

کمینه‌سازی هزینه‌های پمپاژ در آبخوان آزاد تحت مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی سطوح شیب‌دار

زهرا باعزم^۱، مهدی ناصری^{۲*}، ابوالفضل اکبرپور^۳ و سید حمید ظهیری^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶

چکیده

با توجه به پیچیدگی‌های محیط آب زیرزمینی، ابداع فن‌آوری‌های نو و بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته در این امر، کمک شایانی در بهبود مدیریت منابع آب زیرزمینی کرده است. در این مطالعه جهت مدیریت بهره‌برداری از آبخوان از مدل ارائه شده شبیه‌سازی-بهینه‌سازی FEM-MOIPO استفاده شد. مدل‌سازی ریاضی آبخوان با استفاده از شبیه‌سازی عددی اجزاء محدود با در نظر گرفتن معادلات دو بعدی جریان آب زیرزمینی انجام شد. در این مطالعه ۳ سناریو جهت مدیریت بهینه بررسی شد که در هر سناریو با تعداد چاه‌های مشخص مختلف میزان افت و هزینه‌ی مورد نیاز برای پمپاژ با توجه به نیاز آب مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین منطقه‌ی مورد مطالعه با توجه به مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی به ۳ ناحیه تقسیم گردید. در نهایت هزینه‌ی پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری با توجه به هدف مورد نظر (موقعیت چاه‌ها جهت بهره‌برداری بهینه، کاهش سطح افت) با استفاده از روش نوین الگوریتم صفحات شیب‌دار چند هدفه بهینه گردید. نتایج نشان داد با توجه به این که آبخوان مورد مطالعه از ۷ چاه پمپاژ برخوردار است با غیر فعال کردن دو چاه در سناریوی ۱، آبخوان دارای کم‌ترین هزینه جهت پمپاژ و افت سطح آب بود. همچنین سطح آب محاسبه شده توسط مدل اجزاء محدود با سطح آب مشاهداتی مدل مقایسه شدند به طوری که خطای نسبی و خطای جذر میانگین مربعات به ترتیب ۰/۰۰۰۲۴ و ۰/۲۲۳ محاسبه شد که نشان‌دهنده‌ی دقت بالای مدل می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، الگوریتم بهینه‌سازی سطوح شیب‌دار، پمپاژ، FEM

(Heydari et al., 2016).

مقدمه

با توجه به اهمیت توسعه مناسب منابع آب زیرزمینی، روش‌های بهینه‌سازی برای مقابله با مشکلات مربوطه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bansal et al., 2016). با توجه به عدم قطعیت پارامترها که ممکن است بر مشکلات و محدودیت‌های مدل اضافه کند، شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی می‌تواند نقش بسزایی را در دقت روش بهینه‌سازی ایفا نماید (Moutsopoulos et al., 2017; Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015). با توجه به اهمیت موضوع هزینه‌ی پمپاژ آب زیرزمینی جهت بهره‌برداری بهینه محققان زیادی به این موضوع پرداخته‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد.

گوار و همکاران، در طی پژوهشی با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، نرخ پمپاژ از آبخوان و هزینه توسعه چاه‌های جدید در کشور فرانسه را با استفاده از روش تحلیلی شبیه‌سازی و توسط الگوریتم ازدحام ذرات، بهینه نموده‌اند (Guar et al., 2001). ماتوگلو و همکاران، مسئله جانمایی چاه‌های پمپاژ در آبخوان‌های ساحلی را با الگوریتم غیرخطی و فراکاوشی حل و نتایج را مقایسه کردند. نتایج

عامل مهم افت سطح آب زیرزمینی، پمپاژ بیش از حد مجاز آب و حفر چاه‌های غیرقانونی است. این نوع بهره‌برداری به علت عدم آگاهی بهره‌برداران از عواقب تهي شدن سفره‌های آب زیرزمینی و عدم آشنایی آن‌ها با روش‌های نوین حفظ منابع خسارت جبران‌ناپذیری را به آبخوان وارد می‌سازد. در بسیاری از موارد، هزینه‌ی پمپاژ موضوع اصلی در مشکلات احیای آبخوان بیان می‌شود (Kontos, 2013). علاوه بر این بهینه‌سازی پمپاژ آب زیرزمینی تأثیر بسزایی را در ارائه ارتباط مطلوب مدیریتی بین منابع سطحی و منابع آب زیرزمینی دارد

