تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۶، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۴ (ص ۴۸-۴۱)

کاربرد پمپ‌های دور متغیر در طراحی و بهره‌برداری سامانه‌های تقاضامدار آبیاری

مرتضی دلفان آذری[۱]، عاطفه پرورش‌ریزی*[۲]

۱. دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۳ـ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۷/۷)

چکیده

در سامانه‌های آبیاری کشور از ایستگاه‌های پمپاژ با پمپ‌های دور ثابت استفاده می‌شود که همیشه با مشکل تلفات آب و انرژی مواجه‌اند. ارائهٔ روشی برای تطبیق عملکرد پمپ‌ها با الزامات بهره‌برداری می‌تواند کارایی توزیع آب و بهره‌وری انرژی را بهبود بخشد. یکی از گزینه‌ها استفاده از پمپ دور متغیر است که خود را با تقاضای متغیر سیستم سازگار می‌کند. در این تحقیق، با کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB، طراحی ایستگاه پمپاژ دور متغیر برای سامانهٔ آبیاری قطره‌ای انجام شد. سپس، با منظورکردن تقاضای متغیر دبی و فشار در طول فصل آبیاری، عملکرد ایستگاه پمپاژ ارزیابی و با چند روش بهره‌برداری متداول از پمپ‌های دور ثابت مقایسه شد. نتایج نشان داد عملکرد پمپ‌های دور متغیر کاملاً مناسب و تلفات آب و انرژی ناچیز است؛ در حالی که میزان تلفات آب در ایستگاه‌های پمپاژ معمول، حتی با فرض طراحی ایده‌آل، بر حسب نوع ایستگاه ۱۶ تا ۳۶ درصد است.

کلیدواژگان: تلفات آب، سامانهٔ آبیاری، طراحی ایستگاه پمپاژ، عملکرد پمپ.

مقدمه

نبودِ دستورالعمل و استاندارد مشخص و نظارت کافی در طراحی، انتخاب، نصب، و بهره‌برداری از سیستم‌های پمپاژ در ایران موجب شده این سیستم‌ها بازده پایینی داشته باشند. بی‌توجهی به هزینه‌های دورهٔ بهره‌برداری سیستم در زمان طراحی، انتخاب محافظه‌کارانهٔ پمپ‌ها و استفاده از روش‌های نامناسب برای کنترل جریان، تغییرات سیستم در طول زمان، استفاده از پمپ یا موتور با بازده پایین، و تعمیرات و نگهداری نامناسب سیستم از علل این موضوع است. در بیشتر سیستم‌ها، مقدار جریان مورد نیاز با زمان تغییر می‌کند. بنابراین، سیستم پمپاژ، ضمن آنکه باید پاسخگوی مقدار بیشینهٔ جریان مورد نیاز باشد، باید بسته به ماهیت سیستم و مشخصات آن از روشی مناسب برای کنترل جریان استفاده کند؛ به طوری که علاوه بر تأمین آب مورد نیاز سامانه، کمترین تلفات انرژی را داشته باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد یکی از پتانسیل‌های اصلی کاهش مصرف انرژی در آن‌ها اصلاح روش کنترل جریان است. استفاده از شیرکنترل جریان و خط کنارگذر، که بیشترین تلفات انرژی را سبب می‌شوند، در بسیاری از سیستم‌ها به کار می‌رود. اما استفاده از پمپ دور متغیر، که مقدار آب مورد نیاز سامانه را با فشار کافی و صرف حداقل انرژی تأمین می‌کند، به علت ناآشنایی طراحان یا صرفاً هزینهٔ اولیهٔ بیشتر، محدود است؛ در حالی که بررسی‌ها نشان می‌دهد در بسیاری مواقع قیمت انرژی بازیافت‌شده از این طریق در کمتر از یک سال معادل هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه خواهد بود (Fazeli *et al*, 2009). مطالعه و تحقیق در زمینهٔ استفاده از پمپ‌های دور متغیر در سامانه‌های آبیاری اندک است و از آنجا که در ایران پمپ‌ها قسمت عمدهٔ انرژی را مصرف می‌کنند، مطالعه در این زمینه می‌تواند گامی مؤثر در ارتقای عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ باشد. درایوهای تغییر دور[۱] تجهیزاتی هستند که برای تغییر دور پمپ‌ها و در نتیجه کاهش یا افزایش فشار متناسب با دبی مورد نیاز در ایستگاه‌های پمپاژ به کار می‌روند (Tolvanen, 2008).

Gibson (1994) درایوهای کنترل سرعت را به منزلهٔ جایگزین تجهیزات دستی کنترل دبی معرفی کرد. او، با بیان اینکه عملکرد درایوهای کنترل سرعت در کنترل دبی به‌شدت به اثر متقابل منحنی مشخصهٔ پمپ و منحنی سامانه وابسته است، به این نتیجه رسید که پمپ مجهز به درایو کنترل سرعت می‌تواند دامنهٔ وسیعی از تغییرات دبی را در یک شبکهٔ توزیع آب پوشش دهد. انتخاب غیر اصولی پمپ‌ها، تغییر شرایط بهره‌برداری، گذشت زمان، تغییر در سیستم هیدرولیکی، و تغییر

