dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45931

طراحی جانمایی و ظرفیت بهینه چاه‌های پمپاژ زهکشی با هدف افت سطح آب زیرزمینی در مناطق شهری

مجتبی شوریان[1]، سید محمد جواد داودی[2]

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
(نویسنده مسئول) m_shourian@sbu.ac.ir
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

(دریافت ۹٤/۱۰/۲٤ پذیرش ۹۵/٤/۳۰)

چکیده

بالا بودن سطح آب زیرزمینی در مناطق شهری باعث بروز مشکلات متعددی در سازه‌های موجود و پروژه‌های عمرانی می‌شود. در روش مرسوم زهکشی با حفر تعدادی چاه و پمپاژ آب از آبخوان، سطح ایستابی تا مقدار مطلوب پایین آورده می‌شود. علی‌رغم کارایی قابل قبول این روش، هزینه اجرایی آن غالباً زیاد است. بنابراین بهینه‌سازی طراحی سیستم پمپاژ آب زیرزمینی در این‌گونه پروژه‌ها حائز اهمیت بوده و می‌تواند باعث صرفه‌جویی چشمگیر در هزینه‌های نهایی شود. در این پژوهش، حل مسئله جانمایی و ظرفیت بهینه چاه‌های پمپاژ با حداقل هزینه زهکشی و به‌منظور افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مد نظر قرار گرفت. مدل شبیه‌سازی مورد استفاده به‌منظور بررسی رفتار آبخوان تحت تأثیر احداث چاه‌های پمپاژ نرم‌افزار MODFLOW و الگوریتم بهینه‌سازی به‌منظور تعیین جانمایی و ظرفیت بهینه چاه‌های پمپاژ الگوریتم کرم شب‌تاب می‌باشد. مدل توسعه یافته FOA-MODFLOW بر روی آبخوان محدوده مسجد جامع شهر کرمان به‌منظور طراحی و جانمایی بهینه چاه‌های پمپاژ آب تحت هدف کمینه‌سازی هزینه کل طرح اجرا شد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که در محدوده مذکور، ضمن کاهش قابل توجه هزینه طرح نسبت به طرح پیشنهادی توسط مشاور پروژه، می‌توان با احداث دو حلقه چاه با مجموع نرخ پمپاژ ۵۵۰۳ متر مکعب در روز، به‌میزان حداقل ۱/۵ متر در محدوده مذکور افت ایجاد کرد، در شرایطی که میزان نشست زمین در محدوده طرح نیز در حد مجاز باشد. همچنین بررسی تأثیر پارامترهای مهم حاکم بر مسئله بیانگر تأثیر مقادیر حداکثر رقوم مجاز سطح آب زیرزمینی و حداکثر دبی پمپاژ چاهها بر روی جواب‌های مسئله می‌باشد. از طرف دیگر نتایج، عملکرد مناسب رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مورد استفاده در حل مسائل آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. در این رویکرد تلفیق یک مدل شبیه‌ساز با قابلیت لحاظ جوانب مختلف سیستم آبخوان و یک الگوریتم بهینه‌ساز فراکاوشی با قابلیت نیل به مقادیر بهینه سراسری متغیرهای تصمیم، منتج به طراحی و جانمایی بهینه چاههای برداشت از آبخوان با هدف افت سطح آب زیرزمینی شد.

واژه‌های کلیدی: زهکشی آب زیرزمینی، چاه‌های پمپاژ، شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، مدل MODFLOW، الگوریتم کرم شب‌تاب

۱- مقدمه

منابع آب‌زیرزمینی محدود اما تجدیدپذیر هستند. در مناطقی که برداشت آب از منابع زیرزمینی از میزان تغذیه سالانه فزونی یابد مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، سطح آب‌های زیرزمینی روز به روز افت کرده و چاه‌ها و قنوات منطقه شروع به خشک شدن می‌کنند. علی‌رغم اینکه به‌دلیل استفاده بیش از حد از این منابع، سطح آب زیرزمینی در بسیاری از مناطق کشور افت شدید داشته است اما در برخی نقاط خصوصاً در محدوده‌های شهری به‌دلیل زهکشی نشدن پساب شهری و عدم وجود سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری سطح آب زیرزمینی بالا آمده است. بالا بودن سطح آب زیرزمینی در مناطق شهری و غیر شهری باعث ایجاد مشکلاتی در سازه‌های موجود و یا اجرای سازه‌ها و پروژه‌های عمرانی شده و می‌تواند طراحی سازه‌ها، فرایند ساخت و هزینه پروژه را تحت تأثیر خود قرار دهد. منشأ بسیاری از دعاوی حقوقی در

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45931

قراردادهای اجرای پروژه‌های ساختمانی، بالا بودن سطح آب زیرزمینی بوده است. پروژه‌های بسیاری مشاهده شده که ادامه آن‌ها متأثر از این مسئله، علی‌رغم سرمایه‌گذاری‌های کلان، به‌طور کلی متوقف شده است (Powers et al. 2007). این مسئله همچنین در برخی از شهرها در اجرای پروژه‌های حفاری در اعماق زیاد مانند ایجاد تونل‌های مترو و گودبرداری‌های عمیق اختلال ایجاد کرده است (Forth 2004). در حفاری‌های معادن در اعماق زیاد، بالا بودن سطح آب باعث ایجاد اختلال در عملیات استخراج و بهره‌برداری شده است (Yuan et al. 2009). در حفاری در مناطق نزدیک به دریا یا رودخانه، هجوم آب به سمت منطقه حفاری باعث بروز مشکلات در اجرای پروژه می‌شود. در برخی از مناطق شهری بالا آمدن سطح آب زیرزمینی مشکلات زیادی برای سازه‌های موجود ایجاد کرده است. این پدیده در شهر کرمان علاوه بر تهدید بناهای تاریخی از جمله مسجد جامع کرمان و پاگرد آب‌انبار بازار حاج‌آقا علی، باعث بروز مشکلات زیادی در پروژه‌های عمرانی نیز شده است (Mahab Ghods Consulting Engineers 2008).

به‌منظور حل مشکلات بالا بودن سطح آب زیرزمینی در این‌گونه مناطق روش‌های متعددی وجود دارد. کریمی‌پور و همکاران با استفاده از مدل PMWIN کارایی سیستم زهکشی را در شهر شیراز مورد بررسی قرار دادند (Karimipour et al 2012). این سیستم که به‌منظور پایین آوردن سطح آب زیرزمینی در شهر شیراز احداث شده شامل سه رشته زهکش افقی است. به‌منظور تحلیل و پیش‌بینی سطح ایستابی در شرایط مختلف از مدل عددی MODFLOW استفاده شد که نتایج نشان از عملکرد مطلوب این سیستم در صورت اجرای خطوط فرعی زهکش به‌همراه خطوط اصلی دارد. در پژوهشی به بررسی روش‌های مختلف زهکشی آب زیرزمینی به‌منظور ایجاد گودبرداری در مناطقی که سطح آب زیرزمینی بالاست، پرداخته شده است. برخی از این روش‌ها عبارت‌اند از: استفاده از پرده‌های آب‌بند، روش‌های پیش زهکشی و روش‌های پمپاژ (Wang et al. 2002). انتخاب هرکدام از این روش‌ها به پارامترهایی چون جنس خاک، گستره و عمق حفاری، سطح آب زیرزمینی و محدودیت سازه‌های اطراف، بستگی دارد. به‌منظور پایین آوردن آب زیرزمینی در یک معدن در چین از یک مدل عددی استفاده شده است (Yuan et al. 2009). پس از تهیه مدل اولیه، محققان با استفاده از نتایج اولیه زهکشی در چاه‌های مشاهده‌ای، مدل خود را کالیبره و صحت‌سنجی کردند. در پژوهش دیگری به‌منظور کنترل آب زیرزمینی در گودبرداری حفر شده برای ایجاد ایستگاه‌های مترو در شهر شانگ‌های از دیوارهای بتنی استفاده شده است. محققان از روش تفاضلات محدود سه بعدی برای محاسبه افت سطح آب زیرزمینی استفاده کردند و با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای افت، مقدار نشست را محاسبه کردند (Zhou et al. 2010). مقایسه سطح آب زیرزمینی محاسبه شده با سطح آب مشاهده شده پس از اجرای پروژه، نشان دهنده انطباق خوب نتایج بود.

در پژوهشی سیستم زهکشی احداث شده‌ای به‌منظور پایین آوردن سطح آب زیرزمینی در یک حفاری عمیق در خاک چند لایه مورد بررسی قرار گرفت (Pujades et al. 2014). در طراحی سیستم زهکشی از چاه‌های پمپاژ استفاده شده و همچنین نشست حاصل از پایین انداختن سطح آب زیرزمینی در ساختمان‌های اطراف نیز در آن دیده شده است. به‌منظور پایین آوردن سطح آب زیرزمینی در محدوده مسجد جامع کرمان، طرح‌هایی ارائه شده است (Mahab Ghods Counsulting Engineers 2008). این طرح‌ها شامل ایجاد چاه‌های پمپاژ در اطراف مسجد جامع این شهر بوده‌اند.

استفاده از روش‌های شبیه‌سازی بهینه‌سازی به‌منظور مدیریت منابع آب زیرزمینی در چند سال اخیر گسترش یافته است. شمسایی و فرقانی با استفاده از مدل MODFLOW و الگوریتم ژنتیک، آبخوان دشت یزد را مورد بررسی قرار دادند و یک مدل بهینه جهت بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق خشک ارائه کردند (Shamsaei & Forghani 2011). کتابچی و عطایی آشتیانی مدیریت بهینه آبخوان‌های ساحلی را با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی به‌روش جامعه مورچگان در محیط‌های پیوسته و با اعمال استراتژی نخبه‌گزینی و با هدف کنترل خطر پیشروی آب شور دریا ارائه دادند (Ketabchi & Ataei Ashtiani 2010).