۱- دانشجوی ارشد مهندسی عمران گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه

بیرجند، ایران

۲- استادیار گروه عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- دانشیار گروه عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۴- استاد گروه برق، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

* - نویسنده مسئول: (Email: mnaseri@birjand.ac.ir)

نمودند (Katsifarakis et al., 2017).

شیخ خوزانی و همکاران، به مدلسازی بهره‌برداری از مخازن چند منظوره به روش پویایی سیستم با هدف برنامه‌ریزی صحیح به منظور مدیریت آب و بهره‌برداری بهتر از این منابع محدود پرداختند (شیخ خوزانی و همکاران، ۱۳۸۹). عزیزی و همکاران، سد زیرزمینی آبخوری در استان سمنان را جهت تحلیل پایداری و مکان‌یابی سد برای توسعه بهره‌برداری از آب شیرین مورد بحث قرار داده‌اند (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۳). نخعی، طی پژوهشی به منظور مدیریت بهره‌برداری بهینه از آبخوان دشت ساحلی ارومیه و تعیین نرخ بهینه پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری از یک مدل شبیه‌سازی-بهره‌برداری استفاده کرد. در این پژوهش ابتدا جریان آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعاتی شبیه‌سازی شد، سپس نرخ پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری با توجه به هدف مورد نظر (کمینه‌سازی نرخ پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری) و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه گردید (نخعی و همکاران، ۱۳۹۴). با توجه به اهمیت موضوع هدف این مطالعه توسعه‌ی مدل شبیه‌ساز عددی با استفاده از الگوریتم چند هدفه بهینه‌سازی سطوح شیبدار جهت کمینه‌سازی هزینه‌ی پمپاژ در آبخوان آزاد است.

مواد و روش‌ها

رویکرد اصلی این مطالعه استفاده از مدل شبیه‌سازی روش اجزای المان محدود^۱ (FEM) و الگوریتم چند هدفه سطوح شیبدار^۲ (MOIPO) به صورت توأم در قالب یک برنامه یکپارچه به منظور بهینه‌سازی مکان و هزینه‌ی پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری از یک سفره آب زیرزمینی می‌باشد که در محیط MATLAB برنامه‌نویسی انجام شده است. تعداد و موقعیت چاه‌های تأمین‌کننده آب مورد نیاز از آبخوان با هدف بهینه کردن هزینه‌ی پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری با استفاده از مدل FEM-MOIPO حل و بررسی گردید.

معادله‌ی جریان

معادلات پایه آب زیرزمینی با تلفیق قانون‌های پیوستگی و حرکت سبب تشکیل معادلات ریاضی به فرم دیفرانسیل جزئی می‌شود (Ahlfeld and Mulligan, 2000). معادله حاکم بر جریان در آب‌های زیرزمینی در یک آبخوان دو بعدی در شرایط غیرماندگار و ناهمگن به صورت زیر است (Bear, 1979):

آن‌ها نشان داد اگر چه الگوریتم غیرخطی سرعت بیش‌تری نسبت به الگوریتم فراکوشی دارد ولی دقت آن پایین‌تر می‌باشد (Mantoglou et al., 2004).

کتسیفراکیس و پتالا، نیز به حل مسئله جانمایی و تعیین نرخ پمپاژ بهینه‌ی چاه‌ها در آبخوان ساحلی پرداختند. آن‌ها برای مدل‌سازی هجوم آب شور از روش المان مرزی استفاده کردند و مدل مذکور را با الگوریتم ژنتیک تلفیق کرده و جهت حل مسئله استفاده کردند (Katsifarakis and Petala, 2006).