* نویسندهٔ مسئول: Parvarsh@ut.ac.ir

1. Adjustable Speed Drive

در مقدار درخواست آب بر عملکرد سیستم پمپاژ، راندمان پمپ و سیستم تأثیر می‌گذارد. در زمان‌های غیر از زمان حداکثر نیاز آبی، فشاری که برای سامانه تأمین می‌شود بیش از فشاری است که سامانه به آن نیاز دارد و این نشان می‌دهد که بهره‌برداری ایستگاه پمپاژ به‌درستی صورت نمی‌گیرد (Evans *et al*, 1996). Lamaddalena and Sagardoy (2000) سامانه‌های تحت فشار را، که بر اساس نیازْ آبیاری می‌شوند، بررسی کردند. آن‌ها روشی را برای افزایش راندمان آب پیشنهاد کردند که بر اساس آن نزاع بین کشاورزان کاهش می‌یابد. همچنین، با به‌کارگیری یک برنامهٔ رایانه‌ای روش خود را ارزیابی کردند. آن‌ها دریافتند که تلفات توان مصرفی با به‌کارگیری پمپ دور متغیر تا ۲۱ درصد کاهش می‌یابد. Volk (2005) اعلام کرد پمپ‌های دور متغیر مدت‌هاست که وجود دارند، اما افزایش تقاضا در زمینهٔ پایش و خودکارسازی ایستگاه‌های پمپاژ، برای سهولت بهره‌برداری، و نیاز به روش‌های کاهش تلفات آب و اتلاف انرژی استفاده از این نوع پمپ‌ها را به‌سرعت افزایش داده است. او بیان کرد با تنظیم دور می‌توان از استهلاک پمپ‌ها نیز تا حدّ زیادی جلوگیری کرد. Fazeli *et al* (2008) با درنظرگرفتن هزینه‌های دورهٔ طرح به معرفی پمپ‌های دور متغیر در شبکه‌های آب‌رسانی پرداخت. او ابتدا راه‌های کنترل و تنظیم دبی را در ایستگاه‌های پمپاژ دور ثابت بررسی کرد و با ارزیابی این روش‌ها استفاده از پمپ‌های دور متغیر را پیشنهاد داد؛ که هرچند هزینهٔ اولیهٔ ایستگاه پمپاژ را تا حدودی افزایش می‌دهد، در طول بهره‌برداری به دلایل مختلف- از جمله کاهش مصرف انرژی، افزایش عمر مفید اجزای ایستگاه، کاهش اتفاقات در شبکهٔ توزیع و خط انتقال آب، و کاهش تلفات آب- در مدت زمانی کوتاه به سودآوری مناسب می‌رسد. Moreno *et al* (2009) روشی را برای بهینه‌سازی منحنی‌های مشخصهٔ پمپ‌ها برای آبیاری قطره‌ای در منطقهٔ لاپینادای اسپانیا ارائه کردند. آن‌ها، با درنظرگرفتن دبی و فشار و توزیع آب در طول فصل آبیاری، منحنی‌های مشخصهٔ پمپ و سیستم را بررسی و تعداد بهینهٔ پمپ و لزوم استفاده از پمپ‌های دور متغیر را تعیین و در نهایت استفاده از آن‌ها را توصیه کردند. Lamaddalena and Khila (2012) منحنی‌های پمپ و منحنی یک سیستم آبیاری را در جنوب ایتالیا بررسی کردند و با توجه به نیاز سامانهٔ آبیاری دستورالعمل‌هایی برای کارکرد پمپ‌ها در زمان‌های مختلف ارائه دادند. آن‌ها در نهایت استفاده از پمپ‌های دور متغیر را پیشنهاد کردند تا علاوه بر رفع نیاز سامانه، در مصرف انرژی نیز صرفه‌جویی شود. Fulai and Hexu (2011) روش کلی کنترل بهینهٔ ایستگاه‌های پمپاژ را با پمپ‌های دور متغیر موازی با مصرف حداقل انرژی بررسی کردند. Diaz *et al* (2009)، با درنظرگرفتن سیستم آبیاری منطقه‌ای در جنوب اسپانیا، که مجهز به پمپ‌های دور متغیر است، و با شبیه‌سازی چهار سناریوی مدیریتی بر اساس سطوح مختلف نیاز آبی و به‌کارگیری نرم‌افزار EPANET به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش‌هایی مانند تنظیم دینامیکی فشار و منطقه‌بندی سبب کاهش توان مورد نیاز ایستگاه پمپاژ و ذخیره‌سازی انرژی، تا بیش از ۲۷ درصد، می‌شود.

از آنجا که نوع ایستگاه پمپاژ و روش‌های بهره‌برداری از آن باعث تلفات آب و انرژی می‌شود و در ضمن تا کنون در این زمینه تحقیقی انجام نشده است، ارائهٔ روشی برای تطبیق عملکرد پمپ‌ها، با توجه به شرایط بهره‌برداری، می‌تواند راندمان انتقال و توزیع آب و از طرفی مصرف انرژی را بهبود بخشد. این کار مستلزم استفاده از پمپ‌های دور متغیر است؛ که با توجه به شرایط حاکم بر سامانه، با تغییر دور موتور، شرایط خود را با تغییرات دبی و فشار سامانه سازگار و مقدار آب و فشار مورد نیاز را با مصرف کمترین میزان انرژی تأمین می‌کند. در تحقیق حاضر ایستگاه پمپاژ برای یک سامانهٔ آبیاری قطره‌ای طراحی و عملکرد ایستگاه در چهار حالت بهره‌برداری تحلیل شد.

مواد و روش‌ها

یکی از دلایل بهره‌وری پایین ایستگاه‌های پمپاژ متداول این است که پمپ‌ها محافظه‌کارانه انتخاب می‌شوند و چون برای دبیِ حداکثر طراحی و تنظیم شده‌اند، وقتی نیاز سیستم کم می‌شود، آب و انرژی را هدر می‌دهند. از آنجا که در ایستگاه پمپاژ با پمپ‌های دور ثابت عرضهٔ آب بر حسب تقاضا معمولاً با شیرکنترل دبی انجام می‌شود، در تحقیق حاضر بهره‌برداری از سیستم به طور تقاضامدار نیز در نظر گرفته شد. چهار حالت کلی بهره‌برداری منظور شد: ۱. ایستگاه پمپاژ مجهز به پمپ‌های دور ثابت با بستن شیرکنترل دبی مطابق نیاز (روش اول)؛ ۲. ایستگاه پمپاژ با پمپ‌های دور ثابت بدون شیرکنترل دبی در سراسر فصل آبیاری (روش دوم)؛ ۳. ایستگاه پمپاژ با پمپ‌های دور ثابت با بستن شیرکنترل با توجه به حداکثر نیاز هر ماه (روش سوم)؛ و ۴. ایستگاه پمپاژ مجهز به پمپ‌های دور متغیر.

