نشریه علمی(فصلنامه) پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال ششم/ شماره ۲۰/ پاییز ۱۳۹۹/ صفحات ۱۲۳ - ۸۵

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 وصنعت 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 می گردد. تامین آب از منابع زیرزمینی نیازمند مصرف انرژی بوده ومنابع آب سطحی نیزمحدود و ناپایدارمی‌باشند. هدف ازاین پژوهش، راهبری بهینه وتامین آب مورد نیاز سیستم آبرسانی با حداقل هزینه انرژی وحداقل نیازبه برداشت آب از منابع سطحی، ضمن حفظ پایداری کمی وکیفی سیستم می‌باشد. این هدف از طریق بهینه سازی زمانبندی عملکرد پمپها با مدیریت مصرف انرژی و بهینه سازی تغییرات دبی برداشت و نسبت اختلاط منابع تامین آب صورت پذیرفته است. تفاوت این پژوهش با مقالات مشابه، تعریف اهداف چندگانه، اضافه نمودن محدودیتهایی نظیرکیفیت آب در پایداری سیستم وهمچنین متغیرفرض نمودن دبی برداشت آب ازمنابع سطحی و زیرزمینی می‌باشد. برای حل مسئله، ابتدا بادرنظرگرفتن قوانین پیوستگی وانرژی ومشخصات فنی سیستم آبرسانی، هیدرولیک سیستم مدلسازی ریاضی شده است. سپس با شبیه سازی سیستم آبرسانی درنرم افزار Vensim به کمک مدل ریاضی، اعتبار مدل براساس مقایسه خروجی نرم افزار باداده های واقعی موردسنجش قرارگرفته است. در مرحله بعد مسئله بهینه سازی چندهدفه با استفاده ازنرم افزارGAMS حل شده است. در پایان براساس انتظارات واهداف متولیان سیستم، تحلیل حساسیت برروی داده های ورودی و نتایج انجام شده و سناریوهای بهینه برای راهبری سیستم آبرسانی ارائه گردیده است. طبق یافته های پژوهش، با بهینه سازی 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 می گردد.

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

تاریخ دریافت: ۲۷ / ۳ / ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۶ / ۸ / ۱۳۹۹

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

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 ویژه ای در این حوزه برخوردارمیباشد. 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 سایی) 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 حدود۹۵۰ گیگاوات ساعت برق مصرفی و ۱۴۰ گیگاوات ساعت مصرف برق در اوج بار، هزینه انرژی برق به حدود۴۲۰ میلیارد ریال بالغ گردیده است.اصلی ترین مصرف کنندگان انرژی درسیستم آبرسانی این شهرها، الکتروپمپها هستند.به نحوی که حدود ۳۶۰ میلیارد ریال ازهزینه های برق (۸۵٪ کل هزینه انرژی برق)مربوط به پمپاژ در سیستمهای آبرسانی اعم از پمپاژ آب از چاهها ویا ایستگاههای پمپاژبین مخازن بوده است. از سوی دیگر ایران بعنوان کشوری کم آب همواره با

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

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 ویژگی های خاص تامین آب در سیستم های آبرسانی شهرهای بزرگ، تامین بدون وقفه آب مورد نیاز شهروندان و حفظ شرایط کمی و کیفی آب بصورت شبانه روزی ، عوامل اصلی درحفظ پایداری سیستم آبرسانی مورد مطالعه هستند . میزان مصرف آب به عنوان یک پارامتر وابسته به تقاضای شبکه توزیع می باشد و تامین آب مصرفی با اختلاط آب برداشتی از منابع سطحی و زیر زمینی که دارای کیفیتهای مختلف می باشند، امکان پذیر می شود. با توجه به مشخصات و ویژگی های سیستم آبرسانی مورد مطالعه ، موضوع پژوهش این است که بااستفاده ازروشهای بهینه سازی با اهداف چند گانه (با درنظر گرفتن همه متغیرها ومحدودیتهای خاص این نوع سیستم آبرسانی) ، ضمن کاهش هزینه انرژی و کاهش برداشت آب ازمنابع سطحی ، سطح کیفیت مطلوب آب وسایر عوامل پایداری را نیز حفظ نموده و اثرات این بهینه سازی را درحالت واقعی و در سیستم آبرسانی مورد مطالعه ازدیدگاه بهبود عملکرد ارزیابی نماییم. دراینجا مسئله پایداری از دیدگاهی متفاوت و با اهداف چندگانه مورد مطالعه قرارگرفته است. تامین آب از منابع زیرزمینی به دلیل پمپاژ آب از اعماق زمین مصرف انرژی را افزایش می دهد و منابع آب سطحی که عموما" دارای کیفیت بهتری می باشند، محدود و بدلیل وابستگی به بارشها ناپایدار هستند. به دلیل این محدودیتها ، کاهش برداشت ازمنابع آب سطحی دربسیاری ازاوقات الزامی می باشد.کاهش برداشت از منابع آب سطحی ، با توجه به ثابت بودن نیاز مصرف ، باعث استفاده حداکثری از آبهای زیرزمینی و

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

افزایش هزینه انرژی می گردد. لذا ، در نظر گرفتن دوهدف "کاهش هزینه انرژی " و "کاهش برداشت از منابع آب سطحی" بعنوان اهداف بهینه سازی ، دو هدف متضاد می باشند که یکی از وجوه تمایز نسبت به سایر تحقیقات محسوب می شود. درنظر 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 نوآوری های این پژوهش می باشد. علاوه برموارد فوق، لحاظ نمودن "سطح کیفیت آب مصرفی شهروندان" به عنوان یک محدودیت ، عاملی است که دراین تحقیق مورد توجه قرار گرفته وبه شرایط پایداری اضافه شده است. براساس نتایج پژوهش ، نه تنها مدیریت مصرف و کاهش هزینه های انرژی، همزمان با بهینه سازی سازی 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 تغییرو توسعه مدل ریاضی براساس ویژگیهای سیستمهای آبرسانی وهمچنین تعریف سناریوهای متفاوت وحل مسئله متناسب باشرایط جدید ایجاد شده است.انجام پژوهش با توجه به بین رشته ای بودن موضوع آن ، در چهار مرحله صورت پذیرفته است.در مرحله اول بادرنظرگرفتن قوانین پیوستگی وانرژی ومشخصات فنی سیستم آبرسانی، هیدرولیک سیستم بر اساس ویژگیهای این سیستم مدلسازی ریاضی شده است تا بتوان از این مدل در مرحله بهینه سازی با نرم افزار استفاده نمود .ضمنا" ازطریق مدلسازی ریاضی امکان درک بیشتر سیستم برای متخصصین حوزه های مختلف فراهم می گردد.سیستم آبرسانی مورد مطالعه درحال حاضردر دست بهره برداری می باشد ومشخصات فنی آن بصورت اسناد رسمی وجود دارد. همچنین داده های مختلف سیستم از قبیل دبی ورودی و خروجی مخازن و ایستگاه پمپاژ ، حجم آب مخازن و کیفیت آب تامین شده ازمنابع مختلف در گزارشات بهره بردار سیستم و در بازه های زمانی مشخص اندازه گیری و ثبت شده است. لذا با توجه به اینکه نرم افزار