کومار و همکاران، با ترکیب مدل جایگزین شبیه‌سازی ماشین‌های بردار پشتیبان و مدل بهینه‌سازی ازدحام ذرات، یک مدل شبیه‌سازی-بهره‌برداری توسعه داده و از آن به منظور تعیین مکان و نرخ پمپاژ مناسب در عملیات بازیابی زیستی آبخوان استفاده کردند. آن‌ها در این تحقیق تعدادی چاه منتخب در نظر گرفته و از میان آن‌ها بهترین محل و همچنین نرخ بهینه پمپاژ را به دست آورده‌اند (Kumar et al., 2013).

استوارد و آلن، به مدل‌سازی جریان آبخوان دشت‌های مرتفع ایالت کانزاس با استفاده از روش تحلیلی پرداختند و از الگوریتم اجتماع ذرات و لونبرگ-مارکوارد برای بهینه‌سازی نتایج استفاده نمودند. یکی دیگر از روش‌های مورد استفاده در تحقیق آن‌ها، روش بدون شبکه برای حل معادلات حاکم بر حرکت جریان آب زیرزمینی بوده‌است. این روش برداشتی از روش المان محدود بوده، با این تفاوت که سیستم معادلات جبری را برای کل دامنه مسئله بدون استفاده از شبکه از پیش تعیین‌شده ایجاد کرده است و برای این کار، مجموعه‌ای از نقاط پخش‌شده در داخل دامنه را مورد استفاده قرار داده است (Steward and Allen, 2013). آویوز و السی، طی پژوهشی با استفاده از مدل شبیه‌سازی-بهره‌برداری مبتنی بر مدل شبیه‌سازی MODFLOW و الگوریتم فراکوشی جستجوی هارمونی هزینه حفر، تجهیز و پمپاژ از چاه‌های جدید آبخوانی در شهر زمیر ترکیه را به حداقل رساندند. هدف آن‌ها از حل مسئله، جانمایی بهینه چاه‌های بهره‌برداری جدید و تعیین نرخ پمپاژ مناسب به منظور تأمین کلیه نیازهای آبی بود (Ayvaz and Elci, 2013).

السی و آویوز، به بهینه‌کردن هزینه‌ی پمپاژ آب از یک آبخوان ساحلی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی پرداختند. در تحقیق آن‌ها تابع هدف به صورت کمینه‌کردن هزینه‌ی راه‌اندازی، پمپاژ و بیشینه‌کردن نرخ پمپاژ از آبخوان تعریف شده است (Ayvaz and Elci, 2014). صادقی و همکاران، برای اولین بار نرخ پمپاژ دبی در چاه‌های بهره‌برداری از آبخوان را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه، بهینه نمودند (Sadeghi tabas et al., 2016). همچنین کتسیفراکیس و همکاران، کمینه‌سازی هزینه انتقال پمپاژ آب زیرزمینی در حالت غیرماندگار از راه‌حل‌های تحلیلی و تجربی بررسی

1- Finite Element Method

2- Multi Objective Inclined Planes System Optimization (MOIPO)

توابع هدف چندگانه

در این مطالعه توابع هدف مسئله کمینه‌سازی هزینه‌ی پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری و کاهش سطح افت آبخوان می‌باشد که در دو تابع هدف در ادامه بیان می‌گردد. علاوه بر این، محدودیت‌های دیگری مانند محدودیت سرعت جریان، به علت ظرفیت پمپ، هد هیدرولیک آبخوان در فرآیند بهینه‌سازی وجود دارد (Bayer et al., 2009). هزینه‌های پمپاژ، مانند هزینه‌ی ساخت‌وساز شبکه یا لوله، ملاحظات کیفیت آب نیز به روند بهینه‌سازی وارد می‌شوند (Mayer et al., 2014). تابع هزینه‌ی C شامل تمامی هزینه‌های نصب، راه-اندازی ایستگاه پمپاژ، چاه‌ها و پمپ‌ها می‌باشد. C_w هزینه‌ی نصب و راه‌اندازی چاه مطابق معادله‌ی (۶) می‌باشد.

$$C_w = A_1 N_w \quad (۶)$$

که در معادله‌ی (۶)، A_1 هزینه‌ی نصب و راه‌اندازی عملیات حفاری و فیلترگذاری برای هر چاه، N_w تعداد چاه‌ها می‌باشند.