در این تحقیق ایستگاه پمپاژ با پمپ‌های دور ثابت برای زمینی به مساحت ۲۰ هکتار (با کشت درخت هلو) طراحی شد و عملکرد آن با درنظرگرفتن سه روش مختلف بهره‌برداری (روش‌های اول، دوم، سوم) ارزیابی و با ایستگاه پمپ‌های دور متغیری که برای همین پروژه طراحی شده مقایسه شد. با استخراج مقادیر تبخیر- تعرق، به کمک نرم‌افزار NETWAT (جدول ۱)، و مشخصات خاک و پارامترهای اولیهٔ مورد نیاز

(جدول ۲) تعداد قطره‌چکان و دبی آن و مدت زمان آبیاری و حجم آب مورد نیاز در هر دهه از هر ماه فصل آبیاری محاسبه شد. در بیشتر طراحی‌های سامانه‌های آبیاری تحت فشار فقط بیشینهٔ نیاز آبی در کل فصل آبیاری مبنای طراحی ایستگاه پمپاژ است و اصولاً منحنی سامانهٔ آبیاری در طراحی نقش ندارد. در هر سامانهٔ پمپاژ منحنی سامانه، در واقع، مقاومت هیدرولیکی سیستم را در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد و کمک می‌کند عملکرد سیستم در هر نوع عملکرد پمپ با دقت مشخص شود. در مطالعهٔ حاضر هر ماه به سه دهه تقسیم و تقاضای آب و فشار محاسبه شد. این کار تلاشی در جهت آبیاری به‌هنگام گیاهان است و هر چه این بازه‌های زمانی کوچک‌تر در نظر گرفته شوند سامانه به تأمین نیاز واقعی نزدیک‌تر خواهد شد.

جدول ۱. مقادیر تبخیر و تعرق در هر فصل

	تبخیر- تعرق در دهه‌های مختلف آبیاری بر حسب میلی‌متر در روز					
	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
دههٔ اول	۰٫۸	۲٫۶	۳٫۸	۵٫۴	۵٫۹	۴٫۵
دههٔ دوم	۱	۲٫۹	۴٫۳	۵٫۸	۶٫۱	۳٫۸
دههٔ سوم	۲٫۲	۳٫۷	۵٫۴	۶٫۶	۶	۳٫۲

جدول ۲. پارامترهای اولیهٔ مورد نیاز برای طراحی

پارامترهای مورد نیاز طراحی	مقدار
درصد سطح سایه‌انداز	۵۰
حداکثر تخلیهٔ مجاز رطوبتی خاک	۰٫۵
عمق مؤثر ریشه (متر)	۰٫۶
ظرفیت نگهداری آب در خاک (میلی‌متر در متر)	۱۵۰
بافت خاک	سیلتی لوم
فواصل بین درختان در خط (متر)	۴
فواصل بین درختان در ردیف (متر)	۴

طراحی خطوط لولهٔ شبکهٔ آبیاری

برای طراحی خطوط لوله و ترسیم منحنی سامانه از رابطه‌های مقاومت جریان استفاده می‌شود و انتخاب رابطهٔ مناسب بر عملکرد کل سیستم تأثیری بسزا دارد. در این تحقیق در طراحی خطوط لوله از رابطهٔ دارسی- ویسباخ استفاده شد. برای محاسبهٔ فشار مورد نیاز پمپ در ایستگاه پمپاژ، فشار در ورودی لوله‌های آب‌ده، لوله‌های آب‌رسان، و در نهایت خطوط اصلی و فرعی از رابطه‌های ۱ ،۲، و ۳ استفاده شد:

$$P_{in\,l} = P_a + \alpha H_l + \beta \Delta E \qquad \text{(رابطهٔ ۱)}$$

Pin فشار مورد نیاز معادل ارتفاع آب در ابتدای لولهٔ آب‌ده بر حسب متر، P_a فشار کارکرد قطره‌چکان معادل ارتفاع آب بر حسب متر، H_l افت فشار لولهٔ آب‌ده بر حسب متر، ΔE اختلاف ارتفاع ابتدا و انتهای لوله بر حسب متر، α ضریب تصحیح افت (برابر ۰٫۷۵)، و β ضریب تصحیح اختلاف ارتفاع (برابر ۰٫۵) است (نشریهٔ ضوابط طراحی و اجرای سیستم‌های آبیاری تحت فشار).

$$P_M = P_{in\,l} + \alpha H_M + \beta \Delta E \qquad \text{(رابطهٔ ۲)}$$

P_M فشار ورودی لولهٔ آب‌رسان، H_M افت فشار لولهٔ آب‌رسان، و ضرایب α و β، مانند رابطهٔ ۱، برابر ۰٫۷۵ و ۰٫۵ است (نشریهٔ تخصصی ضوابط و اجرای سیستم‌های آبیاری تحت فشار).

$$H_p = P_M + H_f + \Delta E \pm hs \qquad \text{(رابطهٔ ۳)}$$

H_p فشار مورد نیاز ایستگاه، H_f افت فشار لولهٔ اصلی، و hs ارتفاع مکش پمپ است.

در این تحقیق رابطه‌ها و ضرایب مورد نیاز برای طراحی خطوط لوله در نرم‌افزار متلب کدنویسی شد و خروجی آن، که مقدار دبی و فشار مورد نیاز در هر دهه است، به کار رفت. چون نیاز آبی با توجه به شرایط جوّی و فصل آبیاری متغیر است، می‌توان نیاز آبی را، بسته به اطلاعات موجود و دقت آن‌ها، در دوره‌های زمانی کوتاه‌تر نیز در نظر گرفت. این برنامه هر گونه تغییر در نیاز آبی یا تغییرات جوّی را در محاسبهٔ مقدار آب مورد نیاز وارد می‌کند.