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

Vensim [1] امکان اعتبار سنجی مدل ریاضی را درشرایط وجود داده های واقعی فراهم می سازد و همچنین با توجه به قابلیتهای توسعه ای این نرم افزار برای تکمیل وتوسعه مدل ریاضی درآینده و ارایه نتایج قابل درک وبهره برداری برای مدیران و برنامه ریزان سیستم آبرسانی (فرمانی انتظام ، ۱۳۹۸) ، در مرحله دوم ، شبیه سازی سیستم آبرسانی دراین نرم افزار به کمک مدل ریاضی انجام شده است.در این مرحله ، اعتبار مدل ریاضی درمقایسه با داده های واقعی سیستم مورد تایید قرار گرفت . در مرحله سوم، مسئله تعریف شده بر اساس مدل ریاضی ، با بکارگیری نرم افزار GAMS [2]، توسط روشهای مختلف بهینه سازی توابع چند هدفه (دراینجا دو هدف) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته وبهینه سازی شده است . در مرحله نهایی (چهارم) ، سناریوهای مختلفی برای کارکرد سیستم آبرسانی درشرایط ومحدودیتهای متفاوت محیطی واقلیمی درنظر 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 مدل‌های دینامیکی برای تهیه جدول زمانبندی کارکرد پمپ‌ها در ایستگاه‌های پمپاژ جهت کاهش هزینه‌های انرژی سیستم آبرسانی موضوع جدیدی محسوب نمی‌شود (ویسی و شمشادی ۱۳۸۷). تهیه جدول زمانبندی مطلوب برای عملکرد الکتروپمپهای سیستم با استفاده از روشهای بهینه سازی ، موضوعی است که در دهه اخیر به آن توجه بیشتری شده است (لوپز [3] ،

1 Ventana simulation environment
2 General algebraic modeling system
3 Lopez

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

۲۰۱۱ ؛ لئون[1] ، ۲۰۱۷). این موضوع هم از نقطه نظر تاثیرعوامل 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 ، درحال 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 هرایستگاه 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[2] ، ۲۰۱۴ ؛ اودان وکاپلان[3]، ۲۰۱۵) ، (لئون وهمکاران ،۲۰۱۷)[4].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[5] ، ۲۰۱۲). همچنین الگوریتمهای فرا ابتکاری جهت کاهش هزینه انرژی در سیستمهای آبرسانی نیز توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است(شی و یو[6] ، ۲۰۱۶؛

1 Leon
2 Behandish & Zheng
3 Odan & Kapelan
4 Leon
5 Yuan & Liu
6 Shi & You

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

کاسیولاتو[1] ، ۲۰۱۹). کاندلیری [2] (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 ریبائو[3] (۲۰۱۹) در پژوهش خود به موضوع کاهش انتشار دی اکسید کربن در کنار افزایش بازدهی انرژی در شبکه توزیع پرداخته اند. خاتواکر و میز[4] (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.

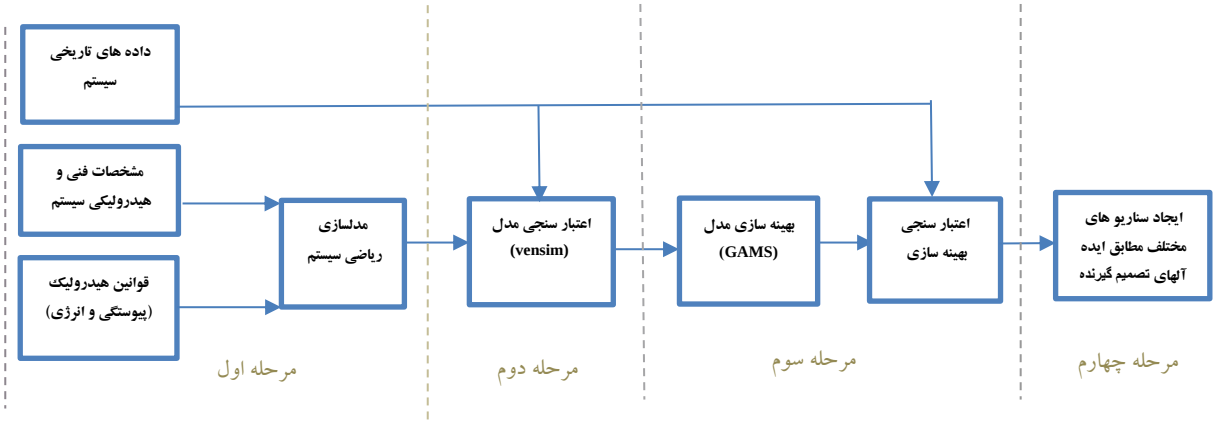
تفاوت اصلی این تحقیق با پژوهشهای پیشین ، متغیر فرض نمودن میزان برداشت آب ازمنابع سطحی و زیرزمینی و لحاظ نمودن اهداف چندگانه و محدودیتهای جدید نظیر کیفیت آب خروجی برای حل مسئله بهینه سازی سیستم آبرسانی می باشد که درمقدمه به تفضیل شرح داده شده است.

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

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]



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

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

نمادهای مورد استفاده دراین پژوهش که برای تشریح سیستم آبرسانی وتهیه مدل ریاضی مورد استفاده قرار خواهند گرفت ، به شرح جدول ذیل می باشند :

جدول۱ – تعریف نمادها و واحدها (بخش اول)

ردیف	تعریف نماد	واحد	تعریف نماد	ردیف	تعریف نماد	واحد	تعریف نماد
۱	اندیس شماره مخزن $i \epsilon (1,2)$		i	۱۳	غلظت فاکتور کیفی آب زیرزمینی در مخزن i در بازه K	gr/m3	$XXUG_{ki}$
۲	اندیس شماره پمپ در ایستگاه پمپاژ $j\epsilon (1,2)$		j	۱۴	غلظت فاکتور کیفی در بازه K در مخزن ۱	gr/m^3	XX_{K1}
۳	اندیس بازه زمانی $K \epsilon (1,2,\ldots.K)$		K	۱۵	غلظت فاکتور کیفی آب سطحی در بازه K در مخزن i	gr/m^3	XXS_{ki}
۴	حجم مخزن i در بازه زمانی K	m^3	V_{ki}	۱۶	دبی خروجی در بازهK در مخزن ۱	m^3/T	D_{k1}
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}
۶	ورودی مخزن i از منابع سطحی در بازه زمانی K	m^3/T	InS_{ki}	۱۸	ضریب تبدیل دبی به فاکتورکیفی در بازه K در مخزن ۱	$(\frac{gr}{m^3})/(\frac{m^3}{T})$	MM_{k1}
۷	وضعیت پمپ j در بازه K	Binary	X_{kj}	۱۹	ضریب تبدیل دبی همزمان پمپاژ	-	e

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

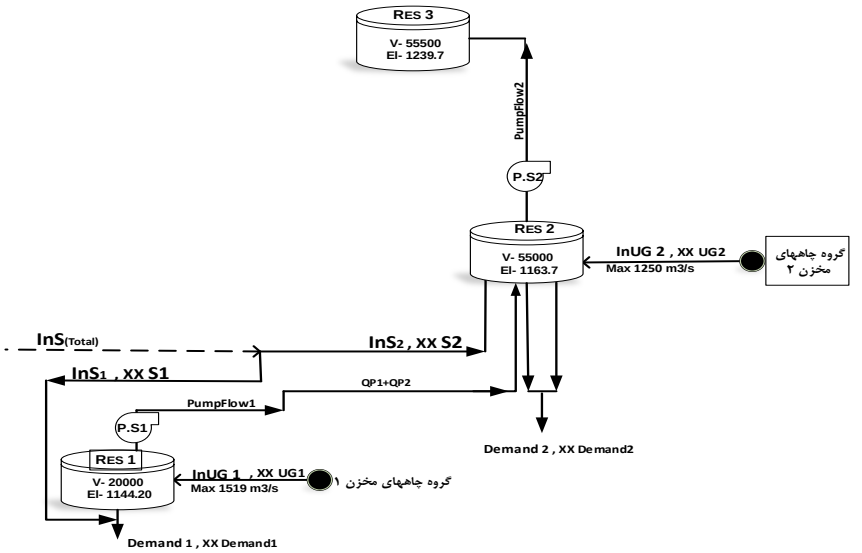
ردیف	تعریف نماد	واحد	تعریف نماد	ردیف	تعریف نماد	واحد	تعریف نماد
۸	حجم مخزن i در شروع دوره زمانی	m^3	V_{0i}	۲۰	ضریب دبی پمپ j	m^3/m^3	F_j
۹	ضریب تبدیل دبی به وضعیت پمپها	m^3	L	۲۱	فاکتور کیفی در شروع دوره زمانی در مخزن i	m^3	XX_{0i}
۱۰	ضریب تبدیل ارتفاع پمپاژ منابع زیرزمینی و ایستگاه پمپاژ	m/m	M	۲۲	مقدار 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 : XXS1 , InS1 ; XXS2 , InS2) و منابع آب زیرزمینی متفاوت شامل دو گروه چاه جداگانه (آب زیرزمینی : InUG1,XXUG ; InUG2,XXUG2)تغذیه می شوند.هریک از ورودی ها دارای دبی(In) وکیفیت (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

