به دست می‌دهد. علت این امر نیز استفاده از الکتروپمپ‌های با سیستم کنترل سرعت ثابت به عنوان تامین‌کننده اصلی دبی کل و الکتروپمپ‌های دیگر به عنوان تنظیم‌کننده دبی در نقطه کاری با سیستم کنترل سرعت متغیر می‌باشد. بنابراین نقطه کاری ایستگاه و نقطه مصرف به‌تر بر همدیگر منطبق شده و راندمان بالاتری به دست می‌آید. جدول (۹) همچنین بیان‌گر این موضوع است که در حالت استفاده از سیستم کنترل ترکیبی سرعت ثابت و سرعت متغیر، تقسیم‌بندی دبی کل $(۵۰ + ۲۵ + ۲۵)$ راندمان بالاتری نسبت به سایر تقسیم‌بندی‌ها به دست می‌دهد. لازم به ذکر است که با توجه به شکل (۷)، استفاده از تیپ الکتروپمپ‌های بسیار بزرگ‌تر مانند سری ۸۰ در مقایسه با سری ۴۰ یا ۵۰ در ایستگاه پمپاژ با سه الکتروپمپ در قبال سناریوی دوم باعث تغییر نقطه‌ای در راندمان کل ایستگاه پمپاژ شده است، اما روند کلی افزایش راندمان با استفاده از سیستم کنترل سرعت ترکیبی نسبت به سیستم کنترل سرعت ثابت حفظ شده است.

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با توجه به نتایج شبیه‌سازی مدل ریاضی ایستگاه‌های پمپاژ با ترکیب الکتروپمپ‌ها و سیستم‌های کنترل مختلف، موارد زیر را می‌توان به عنوان نتیجه‌گیری از تحلیل اطلاعات بخش قبلی بیان نمود.

- استفاده از ایستگاه‌های پمپاژ با تعداد الکتروپمپ کمتر به دلیل تجهیزات کمتر، هزینه تعمیرات و نگهداری کمتر، اشغال فضای کمتر و هزینه تمام‌شده پایین‌تر توأم با راندمان بالاتر پیشنهاد می‌گردد. استفاده از الکتروپمپ‌های بزرگ‌تر که باعث ضربه هیدرولیکی و الکتریکی بیشتر در هنگام راه‌اندازی با سیستم کنترل سرعت ثابت و ریسک خرابی بیشتر باعث کاهش قابلیت اعتماد به این ایستگاه‌های پمپاژ می‌گردد.
- در ایستگاه‌های با سه دستگاه الکتروپمپ با سیستم کنترل سرعت ترکیبی، استفاده از سیستم کنترل $(CS + VS + VS)$ به دلیل هزینه اولیه کمتر و زمان کوتاه‌تر بازگشت سرمایه اولیه توأم با استفاده از درایوهای فرکانس متغیر کوچک‌تر و مشابه، نسبت به سیستم کنترل $(VS + VS + CS)$ پیشنهاد می‌گردد.
- استفاده از سیستم کنترل سرعت متغیر برای تمامی الکتروپمپ‌ها باعث افزایش حدود ۱۰ تا ۱۵ درصدی راندمان نسبت به سیستم کنترل سرعت ثابت برای تمامی الکتروپمپ‌های ایستگاه پمپاژ می‌گردد. این مقدار برای حالت استفاده ترکیبی حدود ۵ تا ۱۰ درصد نسبت به سیستم کنترل سرعت ثابت برای تمامی الکتروپمپ‌ها می‌باشد.

به طور کلی می‌توان دریافت که استفاده از سیستم کنترل سرعت متغیر باعث افزایش ۱۰ درصدی راندمان نسبت به سیستم سرعت ثابت می‌گردد. مطابق گزارش سازمان محیط زیست آمریکا در سال ۲۰۱۹ به ازای تولید هر کیلووات ساعت انرژی برق به میزان ۴۱۷/۳ گرم گاز دی‌اکسیدکربن تولید می‌گردد که این رقم در کشورهای در حال توسعه بسیار بالاتر می‌باشد [۳۰]. بنابراین افزایش راندمان با استفاده از طراحی اولیه بهینه از نظر مدل الکتروپمپ مورد استفاده توام با سیستم کنترل سرعت متغیر می‌تواند به عنوان یکی از عوامل مهم در طراحی سیستم‌های پمپاژ اکوانرژی در نظر گرفته شود.