در پژوهشی با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، مکان و نرخ پمپاژ نامعلوم در یک آبخوان با استفاده از داده‌های چاه‌های مشاهداتی تعیین شده است (Ayvaz 2008). محققان با تلفیق الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی به روش تفاضلات محدود و حداقل‌سازی مجموع مربعات اختلاف میان مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده، توانستند مکان و نرخ پمپاژ هر یک از چاه‌ها را در یک

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45931

آبخوان بسته به‌دست آورند. در پژوهش دیگری با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، زهکشی منطقه‌ای شهری در کشور آلمان در حوضه آبریز راین مورد بازبینی و بهینه‌سازی قرار گرفته است (Bayer et al. 2009). شبکه زهکشی مورد نظر شامل یک زهکش افقی و ۱۲ چاه پمپاژ بوده که این چاه‌ها در مجموع دبی بیش از ۵۰۰ مترمکعب بر ساعت داشتند. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار اسپرینگ به‌عنوان مدل شبیه‌ساز و الگوریتم استراتژی تکامل با تطبیق ماتریس کوواریانس[1] به‌عنوان بهینه‌ساز، سیستم فعلی مورد نظر مورد بازنگری قرار گرفته است. اضافه کردن چاه‌های جدید و اصلاح سطح آب زیرزمینی در نقاط مختلف شهر از جمله روش‌هایی بوده که محققان برای کاهش مجموع دبی پمپاژ چاه‌ها پیشنهاد دادند.

در پژوهشی در سال ۲۰۱۱ با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، نرخ پمپاژ از آبخوان و هزینه توسعه چاه‌های جدید بهینه شده است (Guar et al. 2011). بهینه‌ساز مورد استفاده الگوریتم دسته ذرات[2] بوده و شبیه‌سازی با استفاده از روش جزء تحلیلی[3] انجام شد. این مدل بر روی حوضه آبریزی در کشور فرانسه آزمایش شده است.

در پژوهشی به‌منظور پیدا کردن محل نامعلوم منبع آلودگی آب زیرزمینی از روش بهینه‌سازی کلاسیک استفاده شده است. محققان با استفاده از ارتباط داده‌های نرم‌افزار سوترا به‌عنوان مدل شبیه‌ساز و بهینه‌سازی به شیوه کلاسیک موفق به انجام این کار شدند (Datta et al. 2011).

به‌منظور طراحی بهینه سیستم پمپاژ آب از یک آبخوان ساحلی از الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده شده است. در این تحقیق تابع هدف به‌صورت کمینه کردن هزینه راه‌اندازی و پمپاژ و بیشینه کردن نرخ پمپاژ از آبخوان تعریف شده است(Elci & Ayvaz 2014). طبری و ایل بیگی پارامترهای آبخوان قائن را با استفاده از مدل ریاضی گسترده آبخوان و الگوریتم مبتنی بر جستجوی مستقیم به‌صورت خودکار کالیبره کردند(Mohammad Rezapour Tabari & Eilbeigi 2014). طبری مدیریت بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را تحت شرایط عدم قطعیت در پارامترهای آبخوان مدل‌سازی نمود (Mohammad Rezapour Tabari 2015).

بررسی سوابق تحقیق حاکی است تاکنون در این زمینه الگوریتم‌های فراکاوشی جدید نظیر الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب[4] کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. در نظر گرفتن توأم تعداد، جانمایی و ظرفیت چاه‌های پمپاژ به‌عنوان متغیرهای تصمیم به‌همراه قید کنترل نشست زمین نیز به ندرت لحاظ شده است. همچنین با وجود اینکه مدل شبیه‌سازی MODFLOW سابقه زیادی در مطالعات آب زیرزمینی دارد، اما ترکیب بر خط آن با یک الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی که نیاز به کدنویسی پیشرفته دارد، بر اساس دانش نویسندگان یا تاکنون در سوابق تحقیق انجام نشده و یا بسیار به‌ندرت انجام شده است و لذا می‌تواند از جنبه‌های نوآوری تحقیق حاضر به‌شمار آید. بر این اساس در تحقیق حاضر، تلفیق یک مدل شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی با جزئیات کامل و یک الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی نوین و توسعه یک مدل ترکیبی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به‌منظور طراحی بهینه جانمایی و ظرفیت سیستم پمپاژ آب زیرزمینی و مقایسه نتایج به‌دست آمده با طرح پیشنهادی مشاور پروژه مد نظر قرار گرفت. محدوده مسجد جامع شهر کرمان به‌عنوان مطالعه مورد انتخاب شده است.

۲- روش کار

۲-۱- مطالعه موردی

در این پژوهش آبخوان محدوده مسجد جامع کرمان به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. مسجد جامع شهر کرمان یا مسجد مظفر یکی از بناهای تاریخی دوره اسلامی است که در بافت قدیم شهر کرمان واقع شده است. در شرایط حاضر یکی از معضلات اساسی بافت قدیمی شهر کرمان به‌خصوص اطراف مسجد جامع و سایر ابنیه تاریخی آن بالا آمدن تدریجی سطح آب زیرزمینی در محدوده‌های مذکور طی سالهای اخیر است. مهم‌ترین دلایل بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در این نواحی به شرح زیر است (Mahab Ghods Consulting Engineers 2008).

- عدم وجود سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری و ورود فاضلاب شهر به آبخوان شهر کرمان
- مسدود شدن مسیر جریان قنوات متأثر از ساخت و سازها و در

[1] Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES)
[2] Particle Swarm Optimization (PSO)
[3] Analytic Element Method (AEM)
[4] Firefly Optimization Algorithm (FOA)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45931

نتیجه افزایش ذخیره و سطح آبخوان

- حذف تدریجی بهره‌برداری از قنوات، چاه‌های دستی منازل و چاه‌های شرب به‌دلیل آلودگی در محدوده بافت قدیم شهر و جایگزینی آن از طریق شبکه آبرسانی شهری
- نشت آب از شبکه آب شهری
- دانه‌ریز بودن رسوبات آبرفتی و در نتیجه کند شدن حرکت آب زیرزمینی در محدوده بافت قدیم شهر کرمان

این عوامل موجب شده که بناهای تاریخی نظیر مسجد جامع کرمان، پاگرد آب‌انبار حاج‌آقا علی و پاگرد آب‌انبار گنجعلی‌خان و در معرض ناپایداری و تخریب جدی واقع شوند. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که متوسط عمق آب زیرزمینی در محدوده بافت قدیمی شهر کرمان طی سال‌های ۱۳۵۳ تا ۱۳۵۴ در حدود ۱۵ تا ۲۵ متر و در شرایط حاضر در حدود ۶ تا ۱۲ متر و در برخی از بناهای تاریخی به‌دلیل پایین بودن تراز کف به ۰/۵ تا ۱ متری سطح زمین رسیده است.

۲-۲- مدل شبیه‌سازی آبخوان محدوده مطالعاتی

حرکت سه بعدی آب زیرزمینی در محیط متخلخل با رابطه دیفرانسیل جزئی مطابق معادله ۱ توصیف می‌شود

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)-w=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (۱)$$

که در آن

K_x، K_y و K_z ضرایب هدایت هیدرولیکی آبخوان در راستاهای x، y و z، h سطح آب، w میزان تخلیه یا تغذیه، S_s ضریب ذخیره و t پارامتر زمان می‌باشند. در حل مسائل پایین آوردن سطح آب زیرزمینی می‌توان از روش‌های مختلفی برای حل معادله ۱ استفاده کرد. به‌طور کلی می‌توان این روش‌ها را به دو دسته کلی روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی تقسیم‌بندی نمود. استفاده از روش‌های تحلیلی ساده بوده و برای شرایط خاص جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌دهند؛ اما این روش‌ها کلی نیستند و در همه شرایط پاسخگو نیستند. استفاده از مدل‌های عددی که در چند سال اخیر رواج پیدا کرده است در برخی مواقع اولویت دارد. در مسائل مختلف پایین آوردن سطح آب زیرزمینی در صورت وجود آبخوان‌های چندلایه، وجود سیستم‌های چند چاهی، آبخوان با خاک ناهمسانگرد و با جریان قائم، وجود شرایط مرزی پیچیده در آبخوان، جریان ناپایدار در آبخوان و آبخوان غیرهمگن استفاده از مدل‌های عددی نسبت به مدل‌های تحلیلی ارجحیت دارد (Powers et al. 2007).

یکی از نرم‌افزارهای موجود برای شبیه‌سازی کمی جریان آب زیرزمینی با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، MODFLOW است. MODFLOW یک برنامه رایانه‌ای چندمنظوره است که از آن برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های متخلخل چندلایه استفاده می‌شود. این مدل جریان‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی را با روش تفاضل محدود در آبخوان‌های آزاد و تحت فشار یا ترکیبی از آن دو شبیه‌سازی می‌کند. این برنامه شامل یک برنامه اصلی و تعدادی زیر برنامه به نام مدول می‌باشند. مدول‌ها به‌صورت بسته‌هایی گروه‌بندی شده‌اند. هر بسته برای جنبه خاصی از شبیه‌سازی سامانه است. به‌عنوان مثال بسته چاه، تأثیر چاه‌ها را شبیه‌سازی می‌کند و بسته رودخانه تأثیر رودخانه‌ها را مدل‌سازی می‌نماید (Mahmoudian Shoushtari 2013). در این تحقیق تغییرات اصلی بر روی فایل ورودی بسته چاه[1] صورت می‌گیرد.

۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب

در چند سال اخیر روش‌های بهینه‌سازی بر مبنای جستجوی فراکاوشی رواج یافته است. این روش‌ها با تقلید از سیستم‌های هوشمند طبیعی مانند تکامل و یا هوش ذاتی جانوران، جواب بهینه را به‌دست می‌آورند. روش‌های فراکاوشی با انجام عملیات سعی و خطا به‌صورت هوشمند مسئله بهینه‌سازی را حل کرده، بنابراین نیاز به محاسبات زیادی دارند. یکی از این الگوریتم‌ها، الگوریتم فراکاوشی کرم شب‌تاب است. این الگوریتم در سال ۲۰۱۰ ارائه شده و مبنای آن تقلید از مکانیسم زندگی کرم‌های شب‌تاب است (Yang 2010). میزان جذابیت کرم‌های شب‌تاب متناسب با روشنایی آن‌ها است؛ بنابراین برای دو کرم شب‌تاب، کرم شب‌تابی که دارای روشنایی کمتر است به سمت دیگری جذب شده و حرکت می‌کند. میزان جذابیت و روشنایی با افزایش فاصله، کاهش می‌یابد. در صورتی که یک کرم شب‌تاب وجود داشته باشد که هیچ کرم شب‌تابی روشن‌تر و جذاب‌تر از آن نباشد حرکت آن کرم به‌صورت

[1] Well.dat

جدول ۱- نتایج حل مسئله کمینه‌سازی تابع Ackley-10D با استفاده از الگوریتم‌های PSO، SPSO و FOA

Table 1. Results of the Ackley-10D objective function minimization using PSO, SPSO, and FOA

Algorithm	Best (f^*_{min})	Worst (f^*_{max})	Average (f^*_{ave})	Coefficient of Variation
PSO	2.75	3.01	2.8894	0.027
SPSO	0	7.10×10^{-15}	3.55×10^{-15}	0.32×10^{-15}
FOA	1.51×10^{-14}	1.18×10^{-12}	2.63×10^{-13}	1.37×10^{-13}

تصادفی خواهد بود. روشنایی هر کرم شب‌تاب متناسب با مقدار تابع هدف متناظر با آن مشخص می‌شود. فاصله بین کرم شب‌تاب i ام با کرم شب‌تاب j ام با مختصات کارتزین x_i و x_j مطابق معادله ۲ تعریف می‌شود

$$r_{ij} = \| x_i - x_j \| = \sqrt{\sum_{k=1}^{d}(x_{i,k} - x_{j,k})^2} \qquad (۲)$$

که در آن

k اندیس بعد و d تعداد ابعاد مسئله است. در صورتی که کرم شب‌تاب j ام جذاب‌تر از کرم شب‌تاب i ام باشد معادله حرکت کرم i ام به سمت کرم j ام به‌صورت معادله ۳ است

$$x'_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}(x_i - x_j) + \alpha\epsilon_i \qquad (۳)$$

که در آن

x'_i مختصات ثانویه کرم شب‌تاب i ام پس از حرکت به سمت کرم شب‌تاب j ام، x_i مختصات اولیه کرم شب‌تاب i ام، β_0 میزان جذابیت در فاصله $r = 0$ و γ ضریب جذب نور می‌باشد. ترم دوم ناشی از حرکت کرم شب‌تاب به سمت کرم دیگر است. ترم سوم در این معادله بیانگر حرکت تصادفی کرم شب‌تاب است که با بردار تصادفی ϵ_i به‌صورت توزیع نرمال و یا یکنواخت مشخص می‌شود و α ضریب بردار تصادفی (پارامتر تصادفی) است. مقدار α معمولا عددی بین صفر و یک در نظر گرفته شده و در مراحل آخر همگرایی تابع هدف باید مقدار آن به‌تدریج کاهش یافته و به‌سمت صفر نزدیک‌تر شود. در صورتی که مقدار β_0 برابر صفر باشد، مسئله به شکل گام‌های تصادفی[1] در می‌آید. پارامتر γ (ضریب جذب نور) تأثیر مهمی در سرعت همگرایی و نحوه رفتار الگوریتم کرم شب‌تاب دارد. از لحاظ تئوری مقدار γ می‌تواند بین صفر تا بی‌نهایت باشد ($\gamma \in [0, \infty)$)، اما در بیشتر مسائل عملی $0.1 \leq \gamma \leq 9$ در نظر گرفته می‌شود (Yang 2010).

به‌منظور بررسی توانایی الگوریتم کرم شب‌تاب در حل مسائل بهینه‌سازی، عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی PSO استاندارد، PSO همراه با تکنیک کشش تابع (SPSO) که در آن راهکاری به‌منظور فرار از بهینه‌های محلی تعبیه شده و الگوریتم کرم شب‌تاب بر روی تابع Ackley ده بعدی مورد آزمون قرار گرفته است. نتایج حاصل از ده بار اجرای الگوریتم‌های مذکور در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده بیانگر این است که الگوریتم کرم شب تاب نسبت به الگوریتم PSO استاندارد عملکرد بهتری داشته و جواب‌های آن تقریباً نزدیک به الگوریتم SPSO در حل مسئله حداقل‌سازی تابع Ackley در حالت ده بعدی است. لذا این الگوریتم قابلیت استفاده در مسائل بهینه‌سازی واقعی را داراست.

۲-۴- مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ترکیبی FOA-MODFLOW

در مسئله بهینه‌سازی زهکشی با استفاده از چاه‌های پمپاژ دو نوع متغیر وجود دارد. این متغیرها عبارت‌اند از متغیرهای تصمیم و متغیرهای حالت. نرخ پمپاژ، مختصات و تعداد چاه‌ها جزء متغیرهای تصمیم محسوب می‌شوند. متغیرهای تصمیم باید به نحوی مشخص شوند که ترکیب آن‌ها باعث ایجاد بهترین حالت از لحاظ هزینه شود. متغیرهای حالت عبارت‌اند از هد هیدرولیکی (سطح آب زیرزمینی) و نشست سطح زمین که این متغیرها وابسته به معادلات جریان آب زیرزمینی و نشست تحت تأثیر افت سطح آب زیرزمینی می‌باشند. در روش شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مورد استفاده در تحقیق حاضر، محاسبه متغیرهای حالت توسط مدل شبیه‌سازی (MODFLOW) و بهینه‌یابی متغیرهای تصمیم توسط الگوریتم بهینه‌سازی (FOA) انجام می‌شود. تابع هدف بهینه‌سازی می‌تواند به شکل حداقل کردن نرخ پمپاژ و یا حداقل کردن هزینه (شامل هزینه‌های حفاری، تجهیز چاه‌ها و انرژی مصرفی جهت پمپاژ

[1] Random Walk

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45931

آب) باشد. برای مثال در پروژه‌های بلند مدت می‌توان از هزینه‌های اولیه (هزینه حفاری و تجهیز چاه‌ها) صرف‌نظر نمود که در این حالت تابع هدف به شکل حداقل کردن نرخ پمپاژ تبدیل می‌شود. شکل دقیق تابع هدف در مسائل مختلف بسته به شرایط مسئله متفاوت است. هدف مورد نظر در تابع هدف باید در محدوده یک‌سری قیود برآورده شود که این قیدها تحت شرایط فنی، اقتصادی و یا قانونی مرتبط با پروژه تعیین می‌شوند. این قیدها می‌توانند دربرگیرنده متغیرهای تصمیم و یا حالت باشند. حداکثر یا حداقل نرخ پمپاژ، محدوده مختصاتی امکان حفر چاه‌ها و محدودیت‌های مربوط به تعداد چاه‌ها، قیدهای مربوط به متغیرهای تصمیم می‌باشند. قیدهای متغیر حالت عبارت‌اند از حداکثر سطح آب زیرزمینی و میزان نشست مجاز برای منطقه تحت مطالعه. شکل کلی تابع هدف و قیود برای مسئله حاضر مطابق معادلات ۴ تا ۱۳ است

$$z = \min\{c_1 \sum_{i=1}^{n_w} w_i + c_2 \sum_{i=1}^{n_{aw}} Q_i + \sum_{i=1}^{n_{obs}} [\beta_1 F(h_i) + \beta_2 G(s_i)]\} \quad (۴)$$

$$n_{aw} \le n_w \quad (۵)$$

$$Q_{min} \le Q_i \le Q_{max} \quad (۶)$$

$$h_i \le h_{max} \quad (۷)$$

$$S_i \le S_{max} \quad (۸)$$

$$x_{min} \le x_i \le x_{max} \quad (۹)$$

$$y_{min} \le y_i \le y_{max} \quad (۱۰)$$

$$F(h_i) = \begin{cases} \frac{h_i}{h_{max}} - 1 & \text{if } h_i > h_{max} \\ 0 & \text{if } h_i < h_{max} \end{cases} \quad (۱۱)$$

$$G(s_i) = \begin{cases} \frac{s_i}{s_{max}} - 1 & \text{if } s_i > s_{max} \\ 0 & \text{if } s_i < s_{max} \end{cases} \quad (۱۲)$$

$$h, s = f(Q, x, y, n_{aw}) \quad (۱۳)$$

که در این معادلات

z تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، c_1 هزینه ثابت حفر و تجهیز هر چاه، n_w تعداد کل چاه‌های در نظر گرفته شده (تعداد چاه‌های اولیه انتخاب شده)، w_i متغیر دودویی[1] که در حالت حفر یا عدم حفر چاه i به‌ترتیب برابر یک یا صفر در نظر گرفته می‌شود، c_2 هزینه پمپاژ به ازای دبی واحد، n_{aw} تعداد چاه‌های حفر شده، Q_i دبی پمپاژ چاه i، n_{obs} تعداد نقاط کنترل برای سطح آب زیر زمینی و نشست، β_1 ضریب وزنی تابع جریمه قید سطح آب زیرزمینی، h_i سطح آب زیرزمینی در نقاط کنترل i، β_2 ضریب وزنی تابع جریمه قید نشست، s_i نشست محاسبه شده در نقاط کنترل i، x_i و y_i مختصات چاه i، F و G توابع جریمه سطح آب زیرزمینی و نشست، h_{max} سطح مجاز آب زیرزمینی و s_{max} حداکثر نشست مجاز است. کلیه پارامترها بر حسب واحدهای سیستم متریک در معادلات وارد شده‌اند. همان‌طور که در معادله ۴ ملاحظه می‌شود، برای در نظر گرفتن قیدهای مربوط به سطح آب زیرزمینی و نشست از تابع جریمه جمع شونده استفاده شده است.