طراحی و بهره‌برداری ایستگاه پمپاژ بر اساس استفاده از پمپ دور متغیر

اولین گام اساسی در طراحی ایستگاه پمپاژ انتخاب پمپ‌های متناسب با نیاز سامانه است. انتخاب پمپ‌های نامناسب و بزرگ‌تر از حدّ نیاز بهای انرژی و هزینه‌های نگهداری را افزایش می‌دهد. در یک سامانهٔ تقاضامدار، برای انتخاب صحیح پمپ، باید ویژگی‌های کارکرد پمپ را با شرایط سامانه تطبیق داد. بنابراین، در این تحقیق با استفاده از مقادیر نیاز آبی و فشار مورد نیاز در هر دهه (جدول ۳) پمپ‌های مناسب برای این ایستگاه انتخاب شدند. از آنجا که دامنهٔ تغییرات مقدار آب و فشار مورد نیاز در دهه‌های مختلف در این طراحی زیاد است، طراحی بر اساس دو سایز پمپ (کوچک و بزرگ) انجام شد؛ به طوری که در پنج دههٔ نخست آبیاری، که به مقدار دبی و فشار کمتری نیاز است، از پمپ کوچک‌تر و در سایر دهه‌ها از پمپ

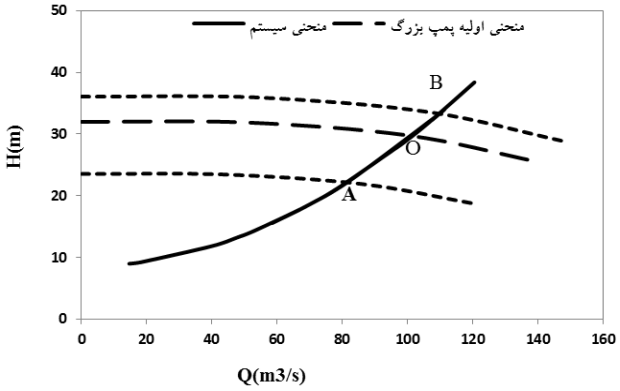
بزرگ استفاده شد. این کار ممکن است برای یک طرح ۲۰ هکتاری چندان ضروری به نظر نرسد، ولی با توجه به تلفات انرژی و استهلاک پمپ هنگام استفاده از پمپ‌هایی که بزرگ‌تر از نیاز هستند و همچنین با نوجه به متدولوژی کلی در طراحی پمپ‌های دور متغیر این روش به کار رفت (Lamaddalena and Khila, 2012). البته در طرح‌های مختلف ممکن است سایزهای دیگر پمپ یا ترکیبات مختلف آن‌ها استفاده شود. در انتخاب پمپ‌ها ابتدا دبی و فشار مورد نیاز در پنج دههٔ نخست در نظر گرفته شد و با مشخص‌کردن محدودهٔ آن‌ها پمپ‌هایی با بهترین راندمان و قابلیت تأمین این محدوده‌ها انتخاب شد. در این حالت، در آغاز آبیاری، سامانه با پمپ کوچک‌تر راه‌اندازی می‌شود. سپس، با توجه به مقدار دبی و فشار مورد نیاز در هر دهه، با استفاده از قواعد تشابه، دور موتور جدید پمپ بازتولید می‌شود. با اتمام پنج دههٔ ابتدای فصل آبیاری، پمپ کوچک خاموش و پمپ بزرگ‌تر وارد مدار می‌شود. با توجه به مقدار فشار و دبی مورد نیاز در هر دهه، با استفاده از رابطه‌های تشابه (رابطه‌های ۴)، دور موتور جدید پمپ بازتولید می‌شود.

$$\frac{Q_2}{Q_1}=\frac{N_2}{N_1},\quad \frac{H_2}{H_1}=\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2,\quad \frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \qquad \text{(رابطهٔ ۴)}$$

N سرعت دورانی، H ارتفاع فشار در پمپ، Q دبی، و P توان پمپ است.

شکل ۱ نحوهٔ تغییر دور پمپ‌های دور متغیر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱، با ترسیم منحنی سامانه و منحنی پمپ و با استفاده از رابطه‌های تشابه (رابطهٔ ۴) می‌توان دور پمپ را در هر زمان و برای هر دبی و فشار مورد نیاز به دست آورد. مثلاً اگر در دور N نقطهٔ عملکرد پمپ O باشد و سپس دبی دیگری معادل دبی نقطهٔ B (یا A) لازم باشد، با کاربرد رابطه‌های تشابه می‌توان دور جدید را برای نقطهٔ B (یا A) به دست آورد. این محاسبات برای سامانهٔ آبیاری مورد نظر انجام گرفت و بر اساس نیاز آبی و مقدار فشار مورد نیاز دور موتور جدید در هر دهه محاسبه شد (جدول ۳).

شکل ۲ منحنی پمپ را در دورهای مختلف نشان می‌دهد که منحنی سامانه را در نقطهٔ دبی و فشار مورد نیاز هر دهه قطع می‌کند. روندنمای مراحل محاسبات عملکرد پمپ دور متغیر متناسب با نیاز سامانه در نرم‌افزار متلب در شکل ۳ می‌آید.