مراجع

- [1] A. Mérida García, J. A. Rodríguez Díaz, J. García Morillo, and A. McNabola, "Energy Recovery Potential in Industrial and Municipal Wastewater Networks using Micro-hydropower in Spain," *Water*, Vol. 13, No. 5, p. 691, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/w13050691>.
- [2] M. C. Morani, A. Carravetta, G. Del Giudice, A. McNabola, and O. Fecarotta, "A Comparison of Energy Recovery by PATs Against Direct Variable Speed Pumping in Water Distribution Networks," *Fluids*, Vol. 3, No. 2, p. 41, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids3020041>.
- [3] IEA, "IEA (2020), Global Energy Review 2020," 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>.
- [4] A. Y. Hoekstra, "Chapter 7 - The Water Footprint of Industry," *Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability*, J. J. Klemeš, Ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 221-254. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780127999685000075>.
- [5] UNESCO, "The United Nations World Water Development Report 2020," 2020. [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985.locale=en>.
- [6] P. W. Gerbens-Leenes, M. M. Mekonnen, and A. Y. Hoekstra, "The Water Footprint of Poultry, Pork and Beef: A Comparative Study in Different Countries and Production Systems," *Water Resources and Industry*, Vol. 1-2, pp. 25-36, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wri.2013.03.001>.
- [7] A. Majid et al., "An Analysis of Electricity Consumption Patterns in the Water and Wastewater Sectors in South East England, UK," *Water*, Vol. 12, No. 1, p. 225, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/w12010225>.
- [8] L. Cimorelli and O. Fecarotta, "Optimal Regulation of Variable Speed Pumps in Sewer Systems," *Environmental Sciences Proceedings*, Vol. 2, No. 1, p. 58, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/environsciproc2020002058>.
- [9] İ. Eker, M. J. Grimble, and T. Kara, "Operation and Simulation of City of Gaziantep Water Supply System in Turkey," *Renewable Energy*, Vol. 28, No. 6, pp. 901-916, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00095-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00095-2).

- [10] C. Kallesøe, "Fault Detection and Isolation in Centrifugal Pumps," PhD Thesis, Aalborg University, 2005. [Online]. Available: <https://vbn.aau.dk/ws/files/316397360/thesis-1a.pdf>.
- [11] F. Khayatzadeh and J. Ghafouri, "Dynamical Modeling of Frequency Controlled Variable Speed Parallel Multistage Centrifugal Pumps," *Archive of Mechanical Engineering*, Vol. 62, No. 3, pp. 347-361, 2015, doi: <https://doi.org/10.1515/meceng-2015-0020>.
- [12] I. Boldea, "Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook," CRC Press, 2017. [Online]. Available: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b13756/linear-electric-machines-drives-maglevs-handbook-ion-boldea>.
- [13] M. H. Rashid, "Power Electronics Handbook, Devices, Circuits and Applications," 2017. [Online]. Available: <http://powerunit-ju.com/wp-content/uploads/2016/11/Book-Power-Electronics-Handbook-3rd-Edition-M-Rashid.pdf>.
- [14] F. L. Luo, H. Ye, and M. H. Rashid, "Digital Power Electronics and Applications," Elsevier, 2010. [Online]. Available: https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=R44dbJu_cYgC&oi=fnd&pg=PP2&ots=BJzS3NKI3u&sig=we6qowRmWZZ43oHME_znZ_pywU8#v=onepage&q&f=false.
- [15] P. C. Krause and C. H. Thomas, "Simulation of Symmetrical Induction Machinery," Vol. 84, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1965, pp. 1038-1053. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4766135>.
- [16] I. V. Nikolenko and A. N. Ryzhakov, "Parallel Operation Mode Optimization of Different-type Centrifugal Pumps of a Water Supply Booster Pumping Station," in 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), 2020, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/DVM49764.2020.9243886>.
- [17] J. A. Rodríguez-Díaz, L. Pérez-Urrestarazu, E. Camacho-Poyato, and P. Montesinos, "The Paradox of Irrigation Scheme Modernization: More Efficient Water Use Linked to Higher Energy Demand," *Spanish Journal of Agricultural Research*, Vol. 9, No. 4, pp. 1000-1008, 2011, doi: <https://doi.org/10.5424/sjar/20110904-492-10>.
- [18] B. Hanson, C. Weigand, and S. Orloff, "Performance of Electric Irrigation Pumping Plants using Variable Frequency Drives," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 122, No. 3, pp. 179-182, 1996, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1996\)122:3\(179\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1996)122:3(179)).
- [19] N. Lamaddalena and S. Khila, "Efficiency-driven Pumping Station Regulation in On-demand Irrigation Systems," *Irrigation Science*, Vol. 31, No. 3, pp. 395-410, 2013, doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0314-0>.
- [20] L. Gevorkov, A. Rassõlkin, A. Kallaste, and T. Vaimann, "Simulation Study of Mixed Pressure and Flow Control Systems for Optimal Operation of Centrifugal Pumping Plants," *Electrical, Control and Communication Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 89-94, 2018, doi: <https://doi.org/10.2478/ecce-2018-0010>.
- [21] V. Goman, V. Prakht, V. Kazakbaev, and V. Dmitrievskii, "Comparative Study of Energy Consumption and CO2 Emissions of Variable-Speed Electric Drives with Induction and

Synchronous Reluctance Motors in Pump Units," *Mathematics*, Vol. 9, No. 21, p. 2679, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/math9212679>.

[22] S. Oshurbekov, V. Kazakbaev, V. Prakht, V. Dmitrievskii, and L. Gevorkov, "Energy Consumption Comparison of a Single Variable-speed Pump and a System of Two Pumps: Variable-speed and Fixed-speed," *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 24, p. 8820, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/app10248820>.