حل مسئله شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، با اتصال دو مدل مذکور و اجرای آنها به‌صورت توأم و اشتراک نتایج هر یک از این دو مدل با یکدیگر، امکان‌پذیر است. کد الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب در نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است. این کد با ایجاد متغیرهای تصمیم که بسته به نوع مسئله می‌تواند نرخ پمپاژ، تعداد، مختصات چاه‌ها و یا ترکیبی از این موارد باشد، جمعیت کرم‌های شب‌تاب را ایجاد کرده و مقادیر متغیرهای تصمیم را در فایل‌های ورودی MODFLOW (دسته فایل‌های well.dat) بازنویسی می‌کند. به‌منظور محاسبه مقدار تابع هدف و قیود مسئله، برای هر کرم شب‌تاب باید مدل شبیه‌سازی MODFLOW اجرا شود. پس از اجرای مدل MODFLOW و با استخراج مقادیر هد آبخوان در نقاط مختلف از فایل‌های خروجی، مقدار تابع هدف بهینه‌سازی و قیود مسئله در محیط MATLAB محاسبه شده و با تکرار این روند و طبق محاسبات الگوریتم بهینه‌سازی، کرم شب‌تابی که در آن اولاً قیود مسئله برآورده شده و ثانیاً دارای کمترین هزینه است انتخاب شده و به‌عنوان بهترین جواب ارائه می‌شود. در شکل ۱، نمودار

[1] Binary Variable

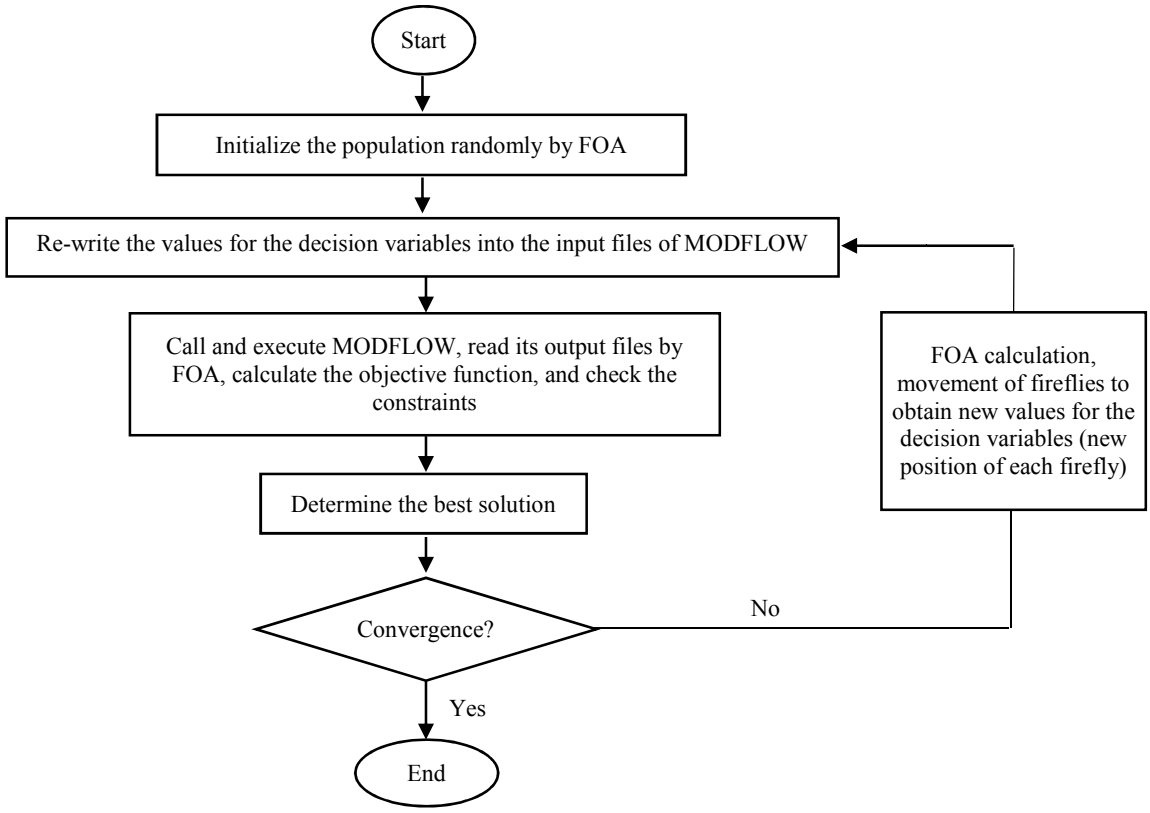

Fig. 1. Flowchart of the FOA-MODFLOW simulation-optimization model
شکل ۱- نمودار جریان مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی FOA-MODFLOW

جریان حل مسئله با استفاده از مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی توسعه داده شده FOA-MODFLOW نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

ضخامت آبرفت آبخوان در محدوده مسجد جامع شهر کرمان در حدود ۱۱۸ متر و ضخامت آبخوان آن حدود ۱۱۱/۵ متر می‌باشد؛ بنابراین سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط در عمق ۶/۵ متری از سطح زمین قرار دارد. این عمق مربوط به قسمت‌های اطراف مسجد جامع می‌باشد و به‌دلیل اینکه کف شبستان مسجد در سطحی پایین‌تر از سطح زمین اطراف قرار دارد، عمق آب زیرزمینی در بعضی از مناطق داخل مسجد نزدیک به سطح زمین است. جنس لایه‌های خاک این منطقه از نوع مخلوط رس و لای است و میزان هدایت هیدرولیکی در جهت افقی آبخوان برابر ۴ متر بر روز اندازه‌گیری شده است. همچنین آبخوان در این منطقه از نوع آزاد و تک لایه است. به‌منظور شبیه‌سازی محدوده مطالعاتی آبخوان محدوده مسجد جامع کرمان از مدل MODFLOW-2005 استفاده شده است. به‌منظور تهیه مدل اولیه از این ناحیه، تمامی مسجد جامع به‌اضافه نواحی اطراف آن تا شعاع حدوداً ۱۲۰ متری در نظر گرفته شده است. طول و عرض این ناحیه به ترتیب ۵۲۰ و ۳۴۰ متر بوده و ابعاد سلول‌های مورد نیاز به‌منظور شبکه‌بندی ۱۰×۱۰ متر انتخاب شده است. در شکل ۲ محدوده ناحیه تحت مطالعه در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ به همراه شبکه‌بندی سلول‌های آن نشان داده شده است. مرزهای اطراف آبخوان از نوع هد کلی با هد هیدرولیکی خارجی برابر ۱۱۱/۵ متر و هدایت هیدرولیکی معادل ۴ متر در روز انتخاب شده است. در نتیجه مشخصات منبع خارجی در اطراف مرز آبخوان معادل آبخوان محدوده مطالعاتی در نظر گرفته شده است. از تبخیر آب در آبخوان در نزدیکی سطح زمین صرف‌نظر شده است. میزان تغذیه آبخوان در محدوده مورد نظر با توجه به میزان آب مصرفی و قبوض آب واحدهای تجاری و مسکونی اطراف محاسبه شده است (Mahab Ghods Consulting Engineers 2008). اما

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45931

Fig. 2. Plan and zoning of the Kerman city ancient Mosque

شکل ۲- پلان و شبکه‌بندی محدوده مسجد جامع شهر کرمان

با توجه به عدم قطعیت میزان نرخ تغذیه، این پارامتر با استفاده از نرم‌افزار PEST کالیبره شده و مقدار آن در نهایت ۰/۰۰۳ متر بر روز محاسبه و وارد مدل شبیه‌سازی شده است. کالیبراسیون مدل نسبت به میزان نرخ تغذیه در محدوده مد نظر انجام شده و از آنجایی که وسعت محدوده مطالعاتی زیاد نبوده و همچنین مقادیر سایر پارامترهای شبیه‌سازی مانند ضریب هدایت هیدرولیکی در آزمایش‌های انجام گرفته در منطقه با دقت قابل قبول برآورده شده است، لذا از کالیبراسیون سایر پارامترها صرف‌نظر گردیده است. مدل در شرایط جریان پایدار اجرا شده و با در نظر گرفتن چاه‌های کاندیدا (مجموعه چاه‌های اولیه) به‌منظور پایین آوردن سطح آب زیرزمینی اجرا شده است.

از آنجایی که در محدوده مورد نظر با افت سطح آب زیرزمینی احتمال وقوع پدیده نشست نیز وجود دارد، در نتیجه ممکن است پایداری سازه‌های مسجد و اطراف آن با مشکل مواجه شود؛ بنابراین یکی از قیدهای مسئله بهینه‌سازی مقدار مجاز نشست در نظر گرفته شده است. ازآنجا که سطح آب زیرزمینی در سال‌های گذشته پایین‌تر از سطح فعلی بوده است، بنابراین می‌توان خاک این ناحیه را از نوع پیش تحکیم یافته در نظر گرفت. در نتیجه به‌منظور محاسبه نشست از ضریب ذخیره الاستیک استفاده شده است. فرمول اصلی محاسبه نشست الاستیک در آبخوان آزاد به‌صورت معادله ۱۴ است

$$\Delta b = -\Delta h . S_{fe} = -\Delta h . (1 - n + n_w) . S_{ske} . b_0 \qquad (۱۴)$$

که در آن

Δb تغییرات ضخامت آبخوان (مقدار نشست)، Δh تغییرات هد هیدرولیکی آبخوان، S_{fe} ضریب ذخیره الاستیک، n تخلخل، n_w درصد رطوبت خاک در ناحیه بالای سطح آب زیرزمینی، S_{ske} مولفه اسکلتی ضریب ذخیره الاستیک آبخوان[1] و b_0 ضخامت لایه می‌باشند. برای تعیین برخی از پارامترهای فوق نیاز به انجام آزمایش‌های ژئوتکنیک است. به‌دلیل اینکه در این منطقه این آزمایش‌ها صورت نگرفته و اطلاعات آن در دسترس نیست، این پارامترها بر اساس جنس خاک و با استناد به گزارش‌های موجود به‌صورت منطقی در نظر گرفته شده و محاسبات نشست بر مبنای آنها صورت می‌پذیرد. برای آبخوان این ناحیه با توجه به آبرفتی بودن آن تخلخل برابر ۰/۵ و درصد رطوبت خاک در ناحیه بالای سطح آب زیرزمینی برابر ۰/۱ و مؤلفه اسکلتی ضریب الاستیک آبخوان پس از انجام محاسبات برابر $0/0013\ m^{-1}$ به‌دست آمده است.

