

بهینه‌یابی هزینه انرژی و برداشت آب از منابع سطحی در یک سیستم آبرسانی نمونه

غلامرضا نبی بیدهندی

استاد، دانشکده مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران

ghhendi@ut.ac.ir

فرناز برزین پور

دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

barzinpourf@gmail.com

فرید ظهیری

دانشجوی دکتری دانشگاه تهران (نویسنده مسئول)

zahirifarid@yahoo.com

آب مورد نیاز در بسیاری از سیستم‌های آبرسانی بزرگ با اختلاط آبهای برداشتی از منابع سطحی و زیرزمینی با کمیت و کیفیت متفاوت تامین می‌گردد. تامین آب از منابع زیرزمینی نیازمند مصرف انرژی بوده و منابع آب سطحی نیز محدود و ناپایدار می‌باشند. هدف از این پژوهش، راهبری بهینه و تامین آب مورد نیاز سیستم آبرسانی با حداقل هزینه انرژی و حداقل نیاز به برداشت آب از منابع سطحی، ضمن حفظ پایداری کمی و کیفی سیستم می‌باشد. این هدف از طریق بهینه‌سازی زمانبندی عملکرد پمپها با مدیریت مصرف انرژی و بهینه‌سازی تغییرات دبی برداشت و نسبت اختلاط منابع تامین آب صورت پذیرفته است. تفاوت این پژوهش با مقالات مشابه، تعریف اهداف چندگانه، اضافه نمودن محدودیتهایی نظیر کیفیت آب در پایداری سیستم و همچنین متغیر فرض نمودن دبی برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی می‌باشد. برای حل مسئله، ابتدا با در نظر گرفتن قوانین پیوستگی و انرژی و مشخصات فنی سیستم آبرسانی، هیدرولیک سیستم مدلسازی ریاضی شده است. سپس با شبیه‌سازی سیستم آبرسانی در نرم افزار Vensim به کمک مدل ریاضی، اعتبار مدل براساس مقایسه خروجی نرم افزار با داده‌های واقعی موردسنجش قرار گرفته است. در مرحله بعد مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از نرم افزار GAMS حل شده است. در پایان براساس انتظارات و اهداف متولیان سیستم، تحلیل حساسیت بر روی داده‌های ورودی و نتایج انجام شده و سناریوهای بهینه برای راهبری سیستم آبرسانی ارائه گردیده است. طبق یافته‌های پژوهش، با بهینه‌سازی سیستم آبرسانی، ۲۱٪ کاهش در مصرف اوج بار و ۵٪ در هزینه انرژی کل سیستم و فقط در ایستگاه پمپاژ ۳۷٪ کاهش مصرف در اوج بار و ۱۳٪ در هزینه انرژی حاصل می‌گردد.

واژگان کلیدی: پایداری سیستم آبرسانی، بهینه‌سازی چند هدفه، هزینه انرژی، برداشت آب سطحی، مدیریت مصرف انرژی

۱- مقدمه

انرژی به عنوان عاملی اساسی در رشد و توسعه جوامع نوین بشری مطرح است. در عرصه پیشرفت و رقابت جهانی، کشورهایی موفق تر خواهند بود که بتوانند از انرژی با بالاترین بازده ممکن بهره برداری نمایند. راهبری بهینه سیستمهای آبرسانی نیز با توجه به مصرف قابل توجه انرژی، از اهمیت ویژه‌ای در این حوزه برخوردار می‌باشد. مدیریت مصرف انرژی در برداشت آب از چاهها و پمپاژ آب در ایستگاههای پمپاژ، بخشی از هزینه های راهبری سیستم آبرسانی را کاهش می دهد. مدیریت زمانبندی کارکرد الکتروپمپهای سیستم آبرسانی و در نتیجه کاهش مصرف برق در اوج بار (پیک سایه) علاوه بر کاهش هزینه انرژی، میتواند به سیاستهای برنامه ریزان حوزه انرژی در زمینه مدیریت مصرف جامه عمل بپوشاند. کاهش مصرف در اوج بار از انجام سرمایه گذاری های سنگین در حوزه تامین برق (جهت احداث نیروگاه های جدید به منظور تولید برق بیشتر برای پاسخگویی به پیک مصرف) جلوگیری می نماید. سیستم آبرسانی مورد مطالعه در این پژوهش، عهده دار آبرسانی به بخشی از شهر تهران می باشد. آب مورد نیاز در شهر تهران با اختلاط آب برداشت شده از منابع سطحی و زیرزمینی با کمیت و کیفیت متفاوت در سیستمهای آبرسانی شهر تامین شده و انرژی قابل توجهی در الکتروپمپها مصرف می شود. گزارشات سیستم مدیریت انرژی شرکت آبفای استان تهران در سال ۱۳۹۷ نشان میدهد برای آبرسانی شهرهای استان تهران با حدود ۹۵۰ گیگاوات ساعت برق مصرفی و ۱۴۰ گیگاوات ساعت مصرف برق در اوج بار، هزینه انرژی برق به حدود ۴۲۰ میلیارد ریال بالغ گردیده است. اصلی ترین مصرف کنندگان انرژی در سیستم آبرسانی این شهرها، الکتروپمپها هستند. به نحوی که حدود ۳۶۰ میلیارد ریال از هزینه های برق (۸۵٪ کل هزینه انرژی برق) مربوط به پمپاژ در سیستمهای آبرسانی اعم از پمپاژ آب از چاهها و یا ایستگاههای پمپاژ بین مخازن بوده است. از سوی دیگر ایران بعنوان کشوری کم آب همواره با

چالش‌های تامین آب برای مصارف بهداشتی و کشاورزی بخصوص در حوزه منابع آب روبرو بوده و بخصوص در خشکسالی، مسئله دسترسی به آب‌های سطحی از بزرگترین چالش‌های تامین آب در سیستم‌های آبرسانی بوده است. طبق گزارشات مرکز کنترل آب تهران تا سال ۱۳۹۷، اگر در ترسالی بیش از هفتاد درصد آب شرب تهران بزرگ (با نیاز آبی سالانه بیش از یک میلیارد متر مکعب) از منابع آب سطحی قابل تامین بوده است، این میزان در خشکسالی تا پنجاه و پنج درصد کاهش یافته و چالش مهمی با عنوان حفظ کیفیت آب ایجاد نموده است. در تحقیق حاضر، با توجه به ویژگی‌های خاص تامین آب در سیستم‌های آبرسانی شهرهای بزرگ، تامین بدون وقفه آب مورد نیاز شهروندان و حفظ شرایط کمی و کیفی آب بصورت شبانه روزی، عوامل اصلی در حفظ پایداری سیستم آبرسانی مورد مطالعه هستند. میزان مصرف آب به عنوان یک پارامتر وابسته به تقاضای شبکه توزیع می‌باشد و تامین آب مصرفی با اختلاط آب برداشتی از منابع سطحی و زیر زمینی که دارای کیفیت‌های مختلف می‌باشند، امکان پذیر می‌شود. با توجه به مشخصات و ویژگی‌های سیستم آبرسانی مورد مطالعه، موضوع پژوهش این است که با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی با اهداف چند گانه (با در نظر گرفتن همه متغیرها و محدودیت‌های خاص این نوع سیستم آبرسانی)، ضمن کاهش هزینه انرژی و کاهش برداشت آب از منابع سطحی، سطح کیفیت مطلوب آب و سایر عوامل پایداری را نیز حفظ نموده و اثرات این بهینه‌سازی را در حالت واقعی و در سیستم آبرسانی مورد مطالعه از دیدگاه بهبود عملکرد ارزیابی نماییم. در اینجا مسئله پایداری از دیدگاهی متفاوت و با اهداف چند گانه مورد مطالعه قرار گرفته است. تامین آب از منابع زیرزمینی به دلیل پمپاژ آب از اعماق زمین مصرف انرژی را افزایش می‌دهد و منابع آب سطحی که عموماً دارای کیفیت بهتری می‌باشند، محدود و بدلیل وابستگی به بارش‌ها ناپایدار هستند. به دلیل این محدودیت‌ها، کاهش برداشت از منابع آب سطحی در بسیاری از اوقات الزامی می‌باشد. کاهش برداشت از منابع آب سطحی، با توجه به ثابت بودن نیاز مصرف، باعث استفاده حداکثری از آب‌های زیرزمینی و

افزایش هزینه انرژی می‌گردد. لذا، در نظر گرفتن دوهدف "کاهش هزینه انرژی" و "کاهش برداشت از منابع آب سطحی" بعنوان اهداف بهینه‌سازی، دو هدف متضاد می‌باشند که یکی از وجوه تمایز نسبت به سایر تحقیقات محسوب می‌شود. در نظر گرفتن "دبی برداشت آب به تفکیک منابع سطحی و زیرزمینی" به عنوان متغیر مسئله، علاوه بر متغیر "زمانبندی کارکرد الکتروپمپهای ایستگاه پمپاژ" یکی دیگر از نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد. علاوه بر موارد فوق، لحاظ نمودن "سطح کیفیت آب مصرفی شهروندان" به عنوان یک محدودیت، عاملی است که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته و به شرایط پایداری اضافه شده است. براساس نتایج پژوهش، نه تنها مدیریت مصرف و کاهش هزینه‌های انرژی، همزمان با بهینه‌سازی برداشت از منابع آب سطحی و زیر زمینی، ضمن حفظ الزامات کیفیت و کمیت آب (شرایط پایداری) در سیستم آبرسانی مورد مطالعه امکان پذیر شده است، بلکه امکان تغییر و توسعه مدل ریاضی براساس ویژگیهای سیستمهای آبرسانی و همچنین تعریف سناریوهای متفاوت و حل مسئله متناسب با شرایط جدید ایجاد شده است. انجام پژوهش با توجه به بین رشته‌ای بودن موضوع آن، در چهار مرحله صورت پذیرفته است. در مرحله اول بادر نظر گرفتن قوانین پیوستگی و انرژی و مشخصات فنی سیستم آبرسانی، هیدرولیک سیستم بر اساس ویژگیهای این سیستم مدل‌سازی ریاضی شده است تا بتوان از این مدل در مرحله بهینه‌سازی با نرم افزار استفاده نمود. ضمناً از طریق مدل‌سازی ریاضی امکان درک بیشتر سیستم برای متخصصین حوزه‌های مختلف فراهم می‌گردد. سیستم آبرسانی مورد مطالعه در حال حاضر در دست بهره‌برداری می‌باشد و مشخصات فنی آن بصورت اسناد رسمی وجود دارد. همچنین داده‌های مختلف سیستم از قبیل دبی ورودی و خروجی مخازن و ایستگاه پمپاژ، حجم آب مخازن و کیفیت آب تامین شده از منابع مختلف در گزارشات بهره‌بردار سیستم و در بازه‌های زمانی مشخص اندازه‌گیری و ثبت شده است. لذا با توجه به اینکه نرم افزار

Vensim^۱ امکان اعتبار سنجی مدل ریاضی را در شرایط وجود داده های واقعی فراهم می سازد و همچنین با توجه به قابلیت های توسعه ای این نرم افزار برای تکمیل و توسعه مدل ریاضی در آینده و ارایه نتایج قابل درک و بهره برداری برای مدیران و برنامه ریزان سیستم آبرسانی (فرمانی انتظام، ۱۳۹۸)، در مرحله دوم، شبیه سازی سیستم آبرسانی در این نرم افزار به کمک مدل ریاضی انجام شده است. در این مرحله، اعتبار مدل ریاضی در مقایسه با داده های واقعی سیستم مورد تایید قرار گرفت. در مرحله سوم، مسئله تعریف شده بر اساس مدل ریاضی، با بکارگیری نرم افزار GAMS^۲، توسط روش های مختلف بهینه سازی توابع چند هدفه (در اینجا دو هدف) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و بهینه سازی شده است. در مرحله نهایی (چهارم)، سناریوهای مختلفی برای کارکرد سیستم آبرسانی در شرایط و محدودیتهای متفاوت محیطی و اقلیمی در نظر گرفته شده است و توسط نرم افزار GAMS، برای سناریوهای مختلف و براساس ورودی های متفاوت، مسئله حل شده و پاسخهای متناظر (خروجی) حاصل شده است. سپس خروجی های به دست آمده تحلیل حساسیت شده و بهترین پاسخها (سناریو) با توجه به واقعیت بهره برداری سیستم آبرسانی و اولویت های بهره برداری، انتخاب شده است.