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

(PUMP FLOW 2) به سمت مخزن سوم (RES3) انتقال می یابد . آبهای خروجی ازهرمخزن 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 m3	حداکثر ارتفاع آب (m)	ارتفاع مخزن از سطح مبداء (m)	حداکثر آبدهی مجموع چاههای ورودی (m3/s)	حداکثر دبی آب سطحی ورودی (m3/s)
۱	۲۰۰۰۰	۵/۲۵	۱۱۴۳	۱/۵	۰/۳
۲	۵۵۰۰۰	۵/۲۵	۱۱۶۳	۱/۵	۱/۲

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

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 هردو 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.

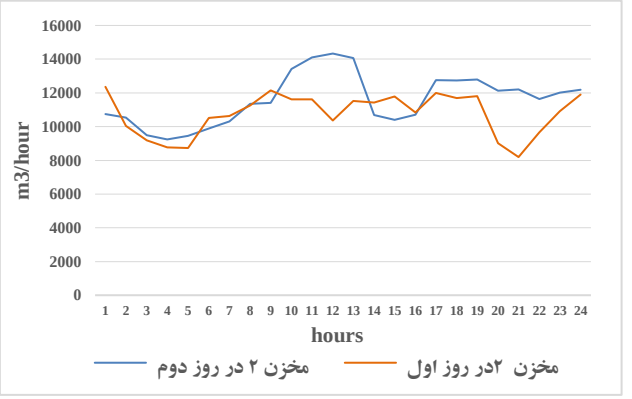
جدول۳ : تعرفه بهای انرژی برای تاسیسات آب شهری

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

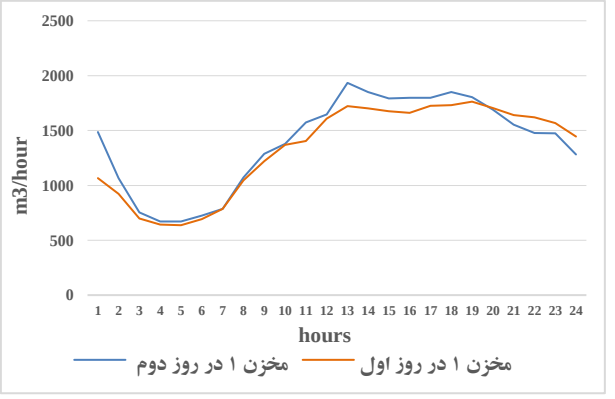
ماخذ:تعرفه های برق ابلاغی وزارت نیرو –۱۳۹۸

با توجه به مقادیر قرائت شده در دبی سنج های ایستگاه پمپاژ ، به ازاء هر ساعت پمپاژ پمپ کوچک با ظرفیت اسمی $\frac{m3}{hr}$ ۲۶۰۰ ، بطور متوسط ۲۵۵۰ متر مکعب بر ساعت آبدهی و برای پمپ های بزرگ با ظرفیت اسمی $\frac{m3}{hr}$ ۳۰۰۰ ، بطور متوسط ۲۸۶۰ متر مکعب بر ساعت آبدهی درشرایط واقعی قابل حصول می باشد . لذا برای بازه زمانی ۳ ساعته ،به ترتیب ۷۶۵۰ و ۸۵۸۰ مترمکعب آبدهی در نظر گرفته شده است (آمار و گزارشات آبرسانی شرکت تامین وتصفیه آب تهران ۱۳۹۷). مطابق داده های تاریخی ، مصرف آب در سیستم آبرسانی مورد مطالعه با بیش از یک میلیون نفرجمعیت تحت پوشش، براساس میزان خروجی دو مخزن دردودوره مختلف زمانی، مطابق شکل های ۳ و ۴ بوده است.این مصارف، درمسئله بهینه سازی به عنوان پارامتر درنظر گرفته شده اند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]



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



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

شکل۳- خروجی از مخازن ۱و۲ به شبکه توزیع در دوره اول و دوم (ماخذ: مفروضات مدل)

مدل ریاضی و توابع هدف سیستم

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

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

بازه زمانی (T) و دوره بهینه سازی: بازه زمانی برای اعمال تغییرات در میزان دبی برداشتی از منابع و تغییر وضعیت روشن و خاموش پمپها در ایستگاه پمپاژ ۳ ساعت در نظر گرفته شده است. اعمال تغییردر متغیرهای سیستم با دامنه زمانی کوتاه می تواند راهبری سیستم را به‌حالت پیوسته تری فراهم آورد و در مسائل بهینه سازی پاسخهای بهتری ایجاد نماید. ولی زمان بر بودن باز و بسته نمودن شیرآلات (جهت تغییر میزان برداشت از منابع آب سطحی) وهمچنین مشکلات مرتبط با کاهش عمر تجهیزات بهنگام اعمال تغییر در بازه های زمانی کوچک به ویژه در مورد روشن و خاموش نمودن الکتروپمپها در ایستگاه پمپاژ و یا چاهها ، مانع از اعمال تغییرات در بازه های زمانی کوچک در سیستم آبرسانی می گردد. لذا بازه زمانی۳ ساعت باتوجه به داده های تاریخی و سوابق بهره برداری در سیستم آبرسانی مورد مطالعه به عنوان بازه مطلوب فرض شده است . طول دوره زمانی برای بهینه سازی سیستم با توجه به امکان تجربه کلیه نوسانات مصرف آب در شبانه روز و تکرار پذیری الگوی مصرف در سایر روزها و متعاقب آن اقدامات بهره برداری مورد نیاز به صورت مشابه، یک شبانه روز درنظر گرفته میشود .همچنین در بررسی پژوهش های پیشین(بن وین[1] و همکاران، ۲۰۱۹ ؛ جونگ[2]، ۲۰۱۵ ؛کانگ وکیم[3]، ۲۰۱۴) ، نیز این دوره زمانی(یک شبانه روز) مورد استفاده قرارگرفته است. قابل ذکراست برای پشتیبانی از نتایج و افزایش اعتبار آنها ، کلیه محاسبات برای دو روز متفاوت انجام شده ونتایج حاصله بررسی شده است.