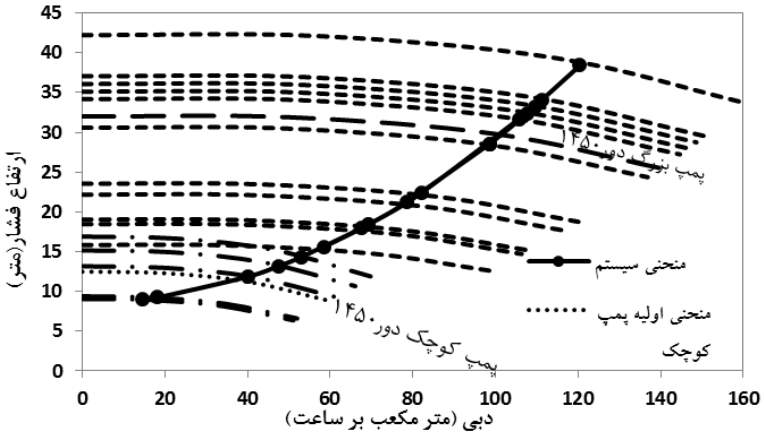


شکل ۱. نحوهٔ تغییر دور پمپ‌ها با توجه به تقاضای شبکه

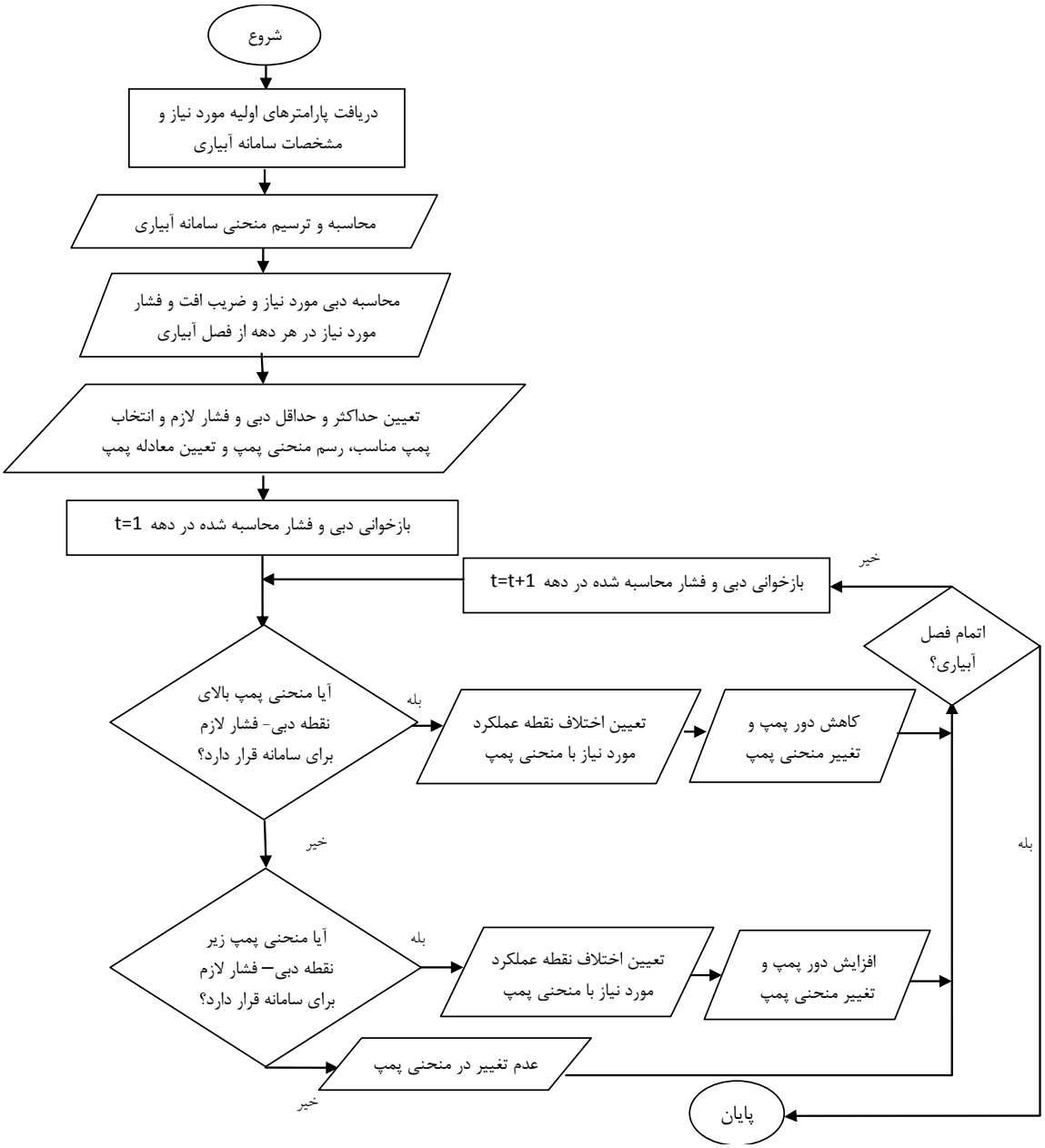
جدول ۳. دبی و فشار مورد نیاز و دور موتور پمپ در دهه‌های مختلف آبیاری

	دهه	$Q(m^3/hr)$	H(m)	N(rpm)
پمپ بزرگ	ششم	۶۷٫۵۴	۱۷٫۹۴	۱۱۰۲
	هفتم	۶۹٫۳۷	۱۸٫۴۵	۱۱۱۹
	هشتم	۷۸٫۴۹	۲۱٫۲۳	۱۲۰۷
	نهم	۹۸٫۵۷	۲۸٫۵۴	۱۴۱۸
	دهم	۹۸٫۵۷	۲۸٫۵۴	۱۴۱۸
	یازدهم	۱۰۵٫۸۷	۳۱٫۶۱	۱۴۹۸
	دوازدهم	۱۲۰٫۴۸	۳۸٫۴۰	۱۶۶۶
	سیزدهم	۱۰۷٫۷۰	۳۲٫۴۱	۱۵۱۹
	چهاردهم	۱۱۱٫۳۵	۳۴٫۰۵	۱۵۶۰
	پانزدهم	۱۰۹٫۵۲	۳۳٫۲۲	۱۵۴۰
	شانزدهم	۸۲٫۱۴	۲۲٫۴۳	۱۲۴۴
	هفدهم	۶۹٫۳۷	۱۸٫۴۵	۱۱۱۹
	هجدهم	۵۸٫۴۱	۱۵٫۵۸	۱۰۲۰

	دهه	$Q(m^3/hr)$	H(m)	N(rpm)
پمپ کوچک	اول	۱۴٫۶۰	۹٫۰۰	۱۲۳۵
	دوم	۱۸٫۲۵	۹٫۲۵	۱۲۵۷
	سوم	۴۰٫۱۶	۱۱٫۸۸	۱۴۸۹
	چهارم	۴۷٫۴۶	۱۳٫۱۹	۱۵۹۷
	پنجم	۵۲٫۹۴	۱۴٫۳۲	۱۶۸۶



شکل ۲. منحنی پمپ و سیستم در دورهای مختلف پمپ‌های دور متغیر



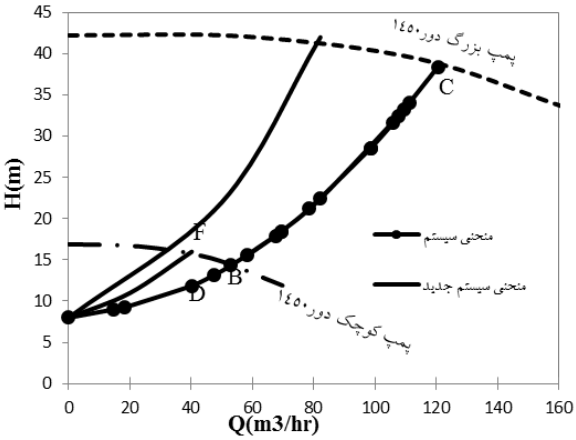
شکل ۳. روندنمای مراحل مختلف عملکرد پمپ‌های دور متغیر متناسب با نیاز سامانه در نرم‌افزار متلب