۲- پیشینه پژوهش

استفاده از مدل های دینامیکی برای تهیه جدول زمانبندی کارکرد پمپ ها در ایستگاه های پمپاژ جهت کاهش هزینه های انرژی سیستم آبرسانی موضوع جدیدی محسوب نمی شود (ویسی و شمشادی ۱۳۸۷). تهیه جدول زمانبندی مطلوب برای عملکرد الکتروپمپهای سیستم با استفاده از روش های بهینه سازی، موضوعی است که در دهه اخیر به آن توجه بیشتری شده است (لوپز^۳،

1 Ventana simulation environment

2 General algebraic modeling system

3 Lopez

۲۰۱۱ ؛ لئون^۱ ، ۲۰۱۷). این موضوع هم از نقطه نظر تاثیر عوامل مختلف در پایداری سیستم آبرسانی (حفظ کمیت و کیفیت آب و الزامات هیدرولیکی)، از جمله حجم آب ذخیره شده در مخازن، محدودیتهای فشار و سرعت آب در شبکه توزیع، استهلاک اجزای سیستم و هم از دیدگاه انتخاب روش بهینه سازی مورد استفاده در تصمیم گیری، در حال توسعه است. رجب پور و همکاران (۲۰۱۲) هزینه انرژی مصرفی در سامانه های انتقال آب را با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار داده اند. ایشان با تعریف "به حداقل رسانیدن هزینه انرژی" به عنوان تابع هدف و وضعیت روشن و خاموش بودن پمپ‌های موجود در هراستگاه بعنوان متغیرهای تصمیم گیری به حل مسئله پرداخته اند. محدودیت‌های مسئله (شرایط پایداری) در دو بخش، یکی نیاز پایین دست به آب و دیگری حجم ذخیره آب در مخازن مطرح شده است.

در پژوهش‌های دیگر با در نظر گرفتن محدودیتهای بیشتر برای راهبری سیستم (اضافه نمودن قیود پایداری) از قبیل حداقل و حداکثر فشار و سرعت در شبکه توزیع، روشهای بهینه سازی توسعه یافته است (به اندیش و ژانگ^۲، ۲۰۱۴؛ اودان و کاپلان^۳، ۲۰۱۵)، (لئون و همکاران، ۲۰۱۷)^۴. در برخی مقالات، الگوریتمهای مختلف بهینه سازی بررسی گردیده و تفاوت آنها از لحاظ دقت پاسخها و سرعت در پردازش برنامه نرم افزاری مورد مقایسه قرار گرفته است (سامی کشکولی، ۱۳۹۵؛ یوان و لیو^۵، ۲۰۱۲). همچنین الگوریتمهای فرا ابتکاری جهت کاهش هزینه انرژی در سیستمهای آبرسانی نیز توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است (شی و یو^۶، ۲۰۱۶؛

1 Leon

2 Behandish & Zheng

3 Odan & Kapelan

4 Leon

5 Yuan & Liu

6 Shi & You

کاسیولانو^۱، ۲۰۱۹). کاندلیری^۲ (۲۰۱۸) با نگاهی نو به روشهای بهینه سازی و استفاده از الگوریتم برنامه ریزی دینامیک تقریبی و با در نظر گرفتن محدودیتهایی از قبیل میزان نشت آب و تعداد حوادث در شبکه توزیع، هزینه انرژی را از طریق اصلاح برنامه زمانبندی عملکرد پمپها کاهش داده است. با توجه به کارائی و اثر بخشی روشهای بهینه سازی، در برخی از تحقیقات، شاخصهای زیست محیطی نیز در زمره اهداف بهینه سازی قرار گرفته اند. لونا و ریباو^۳ (۲۰۱۹) در پژوهش خود به موضوع کاهش انتشار دی اکسید کربن در کنار افزایش بازدهی انرژی در شبکه توزیع پرداخته اند. خاتواکر و میز^۴ (۲۰۱۹) بهینه سازی برنامه زمانبندی عملکرد پمپها و تنظیم شیرآلات در شبکه توزیع را در شرایط بحرانی (کمبود آب در خشکسالی و یا محدودیتهای دسترسی به انرژی برق)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام داده اند. ایشان با مدیریت فشار آب در شبکه توزیع، میزان آب مورد نیاز شبکه را با حداقل فشار مورد نیاز تامین نموده و باعث کاهش مصرف در شبکه توزیع شده اند.

تفاوت اصلی این تحقیق با پژوهشهای پیشین، متغیر فرض نمودن میزان برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی و لحاظ نمودن اهداف چندگانه و محدودیتهای جدید نظیر کیفیت آب خروجی برای حل مسئله بهینه سازی سیستم آبرسانی می باشد که در مقدمه به تفصیل شرح داده شده است.

۳- روش انجام پژوهش:

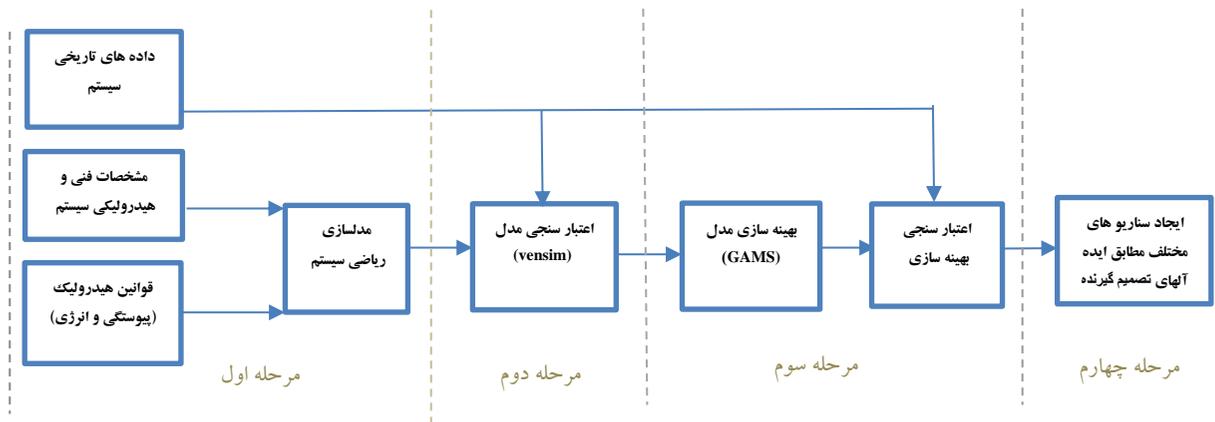
انجام پژوهش بر اساس قوانین هیدرولیک، مشخصات فنی سیستم آبرسانی مورد مطالعه و داده های تاریخی آن در چهار مرحله به شرح شکل ۱ صورت پذیرفته است.

1 Cassiolato

2 Candelieri

3 Luna & Ribaua

4 Khatavkar & Mays



شکل ۱ : نمودار مراحل انجام پژوهش در سیستم آبرسانی مورد مطالعه

نمادهای مورد استفاده در این پژوهش که برای تشریح سیستم آبرسانی و تهیه مدل ریاضی مورد استفاده قرار خواهند گرفت ، به شرح جدول ذیل می باشند :

جدول ۱ - تعریف نمادها و واحدها (بخش اول)

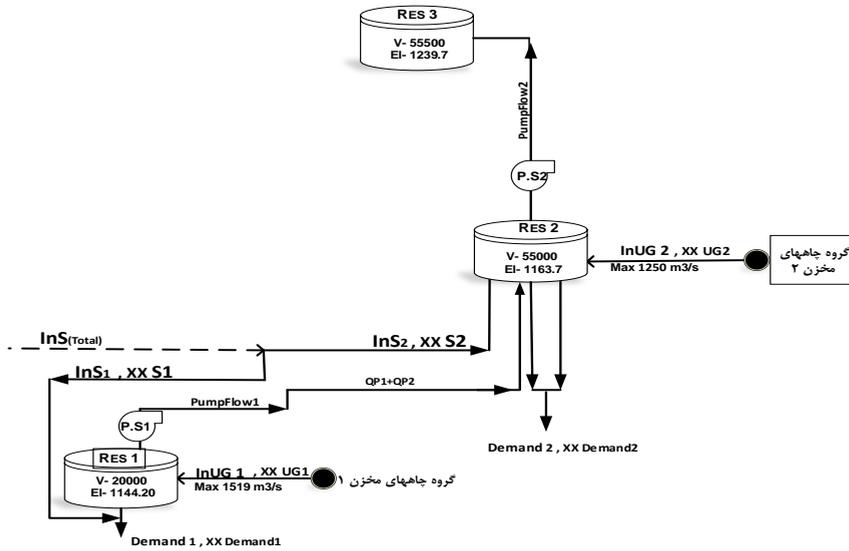
ردیف	تعریف نماد	واحد	تعریف نماد	ردیف	تعریف نماد	واحد	تعریف نماد	ردیف
۱	اندیس شماره مخزن $i \in (1,2)$		i	۱۳	غلظت فاکتور کیفی آب زیرزمینی در مخزن i در بازه K	gr/m^3	$XXUG_{ki}$	تعریف نماد
۲	اندیس شماره پمپ در ایستگاه پمپاژ $j \in (1,2)$		j	۱۴	غلظت فاکتور کیفی در بازه K در مخزن ۱	gr/m^3	XX_{K1}	واحد
۳	اندیس بازه زمانی $K \in (1,2,\dots,K)$		K	۱۵	غلظت فاکتور کیفی آب سطحی در بازه K در مخزن i	gr/m^3	XXS_{ki}	تعریف نماد
۴	حجم مخزن i در بازه زمانی K	m^3	V_{ki}	۱۶	دبی خروجی در بازه K در مخزن ۱	m^3/T	D_{k1}	واحد
۵	ورودی مخزن i از منابع زمینی در بازه زمانی K	m^3/T	$InUG$	۱۷	دبی خروجی در بازه K در مخزن ۲	m^3/T	D_{k2}	تعریف نماد
۶	ورودی مخزن i از منابع سطحی در بازه زمانی K	m^3/T	InS_{ki}	۱۸	ضریب تبدیل دبی به فاکتور کیفی در بازه K در مخزن ۱	$(\frac{gr}{m^3}) / (\frac{m^3}{T})$	MM_{k1}	واحد
۷	وضعیت پمپ j در بازه K	Binary	X_{kj}	۱۹	ضریب تبدیل دبی همزمان پمپاژ	-	e	تعریف نماد