1 Bonvin
2 Jung
3 Kang & Kim

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

کیفیت : برای پایداری سیستم آبرسانی مورد مطالعه، موضوع حفظ کیفیت آب خروجی از مخازن در هر بازه زمانی بسیار با اهمیت ویکی 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 حد اکثر مقادیر واقعی آن در هردو مخزن $1\ gr/m^3$ در نظر گرفته شده است. کیفییت 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 ومعادل حداکثر مقدار ممکن درنظر گرفته می شود . در این پژوهش ، برای مخزن دوم ، با توجه به تغییرات بسیارجزئی کیفیت آبهای زیرزمینی ورودی نسبت به تغییرات دبی در دامنه برداشت موردنیاز ، فاکتورکیفی بادر نظر گرفتن حداکثر غلظت ممکن دراین آب ها، برابر با $9\ gr/m^3$ درنظرگرفته شده است . درخصوص مخزن اول، با توجه به کیفیت پایین تر منابع آب زیرزمینی و تاثیرپذیری آن از دبی برداشت آب، در مدل ریاضی غلظت فاکتورکیفی 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(متغیر های مدل) ، متاثر از سایرمتغیرها ومحدودیتهای 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

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

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 می پذیرد که حسب میزان باز یا بسته بودن دریچه شیرکنترل، میزان جریان بصورت پیوسته تغییر می یابد .برداشت از منابع زیرزمینی از طریق ۷۵ حلقه چاه با دبی متوسط ۳۵ لیتر بر ثانیه تامین می گردد . این چاهها بصورت ۸ گروه در محدوده جغرافیایی اطراف مخازن پراکنده می باشند. برای تنظیم برداشت آب از این منابع، می توان از روش روشن و خاموش کردن پمپ چاهها بصورت منفرد (تکی) استفاده نمود. با توجه به اینکه در این حجم برداشت از منابع زیرزمینی دریک شبانه روز ، درصد تغییرات دبی برداشت با روش و خاموش شدن یک چاه ناچیز می باشد(به نحوی که می توان 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 می باشد . با توجه به وجود داده های تاریخی سیستم، میزان مصرف بصورت پارامتر در مدل در نظر گرفته شده است(شکلهای ۳ و۴).

اختلاط آب در مخازن:در بازه های زمانی ۳ ساعته با توجه به حجم مخازن و میزان دبی ورودی و خروجی به مخازن در۳ ساعت ، کیفیت آب مخازن در هر بازه زمانی یکنواخت فرض شده است. همچنین باتوجه به اختلاط کامل آب های منابع سطحی وزیرزمینی، سطح کیفیت آب در کل حجم هرمخزن نیز یکسان درنظر 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

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

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 اولا موجب مشکل هیدرولیکی در سیستم آبرسانی نگردد و ثانیا 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 وجودداشته 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 درنتیجه 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 درپایان هردوره زمانی (شبانه روز) ، نسبت به پایان دوره مشابه قبل ، بیشتراز حدمشخصی (۱۰ درصد) تغییرنداشته 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 ذکراست 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 می کند که در یک سیستم آبرسانی، افزایش یا کاهش حجم آب در هر مخزن دقیقا برابر حجم آب خالص ورودی (کل ورودی منهای کل خروجی) به هر مخزن می باشد. حجم خالص ورودی در هر بازه

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

زمانی برابر حاصلضرب دبی خالص ورودی در بازه زمانی تعریف می شود. بنابراین تغییرات حجم مخزن درهربازه زمانی برابر $\Delta V_k = Q_k * T$ می باشد. شمارنده بازه زمانی درهر شبانه روز با اندیس k نمایش داده شده و ۸ بازه زمانی۳ ساعته در ۲۴ ساعت (یک شبانه روز) تعریف میشود $K \epsilon (1,2,....8)$. برای محاسبه حجم حاصله از دبی خالص آب ورودی به مخزن در یک دوره مشخص مثلا 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.

$$V_{ni} = \sum_{k=1}^{n} InUG_{ki} + \sum_{k=1}^{n} InS_{ki} - \sum_{k=1}^{n} D_{ki} \pm \sum_{k=1}^{n} pumpflow_{ki} + V_{0i} \qquad (۱)$$

تعریف بخشهای مختلف معادله فوق بصورت ذیل می باشد:

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 مخزنi 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 زمانیn ام

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

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

برای محاسبه دبی پمپ‌ها (Pumpflow) در ایستگاه پمپاژ ، سه حالت قابل بررسی می باشد. 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 پمپ ها، دبی و میزان مصرف انرژی آنها در هر بازه زمانی ثابت بوده و فقط با روشن و یا خاموش بودن آنها تغییر می کند . حالت سوم زمانی است که دو پمپ بطور موازی با هم کار می کنند در این حالت داده های تاریخی در سیستم آبرسانی مورد مطالعه نشان می دهد 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.

$$Q_T = (1-e)(Q_{p1} + Q_{p2}) \qquad (۲)$$

در این معادله Q_{p1} و Q_{p2} دبی پمپهای اول و دوم و Q_T دبی کارکرد پمپها در حالت موازی می باشد. عدد ثابت(e) نیز ضریب همزمانی پمپاژ بصورت موازی و برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است .دبی ایستگاه پمپاژ مخزن اول ($pumpflow_{k1}$) در معادلات ریاضی محاسبه حجم مخازن بصورت زیر محاسبه شده است:

$$Pumpflow_{k1} = [\sum_j (x_{kj} * F_j) - e\prod_j x_{kj}] * L \qquad (۳)$$

متغیر باینری X_{kj} نمایانگر روشن یا خاموش بودن پمپ j در بازه زمانی k بوده و چون دو پمپ ظرفیت متفاوتی دارند F_j ضریب دبی پمپ j تعریف میشود . این ضریب برای پمپ اول (j=1) برابر ۱ و برای پمپ دوم(j=2) برابر ۱/۱۲ مطابق داده های تاریخی و مشخصات فنی سیستم آبرسانی در نظر گرفته شده است. ضریب تبدیل روشن و خاموش بودن پمپها به دبی پمپ (L) ، برابر ۷۶۵۰ با واحد متر مکعب در هر بازه زمانی مطابق مشخصات سیستم آبرسانی در نظر گرفته شده است.همانگونه که درمعادله فوق مشخص می باشد، درزمان پمپاژ دو پمپ بصورت موازی (فقط

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

در زمانی که هر دو پمپ روشن باشند) بخش دوم معادله فوق($\prod_{j} x_{Kj}$) برابر ۱ می باشد و در بقیه حالات صفر خواهد بود. دبی ایستگاه پمپاژ مخزن دوم ($Pumpflow_{k2}$) به‌صورت پارامتر و حسب داده هایی تاریخی در مدل قرار می گیرد.

معادله محاسبه غلظت فاکتور کیفی: غلظت فاکتورکیفی در بازه زمانی k با نماد XX_K نمایش داده شده که برای آب ورودی به مخزن با نماد $XXUG_K$ نمایش داده می شود.میزان جرم ورودی فاکتور کیفی برابر حاصلضرب دبی ورودی در غلظت فاکتور کیفی(برحسب 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 می شود.در مخزن دوم برای سیستم آبرسانی مورد مطالعه خواهیم داشت:

$$XX_{n2}V_{n2} = \sum_{k=1}^{n} InUG_{k2} * XXUG_{K2} + \sum_{k=1}^{n} InS_{k2} * XXS_{k2} + \sum_{k=1}^{n} pumpflow_{k1} * XX_{k1} \quad (۳)$$
$$+V_{02}XX_{02} - \sum_{k=1}^{n} pumpflow_{k2} * XX_{K2} - \sum_{k=1}^{n} D_{k_2} * XX_{k2}$$

تعریف بخشهای معادله فوق بصورت ذیل می باشد:

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

$XX_{K2}V_{n2}$ جرم فاکتور کیفی در مخزن دوم دربازه 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

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

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

$\sum_{k=1}^{n} pumpflow_{k1} * XX_{k1}$ 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 می گیرد.