یکی از روش‌های مناسب پایین آوردن سطح آب زیرزمینی در کوتاه مدت در محدوده مسجد جامع کرمان، با توجه به امکانات و محدودیت‌های اجرایی، زهکشی عمودی آبخوان منطقه با استفاده از چاه‌های پمپاژ است. بر این اساس و با توجه به قابلیت‌های مدل FOA-MODFLOW توسعه داده شده در این تحقیق، حل مسئله بهینه‌سازی جانمایی و ظرفیت چاه‌های پمپاژ با هدف کاهش سطح آب زیرزمینی در محدوده مسجد جامع کرمان مدنظر قرار گرفته است. تابع هدف مسئله حداقل کردن هزینه کل پروژه اعم از هزینه ایجاد چاه‌های جدید و هزینه پمپاژ آنها است. در مدل اولیه شبیه‌سازی تعداد ۱۵ حلقه چاه جهت زهکشی آب زیرزمینی محدوده تحت مطالعه در نقاط مشخص مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است. چاه‌های نشان داده در شکل در امتداد خیابان‌های قدمگاه و میرزا رضا در اطراف مسجد و در موقعیت‌هایی که امکان حفر چاه وجود دارد، انتخاب شده است. چاه ۸ در کنار کتابخانه مسجد جامع امکان حفر دارد. انتخاب اولیه محل و تعداد چاه‌های پیشنهادی می‌تواند بر اساس نظر کاربر صورت گیرد.

به‌منظور محاسبه تابع هزینه لازم است هزینه احداث هر چاه و هزینه برق مصرفی جهت پمپاژ محاسبه شود. بر اساس اطلاعات

[1] Skeletal Component of Elastic Specific Storage

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45931

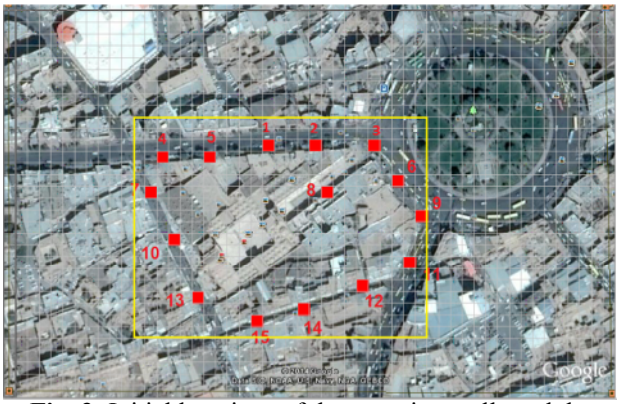

Fig. 3. Initial locations of the pumping wells and the region designated for water table drawdown in the Kerman city ancient Mosque area

شکل ۳- محل اولیه چاه‌های پمپاژ و محدوده مورد نظر جهت افت سطح آبخوان در محدوده مسجد جامع شهر کرمان

جمع‌آوری شده، هزینه احداث و تجهیز هر چاه پمپاژ برابر ۵۰ میلیون ریال و هزینه خرید یک دستگاه الکتروپمپ برابر ۲۵ میلیون ریال است که به ازای افزایش دبی پمپاژ ۱۰۰۰ متر مکعب در روز به هزینه خرید ۲۵ میلیون ریال افزوده می‌شود (Mahab Ghods Consulting Engineers 2008).
هزینه برق مصرفی جهت پمپاژ با استفاده از معادلات ۱۵ و ۱۶ محاسبه می‌شود

$$P = \frac{\gamma QH}{R} = \frac{9.810 \times Q \times H}{0.9} \qquad (۱۵)$$

که در آن
P توان مصرفی پمپ (KW)، γ وزن مخصوص آب (KN/m^3)، Q دبی پمپاژ چاه‌ها (m^3/s)، H ارتفاع پمپاژ (m) و R راندمان پمپ می‌باشد. در رابطه فوق راندمان پمپ برابر ۹۰ درصد فرض می‌شود. قیمت انرژی به ازای هر کیلو وات ساعت برابر ۱۸۸۰ ریال فرض شده، بنابراین مقدار هزینه برق مصرفی پمپاژ آب به ازای هر ساعت کارکرد پمپ با استفاده از معادله ۱۶ محاسبه می‌شود

$$Ecost = 1880 \times P \qquad (۱۶)$$

که در آن
Ecost هزینه برق مصرفی به ازای یک ساعت پمپاژ بر حسب ریال و P توان مصرفی مطابق معادله ۱۵ است. در این مسئله فرض شده که مدت زمان طرح جهت افت سطح آب ۱۲ ماه است. به‌عبارت دیگر، چاه‌های پمپاژ در یک بازه زمانی یک ساله عملیات استخراج آب از آبخوان را انجام می‌دهند. به‌منظور محاسبه حداکثر دبی مجاز پمپاژ از هر چاه، ظرفیت پمپاژ هر چاه طبق معادله تجربی Sichart محاسبه می‌شود

$$Q_w = 24.91 \times l_w \times r_w \times \sqrt{K} \qquad (۱۷)$$

که در آن
Q_w ظرفیت پمپاژ از چاه بر حسب لیتر بر دقیقه، l_w طول اسکرین چاه با در نظر گرفتن مقدار افت سطح آب ناشی از پمپاژ بر حسب لیتر، r_w قطر چاه بر حسب میلی‌متر و K نفوذپذیری خاک بر حسب متر بر ثانیه است. با جایگذاری مقدار طول اسکرین چاه برابر ۱۰۰ متر، شعاع چاه برابر ۱۷۵ میلی‌متر و نفوذپذیری آبخوان در معادله ۱۷، مقدار ظرفیت پمپاژ هر چاه به شکل زیر محاسبه می‌شود

$$Q_w = 24.91 \times 100 \times 175 \times \sqrt{4.63 * 10^{-5}} = 2966 L/\min \qquad (۱۸)$$

بنابراین حداکثر دبی پمپاژ هر چاه برابر ۴۲۷۱ متر مکعب در روز است و در مدل به‌منظور اطمینان مقدار دبی مجاز از هر چاه برابر ۴۰۰۰ متر مکعب در روز فرض می‌شود. حداکثر مقدار سطح آب مجاز (h_{max}) در محدوده مسجد جامع برابر ۱۱۰ متر در نظر گرفته شده است. در واقع در این محدوده باید سطح آب حداقل به میزان ۱/۵ متر پایین آورده شود. محدوده مورد نظر برای کنترل سطح آب در شکل ۳ با خط پیوسته نشان داده است. مقدار نشست مجاز نیز باید با توجه به شرایط موجود در محدوده مورد نظر لحاظ شود. به‌عنوان مثال با بررسی سازه‌های موجود در محل اعم از ساختمان مسجد و لوله‌کشی و تأسیسات شهری، می‌توان مقدار نشست مجاز را محاسبه نمود. برای مسئله حاضر مقدار نشست مجاز برابر ۸۰ میلی‌متر فرض شده است. محدوده در نظر گرفتن نشست مجاز نیز مشابه محدوده در نظر گرفته شده برای حداکثر سطح آب زیرزمینی و مطابق شکل ۳ لحاظ شده است.
به‌منظور در نظر گرفتن قیدهای مربوط به سطح آب زیرزمینی و

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45931

نشست سطح زمین در محدوده مشخص شده از تابع جریمه نوع جمع شونده استفاده شده است. ضرایب مربوط به تابع جریمه با سعی خطا مشخص شده و مقدار آن برای قیدهای سطح آب و نشست به ترتیب برابر ۹×۱۰^{۸} و ۲×۱۰^{۹} در نظر گرفته شده است. بنابراین تابع هدف در این مسئله که در معادله ۴ به آن اشاره شده است با در نظر گرفتن قیدهای سطح آب و نشست به‌صورت تابع جریمه جمع شونده به شکل معادله ۱۹ نوشته می‌شود

$$Cost = \sum_{i=1}^{n_w} C_1 W_i + C_2 \sum_{i=1}^{n_{aw}} Qi + \sum_{i=1}^{n_{obs}} [9\times10^{8} f(h_i) + 2\times10^{9} G(S_i)] \quad (۱۹)$$

سایر قیود مدل ریاضی مسئله نیز در معادلات ۵ تا ۱۳ نشان داده شده است. حداکثر تکرار برای توقف الگوریتم کرم شب‌تاب برابر ۲۰۰ در نظر گرفته شده، اما معیار اصلی توقف الگوریتم عدم پیشرفت بهترین جواب در ۲۰ تکرار متوالی است و در صورتی که این معیار قبل از تکرار ۲۰۰ حاصل شود الگوریتم متوقف می‌شود. جمعیت اولیه کرم‌های شب‌تاب برابر ۲۰ و به‌صورت تصادفی با توزیع نرمال انتخاب می‌شود. مدل FOA-MODFLOW برای مسئله مطرح در آبخوان محدوده مسجد جامع کرمان ۱۰ بار اجرا شده است. با اجرای مدل FOA-MODFLOW تحت قیود برشمرده شده، تعداد، محل و دبی پمپاژ بهینه چاه‌ها به‌منظور کاهش سطح آب زیرزمینی در محدوده مسجد جامع کرمان با هدف کمینه مقدار هزینه طرح در هر بار اجرا به‌دست آورده شده است. خلاصه نتایج حاصل از اجرای مدل در جدول ۲ نشان داده شده است.