ردیف	تعریف نماد	واحد	تعریف نماد	ردیف	تعریف نماد	واحد	تعریف نماد	ردیف
۸	حجم مخزن i در شروع دوره زمانی	m^3	V_{0i}	۲۰	ضریب دبی پمپ j	m^3/m^3	F_j	
۹	ضریب تبدیل دبی به وضعیت پمپها	m^3	L	۲۱	فاکتور کیفی در شروع دوره زمانی در مخزن i	m^3	XX_{0i}	
۱۰	ضریب تبدیل ارتفاع پمپاژ منابع زیرزمینی و ایستگاه پمپاژ	m/m	M	۲۲	مقدار بازه زمانی K	3 Hours	T	
۱۱	تعرفه برق در بازه K	Rials/kwh	C_k	۲۳	دبی پمپ شماره ۱	m^3/T	Q_{p1}	
۱۲	ضریب تبدیل دبی به انرژی مصرفی	Kwh/m^3	N	۲۴	دبی پمپ شماره ۲	m^3/T	Q_{p2}	

سیستم آبرسانی مورد مطالعه

سیستم آبرسانی مورد مطالعه شامل شامل مخازن اول و دوم ($RES1, RES2$) مطابق شکل ۲ می باشد که از ورودی منبع آب سطحی یکسان (تصفیه خانه آب: $InS1, XXS1$; $InS2, XXS2$) و منابع آب زیرزمینی متفاوت شامل دو گروه چاه جداگانه (آب زیرزمینی: $InUG1, XXUG$; $InUG2, XXUG2$) تغذیه می شوند. هر یک از ورودی ها دارای دبی (In) و کیفیت (XX) مشخص می باشند. آب خروجی در مخزن اول علاوه بر مصرف شبکه توزیع ($Demand1$)، توسط دو پمپ در ایستگاه پمپاژ اول ($PUMP FLOW 1$) به مخزن دوم انتقال می یابد. در مخزن دوم نیز آب خروجی علاوه بر مصرف شبکه توزیع تحت پوشش ($Demand2$)، از ایستگاه پمپاژ دوم

(PUMP FLOW 2) به سمت مخزن سوم (RES3) انتقال می یابد . آبهای خروجی از هر مخزن نیز هریک دارای کیفیت مشخص (XX) هستند.



شکل ۲: تصویر سیستم آبرسانی

مشخصات مخازن و ظرفیت ورودی به آنها در این سیستم آبرسانی که مناطقی از شهر تهران را تحت پوشش دارد، مطابق جدول ۲ می باشد.

جدول ۲: مشخصات مخازن مورد مطالعه در سیستم آبرسانی نمونه

شماره مخزن	حجم مخزن m ³	حداکثر ارتفاع آب (m)	ارتفاع مخزن از سطح مبداء (m)	حداکثر آبدهی مجموع چاههای ورودی (m ³ /s)	حداکثر دبی آب سطحی ورودی (m ³ /s)
۱	۲۰۰۰۰	۵/۲۵	۱۱۴۳	۱/۵	۰/۳
۲	۵۵۰۰۰	۵/۲۵	۱۱۶۳	۱/۵	۱/۲

ماخذ: مفروضات مدل

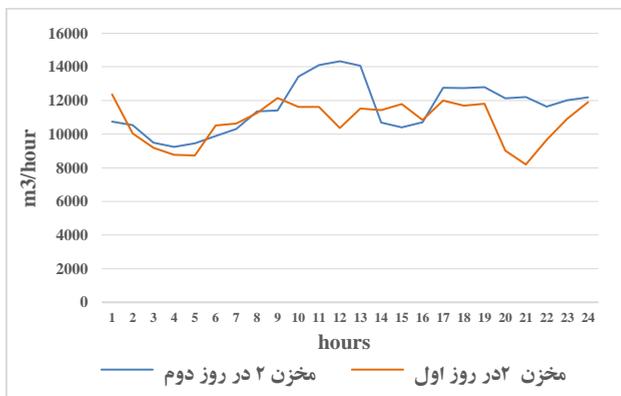
ایستگاه پمپاژ دارای پمپهایی با ظرفیت ۳۰۰۰ و ۲۶۰۰ متر مکعب در ساعت می باشد که در عمل، به صورت روشن شدن یک پمپ و یا بصورت همزمان هر دو پمپ ، پمپاژ صورت می پذیرد . همچنین برای هر پمپ یک پمپ رزرو نیز در ایستگاه در نظر گرفته شده است . مطابق تعرفه سال ۱۳۹۸ ، بهای انرژی برای تاسیسات آب شهری به شرح جدول ۳ می باشد که در تابستان به تعرفه های فوق ۲۰٪ اضافه می گردد.

جدول ۳: تعرفه بهای انرژی برای تاسیسات آب شهری

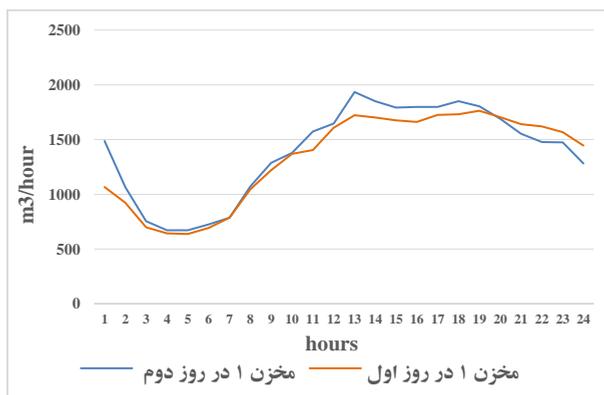
کد تعرفه	هزینه انرژی Rial/Kwh		
	اوج بار	میان بار	کم باری
۳-ب	۵۴۶	۲۷۳	۱۳۶/۵
ساعت مورد عمل	۱۹-۲۳	۷-۱۹	۷-۲۳

ماخذ: تعرفه های برق ابلاغی وزارت نیرو - ۱۳۹۸

با توجه به مقادیر قرائت شده در دبی سنج های ایستگاه پمپاژ ، به ازاء هر ساعت پمپاژ پمپ کوچک با ظرفیت اسمی $\frac{m^3}{hr}$ ۲۶۰۰ ، بطور متوسط ۲۵۵۰ متر مکعب بر ساعت آبدهی و برای پمپ های بزرگ با ظرفیت اسمی $\frac{m^3}{hr}$ ۳۰۰۰ ، بطور متوسط ۲۸۶۰ متر مکعب بر ساعت آبدهی در شرایط واقعی قابل حصول می باشد . لذا برای بازه زمانی ۳ ساعته ، به ترتیب ۷۶۵۰ و ۸۵۸۰ متر مکعب آبدهی در نظر گرفته شده است (آمار و گزارشات آبرسانی شرکت تامین و تصفیه آب تهران ۱۳۹۷). مطابق داده های تاریخی ، مصرف آب در سیستم آبرسانی مورد مطالعه با بیش از یک میلیون نفر جمعیت تحت پوشش، براساس میزان خروجی دو مخزن در دوره مختلف زمانی، مطابق شکل های ۳ و ۴ بوده است. این مصارف، در مسئله بهینه سازی به عنوان پارامتر در نظر گرفته شده اند.



شکل الف- خروجی از مخزن ۲ به شبکه توزیع در دوره اول و دوم



شکل ب- خروجی از مخزن ۱ به شبکه توزیع در دوره اول و دوم

شکل ۳- خروجی از مخزن ۱ و ۲ به شبکه توزیع در دوره اول و دوم (ماخذ: مفروضات مدل)

مدل ریاضی و توابع هدف سیستم

برای مدلسازی ریاضی وضعیت هیدرولیکی سیستم آبرسانی مورد مطالعه نیاز به فروضی می‌باشد تا بتوان مفاهیم فنی و راهبری سیستم را در مدل ریاضی تبیین نمود.

بازه زمانی (T) و دوره بهینه سازی:

برداشتی از منابع و تغییر وضعیت روشن و خاموش پمپها در ایستگاه پمپاژ ۳ ساعت در نظر گرفته شده است. اعمال تغییر در متغیرهای سیستم با دامنه زمانی کوتاه می‌تواند راهبری سیستم را به حالت پیوسته تری فراهم آورد و در مسائل بهینه‌سازی پاسخهای بهتری ایجاد نماید. ولی زمان بر بودن باز و بسته نمودن شیرآلات (جهت تغییر میزان برداشت از منابع آب سطحی) و همچنین مشکلات مرتبط با کاهش عمر تجهیزات بهنگام اعمال تغییر در بازه‌های زمانی کوچک به ویژه در مورد روشن و خاموش نمودن الکتروپمپها در ایستگاه پمپاژ و یا چاهها، مانع از اعمال تغییرات در بازه‌های زمانی کوچک در سیستم آبرسانی می‌گردد. لذا بازه زمانی ۳ ساعت با توجه به داده‌های تاریخی و سوابق بهره‌برداری در سیستم آبرسانی مورد مطالعه به عنوان بازه مطلوب فرض شده است. طول دوره زمانی برای بهینه‌سازی سیستم با توجه به امکان تجربه کلیه نوسانات مصرف آب در شبانه‌روز و تکرار پذیری الگوی مصرف در سایر روزها و متعاقب آن اقدامات بهره‌برداری مورد نیاز به صورت مشابه، یک شبانه‌روز در نظر گرفته میشود. همچنین در بررسی پژوهش‌های پیشین (بن وین^۱ و همکاران، ۲۰۱۹؛ جونگ^۲، ۲۰۱۵؛ کانگ و کیم^۳، ۲۰۱۴)، نیز این دوره زمانی (یک شبانه‌روز) مورد استفاده قرار گرفته است. قابل ذکر است برای پشتیبانی از نتایج و افزایش اعتبار آنها، کلیه محاسبات برای دو روز متفاوت انجام شده و نتایج حاصله بررسی شده است.

1 Bonvin
2 Jung
3 Kang & Kim

کیفیت: برای پایداری سیستم آبرسانی مورد مطالعه، موضوع حفظ کیفیت آب خروجی از مخازن در هر بازه زمانی بسیار با اهمیت و یکی از محدودیت‌های سیستم می باشد. در این پژوهش، با توجه به ملاحظات اجتماعی، شاخص سنجش کیفیت با عنوان فاکتور کیفی مطرح گردیده است. واحد اندازه گیری این فاکتور گرم بر متر مکعب می باشد. این فاکتور در منابع آب سطحی (خروجی تصفیه خانه) براساس حداکثر مقادیر واقعی آن در هر دو مخزن $1 \text{ gr} / \text{m}^3$ در نظر گرفته شده است. کیفیت آبهای زیرزمینی با افزایش دبی برداشت کاهش می یابد. ولی با توجه به تغییرات کم فاکتور کیفی در دامنه تغییرات دبی در برداشت فصلی از آبهای زیر زمینی، این فاکتور در گزارشات بهره برداری و یا مشاورین حوزه مهندسی شرکت آبفا استان تهران ثابت و معادل حداکثر مقدار ممکن در نظر گرفته می شود. در این پژوهش، برای مخزن دوم، با توجه به تغییرات بسیار جزئی کیفیت آبهای زیرزمینی ورودی نسبت به تغییرات دبی در دامنه برداشت مورد نیاز، فاکتور کیفی بادر نظر گرفتن حداکثر غلظت ممکن در این آب ها، برابر با $9 \text{ gr} / \text{m}^3$ در نظر گرفته شده است. در خصوص مخزن اول، با توجه به کیفیت پایین تر منابع آب زیرزمینی و تاثیر پذیری آن از دبی برداشت آب، در مدل ریاضی غلظت فاکتور کیفی بعنوان متغیری وابسته به دبی برداشت آب زیرزمینی در نظر گرفته شده که جزئیات آن در بخش مدلسازی ریاضی توضیح داده شده است.