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

$$D_{k1} * XXD_{k1} = InS_{k1} * XXS_{k1} + (D_{k1} - InS_{k1}) * XX_{K1} \quad (۵)$$

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 فاکتورکیفی خروجی به شبکه توزیع در مخزن اول دارای اهمیت زیادی بوده واین برای فاکتور (XXD_{k1}) محدودیت درنظر 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 چاهها ی این بخش از شهر (گزارشات شرکت تامین وتصفیه 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 ۹/۲۵گرم بر متر مکعب تخمین زده شده است. لذا برای آب ورودی از منابع زیر زمینی به مخزن اول، معادله تغییرات غلظت فاکتورکیفی($XXUG_{K1}$) نسبت به دبی برداشت از منابع زیرزمینی($INUG_{k1}$) با معادله خطی

$$XXUG_{K1} = 7 + 0.00025 * INUG_{k1}$$

برآورد گردیده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

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: $E_T = Ep + Ew$. 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 فاکتورمهمی است، مطرح شود. با داشتن اندیس مصرف انرژی (Ie) وحجم آب پمپ شده (ایستگاه پمپاژ یا چاهها) و همچنین ارتفاع پمپاژ میتوان به انرژی مصرفی سیستم دست یافت:

(۶) ارتفاع پمپاژ * اندیس مصرف انرژی * حجم آب پمپ شده = Epدر ایستگاه پمپاژ ، حجم آب پمپ شده برابر حاصلضرب دبی در زمان بوده و مطابق مشخصات سیستم آبرسانی مورد مطالعه، ارتفاع پمپاژ H برابر۲۰ متر و اندیس انرژی Ie 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:

$$Ep_K = \sum_j X_{kj} * F_j * L * N * C_k \qquad (۷)$$

N ضریب تبدیل جریان آب به انرژی مصرفی با تعریف $N = I_e * H$ برابر۰/۰۸ 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 :

$$Ew_k = InUG_k * M * N * C_k \qquad (۸)$$

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 برابر۰/۶۸ می

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

باشد. نسبت ارتفاع پمپاژ چاه ها به ایستگاه پمپاژ برابر ۸/۵ = ۱۷۰/۲۰ وانرژی پمپاژ یک متر مکعب آب از چاهها برابر ۰/۶۸ = ۸/۵* ۰.۰۸ می باشد.کل انرژی مصرفی در یک شبانه روز(E_T) و کل آب سطحی مصرفی سیستم آبرسانی در یک شبانه روز $\mathrm{InS}(\mathbf{total})$ با توجه به موارد فوق، مطابق معادله ذیل قابل محاسبه می باشد :

$$E_T = \sum_k \sum_j \left(X_{kj} * F_j * L * C_k * N \right) + \sum_k \sum_j \left(\mathrm{InUG}_k * M * C_k * N \right)$$

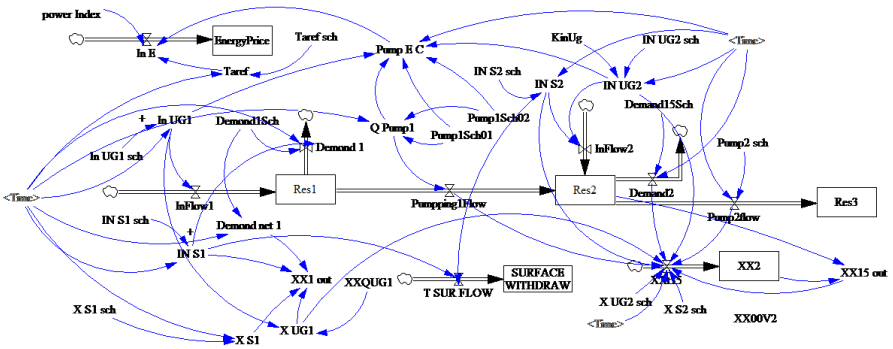
$$\mathrm{InS}(\mathbf{total}) = \sum_k \sum_j \mathrm{InS}_{ki}$$

اهداف پژوهش، " بهینه سازی هزینه انرژی" و "میزان برداشت از منابع آب سطحی" به شرح ذیل تعریف می شوند:

$$Z_1 = E_T$$
$$Z_2 = \mathrm{InS}(\mathbf{total})$$

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 می باشد. بدیهی است چنانچه خروجی های مدل با داده ها ی واقعی سیستم آبرسانی تناسب و همپوشانی داشته باشد آنگاه میتوان اعتبار معادلات ریاضی را تایید نمود. در عین حال باتوجه به بین رشته ای بودن مقاله، SA باعث درک بهتر مخاطبین با تخصص های مختلف از مدل سیستم آبرسانی گردیده و امکان توسعه مدل و استفاده از آن برای سیاستگذاری های آینده در حوزه های فنی و اجتماعی سیستم آبرسانی از قبیل تاثیرات رشد جمعیت، کاهش منابع آبی و غیره را فراهم می سازد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]



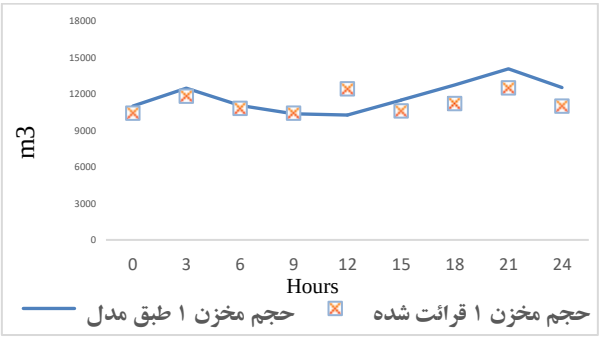
شکل ۴ : مدلسازی سیستم آبرسانی نمونه با نرم افزار vensim (S.D)

اعتبار سنجی مدل تولید شده توسط نرم افزار vensim بر اساس آزمون های برازندگی متداول (ابراهیم تیموری، ۱۳۹۳) صورت می پذیرد. با توجه به اینکه موضوع اصلی اعتبار سنجی بررسی همپوشانی خروجی های مدل با داده های واقعی موجود می باشد، آزمونهای به شرح ذیل در نظر گرفته می شود:

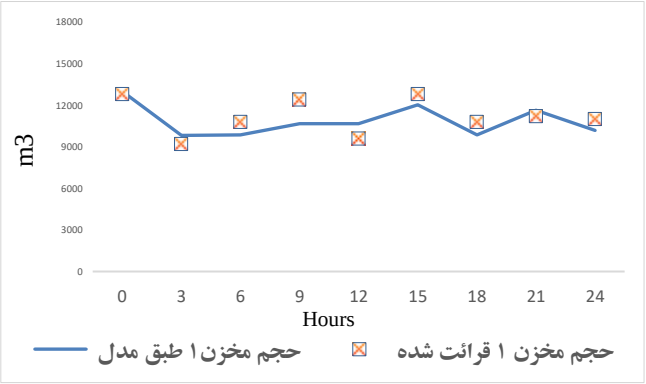
- تایید ساختار : ساختارمدل بر اساس معادلات پیوستگی و انرژی در مکانیک سیالات و مطابق با دانش مورد تایید در ساختار مهندسی سیستم های آبرسانی می باشد .
- سازگاری ابعادی : سازگاری ابعادی کلیه معادلات در بخش معرفی مدل ریاضی این مقاله به دقت در نظر گرفته شده و همچنین با استفاده از قابلیتهای نرم افزار vensim کنترل مضاعف شده است . ابعاد متغیرها در دو سمت تمامی معادلات موجود در مدل در حالت موازنه قرار دارند .
- شرایط حدی : این شرایط در معادلات مورد بررسی قرار گرفته و معادلات در شرایط حدی معنادار هستند. مثلا برای حالت ورودی های جریان صفر از منابع زیرزمینی و عدم کارکرد پمپها در ایستگاه پمپاژ (عوامل اصلی مصرف انرژی در سیستم) میزان هزینه انرژی صفر حاصل می گردد.
- اعتبار ظاهری : همانگونه که در شکل ۴ نمایش داده شده اعتبار ظاهری مدل با سیستم آبرسانی شکل ۲ از جنبه های شباهت مدل به سیستم واقعی و امکان یک بازنمایی بین اجزای مدل و