نمودار همگرایی بهترین مقدار تابع هدف[1] در بهترین جواب حاصل در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل تقریباً در تکرار ۲۵ به جواب بهینه همگرا شده است که این موضوع

جدول ۲- مقادیر تابع هدف حاصل از ۱۰ بار اجرای مدل FOA-MODFLOW (ریال)

Table 2. Values of the objective function obtained from 10 items of execution of the FAO-MODFLOW model (in IRRials)

Best	Worst	Mean	C.V.
406,145,328	427,976,886	410,639,421	0.017

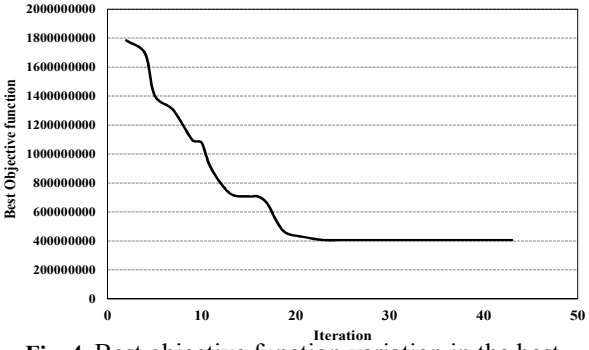

Fig. 4. Best objective function variation in the best solution obtained by the FOA-MOLFLOW model

شکل ۴- نمودار تغییرات بهترین مقدار تابع هدف در بهترین جواب به‌دست آمده حاصل از اجرای مدل FOA-MODFLOW

یکی از قابلیت‌های الگوریتم کرم شب‌تاب می‌باشد. در مدل مسئله حاضر در هر تکرار ۲۰ بار تابع هدف مورد محاسبه قرار گرفته، بنابراین تعداد اجرای مدل MODFLOW در هر تکرار برابر ۲۰ بار می‌باشد. مقدار بهینه تابع هدف برابر ۴۰۶،۱۴۵،۳۲۸ ریال به‌دست آمده است که از این مقدار ۲۵۰،۰۰۰،۰۰۰ ریال هزینه احداث، تجهیز و خرید الکتروپمپ، ۱۴۸،۶۴۹،۴۶۹ ریال هزینه انرژی مصرفی جهت پمپاژ و ۷،۴۹۵،۸۵۹ ریال مربوط به توابع جریمه در نظر گرفته شده برای قیود سطح آب و نشست است. با توجه به لزوم افت سطح آبخوان در مسئله، مدل ناچار به تخطی از قید حداکثر نشست در برخی نقاط بوده و لذا آنرا به‌صورت قبول جریمه در تابع هدف پذیرفته است. از آنجا که این مقدار تابع جریمه درصد کمی (۱/۸۴ درصد) از مقدار کل تابع هدف را تشکیل می‌دهد و همچنین محدوده در نظر گرفته شده جهت افت سطح آب و نشست وسیع‌تر از مسجد جامع می‌باشد، بنابراین مقدار جریمه قابل قبول بوده و نیازی به افزایش ضرایب توابع جریمه احساس نمی‌شود. در جواب بهینه، چاه‌های شماره ۶ و ۱۰ به‌عنوان چاه‌های روشن انتخاب شده است که دبی چاه شماره ۱۰ برابر ۲۵۲۳ و چاه شماره ۶ برابر ۲۹۸۰ مترمکعب در روز به‌دست آمده است. بنابراین مجموع دبی پمپاژ شده برابر ۵۵۰۳ مترمکعب در روز محاسبه شده است. در شکل ۵ خطوط هم‌پتانسیل ناشی از دبی پمپاژ چاه‌های منتخب نشان داده شده است. همانطورکه ملاحظه می‌شود در محدوده مورد نظر سطح آب زیرزمینی به‌جز در برخی از نقاط در گوشه‌ها از حداکثر مقدار در نظر گرفته شده (۱۱۰ متر) کمتر به‌دست آمده است. ازآنجا که

[1] Best Objective Function

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45931

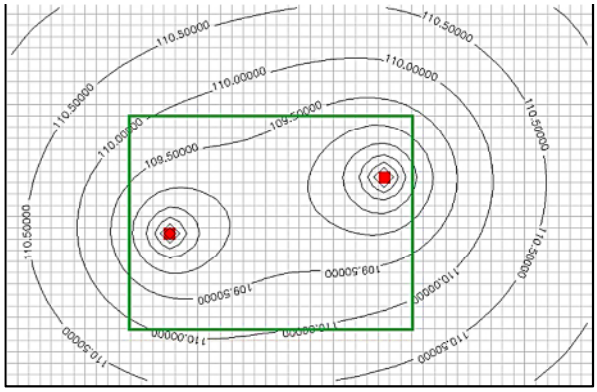

Fig. 5. Groundwater contour lines in the study area obtained by the FOA-MODFLOW model in the basic state

شکل ۵- خطوط هم‌تراز سطح آب زیرزمینی در محدوده تحت مطالعه حاصل از اجرای FOA-MODFLOW در حالت مبنا

این گوشه‌ها در خارج از محدوده مسجد جامع کرمان می‌باشند لذا این مقدار از عدم برآوردگی قیود مسئله قابل قبول در نظر گرفته شده و نیازی به افزایش ضرایب توابع جریمه نمی‌باشد. بر این اساس می‌توان گفت که جواب به‌دست آمده یک جواب مناسب برای مسئله تحت بررسی است؛ زیرا هم سطح آبخوان به میزان مورد نیاز پایین آورده شده و هم میزان تخطی از قید نشست مجاز در کل محدوده طرح به میزانی نبوده که برای پایداری ساختمان‌ها و تأسیسات مشکل آفرین باشد. طرح پیشنهادی مشاور پروژه مشتمل بر احداث ۱۲ حلقه چاه جهت پمپاژ با دبی پمپاژ متوسط ۸۱۵ مترمکعب در روز است؛ بنابراین مجموع دبی پمپاژ در این حالت برابر ۹۷۲۵ مترمکعب در روز است. در این حالت می‌توان انتظار داشت که حدود ۳/۲ متر افت سطح آب در محدوده طرح ایجاد شود (Mahab Ghods Consulting Engineers 2008).

میزان افت مطلوب و نحوه محاسبه آن به‌صورت میانگین، مدل شبیه‌سازی و شرایط مرزی از جمله تفاوت‌های گزارش مشاور پروژه با کار انجام شده در این تحقیق است. هزینه طرح در این حالت برابر ۱،۱۶۲،۵۳۷،۲۰۰ ریال به‌دست آمده است که افزایشی به میزان ۷۵۶،۳۹۱،۸۷۲ ریال نسبت به هزینه به‌دست آمده توسط مدل توسعه یافته استفاده شده در این تحقیق نشان می‌دهد. بنابراین طراحی با استفاده از مدل FOA-MODFLOW و در نظر گرفتن پارامترهای منطقی‌تری (مانند افت مطلوب در محدوده طرح) می‌تواند کاهش قابل ملاحظه‌ای در هزینه طرح داشته باشد.

۳-۱- تحلیل حساسیت و ارزیابی نتایج

به‌منظور ارزیابی تأثیر مقادیر فرض شده برای پارامترهای مورد استفاده در مسئله بر روی جواب مسئله، تحلیل حساسیت انجام پذیرفت. در مسئله حاضر این فرایند در خصوص پارامترهای سطح مجاز افت آبخوان، حداکثر دبی پمپاژ چاهها و قیمت برق مصرفی انجام شد. در حالت اول در مدل FOA-MODFLOW مسجد جامع کرمان، رقوم سطح مجاز آب زیرزمینی (h_{max}) تغییر کرده و در دو حالت افزایش و کاهش مقدار آن، نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مقدار کاهش و افزایش برابر یک متر در هر حالت در نظر گرفته شده است. در حالت مبنا سطح آب زیرزمینی مجاز ۱۱۰ متر (از سنگ کف) در نظر گرفته شده بود، بنابراین سطح آب زیرزمینی مجاز در دو حالت افزایش و کاهش آن به ترتیب برابر ۱۱۱ و ۱۰۹ متر از سنگ کف خواهد بود. در نتیجه مقدار افت مطلوب نیز در دو حالت مذکور به‌ترتیب برابر ۰/۵ و ۲/۵ متر است. سایر پارامترها مانند حالت مبنا خواهد بود. در شکل‌های ۶ و ۷ خطوط هم‌تراز سطح آب زیرزمینی و نحوه توزیع بهینه چاه‌های پمپاژ و در جدول ۳ دبی پمپاژ هر یک از این چاه‌ها در دو حالت مذکور نشان داده شده است.