روش تنظیم برداشت آب از منابع تامین: دبی برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی در هر بازه زمانی (متغیرهای مدل)، متأثر از سایر متغیرها و محدودیت‌های مدل تغییر می کند. نسبت اختلاط آب برداشتی از منابع در هر مخزن، متغیر وابسته به متغیر دبی منابع می باشد و محدودیتی برای آن وجود ندارد. حداکثر دبی قابل برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی در جدول ۲ درج شده است. برای نزدیکتر شدن دامنه برداشت از آبهای زیرزمینی در مدل بهینه سازی به شرایط واقعی دوره مورد مطالعه، حداکثر دبی قابل برداشت از آبهای زیرزمینی برای

هر مخزن در مدل، معادل حداکثر ۱۰٪ بیشتر از دبی قابل برداشت واقعی در همان دوره در نظر گرفته شده است. تنظیم جریان برداشت آب از منابع سطحی توسط شیر تنظیم جریان صورت می‌پذیرد که حسب میزان باز یا بسته بودن دریچه شیر کنترل، میزان جریان بصورت پیوسته تغییر می‌یابد. برداشت از منابع زیرزمینی از طریق ۷۵ حلقه چاه با دبی متوسط ۳۵ لیتر بر ثانیه تامین می‌گردد. این چاهها بصورت ۸ گروه در محدوده جغرافیایی اطراف مخازن پراکنده می‌باشند. برای تنظیم برداشت آب از این منابع، می‌توان از روش روشن و خاموش کردن پمپ چاهها بصورت منفرد (تکی) استفاده نمود. با توجه به اینکه در این حجم برداشت از منابع زیرزمینی در یک شبانه روز، درصد تغییرات دبی برداشت با روش و خاموش شدن یک چاه ناچیز می‌باشد (به نحوی که می‌توان با تقریب بالایی آن را پیوسته فرض نمود)، متغیر دبی برداشت از منابع زیرزمینی یک متغیر پیوسته فرض شده است.

مصرف آب در سیستم آبرسانی: مصرف آب در سیستم آبرسانی، حاصل خروجی مخازن به سمت شبکه توزیع برای تامین آب شرب شهروندان می‌باشد. با توجه به وجود داده‌های تاریخی سیستم، میزان مصرف بصورت پارامتر در مدل در نظر گرفته شده است (شکلهای ۳ و ۴).

اختلاط آب در مخازن: در بازه‌های زمانی ۳ ساعته با توجه به حجم مخازن و میزان دبی ورودی و خروجی به مخازن در ۳ ساعت، کیفیت آب مخازن در هر بازه زمانی یکنواخت فرض شده است. همچنین با توجه به اختلاط کامل آب‌های منابع سطحی و زیرزمینی، سطح کیفیت آب در کل حجم هر مخزن نیز یکسان در نظر گرفته شده است.

پایداری سیستم آبرسانی: در سیستم آبرسانی مورد مطالعه، مسئله اختلاط آب برداشت شده از منابع سطحی و زیرزمینی با کیفیتهای مختلف، چالش حفظ کیفیت آب در خروجی از مخازن را ایجاد مینماید. لذا علاوه بر حفظ محدوده بالا و پایین حجم مخازن، حفظ کیفیت آب در حد

استاندارد نیز به شرایط پایداری سیستم آبرسانی اضافه شده است. برای سیستم آبرسانی، شرایط پایداری طبق محدودیتهای ذیل تعریف می‌شود:

- همواره آب به اندازه کافی در مخازن موجود باشد (حد بالا و پایین حجم آب در مخازن). حجم آب موجود در مخازن همواره باید در حدی قرار بگیرد که اولاً موجب مشکل هیدرولیکی در سیستم آبرسانی نگردد و ثانیاً قابلیت اطمینان به سیستم در حد مطلوب را حفظ نماید. به عبارت دیگر هیچگاه نباید امکان سرریز مخزن و یا خالی شدن آن در هیچ یک از بازه های زمانی وجود داشته باشد (شرط هیدرولیکی) و همواره حجم آب مخزن در حدی باقی بماند که به دلیل خطای انسانی یا سخت افزاری (از قبیل اقدامات بهره برداری نامناسب در نتیجه اشتباه در سنجش ارتفاع مخزن و یا قطع برق و سایر موارد) به سادگی موجبات قطع آب خروجی مخزن فراهم نگردد. لذا در محدودیتهای مسئله، حداکثر حجم مخازن را حدود ۸۵٪ گنجایش مخزن و حداقل حجم را حدود ۴۵٪ گنجایش مخزن در نظر گرفته شده است.

- بایستی کیفیت آب خروجی از مخازن، برای مصرف در حد مطلوب باشد. حد مطلوب غلظت فاکتور کیفی برای خروجی مخازن در سناریوهای مختلف حدود ۶ گرم در متر مکعب و حد نهایی غلظت این فاکتور، حداکثر ۷ گرم در متر مکعب در نظر گرفته می‌شود.

- میزان ذخیره آب در مخازن در پایان هر دوره زمانی (شبهانه روز)، نسبت به پایان دوره مشابه قبل، بیشتر از حد مشخصی (۱۰ درصد) تغییر نداشته باشد.

مسئله بر اساس فرضیات و مبانی هیدرولیک حاکم بر سیستم آبرسانی، بصورت یک مدل ریاضی که شامل بخشهای مورد نیاز حل مسئله بهینه سازی چند هدفه می‌باشد، ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است برای ارائه مدل ریاضی، از نمادهای تشریح شده در جدول (۱) استفاده شده است.

معادله محاسبه حجم آب مخازن: قانون پیوستگی در مکانیک سیالات بیان می‌کند که در یک سیستم آبرسانی، افزایش یا کاهش حجم آب در هر مخزن دقیقاً برابر حجم آب خالص ورودی (کل ورودی منهای کل خروجی) به هر مخزن می‌باشد. حجم خالص ورودی در هر بازه

زمانی برابر حاصلضرب دبی خالص ورودی در بازه زمانی تعریف می‌شود. بنابراین تغییرات حجم مخزن در هر بازه زمانی برابر $\Delta V_k = Q_k * T$ می‌باشد. شمارنده بازه زمانی در هر شبانه روز با اندیس k نمایش داده شده و ۸ بازه زمانی ۳ ساعته در ۲۴ ساعت (یک شبانه روز) تعریف می‌شود $K \in (1, 2, \dots, 8)$. برای محاسبه حجم حاصله از دبی خالص آب ورودی به مخزن در یک دوره مشخص مثلاً تا بازه n ام، از محاسبه تجمیعی معادله تغییرات حجم $V_n = \sum_{k=1}^n Q_k * T$ استفاده می‌شود. برای سیستم آبرسانی مورد مطالعه، دبی خالص ورودی با واحد متر مکعب در بازه زمانی ثابت (۳ ساعته) تعریف شده است. لذا ($T = 1$) و در نتیجه معادله تغییرات حجم به صورت معادله $V_n = \sum_{k=1}^n Q_k$ ساده می‌شود. در سیستم آبرسانی مورد مطالعه مطابق شکل ۱، برای مخزن i خواهیم داشت.

$$V_{ni} = \sum_{k=1}^n InUG_{ki} + \sum_{k=1}^n InS_{ki} - \sum_{k=1}^n D_{ki} \pm \sum_{k=1}^n pumpflow_{ki} + V_{0i} \quad (1)$$

تعریف بخشهای مختلف معادله فوق بصورت ذیل می‌باشد:

V_{0i} حجم آب مخزن i در زمان صفر

V_{ni} حجم آب مخزن i در باز n

$\sum_{k=1}^n InUG_{ki}$ حجم آب ورودی از منابع زیرزمینی به مخزن i تا بازه زمانی n ام

$\sum_{k=1}^n InS_{ki}$ حجم آب ورودی از منابع سطحی به مخزن i تا بازه زمانی n ام

$\sum_{k=1}^n D_{ki}$ مصرف آب از مخزن i تا بازه زمانی n ام

$\sum_{k=1}^n pumpflow_{ki}$ آب پمپاژ شده به مخزن یا از مخزن i تا بازه زمانی n ام

برای محاسبه دبی پمپ‌ها (Pumpflow) در ایستگاه پمپاژ، سه حالت قابل بررسی می‌باشد. در حالت اول، یک پمپ با دبی پایین و در حالت دوم یک پمپ با دبی بالا روشن خواهد بود. در حالت اول و دوم که در معرفی مدل آبرسانی ذکر شده است، با توجه به ارتفاع ثابت پمپاژ و دور ثابت پمپ‌ها، دبی و میزان مصرف انرژی آنها در هر بازه زمانی ثابت بوده و فقط با روشن و یا خاموش بودن آنها تغییر می‌کند. حالت سوم زمانی است که دو پمپ بطور موازی با هم کار می‌کنند در این حالت داده‌های تاریخی در سیستم آبرسانی مورد مطالعه نشان می‌دهد که دبی پمپاژ از حاصل جمع دبی دو پمپ حدود ده درصد کمتر می‌باشد [6] برای اعمال اثرات این موضوع در مدل ریاضی، از رابطه زیر استفاده شده است.

$$Q_T = (1 - e)(Q_{p1} + Q_{p2}) \quad (2)$$

در این معادله Q_{p1} و Q_{p2} دبی پمپ‌های اول و دوم و Q_T دبی کارکرد پمپ‌ها در حالت موازی می‌باشد. عدد ثابت (e) نیز ضریب همزمانی پمپاژ بصورت موازی و برابر $0/1$ در نظر گرفته شده است. دبی ایستگاه پمپاژ مخزن اول (pumpflow_{k1}) در معادلات ریاضی محاسبه حجم مخازن بصورت زیر محاسبه شده است:

$$\text{Pumpflow}_{k1} = \left[\sum_j (x_{kj} * F_j) - e \prod_j x_{kj} \right] * L \quad (3)$$

متغیر باینری x_{kj} نمایانگر روشن یا خاموش بودن پمپ j در بازه زمانی k بوده و چون دو پمپ ظرفیت متفاوتی دارند دبی پمپ j تعریف میشود. این ضریب برای پمپ اول ($j=1$) برابر 1 و برای پمپ دوم ($j=2$) برابر $1/12$ مطابق داده‌های تاریخی و مشخصات فنی سیستم آبرسانی در نظر گرفته شده است. ضریب تبدیل روشن و خاموش بودن پمپ‌ها به دبی پمپ (L)، برابر 7650 با واحد متر مکعب در هر بازه زمانی مطابق مشخصات سیستم آبرسانی در نظر گرفته شده است. همانگونه که در معادله فوق مشخص می‌باشد، در زمان پمپاژ دو پمپ بصورت موازی (فقط

در زمانی که هر دو پمپ روشن باشند) بخش دوم معادله فوق ($\prod_j X_{Kj}$) برابر ۱ می‌باشد و در بقیه حالات صفر خواهد بود. دبی ایستگاه پمپاژ مخزن دوم ($Pumpflow_{k2}$) به صورت پارامتر و حسب داده‌هایی تاریخی در مدل قرار می‌گیرد.