ایستگاه‌های پمپاژ اصلی، که آب را برای سامانه شبکه توزیع فراهم می‌کنند، معمولاً در نزدیکی تأسیسات تصفیه و یا تانک‌های ذخیره آب آشامیدنی قرار گرفته است و به خط لوله‌کشی انتقال می‌یابند. C_{pi} هزینه‌ی کل لوله‌کشی در روند پمپاژ آب از چاه به صورت معادله‌ی (۷) محاسبه می‌گردد.

$$C_{pi} = A_2 L_k \quad (۷)$$

$$A_2 = 1320 D^{0.866} \quad (۸)$$

که A_2 هزینه‌های مربوط به لوله‌کشی در هر متر، L_k طول لوله-کشی بر حسب متر در معادله (۷) می‌باشد. مقدار هزینه‌ی لوله‌کشی در هر متر (A_2) به قطر لوله‌ی مورد استفاده شده در سیستم پمپاژ وابسته می‌باشد. هزینه‌ی نصب، راه‌اندازی و انرژی مورد استفاده در پمپ برای کل چاه‌ها (C_p) به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_p = C_{pe} + C_{pp} \quad (۹)$$

$$C_{pe} = \frac{8.76 \rho g Q h R_e}{\zeta} \quad (۱۰)$$

$$P = \frac{\rho g Q H}{1000 \zeta} \quad (۱۱)$$

C_{pp} هزینه‌ی نصب و راه‌اندازی پمپ برای کل چاه‌ها، C_{pe} هزینه‌ی برق مورد استفاده در پمپ می‌باشد که به توان پمپ (P) وابسته است. Q نرخ پمپاژ، ρg وزن مخصوص آب بر حسب نیوتن بر متر مربع، H ارتفاع پمپاژ (مجموع ارتفاع چاه و ارتفاع مخزن ذخیره-سازی آب)، ζ بازده پمپ، R_e نرخ هزینه‌ی هر واحد برق مصرف شده در هر ساعت (بر حسب کیلو وات در ساعت) می‌باشد. تابع هزینه با توجه به معادلات (۶) تا (۱۱) به شرح معادله‌ی (۱۲) می‌باشد. همچنین با بررسی موضوعات اساسی در بررسی تغییرات کمی منابع آب زیرزمینی از جمله اندازه‌گیری پارامتر سطح آب زیرزمینی و بهینه-سازی میزان بهره‌برداری می‌توان به مدیریت صحیح منابع آبی

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \cdot h \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \cdot h \frac{\partial h}{\partial y} \right] = S \frac{\partial h}{\partial t} + \quad (۱)$$

$Q_w \delta(x - x_i)(y - y_i) - q$ که در معادله‌ی (۱)، k_x و k_y به ترتیب ضریب هدایت هیدرولیکی در جهت x (مترمربع بر روز)، S ضریب ذخیره‌ی آبخوان، x ، y فاصله افقی و قائم (متر)، \bar{Q}_w دبی تخلیه و تغذیه (متر مکعب بر روز)، t زمان بر حسب روز و h ارتفاع سطح آب زیرزمینی در آبخوان می‌باشد.

شرایط اولیه به صورت زیر قابل بیان است:

$$h(x, y, 0) = h_0(x, y), x, y \in \Omega \quad (۲)$$

شرایط مرزی به دو صورت زیر ارائه می‌شود:

شرایط مرزی دیریکله (شرایط مرزی با هد ثابت)

$$h(x, y, t) = h_1(x, y, t), x, y \in \partial\Omega_1 \quad (۳)$$

شرایط مرزی نیومن

$$K \frac{\partial h}{\partial n} = q(x, y, t), x, y \in \partial\Omega_2 \quad (۴)$$