همان‌طور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود تعداد چاه‌های پمپاژ در حالت کاهش رقوم سطح مجاز آب زیرزمینی (از سنگ کف) یک حلقه نسبت به حالت مبنا افزایش پیدا کرده است. همچنین مجموع دبی پمپاژ در این حالت نسبت به حالت مبنا ۳۴۸۶ متر مکعب در روز افزایش یافته است. در حالت افزایش رقوم سطح مجاز آب

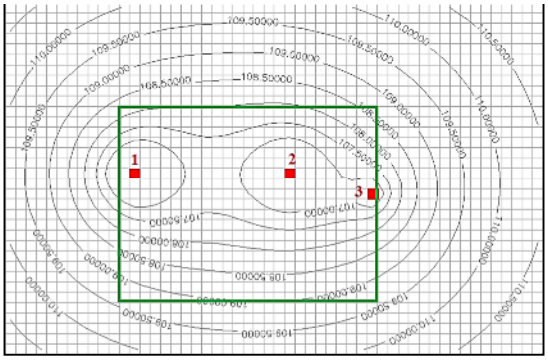

Fig. 6. Groundwater contour lines in the state of reduction of the permissible groundwater table

شکل ۶- خطوط هم‌تراز سطح آب زیرزمینی در حالت کاهش رقوم مجاز سطح آب زیرزمینی

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45931

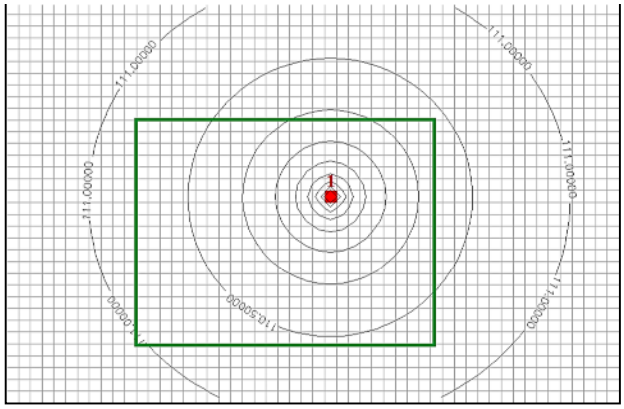

Fig. 7. Groundwater contour lines in the state of increase of the permissible groundwater table

شکل ۷- خطوط هم‌تراز سطح آب زیرزمینی در حالت افزایش رقوم مجاز سطح آب زیرزمینی

جدول ۳- نرخ بهینه پمپاژ چاه‌ها در دو حالت کاهش و افزایش رقوم مجاز سطح آبخوان (m^3/day)

Table 3. Optimal pumping rates for two states of reduced and increased permissible groundwater table (m^3/day)

Well No.	Decrease	Increase
1	4000	3000
2	2996.29	-
3	1993.26	-
Sum	8989.54	3000

زیرزمینی تعداد چاه‌های پمپاژ یک حلقه و مجموع دبی پمپاژ ۲۵۰۳ متر مکعب در روز کاهش یافته است. در شکل ۸ نمودار همگرایی بهترین مقدار تابع هدف در دو حالت مذکور در کنار حالت مبنا نشان داده شده است. بهترین مقدار تابع هدف در حالت کاهش رقوم سطح آب زیرزمینی مجاز برابر ۶۳۷،۸۸۷،۱۹۰ ریال و در حالت افزایش ۲۲۰،۵۱۱،۰۴۲ ریال به‌دست آمده است. بنابراین با افزایش یک متری افت سطح آب زیرزمینی هزینه نهایی پروژه ۲۳۱،۷۴۱،۸۶۱ ریال معادل ۵۷ درصد افزایش و همچنین در صورت کاهش مقدار افت مجاز به میزان یک متر هزینه نهایی طرح ۱۸۵،۶۳۴،۲۵۸ریال معادل ۴۶ درصد کاهش خواهد یافت. این موضوع بیانگر میزان اهمیت مقدار در نظر گرفته شده برای این پارامتر بر روی هزینه طرح می‌باشد.

همانگونه که اشاره شد حداکثر ظرفیت پمپاژ هر چاه ۴۲۷۱ متر مکعب در روز محاسبه شد که این مقدار در حالت مبنا در جهت اطمینان ۴۰۰۰ مترمکعب در روز لحاظ شد. از آنجا که این

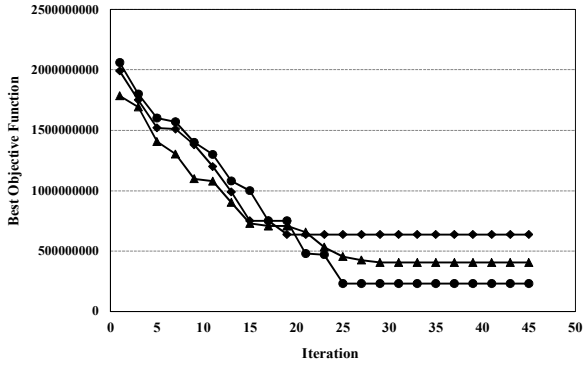

Fig. 8. Convergence trend of the best objective function for the basic (triangle), reduced (square), and increased (circle) permissible groundwater table

شکل ۸- همگرایی بهترین مقدار تابع هدف در حالت مبنا (مثلث)، کاهش (مربع) و افزایش (دایره) رقوم مجاز سطح آب زیرزمینی

پارامتر وابسته به قدرت الکتروپمپ‌های موجود در بازار است بنابراین تحلیل حساسیت بر روی آن ضروری می‌باشد. به‌همین منظور حداکثر ظرفیت پمپاژ هر یک از چاه‌ها در دو مرحله کاهش پیدا کرده و با مقادیر ۲۰۰۰ و ۱۰۰۰ متر مکعب در روز مدل FOA-MODFLOW در حالت مبنا اجرا شد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ خطوط هم‌تراز و نحوه جانمایی بهینه چاه‌های پمپاژ در دو حالت مذکور نشان داده شده است. همچنین مقدار بهینه دبی پمپاژ چاه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

همانگونه که در نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود، تعداد بهینه چاه‌های پمپاژ در حالت دبی حداکثر ۱۰۰۰ متر مکعب در روز برابر ۵ حلقه چاه و دبی هر یک از چاه‌ها نزدیک به دبی حداکثر و مجموع

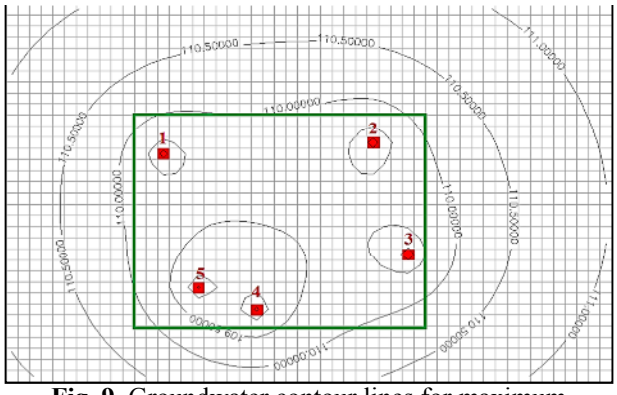

Fig. 9. Groundwater contour lines for maximum pumping rate of 1,000 m^3/day for each well

شکل ۹- خطوط هم‌تراز سطح آب زیرزمینی در حالت دبی پمپاژ حداکثر ۱۰۰۰ متر مکعب در روز برای هر چاه

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45931

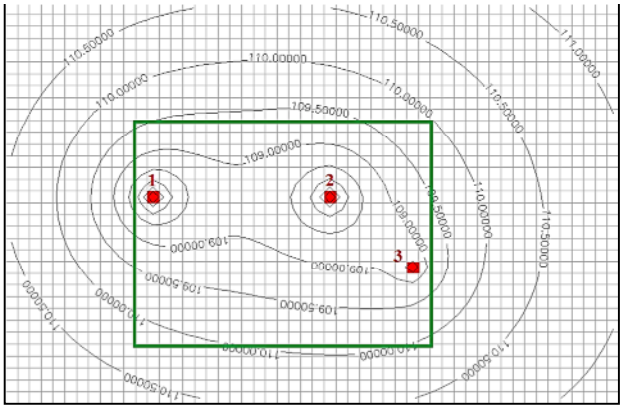

Fig. 10. Groundwater contour lines for maximum pumping rate of 2,000 m^3/day for each well

شکل ۱۰- خطوط هم‌تراز سطح آب زیرزمینی در حالت دبی پمپاژ حداکثر ۲۰۰۰ متر مکعب در روز برای هر چاه

جدول ۴- نرخ بهینه پمپاژ چاه‌ها در حالتهای دبی حداکثر مختلف (m^3/day)

Table 4. Optimal pumping rates for different maximum discharge rates (m^3/day)

Well No.	Q_{max}=1000	Q_{max}=2000
1	966.04	2000
2	944.36	2000
3	1000	997
4	1000	-
5	971.54	-
Sum	4881	4997

نرخ پمپاژ در این حالت ۴۸۸۱ متر مکعب در روز به‌دست آمده است که نسبت به حالت مبنا ۶۲۲ مترمکعب در روز کاهش داشته است. در حالت دبی حداکثر برابر ۲۰۰۰ متر مکعب در روز تعداد بهینه چاه‌ها سه حلقه و دبی مجموع این چاه‌ها برابر ۴۹۹۷ نتیجه شده که نسبت به حالت مبنا ۵۰۶ مترمکعب در روز کاهش داشته است. در شکل ۱۱ نمودار همگرایی بهترین مقدار تابع هدف در دو حالت مذکور در کنار حالت مبنا نشان داده شده است. بهترین مقدار تابع هدف در حالت دبی حداکثر ۲۰۰۰ متر مکعب در روز برابر ۴۴۷،۲۴۹،۲۹۶ ریال و در حالت دبی حداکثر ۱۰۰۰ متر مکعب در روز برابر ۵۱۳،۴۹۵،۱۵۸ ریال به‌دست آمده است. این مقادیر به ترتیب ۴۱،۱۰۳،۹۶۸ ریال و ۱۰۷،۳۴۹،۸۳۰ ریال از حالت مبنا بیشتر است. بنابراین هزینه اجرایی پروژه در حالت دبی حداکثر ۲۰۰۰ متر مکعب در روز تقریباً ۴۱ میلیون ریال و در حالت دبی حداکثر ۱۰۰۰ متر مکعب در روز تقریباً ۱۰۷ میلیون ریال از حالت مبنا بیشتر به‌دست آمده است. در نتیجه می‌توان گفت که در نظر گرفتن دبی حداکثر برابر ۴۰۰۰ متر مکعب در روز نسبت به دو حالت دیگر اقتصادی‌تر بوده و هزینه نهایی طرح در این حالت کمتر خواهد بود. بر این اساس می‌توان گفت که در نظر گرفتن مقدار مناسب برای حداکثر دبی پمپاژ می‌تواند تا حدودی هزینه‌های اجرایی پروژه را تحت تأثیر خود قرار دهد. این مقدار باید با توجه به شرایط آبخوان و ویژگی‌های چاه‌های پمپاژ و امکانات موجود مانند حداکثر توان الکتروپمپ‌های موجود انتخاب شود. در صورتی که مقدار حداکثر آن برابر ظرفیت هر چاه انتخاب شود، بهترین حالت از نظر اقتصادی است.