معادله محاسبه غلظت فاکتور کیفی: غلظت فاکتور کیفی در بازه زمانی k با نماد XX_K

نمایش داده شده که برای آب ورودی به مخزن با نماد $XXUG_K$ نمایش داده می‌شود. میزان جرم ورودی فاکتور کیفی برابر حاصلضرب دبی ورودی در غلظت فاکتور کیفی (بر حسب گرم در متر مکعب) تعریف شده و جرم آن در مخزن در هر بازه زمانی از حاصلضرب حجم مخزن در غلظت فاکتور کیفی در همان بازه زمانی با واحد گرم محاسبه می‌شود. در مخزن دوم برای سیستم آبرسانی مورد مطالعه خواهیم داشت:

$$XX_{n2} V_{n2} = \sum_{k=1}^n InUG_{k2} * XXUG_{K2} + \sum_{k=1}^n InS_{k2} * XXS_{k2} + \sum_{k=1}^n pumpflow_{k1} * XX_{k1} \quad (3)$$

$$+ V_{02} XX_{02} - \sum_{k=1}^n pumpflow_{k2} * XX_{k2} - \sum_{k=1}^n D_{k2} * XX_{k2}$$

تعریف بخشهای معادله فوق بصورت ذیل می‌باشد:

$V_{02} * XX_{02}$ جرم فاکتور کیفی در مخزن دوم در زمان صفر

$XX_{K2} V_{n2}$ جرم فاکتور کیفی در مخزن دوم در بازه زمانی n ام

$\sum_{k=1}^n InUG_{k2} * XXUG_{K2}$ جرم ورودی فاکتور کیفی از آبهای زیر زمینی تا بازه زمانی n ام

$\sum_{k=1}^n InS_{k2} * XXS_{k2}$ جرم ورودی فاکتور کیفی از آبهای سطحی تا بازه زمانی n ام

$\sum_{k=1}^n D_{k2} * XX_{k2}$ جرم خروجی فاکتور کیفی به مصرف تا بازه زمانی n ام

$\sum_{k=1}^n \text{pumpflow}_{k2} * XX_{k2}$ جرم خروجی فاکتور کیفی به مخزن سوم تا بازه زمانی n ام

$\sum_{k=1}^n \text{pumpflow}_{k1} * XX_{k1}$ جرم ورودی فاکتور کیفی از مخزن اول تا بازه زمانی n ام

برای مخزن اول مطابق شکل ۱ اختلاط آب سطحی و زیر زمینی در کالکتور خروجی مخزن اول صورت می‌گیرد.

برای غلظت فاکتور کیفی خروجی مخزن به سمت شبکه توزیع، خواهیم داشت.

$$D_{k1} * XX_{D_{k1}} = \text{In}S_{k1} * XX_{S_{k1}} + (D_{k1} - \text{In}S_{k1}) * XX_{K1} \quad (5)$$

میزان غلظت فاکتور کیفی در مخزن اول (XX_{k1}) بدلیل انتقال آب از مخزن اول به دوم اهمیت دارد و غلظت فاکتور کیفی در مخزن دوم را تحت تاثیر قرار میدهد. غلظت فاکتور کیفی خروجی به شبکه توزیع در مخزن اول دارای اهمیت زیادی بوده و این برای فاکتور ($XX_{D_{k1}}$) محدودیت در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن حجم کم مخزن اول نسبت به دبی های ورودی و حد بالای حجم آب در مخزن، غلظت فاکتور کیفی مخزن اول برابر غلظت کیفی تنها ورودی آن یعنی آبهای زیرزمینی در نظر گرفته شده است. مطابق نتایج آزمایش پمپاژ و آزمایشات کیفی دوره ای چاههای این بخش از شهر (گزارشات شرکت تامین و تصفیه آب تهران ۱۳۹۷) و با توجه به دامنه تغییرات دبی برداشت آب از چاههای ورودی به مخزن اول در دوره زمانی مورد مطالعه، غلظت فاکتور کیفی در دبی حدود ۱۲۰۰۰ مترمکعب در بازه زمانی، برابر ۱۰ و در دبی حدود ۹۰۰۰ مترمکعب در بازه زمانی برابر ۹/۲۵ گرم بر متر مکعب تخمین زده شده است. لذا برای آب ورودی از منابع زیر زمینی به مخزن اول، معادله تغییرات غلظت فاکتور کیفی ($XX_{UG_{k1}}$) نسبت به دبی برداشت از منابع زیرزمینی ($IN_{UG_{k1}}$) با معادله خطی

$$XX_{UG_{k1}} = 7 + 0.00025 * IN_{UG_{k1}}$$

برآورد گردیده است.

معادله محاسبه انرژی مصرفی: انرژی مصرفی در سیستم آبرسانی با واحد کیلو وات ساعت، حاصل مجموع انرژی مصرفی در پمپهای ایستگاه پمپاژ بعلاوه انرژی مصرفی برای پمپاژ چاهها می باشد: $E_T = E_p + E_w$. برای بدست آوردن انرژی مصرفی، لازم است اندیس مصرف انرژی (شدت انرژی ویژه) با تعریف "میزان انرژی مورد نیاز برای پمپاژ یک متر مکعب آب به ارتفاع یک متر بالاتر" که در صنعت آب و فاضلاب فاکتور مهمی است، مطرح شود. با داشتن اندیس مصرف انرژی (I_e) و حجم آب پمپ شده (ایستگاه پمپاژ یا چاهها) و همچنین ارتفاع پمپاژ میتوان به انرژی مصرفی سیستم دست یافت:

$$\text{ارتفاع پمپاژ} * \text{اندیس مصرف انرژی} * \text{حجم آب} \quad (6)$$

پمپ شده $E_p =$ در ایستگاه پمپاژ، حجم آب پمپ شده برابر حاصلضرب دبی در زمان بوده و مطابق مشخصات سیستم آبرسانی مورد مطالعه، ارتفاع پمپاژ H برابر ۲۰ متر و اندیس انرژی I_e برابر $\frac{Kwh}{m^3} / m$ ۰/۰۰۴ در نظر گرفته شده است (گزارشات سیستم مدیریت انرژی شرکت آبفای استان تهران ۱۳۹۷). دبی پمپها در ایستگاه پمپاژ حسب روش و یا خاموش بودن پمپها تعیین میشود. انرژی مصرفی در ایستگاه پمپاژ در هر بازه زمانی با رابطه ذیل تعریف میشود:

$$E_{p_k} = \sum_j X_{kj} * F_j * L * N * C_k \quad (7)$$

N ضریب تبدیل جریان آب به انرژی مصرفی با تعریف $N = I_e * H$ برابر ۰/۰۸ کیلو وات ساعت بر متر مکعب می باشد. (سایر متغیرها در بخش معادله محاسبه حجم تشریح گردیده اند). برای مصرف انرژی در هر بازه زمانی در چاهها داریم:

$$E_{w_k} = I_n U G_k * M * N * C_k \quad (8)$$

در این معادله M ضریب تبدیل ارتفاع پمپاژ چاهها به ارتفاع پمپاژ پمپها در ایستگاه پمپاژ بوده و نشان می دهد که انرژی پمپاژ یک متر مکعب آب از چاهها با ارتفاع پمپاژ ۱۷۰ متر برابر ۰/۶۸ می

باشد. نسبت ارتفاع پمپاژ چاه‌ها به ایستگاه پمپاژ برابر $۸/۵ = ۱۷۰/۲۰$ و انرژی پمپاژ یک متر مکعب آب از چاهها برابر $۰/۶۸ = ۰/۰۸ * ۸/۵$ می‌باشد. کل انرژی مصرفی در یک شبانه‌روز (E_T) و کل آب سطحی مصرفی سیستم آبرسانی در یک شبانه‌روز **InS(total)** با توجه به موارد فوق، مطابق معادله ذیل قابل محاسبه می‌باشد:

$$E_T = \sum_k \sum_j (X_{kj} * F_j * L * C_k * N) + \sum_k \sum_j (InUG_k * M * C_k * N)$$

$$InS(\text{total}) = \sum_k \sum_j InS_{ki}$$

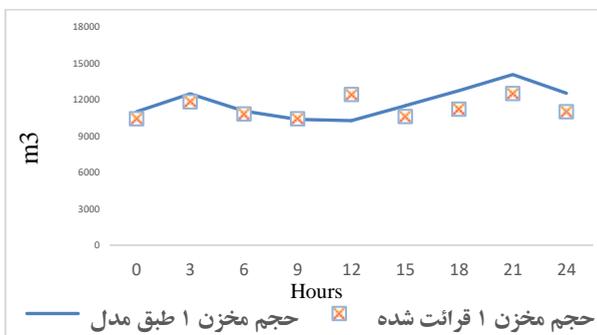
اهداف پژوهش، "بهینه‌سازی هزینه انرژی" و "میزان برداشت از منابع آب سطحی" به شرح ذیل تعریف می‌شوند:

$$Z_1 = E_T$$

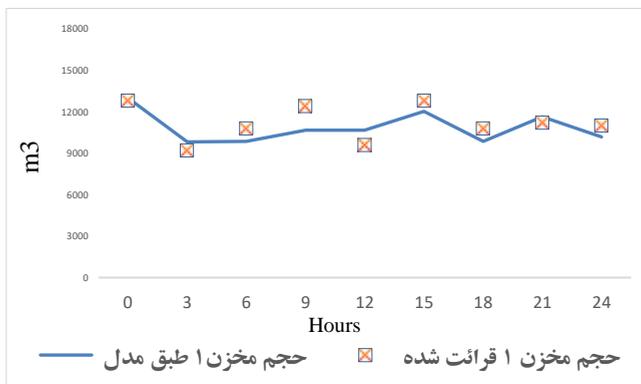
$$Z_2 = InS(\text{total})$$

اعتبار سنجی مدل ریاضی: در این پژوهش برای اعتبار سنجی مدل ریاضی از مدلسازی سیستم آبرسانی توسط نرم افزار *vensim*, (SA) استفاده شده است. بدین ترتیب که معادلات اصلی متغیرهای جریان، سطح و کمکی در SA برگرفته از مدل ریاضی و توابع هدف ایجاد شده در بخش معرفی مدل ریاضی مقاله می‌باشد. بدیهی است چنانچه خروجی‌های مدل با داده‌های واقعی سیستم آبرسانی تناسب و همپوشانی داشته باشد آنگاه میتوان اعتبار معادلات ریاضی را تایید نمود. در عین حال باتوجه به بین رشته‌ای بودن مقاله، SA باعث درک بهتر مخاطبین با تخصص‌های مختلف از مدل سیستم آبرسانی گردیده و امکان توسعه مدل و استفاده از آن برای سیاستگذاری‌های آینده در حوزه‌های فنی و اجتماعی سیستم آبرسانی از قبیل تاثیرات رشد جمعیت، کاهش منابع آبی و غیره را فراهم می‌سازد.

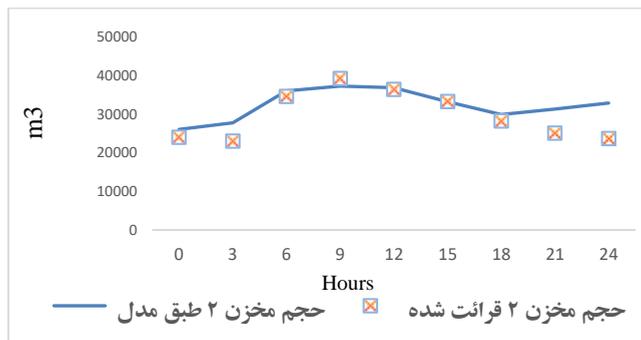
سیستم آبرسانی، از قبیل متغیرهای سطح در مدل (مخازن سیستم) و متغیرهای جریان (ورودی‌های منابع سطحی و زیرزمینی) و سایر بخشها قابل تشخیص می باشد.