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

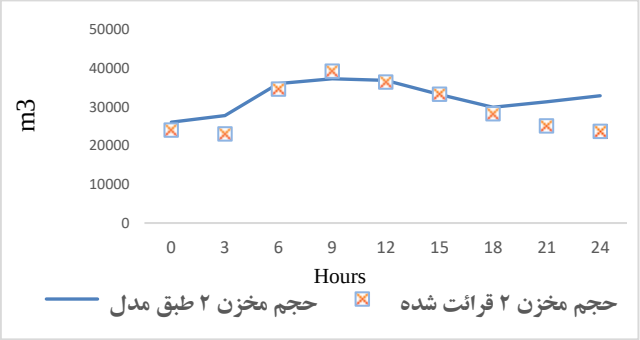
سیستم آبرسانی، از قبیل متغیرهای سطح در مدل (مخازن سیستم) و متغیرهای جریان (ورودی‌های منابع سطحی و زیرزمینی) و سایر بخشها قابل تشخیص می باشد.



الف-حجم مخزن ۱ در دوره اول

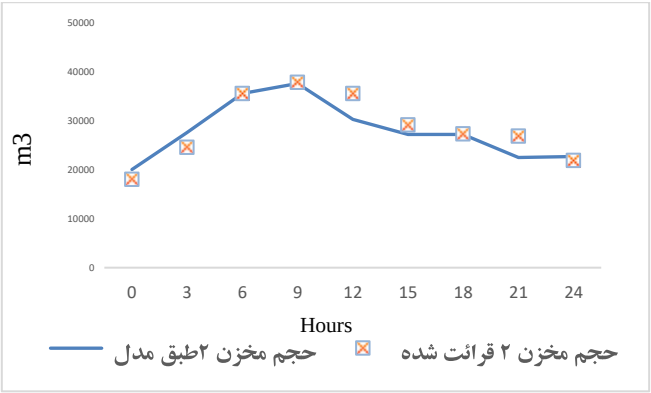


ب-حجم مخزن ۱ در دوره دوم



[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

ج-حجم مخزن ۲ در دوره اول



د- حجم مخزن ۲در دوره دوم

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

- آزمون هپوشانی 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 نتیجه گیری شده اند . 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 گرفته اند. با توجه به نرمال نبودن داده ها، آزمون فرض نبود اختلاف بین داده های مدل و داده های واقعی با استفاده از آماره ویلکاکسون[1] سنجده شده است. نتایج آزمون نشان می دهد که پی – مقدار[2] آماره مذکور در سطح α =۰/۰۵ مقداری برابر ۰/۶۳۳۵ بدست می آید که با دقت بالایی نبود اختلاف بین داده ها را تایید می کند. یعنی داده های واقعی با داده های مدل هم پوشانی بالایی دارند .به عبارت دیگر می توان از مدل ارائه شده با دقت بالایی برای تخمین رفتار سیستم آبرسانی استفاده نمود.

1 Wilcoxon signed-rank test
2 P-Value

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

حل مسئله بهینه سازی

مسئله بهینه سازی با توجه به مدلسازی ریاضی ، یک مسئله بهینه سازی چند هدفه با دو هدف کاملا مجزا و دارای محدودیتهای غیر خطی وشرایط غیر محدب[1] ازنوع MINLP[2] می باشد. برای حل این مسئله بهینه سازی دوهدفه ازروش برنامه ریزی آرمانی[3] (GP) استفاده شده است. برای بهینه نمودن اهداف Z2 وZ1 در مرحله اول ، مطابق معادلات مطرح شده در بخش مدلسازی ریاضی خواهیم داشت:

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

- با توجه به الگوریتم حل مسائل بهینه سازی درروش برنامه ریزی آرمانی :

$$\text{Min } \{ d_1' , d_2' \}$$

ST:

آرمانی

$$\begin{cases} z_1 + d_1 - d_1' = A \\ z_2 + d_2 - d_2' = B \end{cases}$$

سیستمی

$$\begin{cases} V_{ki} \le V_{max\,i} & \forall\ k , i \\ V_{ki} \ge V_{min\,i} & \forall\ k , i \\ XX_{ki} \le XX_{max\,i} & \forall\ k , i \end{cases}$$

$$InUG_{ki}, InS_{ki} \ge 0 \quad ، \quad InS_{ki} \le InS_{max\,i} \quad ، \quad InUG_{ki} \le InUG_{max\,i} \qquad \forall\ k , i$$

و x_1 و $X_2 \in (0 , 1)$

1 Non-Convex
2 Mixed Integer Nonlinear Programming
3 Goal Programming

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

در مسئله بهینه سازی فوق، A وB ایده آلهای تصمیم گیرنده برای اهداف اول و دوم خواهند بود. روش برنامه ریزی آرمانی امکان می دهد تا برای حل دو مسئله تک هدفه ایجاد شده که غیر خطی وبا شرایط غیر محدب می باشند، از هریک از روشهای بهینه سازی غیر خطی، بهره برداری شود.برای حل مسئله ابتدا حسب نظر تصمیم گیرنده، هدف با اولویت بالاتر مثلا Z_1 انتخاب گردیده و بنابراین ابتدا d_1' مینیمم می شود و فرض می کنیم 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 دست یابی به آرمانی با اولویت پایین تر نباید به قیمت خراب شدن دسترسی قبلی به آرمان با اولویت اول بدست آید(ماکویی پور، ۱۳۹۵). برای بهینه سازی هر هدف مجزا دراین مطالعه ازروش SCIP[1] که مناسب برای حل مسائل بهینه سازی غیر خطی و غیر محدب می باشد، استفاده شده است. نرم افزار GAMS نیز با توجه به دارا بودن امکان حل مسایل از روشSCIP ، برای حل مسئله بهینه سازی برای هر هدف بطور مجزا انتخاب شده است. در مرحله بعد، برای حل مسئله بهینه سازی دو هدفه از دو الگوریتم متفاوت، روش برنامه ریزی آرمانی و روش معیار جامع[2] (GC) استفاده شده است که روش برنامه ریزی آرمانی روش اصلی و روش معیار جامع روش پشتیبان می باشد. برای حل مسئله ازاین دوروش در نرم افزار GAMS کد نویسی شده است. در این پژوهش، روش برنامه ریزی آرمانی با دو رویکرد حل شده است. رویکرد اول (1GP) 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 بهینه سازی علاوه بر بهینه سازی 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 می شود،

1 Solving Constraint Integer Programs
2 Global Criterion

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

نتایج نشان میدهد که علاوه بر رعایت کلیه محدودیتها ،اهداف بهینه سازی نیز هردو بهبود یافته اند و روش بهینه سازی ازاعتبار مناسبی برخوردارمی باشد.