بهره‌برداری با پمپ‌های دور ثابت به روش اول

در این حالت، به دلیل ثابت‌بودن دور موتور، منحنی‌های پمپ بزرگ و کوچک تغییری نمی‌کنند و فقط با بستن شیرکنترل دبی ابتدای لوله‌های آب‌رسان، مطابق نیاز، منحنی سامانه در هر دهه تغییر می‌کند و شیب آن تندتر می‌شود. در شکل ۴ منحنی سامانه و منحنی پمپ‌های کوچک و بزرگ ترسیم می‌شود. با توجه به منحنی سامانه و پمپ‌ها، نقطهٔ کارکرد پمپ کوچک B و نقطهٔ کارکرد پمپ بزرگ C است. اگر نقطهٔ D نقطهٔ دبی و فشار مورد نیاز سامانه باشد، با بستن شیرکنترل دبی نقطهٔ کارکرد پمپ کوچک از نقطهٔ B به نقطهٔ F تغییر می‌کند و منحنی سامانهٔ جدید ایجاد می‌شود که این عمل باعث کاهش تلفات آب می‌شود. در بهره‌برداری به این روش، در هر دهه، منحنی سامانهٔ جدیدی وجود خواهد داشت.

بهره‌برداری با پمپ‌های دور ثابت به روش دوم

در این حالت در بخش اول فصل آبیاری سامانه فقط با پمپ کوچک کار می‌کند و در سایر فصول آبیاری منحنی پمپ بزرگ را در حداکثر دبی و فشار مورد نیاز سامانه قطع می‌کند. در واقع، در این حالت بهره‌برداری و در طول فصل آبیاری هر پمپ فقط در یک نقطه کار می‌کند؛ مثلاً در شکل ۴ اگر منحنی سامانه منحنی پمپ کوچک را در نقطهٔ B و منحنی پمپ بزرگ را در نقطهٔ C قطع کند، این نقاط برای هر پمپ در طول فصل آبیاری ثابت خواهند بود.



شکل ۴. نحوهٔ تغییر منحنی سیستم در روش‌های بهره‌برداری اول، دوم، سوم

بهره‌برداری با پمپ‌های دور ثابت به روش سوم

روش بهره‌برداری سوم شبیه روش اول است؛ با این تفاوت که منحنی سامانه با توجه به حداکثر نیاز در هر ماه و با تغییر بازشدگی شیرکنترل دبی در هر ماه تغییر می‌کند. تفاوت روش سوم با روش اول در تعداد تغییرات منحنی سامانه است. در بهره‌برداری روش اول در هر دهه منحنی سامانه مطابق نیاز تغییر می‌کند؛ اما در روش سوم منحنی سامانه در هر ماه تغییر می‌کند.

یافته‌ها و بحث

مصرف آب

از آنجا که در طراحی ایستگاه‌های پمپاژ برای تأمین آب و فشار مورد نیاز سامانه پمپ‌ها را بر اساس حداکثر فشار و دبی انتخاب می‌کنند و از طرفی نیاز آبی با این مقدار متفاوت است، مقداری از آب در هر فصل رشد تلف می‌شود. در ایستگاه‌های پمپاژ دور ثابت، با تنظیم شیرکنترل دبی، تا حدّی جلوی تلفات آب را می‌گیرند. در این تحقیق حالت ایده‌آل طراحی و بهره‌برداری ایستگاه پمپاژ با پمپ‌های دور ثابت، که تنظیم شیرکنترل دبی مطابق نیاز سامانه است و معمولاً در عمل اجرا نمی‌شود، در نظر گرفته شد و با دو نوع دیگر طراحی و بهره‌برداری معمول با پمپ‌های دور ثابت و با ایستگاه پمپاژ دور متغیر مقایسه شد (جدول ۴).

در بهره‌برداری به روش دوم و سوم آب بیش از نیاز به سامانه تزریق می‌شود؛ به طوری که تلفات آب در بهره‌برداری به روش دوم ۳۶ درصد و به روش سوم ۱۶ درصد کل آب مصرفی است. بنابراین، روش‌های بهره‌برداری دوم و سوم گزینه‌های مدیریتی مناسبی نیستند و از آنجا که بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ به روش اول نیز به صورت دستی دشوار است و اغلب در عمل انجام نمی‌شود، بهترین راه جلوگیری از هدررفت آب در سامانه‌های آبیاری استفاده از پمپ‌های دور متغیر در ایستگاه پمپاژ است. افزایش فشار در ایستگاه پمپاژ مجهز به پمپ دور ثابت، علاوه بر اینکه به لوله‌ها آسیب می‌رساند، باعث کاهش عمر پمپ‌ها و مصرف بیهودهٔ انرژی در ایستگاه پمپاژ نیز می‌شود.

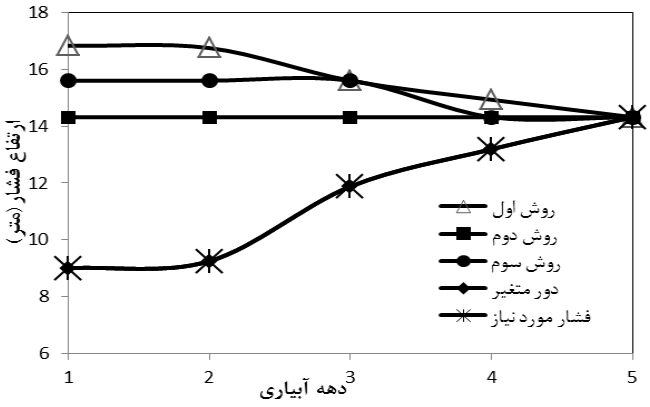
میزان فشار

شکل‌های ۵ و ۶ مقدار فشار تولیدشده به‌وسیلهٔ پمپ‌ها را در چهار حالت بهره‌برداری نشان می‌دهند. شکل ۵ مربوط به پنج دههٔ نخست آبیاری است که ایستگاه با پمپ کوچک کار می‌کند و شکل ۶ مربوط به مابقی فصل آبیاری است که ایستگاه با پمپ بزرگ کار می‌کند. همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ نیز مشخص است، میزان فشار تولیدشده در ایستگاه مجهز به پمپ‌های دور متغیر با مقدار فشار مورد نیاز سامانه منطبق است؛ اما در سایر ایستگاه‌ها که از پمپ‌های دور ثابت استفاده شده فشار بیش از مقدار مورد نیاز تولید می‌شود. این اضافه‌فشار موجب کاهش عمر پمپ‌ها و اتلاف انرژی می‌شود. در ایستگاه‌های پمپاژ مجهز