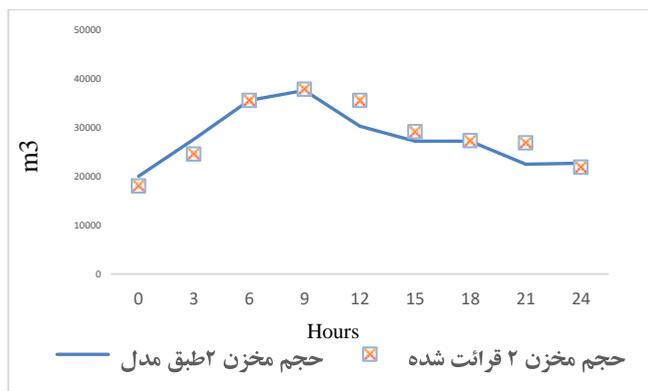
الف-حجم مخزن ۱ در دوره اول



ب-حجم مخزن ۱ در دوره دوم



ج- حجم مخزن ۲ در دوره اول



د- حجم مخزن ۲ در دوره دوم

شکل ۵: نمودار مقایسه حجم مخزن قرائت شده و خروجی مدل (ماخذ: نتایج تحقیق)

- آزمون همپوشانی مدل: معادله ریاضی محوری در مدل‌سازی سیستم آبرسانی، معادله محاسبه حجم مخازن است. این معادله مبنای محاسبه معادلات هزینه انرژی و کیفیت می‌باشد و معادلات مذکور با اعمال ضرایب، پارامترها و یا حذف برخی بخشها، از معادله حجم مخازن نتیجه‌گیری شده‌اند. برای حجم مخازن در دو روز مختلف، ۳۶ داده واقعی مستقل وجود دارد که مقایسه آنها با ۳۶ داده استخراج شده از مدل (شکل ۵) مبنای آزمون همپوشانی مدل قرار گرفته‌اند. با توجه به نرمال نبودن داده‌ها، آزمون فرض نبود اختلاف بین داده‌های مدل و داده‌های واقعی با استفاده از آماره ویلکاکسون^۱ سنجده شده است. نتایج آزمون نشان می‌دهد که پی - مقدار^۲ آماره مذکور در سطح $\alpha = 0.05$ مقداری برابر 0.6335 بدست می‌آید که با دقت بالایی نبود اختلاف بین داده‌ها را تایید می‌کند. یعنی داده‌های واقعی با داده‌های مدل هم پوشانی بالایی دارند. به عبارت دیگر می‌توان از مدل ارائه شده با دقت بالایی برای تخمین رفتار سیستم آبرسانی استفاده نمود.

1 Wilcoxon signed-rank test

2 P-Value

حل مسئله بهینه سازی

مسئله بهینه سازی با توجه به مدل‌سازی ریاضی، یک مسئله بهینه سازی چند هدفه با دو هدف کاملاً مجزا و دارای محدودیتهای غیر خطی و شرایط غیر محدب^۱ از نوع MINLP^۲ می باشد. برای حل این مسئله بهینه سازی دو هدفه از روش برنامه ریزی آرمانی^۳ (GP) استفاده شده است. برای بهینه نمودن اهداف Z1 و Z2 در مرحله اول، مطابق معادلات مطرح شده در بخش مدل‌سازی ریاضی خواهیم داشت:

$$\text{Min } z_1 = \text{Min ET} \quad \text{و} \quad \text{Min } z_2 = \text{Min InS}(\text{total})$$

○ با توجه به الگوریتم حل مسائل بهینه سازی در روش برنامه ریزی آرمانی:

$$\text{Min } \{ d'_1, d'_2 \}$$

ST:

$$\text{آرمانی} \left\{ \begin{array}{l} z_1 + d_1 - d'_1 = A \\ z_2 + d_2 - d'_2 = B \end{array} \right.$$

$$\text{سیستمی} \left\{ \begin{array}{ll} V_{ki} \leq V_{\max i} & \forall k, i \\ V_{ki} \geq V_{\min i} & \forall k, i \\ \text{XX}_{ki} \leq \text{XX}_{\max i} & \forall k, i \end{array} \right.$$

$$\text{InUG}_{ki}, \text{InS}_{ki} \geq 0, \quad \text{InS}_{ki} \leq \text{InS}_{\max i}, \quad \text{InUG}_{ki} \leq \text{InUG}_{\max i} \quad \forall k, i$$

$$\text{و} \quad x_1 \quad \text{و} \quad x_2 \in (0, 1)$$

1 Non-Convex

2 Mixed Integer Nonlinear Programming

3 Goal Programming

در مسئله بهینه‌سازی فوق، A و B ایده آل‌های تصمیم‌گیرنده برای اهداف اول و دوم خواهند بود. روش برنامه‌ریزی آرمانی امکان می‌دهد تا برای حل دو مسئله تک هدفه ایجاد شده که غیر خطی و با شرایط غیر محدب می‌باشند، از هر یک از روشهای بهینه‌سازی غیر خطی، بهره‌برداری شود. برای حل مسئله ابتدا حسب نظر تصمیم‌گیرنده، هدف با اولویت بالاتر مثلا Z_1 انتخاب گردیده و بنابراین ابتدا d'_1 مینیمم می‌شود و فرض می‌کنیم که مقدار بهینه آن d_1^* باشد. سپس d'_2 مینیمم خواهد شد. ولی تحت هیچ شرایطی نباید اجازه داده شود که d'_1 بزرگتر از d_1^* گردد، یعنی دست‌یابی به آرمانی با اولویت پایین‌تر نباید به قیمت خراب شدن دسترسی قبلی به آرمان با اولویت اول بدست آید (ماکویی پور، ۱۳۹۵). برای بهینه‌سازی هر هدف مجزا در این مطالعه از روش $SCIP^1$ که مناسب برای حل مسائل بهینه‌سازی غیر خطی و غیر محدب می‌باشد، استفاده شده است. نرم‌افزار GAMS نیز با توجه به دارا بودن امکان حل مسایل از روش $SCIP$ ، برای حل مسئله بهینه‌سازی برای هر هدف بطور مجزا انتخاب شده است. در مرحله بعد، برای حل مسئله بهینه‌سازی دو هدفه از دو الگوریتم متفاوت، روش برنامه‌ریزی آرمانی و روش معیار جامع GC^2 استفاده شده است که روش برنامه‌ریزی آرمانی روش اصلی و روش معیار جامع روش پشتیبان می‌باشد. برای حل مسئله از این دوروش در نرم‌افزار GAMS کد نویسی شده است. در این پژوهش، روش برنامه‌ریزی آرمانی با دو رویکرد حل شده است. رویکرد اول (IGP) با اولویت دهی به اهداف (هزینه انرژی به عنوان اولویت اول) انجام شده است و رویکرد دوم (2GP) بدون اولویت دهی به اهداف تحقق یافته است. همچنین برای اعتبار سنجی بهینه‌سازی علاوه بر بهینه‌سازی مدل با روشهای مختلف برای یک دوره (دوره اول)، مسئله برای دوره زمانی دوم نیز به صورت یک تحلیل پشتیبان حل شده است. همانگونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود،

1 Solving Constraint Integer Programs

2 Global Criterion

نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر رعایت کلیه محدودیتها، اهداف بهینه سازی نیز هر دو بهبود یافته اند و روش بهینه سازی از اعتبار مناسبی برخوردار می باشد.

جدول ۵: پاسخ تحلیلهای پشتیبان با مدل‌های مختلف بهینه سازی چند هدفه

تاریخ	روش بهینه سازی	هزینه انرژی Rials/Day	مصرف آب سطحی M ³ / Day	حداکثر فاکتور کیفی (gt/m ³)/T
دوره اول	1GP) 01(	۱۰۷*۴/۲۶	۱۰۶۲۰۰	۷/۶
دوره اول	GC) 02(	۱۰۷*۴/۲۲	۱۰۷۷۰۰	۷/۶
دوره اول	(2GP) 03	۱۰۷*۴/۲۹	۱۰۵۵۰۰	۹/۶
دوره اول	Real	۱۰۷*۴/۴۰	۱۰۸۱۰۰	۹/۶
دوره دوم	1GP) 01(	۱۰۷*۴/۶۳	۱۰۷۵۰۰	۶/۶
دوره دوم	GC) 02(	۱۰۷*۴/۶۶	۱۰۶۵۰۰	۹/۶
دوره دوم	(2GP) 03	۱۰۷*۴/۶۲	۱۰۷۵۰۰	۹/۶
دوره دوم	Real	۱۰۷*۴/۷۵	۱۰۸۶۰۰	۹/۶

مآخذ: نتایج تحقیق

۴ - تعریف سناریوها و نتایج محاسباتی :

برای بهینه سازی توابع هدف، براساس اولویت های تصمیم گیرنده، می توان سناریوهای مختلفی در نظر گرفت. سناریوها با توجه به اولویت دهی به اهداف در شرایط و موقعیتهای مختلف اقلیمی و اجتماعی توسط تصمیم گیرنده و محدودیت کیفیت آب و با رعایت سایر قیود پایداری سیستم آبرسانی از جمله حجم مخازن تعریف می شوند. در سیستم های آبرسانی، تامین آب به میزان مورد تقاضا با حفظ کیفیت و با کمترین هزینه، مهمترین وظیفه محسوب می گردد. لذا جهت بهبود عملکرد سیستم نسبت به شرایط واقعی (Real)، شرایط ذیل را میتوان متصور شد: در شرایط نرمال دسترسی به منابع تامین آب، کاهش هزینه ها از اولویت خاص برخوردار بوده و لذا هدف کاهش هزینه انرژی بعنوان هدف اصلی می تواند مطرح باشد. در خشکسالی و محدودیت برداشت از

منابع آب، بخصوص منابع سطحی، هدف کاهش برداشت از منابع آب سطحی بعنوان اولویت اول مطرح می‌گردد. لازم بذکر است که در برخی شرایط، محدودیت منابع آب یا شرایط اجتماعی چالش جدیدی با عنوان حفظ پایداری کیفیت آب را در سیستم‌ها مطرح می‌سازد که می‌تواند مهمترین شرط در راهبری سیستم آبرسانی باشد. شرایطی نیز می‌تواند وجود داشته باشد که هر دو هدف اولویت یکسانی داشته باشند و بهبود کیفیت در راستای رسیدن به سطح مطلوب نیز مدنظر باشد. در این شرایط، بهینه‌سازی همزمان اهداف انجام می‌شود و بهینه‌نهایی^۱ حاصل می‌گردد. با توجه به موارد فوق، در این پژوهش چهار سناریو براساس اولویتهای مورد نظر تصمیم‌گیرنده در شرایط مختلف در نظر گرفته می‌شود. در هر یک از این سناریوها برای رسیدن به بهترین پاسخ با استفاده از روش GP، با تغییر مقادیر A و B (ایده‌آلهای اولیه تصمیم‌گیرنده) و تحلیل حساسیت براساس نظرات تصمیم‌گیرنده، مناسبترین مقادیر A و B با توجه به میزان اولویت اهداف و محدودیتها تعیین می‌شوند و می‌توان به جواب نهایی هر سناریو رسید.