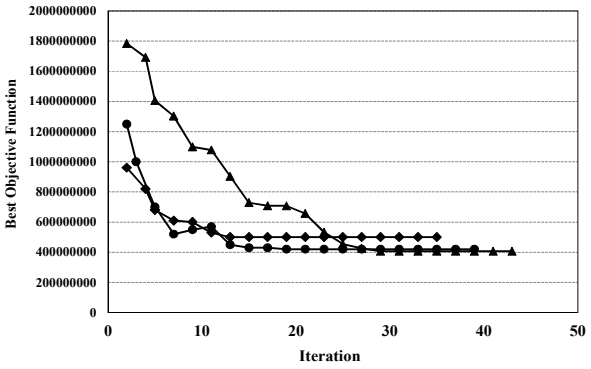

Fig. 11. Convergence trend of the best objective function for the basic (triangle), for Q_{max} =1000 (Square), 2000 (Circle) m^3/d

شکل ۱۱- همگرایی بهترین مقدار تابع هدف در حالت مبنا (مثلث)، دبی حداکثر ۱۰۰۰ (مربع) و ۲۰۰۰ (دایره) متر مکعب در روز

همانگونه که عنوان شد در حالت مبنا هزینه برق مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت انرژی برابر ۱۸۸۰ ریال فرض شد. از آنجا که این هزینه تابع پارامترهای بسیاری همچون زمان (ساعات اوج مصرف و کم‌باری)، فصل سال (گرم و سرد) و توان مصرفی وسیله الکتریکی است. بنابراین تحلیل حساسیت این پارامتر نیز ضروری به‌نظر می‌رسد. به‌منظور بررسی این موضوع، هزینه واحد برق مصرفی در دو نوبت تغییر داده شده تا اثرات این پارامتر بر نتایج مورد بررسی قرار گیرد. در حالت اول هزینه برق مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت به ۲۵۰۰ ریال افزایش و در حالت دوم این هزینه به ۱۰۰۰ ریال کاهش یافت. پس از اجرای مدل FOA-MODFLOW در دو حالت مذکور مشاهده شد که نحوه آرایش و محل منتخب چاه‌های پمپاژ و همچنین مقدار بهینه دبی پمپاژ چاه‌ها نسبت به حالت مبنا

تغییر پیدا نکرد و جانمایی چاه‌ها همانند شکل ۵ به‌دست آمد، اما بهترین مقدار تابع هدف و هزینه نهایی طرح تغییر کرد. مقدار تابع هدف در حالت هزینه واحد برق مصرفی ۲۵۰۰ ریال، برابر ۴۵۴،۶۱۱،۹۳۰ ریال و در حالت ۱۰۰۰ ریال برابر ۳۳۵،۸۳۸،۱۸۰ ریال محاسبه شد؛ بنابراین می‌توان بیان کرد هزینه طرح وابسته به هزینه واحد برق مصرفی است اما آرایش چاه‌های پمپاژ و دبی بهینه پمپاژ مستقل از این پارامتر است. در شکل ۱۲ نمودار همگرایی بهترین مقدار تابع هدف در دو حالت مذکور در کنار حالت مبنا نشان داده شده است.

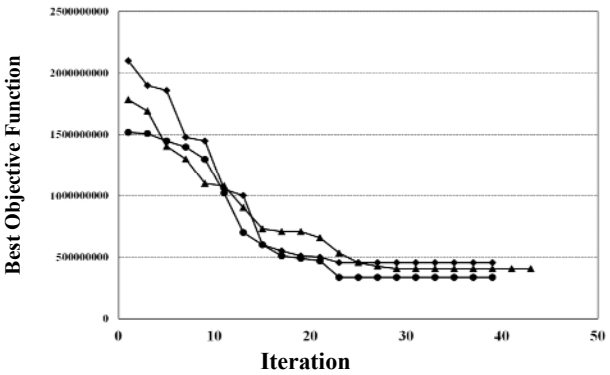

Fig.12. Conevrgence trend of the best objective function for the basic (triangle), reduced (square), and increased (circle) power consumption unit costs

شکل ۱۲- همگرایی بهترین مقدار تابع هدف در حالت مبنا (مثلث)، افزایش (مربع) و کاهش (دایره) هزینه واحد برق مصرفی

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، حل مسئله طراحی بهینه سیستم چاههای پمپاژ با هدف افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از تلفیق مدل شبیه‌سازی MODFLOW و الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب مد نظر قرار گرفت. مدل توسعه یافته FOA-MODFLOW در محدوده مسجد جامع کرمان و با هدف کاهش سطح آب زیرزمینی اجرا شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از اجرای مدل، استفاده از دو حلقه چاه از میان ۱۵ حلقه چاه اولیه به‌عنوان جواب بهینه به‌دست آمد. مجموع دبی پمپاژ این دو چاه برابر ۵۵۰۳ متر مکعب در روز و هزینه نهایی پروژه ۴۰۶،۱۴۵،۳۲۸ ریال به‌دست آمد. مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل FOA-MODFLOW با شبکه چاه‌های پمپاژ طراحی شده توسط مهندسین مشاور طرح حاکی از کاهش قابل توجه هزینه نهایی پروژه است که دلیل این امر می‌تواند فرضیات در نظر گرفته شده و اهداف مدنظر متفاوت در هر حالت باشد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر نتایج، اثر پارامترهای مهم حاکم بر مسئله شامل حداکثر رقوم مجاز سطح آب زیرزمینی، حداکثر دبی پمپاژ چاه‌ها و قیمت واحد برق مصرفی بر جواب‌های مدل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده حاکی از قابلیت‌های مطلوب رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مورد استفاده در حل مسائل جانمایی و ظرفیت بهینه چاههای برداشت از منابع آب زیرزمینی می‌باشد.

References

Ayvaz, M., 2008, "A simulation/optimization model for the identification of unknown groundwater well locations and pumping rates", *Journal of Hydrology*, 357, 76-92.

Bayer, P., Duran, E., Baumann, R., & Finkel, M., 2009, "Optimized groundwater drawdown in a subsiding urban mining area", *Journal of Hydrology*, 365, 95-104.

Datta, B., Chakrabarty, D., & Dhar, A., 2011, "Identification of unknown groundwater polloution sources using classical optimization with linked simulation", *Hydro-enviroment Research*, 5, 25-36.

Elci, A, & Ayvaz, M., 2014, "Diffrencial-evoloution algorithm based optimization for site selection of groundwater production wells with consideration of volnreability concept", *Journal of Hydrology*, 511, 736-749.

Forth, R., 2004, "Groundwater and geotechnical aspects of deep excavations in Hong Kong", *Engineering Geology*, 72, 253-260.

Guar, S., Chahar, B. R. & Graillot, D., 2011, Analatic elements method and particle swarm optimization based on simulation-optimization model for groundwater management", *Journal of Hydrology*, 402, 217-227.

Karimipour, A. Rakhshandeh, R. & Banitalebi, G., 2012, "Evaluation of the effect of the drainage system for the groundwater level degradation in the Shiraz plain by PMWIN model", *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 23 No 2 (82), 30-41.

Ketabchi, H. & Ashtiani, B., 2010, "Development of the ant colony optimization algorithm combined with a numerical simulation model for coastal aquifers' optimum management", *Journal of Water Resources Research*, 1, 1-12. (In Persian)

Mahab Ghods Consulting Engineers, 2008, "Degradation of the groundwater level in region of the Kerman city's ancient mosque (short term plan). Client: Kerman's municipality", Tehran, Iran. (In Persian)

Mahmoudian Shoushtari, M., 2013, *Groundwater Hydraulics*, Shahid Chamran University Publications, Ahwaz, Iran. (In Persian)

Mohammad Reazpor Tabari, M., 2015, "Conjunctive use management under uncertainty conditions in aquifer parameters", *Water Resources Management*, 29 (8), 2967-2986.

Mohammad Rezapour Tabari, M. & Eilbeigi, M., 2014, "Auto-calibration of aquifer parameters using aquifer distributed mathematical models and direct searching algorithm", *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 25 No 3 (91) 98-109. (In Persian)

Powers, P., Corwin, A., Schmall, P., & Kaeck, W., 2007, *Construction dewatering and groundwater control*. John Wiley & Sons, NY.

Pujades, E., Vazquez-sune, E., Carrera, J., & Jurado, A., 2014, "Dewatering of deep excavation undertaken in a layerd soil", *Engineering Geology*, 178, 15-27.

Shamsaei, A. & Forghani, A., 2011, "Conjunctive use of surface and groundwater resources in dry regions", *Iranian Journal of Water Resources Research*, 2, 26-36. (In Persian)

Wang, S. K., Wee, Y. P. & Ofori, G., 2002, "A decision support sysytem for dewatering systems selection", *Building and Enviroment*, 37, 625-645.

Yang, X.-S., 2010, *Engineering optimization an introduction with metaheuristic applications*, John Wiley & Sons.

Yuan, H., Gai-ling, Z., & Guo-yong, Y., 2009, "Numerical simulation of dewatering thick unconsolidated aquifers for safety of underground coal mining", *Mining Science and Technology*, 19, 312-316.

Zhou , N., Vermeer, P., Lou, R., Tang, Y. & Jiang, S., 2010, "Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controling land subsidece", *Engineering Geology*, 114, 251-260.