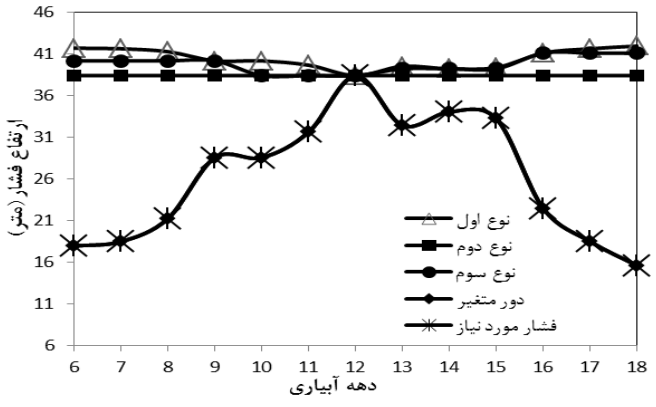
به پمپ‌های دور ثابت بستن شیرکنترل دبی باعث افزایش افت فشار و در نهایت افزایش فشار مورد نیاز در ایستگاه پمپاژ می‌شود. بنابراین، هرچند برخی روش‌های بهره‌برداری در ایستگاه‌های پمپاژ با پمپ‌های دور ثابت، مانند بهره‌برداری به روش اول و سوم، با بستن شیرکنترل دبی از تلفات آب می‌کاهند، باعث افزایش فشار در ایستگاه و در نهایت افزایش مصرف انرژی به‌وسیلهٔ پمپ‌ها می‌شوند. Lamaddalena and Khila (2012) با ترسیم منحنی‌های فشار تولیدشده در ایستگاه پمپاژ به این نتیجه رسیدند که پمپ‌های دور ثابت با تولید فشاری بیشتر از فشار مورد نیاز سامانهٔ آبیاری سبب اتلاف مقدار زیادی انرژی می‌شوند. Diaz *et al* (2009) با شبیه‌سازی چهار سناریوی مدیریتی بر اساس سطوح مختلفی از نیاز آبی و به‌کارگیری نرم‌افزار EPANET به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش‌هایی مانند تنظیم دینامیکی فشار سبب کاهش توان مورد نیاز ایستگاه پمپاژ و ذخیره‌سازی انرژی به بیش از ۲۷ درصد می‌شود.

جدول ۴. مقادیر آب مورد نیاز و تلفات آب (متر مکعب) در ایستگاه‌های پمپاژ مطالعه‌شده

دهه	آب مورد نیاز	آب مصرفی	تلفات آب	آب مصرفی	تلفات آب	آب مصرفی	تلفات آب	آب مصرفی	تلفات آب
اول	۱۰۲۲	۱۰۲۲	۰	۳۷۰۶	۲۶۸۳	۲۸۱۱	۱۷۸۹	۱۰۲۲	۰
دوم	۱۲۷۸	۱۲۷۸	۰	۳۷۰۶	۲۴۲۸	۲۸۱۱	۱۵۳۳	۱۲۷۸	۰
سوم	۲۸۱۱	۲۸۱۱	۰	۳۷۰۶	۸۹۴	۲۸۱۱	۰	۲۸۱۱	۰
چهارم	۳۳۲۲	۳۳۲۲	۰	۳۷۰۶	۳۸۳	۳۷۰۶	۳۸۳	۳۳۲۲	۰
پنجم	۳۷۰۶	۳۷۰۶	۰	۳۷۰۶	۰	۳۷۰۶	۰	۳۷۰۶	۰
ششم	۴۷۲۸	۴۷۲۸	۰	۸۴۳۳	۳۷۰۶	۶۹۰۰	۲۱۷۲	۴۷۲۸	۰
هفتم	۴۸۵۶	۴۸۵۶	۰	۸۴۳۳	۳۵۷۸	۶۹۰۰	۲۰۴۴	۴۸۵۶	۰
هشتم	۵۴۹۴	۵۴۹۴	۰	۸۴۳۳	۲۹۳۹	۶۹۰۰	۱۴۰۶	۵۴۹۴	۰
نهم	۶۹۰۰	۶۹۰۰	۰	۸۴۳۳	۱۵۳۳	۶۹۰۰	۰	۶۹۰۰	۰
دهم	۶۹۰۰	۶۹۰۰	۰	۸۴۳۳	۱۵۳۳	۸۴۳۳	۱۵۳۳	۶۹۰۰	۰
یازدهم	۷۴۱۱	۷۴۱۱	۰	۸۴۳۳	۱۰۲۲	۸۴۳۳	۱۰۲۲	۷۴۱۱	۰
دوازدهم	۸۴۳۳	۸۴۳۳	۰	۸۴۳۳	۰	۸۴۳۳	۰	۸۴۳۳	۰
سیزدهم	۷۵۳۹	۷۵۳۹	۰	۸۴۳۳	۸۹۴	۷۷۹۴	۲۵۶	۷۵۳۹	۰
چهاردهم	۷۷۹۴	۷۷۹۴	۰	۸۴۳۳	۶۳۹	۷۷۹۴	۰	۷۷۹۴	۰
پانزدهم	۷۶۶۷	۷۶۶۷	۰	۸۴۳۳	۷۶۷	۷۷۹۴	۱۲۸	۷۶۶۷	۰
شانزدهم	۵۷۵۰	۵۷۵۰	۰	۸۴۳۳	۲۶۸۳	۵۷۵۰	۰	۵۷۵۰	۰
هفدهم	۴۸۵۶	۴۸۵۶	۰	۸۴۳۳	۳۵۷۸	۵۷۵۰	۸۹۴	۴۸۵۶	۰
هجدهم	۴۰۸۹	۴۰۸۹	۰	۸۴۳۳	۴۳۴۴	۵۷۵۰	۱۶۶۱	۴۰۸۹	۰
جمع	۹۴۵۵۶	۹۴۵۵۶	۰	۱۲۸۱۶۱	۳۳۶۰۶	۱۰۹۳۷۸	۱۴۸۲۲	۹۴۵۵۶	۰
درصد تلفات آب		٪۰		٪۳۶		٪۱۶		٪۰	