سناریو اول (۰۱): در سال آبی نرمال، به کاهش هزینه انرژی از طریق مدیریت اوج بار برق (هدف اول) اولویت داده می‌شود و بهینه‌سازی هدف دوم به نحوی انجام می‌شود که از منابع آب سطحی بیش از حالت واقعی (Real) برداشت نگردد. این سناریو با شرایط حدود ۵٪ هزینه انرژی کمتر (حدود ۲۲۰۰۰۰۰ ریال هزینه کمتر در شبانه روز) و مصرف ۲۱٪ کمتر از انرژی برق در اوج بار (متوسط حدود ۵ مگاوات ساعت کمتر در زمان اوج بار) در این شرایط بعنوان سناریوی منتخب تصمیم‌گیرنده معرفی شده است.

سناریو دوم (۰۲): در شرایط نرمال دسترسی به منابع آب سطحی، با توجه به شرایط اجتماعی تشدیدکننده اهمیت کیفیت آب در سیستم، در بسیاری اوقات، کیفیت بالاتر آب بعنوان اولویت اصلی

راهبران سیستم آبرسانی قرار می‌گیرد. در این حالت، بهینه‌سازی هزینه انرژی و میزان برداشت از آبهای سطحی به نحوی که مقادیر هردوی این اهداف از سناریو واقعی (Real) بیشتر نگردد و به میزان ۶٪ بهبود در عامل کیفی، سناریو دوم توسط راهبران سیستم انتخاب می‌شود.

سناریو سوم (۰۳): در خشکسالی و محدودیت شدید منابع آب سطحی، با اولویت دهی به هدف دوم و با شرایط برداشت تا حدود ۵٪ کمتر از منابع آب سطحی (۵۰۰۰ متر مکعب کمتر در شبانه روز) و بهینه‌سازی هدف اول به نحوی که هزینه انرژی بیش از حالت واقعی (Real) نگردد، سناریوی سوم برای تصمیم‌گیرندگان ارجح می‌باشد.

سناریو چهارم (۰۴): در سناریوی چهارم، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با در نظر گرفتن اولویت یکسان برای اهداف، به مقادیر بهینه در همه حوزه‌ها (بهینه‌نهایی) به حدود ۳٪ کاهش هزینه انرژی، ۱۵٪ مصرف انرژی برق کمتر در اوج بار و همزمان ۱/۵٪ برداشت آب سطحی کمتر نسبت به حالت واقعی دست یابند. بهبود فاکتور کیفی در حدود ۴٪ نیز در این سناریو حاصل خواهد شد. خلاصه‌ای از سناریوهای مطروحه و نتایج آن مطابق جدول ۶ و ۷ ارائه گردیده است. کاهش هزینه انرژی بدست آمده در سناریوهای مختلف جدول ۶ با اعمال زمانبندی مناسب در راهبری سیستم آبرسانی و از طریق کاهش مصرف در اوج بار (پیکسای) صورت پذیرفته است. لذا با حفظ کیفیت و میزان برداشت از آب سطحی هم اندازه سناریوی واقعی (Real) میتوان با رعایت شرایط پایداری سیستم آبرسانی حدود ۲۱٪ از اوج مصرف انرژی برق را در سناریوی اول کاهش داد (جدول ۷).

جدول ۶: سناریوهای مختلف و نتایج اهداف در سیستم آبرسانی مورد مطالعه

تاریخ	شماره سناریو	هزینه انرژی Rials/Day	مصرف آب سطحی M ³ / Day	حداکثر فاکتور کیفی (gr/m ³)/T
دوره اول	۰۱	۱۰۷*۴/۱۷	۱۰۸۷۰۰	۶/۸
دوره اول	۰۲	۱۰۷*۴/۳۱	۱۰۹۴۰۰	۶/۵
دوره اول	۰۳	۱۰۷*۴/۳۹	۱۰۳۶۰۰	۶/۹

دوره اول	۰۴	۱۰.۷*۴/۲۶	۱۰۶۲۰۰	۶/۷
دوره اول	Real	۱۰.۷*۴/۴۰	۱۰۸۱۰۰	۶/۹
دوره دوم	۰۱	۱۰.۷*۴/۵۶	۱۰۹۲۰۰	۶/۹
دوره دوم	۰۲	۱۰.۷*۴/۶۹	۱۰۷۰۰۰	۵/۶
دوره دوم	۰۳	۱۰.۷*۴/۷۴	۱۰۴۲۰۰	۹/۶
دوره دوم	۰۴	۱۰.۷*۴/۶۲	۱۰۷۴۰۰	۶/۶
دوره دوم	Real	۱۰.۷*۴/۷۵	۱۰۸۶۰۰	۹/۶

مآخذ: نتایج تحقیق

جدول ۷: تغییرات الگوی مصرف انرژی در سیستم با سناریوهای مختلف

تاریخ	شماره سناریو	کل مصرف انرژی در یک شبانه روز (Mwh)	مصرف انرژی در کم باری Mwh	مصرف انرژی در میان باری Mwh	مصرف انرژی در اوج بار Mwh
دوره اول	۰۱	۱۳۲	۳۹	۷۵	۱۸
دوره اول	۰۲	۱۳۲	۳۹	۷۲	۲۱
دوره اول	۰۳	۱۳۶	۴۰	۷۵	۲۰
دوره اول	۰۴	۱۳۴	۴۱	۷۴	۱۹
دوره اول	Real	۱۳۴	۴۵	۶۷	۲۲
دوره دوم	۰۱	۱۴۵	۴۴	۸۲	۱۹
دوره دوم	۰۲	۱۴۶	۴۴	۸۱	۲۱
دوره دوم	۰۳	۱۴۹	۴۵	۸۲	۲۲
دوره دوم	۰۴	۱۴۶	۴۴	۸۱	۲۱
دوره دوم	Real	۱۴۵	۴۸	۷۳	۲۴

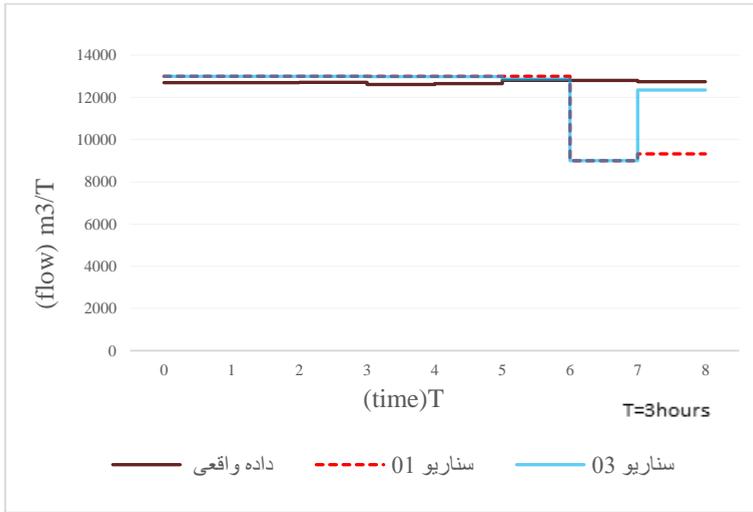
نمودار تغییرات متغیرهای مسئله در سناریوهای ۰۱ و ۰۳ در مقایسه با مقادیر واقعی (Real)

آنها، مطابق جدول ۸ و شکل ۶، به عنوان نمونه ای از فضای تصمیم‌گیری در سناریوها به شرح ذیل ارائه می‌گردد. در جداول ۶ و ۷، کاهش هزینه انرژی از طریق کاهش اوج بار برق در کل سیستم حاصل شده است. انرژی مصرفی در سیستم، حاصل کارکرد الکتروپمپها در ایستگاه آبرسانی و چاهها می‌باشد.

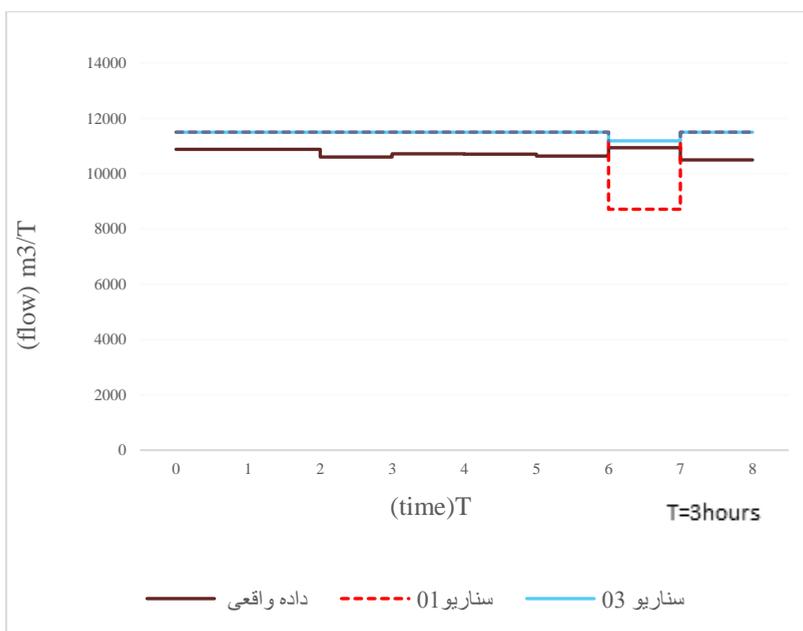
جدول ۸- کارکرد پمپ‌ها در ایستگاه پمپاژ مخزن ۱ به ۲ در دوره اول دوره ۲۴ ساعته

دوره ۲۴ ساعته		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
زمان	پمپ ۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱
	پمپ ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰
سناریو ۰.۱	پمپ ۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰
	پمپ ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
سناریو ۰.۳	پمپ ۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱
	پمپ ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰

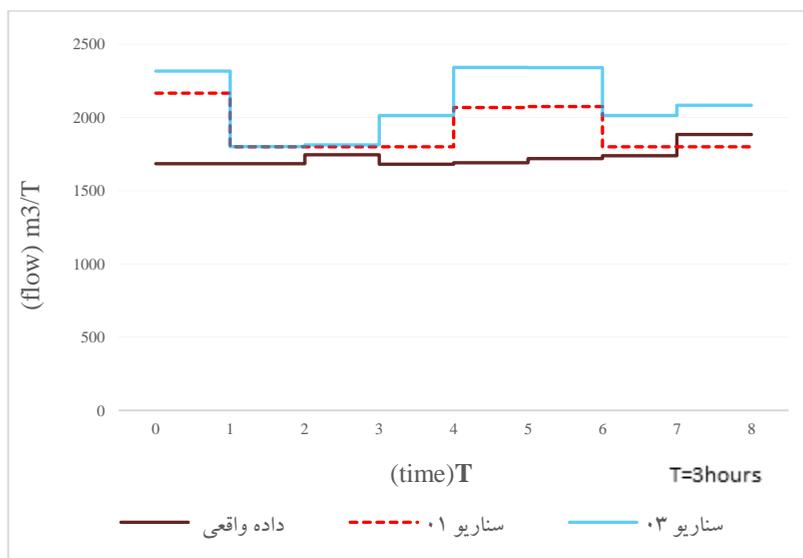
مأخذ: نتایج تحقیق



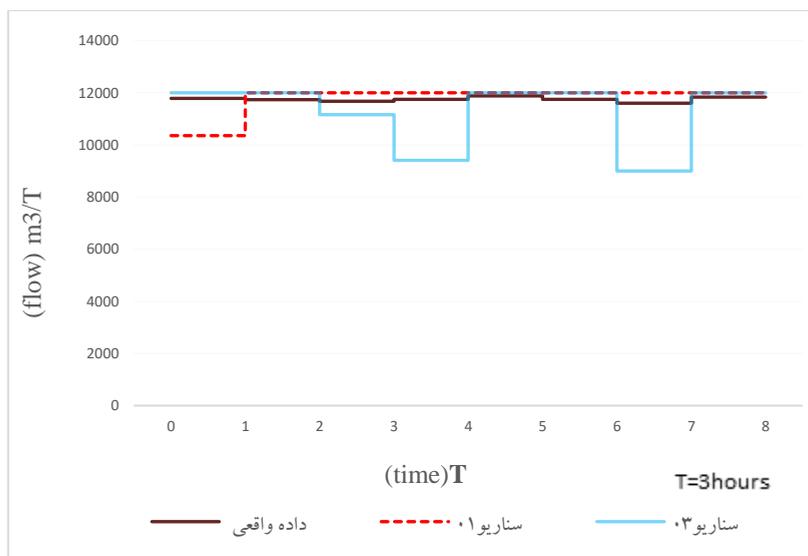
شکل الف- برداشت واقعی از آبهای زیرزمینی مخزن ۱ و سناریو‌ها در دوره اول