[23] J. Ghafouri, Khayatzadeh, F., and Khayatzadeh A., "Dynamic Modeling of Variable Speed Centrifugal Pump Utilizing MATLAB / SIMULINK," *IJSEI*, 2012. [Online]. Available: <http://ijsei.com/papers/ijsei-10512-09>.

[24] L. Gevorkov, J. L. Domínguez-García, and L. T. Romero, "Review on Solar Photovoltaic-powered Pumping Systems," *Energies*, Vol. 16, No. 1, p. 94, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/en16010094>.

[25] *ISO 17769, Liquid Pumps and Installation - General Terms, Definitions, Quantities, Letter Symbols and Unit*, ISO, 2012. [Online]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/41620/aa7a5151accb417ca3ef07689101f12c/ISO-17769-2008.pdf>.

[26] *PUMPIRAN PUMPS, WKL Series, Multistage Centrifugal Pumps Catalog*, 2012. [Online]. Available: <https://pumpiran.co/?p=3226>.

[27] T. Hieninger, F. Goppelt, and R. Schmidt-Vollus, "On-line Self-tuning for Centrifugal Pumps Driven in Parallel Mode using Dynamic Optimization," Presented at the 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), 2018. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8624814>.

[28] M. R. Nahian, Zaman, M.S., Nurulislam, M., and Rokunuzzaman, M., "Development of a Pressure Sensing Module and Flow Control System for A Prototype Pump Test Bed," *Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems*, Vol. 8, pp. 155-166, 2018, doi: <https://doi.org/10.22146/ijeis.33855>.

[29] L. Gevorkov, V. Šmídl, and M. Sirový, "Model of Hybrid Speed and Throttle Control for Centrifugal Pump System Enhancement," in *IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2019, pp. 563-568, doi: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2019.8781218>.

[30] K. Morgan, "The Carbon Reduction Opportunity of Moving to the Cloud for APAC," *AWS Institute, S&P Global Market Intelligence*, 2021. [Online]. Available: <https://d1.awsstatic.com/institute/The%20carbon%20opportunity%20of%20moving%20to%20the%20cloud%20for%20APAC.pdf>.

فهرست نمادهای انگلیسی

a	ضریب ثابت مدل سازی پمپ گریز از مرکز
b	ضریب ثابت مدل سازی پمپ گریز از مرکز
c	ضریب ثابت مدل سازی پمپ گریز از مرکز
B	ضریب اصطکاک سطح و سیال
H	فشار الکتروپمپ بر حسب متر ستون آب
I	جریان الکتریکی اسمی الکتروموتور
N	سرعت دورانی الکتروپمپ بر حسب دور در دقیقه
P	توان هیدرولیکی الکتروپمپ بر حسب کیلووات
Q	دبی الکتروپمپ بر حسب متر مکعب بر ساعت
Q _T	دبی کل ایستگاه پمپاژ بر حسب متر مکعب بر ساعت
T _H	گشتاور هیدرولیکی الکتروپمپ بر حسب نیوتن متر
T _L	گشتاور بار الکتروموتور بر حسب نیوتن متر
V	ولتاژ اسمی بر حسب ولت
V _m	ولتاژ منبع الکتریکی بر حسب ولت
V _s	ولتاژ سیم پیچ استاتور بر حسب ولت

نمادهای یونانی

γ	وزن مخصوص سیال بر حسب نیوتن بر متر مکعب
η	بازدهی هیدرولیکی الکتروپمپ
η_T	بازدهی هیدرولیکی ایستگاه پمپاژ
θ	زاویه ولتاژهای سه فاز منبع الکتریکی
φ	ضریب توان الکتریکی
ω_e	فرکانس منبع الکتریکی

The Effect of ECO-Energy Design on Energy Consumption in Pumping Plants

Farid Khayatzadeh

Ph.D. Candidate, Mechanical Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Tabriz, Tabriz, Iran

faridkhayatzadeh@tabrizu.ac.ir

*Corresponding author: **Mir Biuk Ehghaghi**

Associated Professor, Mechanical Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Tabriz, Tabriz, Iran

ehghaghi@tabrizu.ac.ir

Moharram Jafari

Associated Professor, Mechanical Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Tabriz, Tabriz, Iran

mjafari@tabrizu.ac.ir

Abstract

In this paper, mathematical model of different pumping plants including two or three centrifugal pumps in parallel connection is developed and simulated by MATLAB/Simulink. The effect of utilizing of variable speed (VS) and constant speed (CS) control on efficiency and energy is studied against different water consumption patterns. In according to results, in plants with double pumps, efficiency is a function of operating points as it varies by different consumption patterns, but in plants with three pumps it varies with a steady algorithm. It is recommended to implement (CS + VS + VS) strategy of control in pumping plant with three centrifugal pumps rather than (VS + VS + CS) as it costs lower in primary expenses of plant construction besides higher reliability, lower maintenance cost and shorter payback time. 10 to 15 percent efficiency increase by all VS control and 5 to 10 percent increase in efficiency is proposed by VS and CS compositional control strategies.

Keywords: Energy saving, Efficiency, Pumping plant, Variable frequency drive