جدول۵: 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 (gr/m^3)/T
دوره اول	1GP) 01(	۱۰^۷*۴/۲۶	۱۰۶۲۰۰	۷/۶
دوره اول	GC) 02(	۱۰^۷*۴/۲۲	۱۰۷۷۰۰	۷/۶
دوره اول	(2GP) 03	۱۰^۷*۴/۲۹	۱۰۵۵۰۰	۹/۶
دوره اول	Real	۱۰^۷*۴/۴۰	۱۰۸۱۰۰	۹/۶
دوره دوم	1GP) 01(	۱۰^۷*۴/۶۳	۱۰۷۵۰۰	۶/۶
دوره دوم	GC) 02(	۱۰^۷*۴/۶۶	۱۰۶۵۰۰	۹/۶
دوره دوم	(2GP) 03	۱۰^۷*۴/۶۲	۱۰۷۵۰۰	۹/۶
دوره دوم	Real	۱۰^۷*۴/۷۵	۱۰۸۶۰۰	۹/۶

مآخذ: نتایج تحقیق

٤ - تعریف سناریوها و نتایج محاسباتی :

برای بهینه سازی توابع هدف، براساس اولویت های تصمیم گیرنده ، می توان سناریوهای مختلفی در نظر گرفت . سناریوها باتوجه 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 ازجمله 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 متصورشد: 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

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

منابع آب ، بخصوص منابع سطحی، هدف کاهش برداشت از منابع آب سطحی بعنوان اولویت اول مطرح می گردد. لازم بذکر است که در برخی شرایط ، محدودیت منابع آب یا شرایط اجتماعی چالش جدیدی با عنوان حفظ پایداری کیفیت آب را در سیستم ها مطرح می سازد که می تواند مهمترین شرط در راهبری سیستم آبرسانی باشد. شرایطی نیز می تواند وجودداشته باشد که هر دوهدف اولویت یکسانی داشته باشند وبهبودکیفیت در راستای رسیدن به سطح مطلوب نیز مدنظر باشد. دراین شرایط، بهینه سازی همزمان اهداف انجام می شود و بهینه نهایی[1]حاصل می گردد. با توجه به موارد فوق ، در این پژوهش چهار سناریو براساس اولویتهای مورد نظر تصمیم گیرنده درشرایط مختلف در نظر گرفته می شود. درهریک از این سناریوها برای رسیدن به بهترین پاسخ با استفاده از روش GP ، با تغییر مقادیر A و B (ایده آلهای اولیه تصمیم گیرنده) و تحلیل حساسیت براساس نظرات تصمیم گیرنده ، مناسبترین مقادیر A وB با توجه به میزان اولویت اهداف و محدودیتها تعیین می شوند و می توان به جواب نهایی هرسناریو رسید.

سناریو اول(۰۱)**:** در سال آبی نرمال ، به کاهش هزینه انرژی ازطریق مدیریت اوج بار برق (هدف اول) اولویت داده می شود و بهینه سازی هدف دوم به نحوی انجام می شودکه ازمنابع 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) دراین شرایط بعنوان سناریوی منتخب تصمیم گیرنده معرفی شده است .

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

1 Global Optimum

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

راهبران سیستم آبرسانی قرار می گیرد. در این حالت ، بهینه سازی هزینه انرژی و میزان برداشت از آبهای سطحی به نحوی که مقادیر هردوی این اهداف از سناریو واقعی(Real) بیشترنگردد و به میزان ۶٪ بهبود در عامل کیفی ، سناریو دوم توسط راهبران سیستم انتخاب می شود.

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 بهینه سازی هدف اول به نحوی که هزینه انرژی بیش از حالت واقعی (Real) نگردد ، سناریوی سوم برای تصمیم گیرندگان ارجح می باشد.

سناریو چهارم (۰۴) **:** در سناریوی چهارم، تصمیم گیرندگان می توانند با در نظر گرفتن اولویت یکسان برای اهداف، به مقادیر بهینه در همه حوزه ها(بهینه نهایی) به حدود ۳٪ کاهش هزینه انرژی ، ۱۵٪ مصرف انرژی برق کمتر در اوج بار و همزمان۱/۵٪ برداشت آب سطحی کمتر نسبت به حالت واقعی دست یابند . بهبود فاکتور کیفی در حدود ۴٪ نیز دراین سناریو حاصل خواهدشد. خلاصه ای 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 (پیکسایی) صورت پذیرفته است.لذا با حفظ کیفیت و میزان برداشت ازآب سطحی هم اندازه سناریوی واقعی(Real) میتوان با رعایت شرایط پایداری سیستم آبرسانی حدود ۲۱٪ از اوج مصرف انرژی برق را درسناریوی اول کاهش داد(جدول ۷).

جدول۶ : 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	۱۰^۷*۴/۱۷	۱۰۸۷۰۰	۶/۸
دوره اول	۰۲	۱۰^۷*۴/۳۱	۱۰۹۴۰۰	۶/۵
دوره اول	۰۳	۱۰^۷*۴/۳۹	۱۰۳۶۰۰	۶/۹

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

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

جدول۷ : 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 بارMwh	مصرف انرژی در اوج بارMwh
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

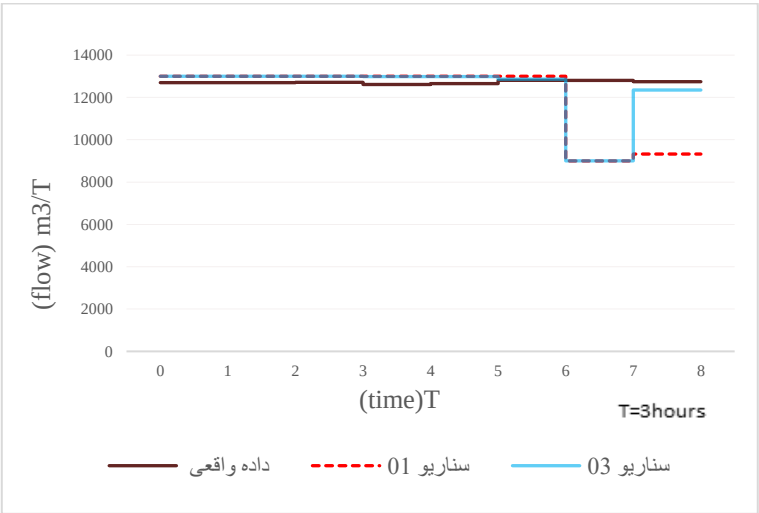
نمودار تغییرات متغیرهای مسئله در سناریوهای ۰۱ و ۰۳ در مقایسه با مقادیر واقعی(Real) آنها ، مطابق جدول ۸ و شکل ۶، به عنوان نمونه ای از فضای تصمیم گیری درسناریوها به شرح ذیل ارائه می گردد. در جداول ۶ و۷ ، کاهش هزینه انرژی ازطریق کاهش اوج باربرق در کل سیستم حاصل شده است. انرژی مصرفی در سیستم ، حاصل کارکرد الکتروپمپها در ایستگاه آبرسانی و چاهها می باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

جدول ۸- کارکرد پمپ ها در ایستگاه پمپاژ مخزن ۱ به ۲ در دوره اول دوره ۲۴ ساعت

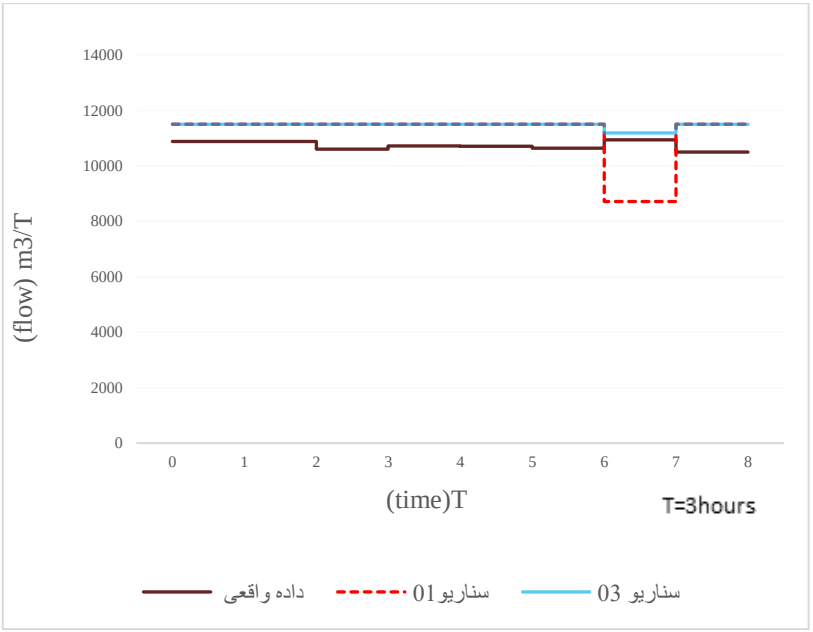
دوره ۲۴ ساعته		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
زمان واقعی	پمپ ۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱
	پمپ ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰
سناریو ۰۱	پمپ ۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰
	پمپ ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱
سناریو ۰۳	پمپ ۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	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	۰	۰	۰