شکل ب- برداشت واقعی از آبهای زیرزمینی مخزن ۲ و سناریو ها در دوره اول



شکل ج- برداشت واقعی از آبهای سطحی مخزن ۱ و سناریو ها در دوره اول



شکل ۵ - برداشت واقعی از آبهای سطحی مخزن ۲ و سناریو ها در دوره اول

شکل ۶- برداشت واقعی و سناریو های ۰.۱ و ۰.۳ در مخازن ۱ و ۲ برای دوره اول (ماخذ: نتایج تحقیق)

حال اگر تنها کاهش هزینه اوج بار در ایستگاه پمپاژ را مدنظر قرار دهیم، نتایجی مطابق جدول ۹ در سناریوی اول حاصل می شود. نتایج نشان می دهد که با بهینه سازی زمانبندی عملکرد پمپها در ایستگاه پمپاژ، ۱۳٪ کاهش هزینه و ۳۷٪ کاهش مصرف برق در اوج بار حاصل شده است. لذا باتوجه به اینکه طبق ویژگی های سیستم آبرسانی مورد مطالعه، هزینه انرژی برداشت از منابع زیرزمینی بیش از ۹۰٪ هزینه کل سیستم بوده است، لذا کاهش هزینه انرژی در ایستگاه پمپاژ تاثیر کمی بر کاهش انرژی در کل سیستم داشته است. این نتیجه بسیار با اهمیت بوده و میتواند مبنایی برای مطالعات بیشتر در این زمینه باشد.

جدول ۹: تغییرات الگوی مصرف و هزینه انرژی در ایستگاه پمپاژ در سناریو اول (ماخذ: نتایج تحقیق)

دوره	سناریو	مصرف انرژی Mwh	مصرف انرژی در کم باری Mwh	مصرف انرژی در میان بار Mwh	مصرف انرژی در اوج بار Mwh	هزینه انرژی Rial/Day
اول	۰۱	۶/۶	۲/۵	۳/۳	۰/۸	۱۰۶*۱/۶۸
اول	واقعی	۷/۱	۲/۷	۳/۱	۱/۳	۱۰۶*۱/۹۲

ماخذ: نتایج تحقیق

۵- نتیجه گیری:

با توجه به محدودیت منابع آب در ایران، آبرسانی به بسیاری از شهرهای بزرگ برای تامین آب مورد نیاز شهروندان با کمیت و کیفیت مناسب موضوعی مهم و چالش بر انگیز می باشد. محدودیت منابع آب باعث شده تا تامین آب مورد نیاز در شهرهای بزرگ از یک منبع امکانپذیر نباشد و استفاده از منابع سطحی و زیرزمینی با کمیت و کیفیت متفاوت به طور همزمان صورت پذیرد. تامین آب از منابع زیرزمینی و همچنین پمپاژ آب بین مخازن، نیازمند انرژی خواهد بود که صرف هزینه قابل توجهی را به دنبال خواهد داشت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد در سیستم‌های آبرسانی که از منابع سطحی و زیرزمینی برای تامین آب مورد نیاز استفاده می‌کنند، با به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه می‌توان به اهداف "کاهش مصرف برق در اوج بار و کاهش هزینه انرژی" و همزمان به "برداشت بهینه از منابع آب سطحی" با رعایت محدودیت‌های سیستم از جمله حفظ کیفیت در حد مناسب، دست یافت. اهداف بهینه‌سازی با استفاده از زمانبندی مناسب عملکرد پمپها در ایستگاه پمپاژ و تغییرات دبی برداشت از آبهای سطحی و زیرزمینی در هر بازه زمانی (متغیرمدل) حاصل می‌شوند و در هیچ شرایطی کیفیت آب نیز از حد مناسب پایین‌تر نخواهد شد. متغیر فرض نمودن دبی برداشت از منابع آبی مختلف و لحاظ نمودن محدودیت کیفیت آب در این پژوهش نسبت به سایر مطالعات بدیع می‌باشند و ارزشمندی نتایج را ارتقا می‌دهند.

طبق یافته‌های پژوهش، این بهینه‌سازی کاهش قابل توجهی در مصرف برق در اوج بار را ایجاد می‌نماید، ولی نسبت تاثیر کاهش اوج بار در کاهش هزینه‌های برق قابل توجه نمی‌باشد. با توجه به تاثیرات هزینه در مصرف مشترکین و اهمیت مصرف در اوج بار در سیستم تامین و توزیع برق نامه وزیر محترم نیرو ۱۳۹۹/۴/۲۸ پیشنهاد میشود تعرفه زمانی برق، بخصوص تعرفه اوج بار در فصل تابستان بازنگری گردد. قابل ذکر است با توجه به نتیجه‌های ذکر شده در بخش قبل، اگر درصد صرفه‌جویی در هزینه انرژی و همچنین درصد کاهش میزان مصرف برق در اوج بار را فقط برای ایستگاههای پمپاژ بین مخازن در نظر بگیریم، نتایج به مراتب بیشتر از درصد‌های متناظر برای کل سیستم آبرسانی بوده است. این یافته می‌تواند مبنایی برای مطالعات و پژوهشهای آتی باشد.

منابع

- تیموری، ابراهیم (۱۳۹۳)، پویایی‌های سیستم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- رجب پور و همکاران (۱۳۹۲) "بهینه‌سازی هزینه انرژی مصرفی در سامانه‌های انتقال آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، شماره دوم نشریه مباحث برگزیده انرژی.
- سامی کشکولی، بهرام (۱۳۹۵) "بهره‌برداری بهینه از ایستگاههای پمپاژ سیستم‌های آب با استفاده از الگوریتم جامعه زنبورهای عسل مصنوعی"، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب جلد بیست و سوم، شماره ۵.
- شرکت تامین و تصفیه آب تهران (۱۳۹۸)، آمار و گزارشات آبرسانی شهر تهران.
- شرکت آب و فاضلاب استان تهران (۱۳۹۸)، آمار و گزارشات حوزه انرژی.
- فرمانی انتظام، حسن (۱۳۹۸) "استخراج سیاست‌های پایدار آب شرب شهری با رویکرد پویایی سیستم (مطالعه موردی: شهرقم)" مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۱ - شماره پیاپی ۱۱۹، فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۸، صفحه ۴۹-۳۲.
- ماکویی پور، احمد (۱۳۹۵)، بهینه‌سازی چند هدفه، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

وزارت نیرو (۱۳۹۹)، لزوم پیکسای (کاهش مصرف در اوج بار)، نامه شماره ۹۹/۲۰۲۴۲/۳۰/۱۰۰ مورخ ۹۹/۴/۲۸ وزیر محترم نیرو.

ویسی، فرزاد و مهرداد شمشادی (۱۳۸۷) "مدیریت مصرف انرژی در ایستگاههای پمپاژ با استفاده از مدل سازی دینامیکی"، مجله آب و فاضلاب، دوره: ۱۹، شماره: ۶۷.

Behandish, Morad & Zheng Wu (2014), "Concurrent Pump Scheduling and Storage Level Optimization Using Meta-Models and Evolutionary Algorithms" *Procedia Engineering*, No. 70, PP.103-112.

Bonvin, Gratién; Sophie Demassey & Andrea Lodi (2019) "Pump scheduling in drinking water distribution networks with an LP/NLP-based branch and bound", HAL ID : hal-02158535.

Candelieri, Antonio; Riccardo Perego & Francesco Archetti (2018) "Intelligent Pump Scheduling Optimization in Water Distribution Networks", 12th International Conference, LION 12, Kalamata, Greece, PP. 352-396.

Cassiolato, G; Esdras P. Carvalho; Jose A. Caballero & Mauro A. S. S.Ravagnani (2019) ."Water Distribution Networks Optimization Using Disjunctive Generalized Programming", *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, No. 76, PP. 547-552 .

Cheng, C.T; W. C. Wang; D. M. Xu & K. W. Chau (2008) "Optimizing Hydropower Reservoir Operation Using Hybrid Genetic Algorithm and Chaos". *Water resources management*, No. 22, PP. 895-909.

Guilin, Zheng (2015), "Energy Optimization Study of Rural Deep Well Two-Stage Water Supply Pumping Station" *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 24, No. (4) , PP. 1-9.

Jung, Donghwi (2015), "Real-Time Pump Scheduling for Water Transmission Systems". *Journal of Civil Engineering*, vol. 19, No. (7), pp. 1987-1993.

Kang, Hyeong-Seok & Hyunook Kim (2014), "Optimization of pumping schedule based on water demand forecasting using combined model of autoregressive integrated moving average and exponential smoothing" *Water Science & Technology Water Supply*, Vol. 15, No. (1) , pp. 188-195 .

Khatavkar, Puneet & Larry W. Mays (2019). "Optimization-simulation model for real-time pump and valve operation of water distribution systems under critical conditions ", *Urban Water Journal*, No. 16, PP. 45-55.

Leon, C.F. (2017). "Energy optimization of supplied flows from multiple pumping Stations in Water Distributions Networks" , *Procedia Engineering* , No. 186, pp 93-100.

L'opez-Ib'añe , M. & Ben Paechter (2011). "Representations and Evolutionary Operators for the Scheduling of Pump Operations in Water Distribution Networks", *Evolutionary Computation*, Vol. 19, No. 3 , PP. 429-467.

Luna, Tiago; aJoão Ribaua & Rita Alvesb (2019). "Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization" *Journal of Cleaner Production*, No. 213, pp. 342-356.

Odan, F. K & Z. Kapelan (2015). "Real-Time Multiobjective Optimization of Operation of Water Supply Systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 141, No (9) :04015011.

Shi , Hanyu & Fengqi You (2016). "Energy Optimization of Water Supply System Scheduling: Novel MINLP Model and Efficient Global Optimization Algorithm", *American Institute of Chemical Engineers AIChE J*, No. 62, PP. 4277-4296.

Wilcoxon, Frank (1945). "Individual Comparisons by Ranking Methods" . *Biometrics Bulletin*, No. 6, PP. 80-83.

Yuan, Y & C. Liu (2012). "Solving optimum operation of single pump unit problem with ant colony optimization (ACO) algorithm", *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 15(2):2008.