شکل ۵. فشار تولیدشده به‌وسیلهٔ پمپ کوچک در بهره‌برداری‌های مختلف از ایستگاه پمپاژ مورد بررسی



شکل ۶. فشار تولیدشده به‌وسیلهٔ پمپ بزرگ در بهره‌برداری‌های مختلف از ایستگاه پمپاژ مورد بررسی

نتیجه‌گیری

در ایستگاه‌های پمپاژ مجهز به پمپ‌های دور ثابت بستن شیرکنترل دبی باعث افزایش افت فشار و در نهایت افزایش فشار مورد نیاز در ایستگاه پمپاژ می‌شود. بنابراین هرچند برخی از روش‌های بهره‌برداری در ایستگاه‌های پمپاژ با پمپ‌های دور ثابت، مانند بهره‌برداری به روش‌های اول و سوم، با بستن شیرکنترل دبی از تلفات آب می‌کاهند، باعث افزایش فشار در ایستگاه و در نهایت افزایش مصرف انرژی به‌وسیلهٔ پمپ‌ها می‌شوند. بنابراین، حتی بستن شیرکنترل دبی مطابق نیاز نیز راهی مناسب برای بهبود عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ نیست و نتایج تحقیق حاضر و تحقیقات مرتبط دیگر نشان می‌دهد طراحی صحیح ایستگاه پمپاژ مجهز به پمپ‌های دور متغیر بهترین راه تأمین دبی و فشار مورد نیاز شبکه با صرف کمترین انرژی است.

تأمین دبی و فشار به اندازهٔ مورد نیاز در سامانه‌های آبیاری دو پارامتر مهم و اساسی در طراحی ایستگاه‌های پمپاژند که باید به آن‌ها توجه کرد. زیرا بی‌توجهی به این دو پارامتر باعث تلفات آب و انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ می‌شود که با توجه به کمبود آب و انرژی و ضرورت صرفه‌جویی در مصرف آن‌ها در طراحی و بهره‌برداری ایستگاه‌های پمپاژ باید به گونه‌ای عمل کرد که نیاز سامانه با صرف کمترین میزان مصرف آب و انرژی تأمین شود. با تنظیم پمپ‌های دور متغیر می‌توان دامنهٔ وسیعی از تغییرات دبی را، که در هر سامانه اتفاق می‌افتد، پوشش داد. تاکنون تلفات آب در سامانه‌های آبیاری به طور کمّی اعلام نشده و فقط به نقش پمپ‌های دور متغیر در کاهش تلفات آب اشاره شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد تلفات آب در ایستگاه پمپاژ مجهز به پمپ‌های دور ثابت ۱۶ تا ۳۶ درصد است؛ به طوری که در بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ مجهز به پمپ‌های دور ثابت به روش دوم تقریباً دوبرابر روش سوم است. متدولوژی این تحقیق به طور مشابه برای سایر سامانه‌های آبیاری نیز قابل کاربرد است. اما حتی اگر همان ۱۶ درصد برای هر سامانهٔ آبیاری لحاظ شود، در مقیاس کلان مقدار زیادی آب تلف می‌شود که با کاربرد پمپ دور متغیر می‌توان به طور مؤثری آن را کاهش داد. یکی دیگر از مسائل مهم در ایستگاه‌های پمپاژ ایجاد فشار مازاد بر نیاز است که در پمپ‌های دور ثابت صورت می‌گیرد و علاوه بر کاهش عمر پمپ‌ها و افزایش نشت در خطوط لوله باعث مصرف بیهودهٔ انرژی نیز می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد میزان فشار ایجادشده در ایستگاه پمپاژ مجهز به پمپ‌های دور متغیر مطابق نیاز سامانه است؛ ولی در سایر بهره‌برداری‌ها بیش از فشار مورد نیاز است که موجب تلفات انرژی می‌شود.

REFERENCES

Aghabeygi, V. and Aghabeygi, A. (2009). Technical and Economical Comparison of two Irrigation system. 3rd water and waste water conference. March 14-16 ,Iran. Tehran. (In Persian)

Diaz, J. A. R., Luque, R. L., Cobo, M. T. C., Montesinos, P., and Poyato, E. C. (2009). Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurized irrigation networks, *Biosyst Eng*, 104:552–561.

Evans, R., Sneed, R. E., and Hunt, J. H. (1996). Pumping plant performance evaluation. North Carolina Cooperative Extension Service. *Publ AG* 452-6.

Fazeli, M., Soltanzadeh, A., Sangroody, A., and Hossein pour, kh. (2008). Economical Evaluation of installing variable speed pumps in water distribution networks. 3rd water and waste water conference. December 8-10, Tehran. (In Persian)

Fazeli, M., Soltanzadeh, A., Sangroody, A., and Khosravi, M. (2009). Performance of variable Speed pump in decreasing water distribution network events. The First National Conference on Engineering and Management of Infrastructures. September 13-15, Tehran. Iran, (In Persian)

Fulai, Y. and Hexu, S. (2011). Optimal Control in Variable speed Pumping Stations. Proceedings of the IEEE. International Conference on Mechatronics and Automation. August 7-10. *Beijing. China*.

Gibson, H. (1994). Variable Speed Drives as Flow Control Elements. *ISA Transactions*, 33, 165-169.

Lamaddalena, N. and Khila, S. (2012). Energy Saving with Variable Speed Pumps in on-demand Irrigation Systems. *Irrigation Science*, 30:157–166.

Lamaddalena, N. and Sagardoy, J. A. (2000). Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. FAO, Rome. *Irrig drain paper*, N°59.

Moreno, M. A., Planells, P., Co´rcoles, J. I., Tarjuelo, J. M., and Carrio´n, P. A. (2009). Development of a New Methodology to Obtain the Characteristic Pump Curves that Minimize the Total Cost at Pumping Stations. *Biosystems Engineering*, 102: 95–105.

Tolvanen, J. (2008). Saving energy with variable-speed drives. *World Pumps*, 501:32–33.

Volk, M. (2005). Pump Characteristics and Applications. Chapter six, 2nd Edition. Taylor and Francis Group. LLC. 373-395.