مأخذ:نتایج تحقیق

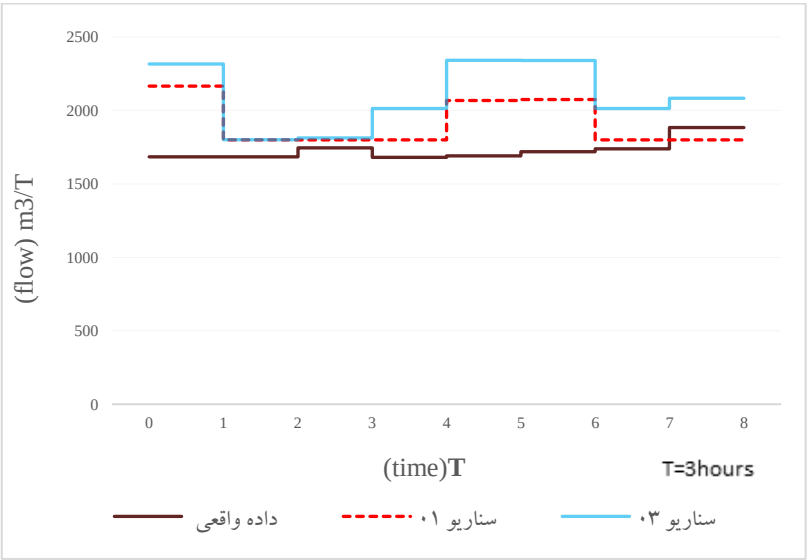


شکل الف- برداشت واقعی از آبهای زیرزمینی مخزن ۱ و سناریو ها در دوره اول

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

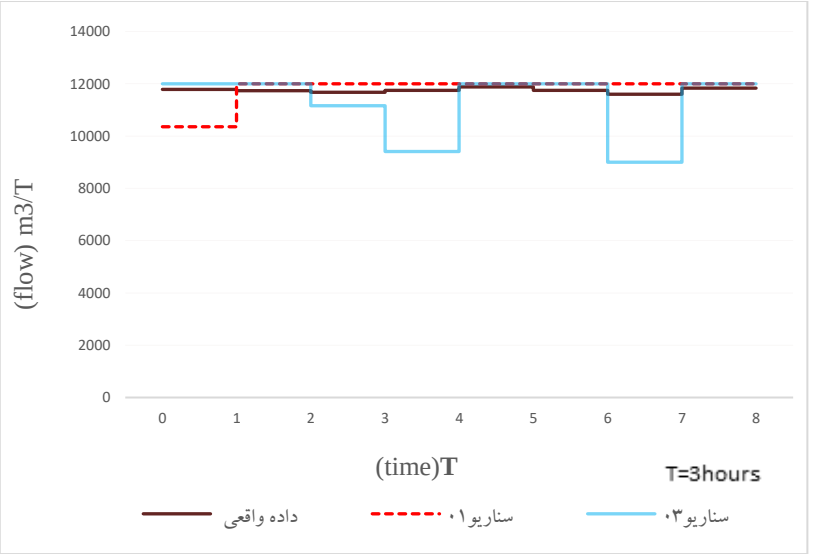


شکل ب- برداشت واقعی از آبهای زیرزمینی مخزن ۲ و سناریو ها در دوره اول



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

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]



شکل د - برداشت واقعی ازآبهای سطحی مخزن ۲ و سناریو ها در دوره اول

شکل۶-برداشت واقعی و سناریو های ۰۱ و ۰۳ در مخازن ا و۲ 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.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

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	۱۰^۶*۱/۶۸
اول	واقعی	۷/۱	۲/۷	۳/۱	۱/۳	۱۰^۶*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 واستفاده از منابع سطحی و زیرزمینی با کمیت و کیفیت متفاوت به طور همزمان صورت پذیرد. تامین آب ازمنابع زیرزمینی وهمچنین پمپاژ آب بین مخازن ، نیازمند انرژی خواهد بود که صرف هزینه قابل توجهی را به دنبال خواهد داشت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد در سیستم های آبرسانی که از منابع سطحی و زیرزمینی برای تامین آب مورد نیاز استفاده می کنند، با به کارگیری روش های بهینه سازی چند هدفه می توان به اهداف "کاهش مصرف برق در اوج بار وکاهش هزینه انرژی "و همزمان به "برداشت بهینه از منابع آب سطحی" با رعایت محدودیت های سیستم از جمله حفظ کیفیت درحد مناسب، دست یافت. اهداف بهینه سازی با استفاده از زمانبندی مناسب عملکرد پمپها درایستگاه پمپاژ و تغییرات دبی برداشت ازآبهای سطحی وزیرزمینی درهربازه زمانی (متغیرمدل) حاصل می شوند و درهیچ شرایطی کیفیت آب نیز از حد مناسب پایین تر نخواهدشد. متغیر فرض نمودن دبی برداشت ازمنابع آبی مختلف و لحاظ نمودن محدودیت کیفیت آب دراین پژوهش نسبت به سایر مطالعات بدیع می باشند و ارزشمندی نتایج را ارتقا می دهند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

طبق یافته های پژوهش، این بهینه سازی کاهش قابل توجهی در مصرف برق دراوج باررا ایجاد می نماید، ولی نسبت تاثیر کاهش اوج بار در کاهش هزینه های برق قابل توجه نمی باشد.با توجه به تاثیرات هزینه در مصرف مشترکین واهمیت مصرف در اوج باردر سیستم تامین وتوزیع برق نامه وزیر محترم نیرو ۴/۲۸ /۱۳۹۹ پیشنهاد میشود تعرفه زمانی برق، بخصوص تعرفه اوج بار در فصل تابستان بازنگری گردد. قابل ذکراست باتوجه به نتیجه جانبی ذکرشده دربخش قبل ، اگر درصد صرفه جویی 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) ، پویایی های سیستم ، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

رجب پور و همکاران (۱۳۹۲) "بهینه سازی هزینه انرژی مصرفی در سامانه های انتقال آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک"،شماره دوم نشریه مباحث برگزیده انرژی .

سامی کشکولی ، بهرام (۱۳۹۵) "بهره برداری بهینه از ایستگاههای پمپاژ سیستم های آب با استفاده از الگوریتم جامعه زنبورهای عسل مصنوعی "، نشریه پژوهش های حفاظت آب جلد بیست و سوم ، شماره۵.

شرکت تامین وتصفیه 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 سیاست های 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) ، بهینه سازی چند هدفه ، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

وزارت نیرو (۱۳۹۹) ، لزوم پیکسایی(کاهش مصرف دراوج 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 UsingMeta-Models and Evolutionary Algorithms" Procedia Engineering ,No. 70 , PP.103-112.

Bonvin, Gratien; 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). "enrgy optimitazion of supplied flows from multiple pumping Stations in Water Distributions Networks" , Procedia Engineering , No. 186, pp 93-100.

L´opez-Ib´a˜ne , 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.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

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.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]