در معادلات فوق Ω محدوده‌ی جریان، $h_0(x, y)$ بار (متر)، $h_1(x, y, t)$ بار (متر)، $\partial h / \partial n$ مشتق در جهت بردار یکه‌ی عمود بر مرز یعنی n می‌باشد، K بردار ضرایب هدایت هیدرولیکی، $q(x, y, t)$ نرخ جریان معلوم (متر مکعب بر روز بر متر) و δ تابع دلتای دایرکت است با این خاصیت که اگر $x = x_i$ و $y = y_i$ باشد آن‌گاه $\delta = 1$ و در غیر این صورت $\delta = 0$ خواهد بود. همچنین $\partial\Omega_1$ مرز دریکله و $\partial\Omega_2$ مرز نیومن می‌باشد و بنابراین مرز دامنه بصورت $\partial\Omega = (\partial\Omega_1 \cup \partial\Omega_2)$ تعریف می‌شود.

معادلات اجزای محدود جریان آب زیرزمینی

حل تحلیلی این معادله در شرایط سیستم پیچیده آبخوان ممکن نیست. بنابراین برای رسیدن به پاسخ تقریبی در چنین سیستمی، از روش‌های عددی استفاده می‌شود. در این راستا در این مطالعه از روش عددی اجزاء محدود یا روش المان محدود (FEM) استفاده می‌گردد. اغلب راه‌حل‌های روش عناصر محدود بر پایه روش گالرکین^۱ استوار می‌باشد (Chiang, and Kinzelbach, 2001). در این شبکه‌بندی، در هر گره پارامتر مجهول ارتفاع سطح آب می‌باشد. معادله‌ی جریان آب زیرزمینی به روش اجزاء محدود به شرح زیر ارائه می‌شود (Pinder and Gray, 1977):

$$[G]\{h_i^{t+\Delta t}\} + \frac{1}{\Delta t} [P]\{(h_i^{t+\Delta t}) - (h_i^t)\} = \{F\} \quad (۵)$$

در معادله (۵)، $\{F\}$ بردار جریان، $[G]$ ماتریس سختی کل، Δt زمان، $[P]$ ماتریس ذخیره و $\{(h_i^{t+\Delta t}) - (h_i^t)\}$ سطح آب برای دو فاصله‌ی زمانی t و $t + \Delta t$ می‌باشد.

$$\vec{x}_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^n) \quad (16)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}, \quad 1 \leq j \leq n \quad (17)$$

در معادله (۱۶)، موقعیت توپ نام در بُعد d ام در فضای n بعدی است. هدف پیدا کردن موقعیت $f(\vec{x})$ مینیمم تابع هدف می باشد که در زمان t زاویه θ_{ij}^d بین توپ نام و توپ نام در بُعد d به صورت معادله (۱۸) قابل محاسبه می باشد.

$$\theta_{ij}^d(t) = \left(\tan^{-1} \left(\frac{f_j(t) - f_i(t)}{x_i^d(t) - x_j^d(t)} \right) \right) \quad (18)$$

$$d = 1, \dots, n; \quad i, j = 1, 2, \dots, N; \quad i \neq j$$

مقدار $f_i(t)$ تابع هدف برای توپ نام در زمان نام است. جهت کاهش پیچیدگی محاسبات و جواب های بهینه تر شتاب هر توپ در هر بعد به طور جداگانه از دیگر ابعاد محاسبه می گردد. توپ ها باید به پایین ترین نقطه در سطح شیب دار حرکت کند به دلیل شتاب توپ هایی که در ارتفاع پایین تر قرار دارند در حل مسئله به کار گرفته می شود. بر اساس قانون دوم نیوتن و برای محاسبه ی شتاب داریم:

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (19)$$

$$a = g \cdot \sin(\theta) \quad (20)$$

پارامتر g نشان دهنده شتاب گرانشی است و از علوم دینامیک گرفته شده زیرا الگوریتم IPO از دینامیک و حرکت الهام گرفته است. شتاب توپ نام در زمان نام در بُعد d ام در الگوریتم IPO با اعمال تغییرات به صورت زیر محاسبه می شود:

$$a_i^d(t) = \sum_{j=1}^N U(f_j(t) - f_i(t)) \cdot \sin(\theta_{ij}^d(t)) \quad (21)$$

که در آن U تابع پله واحد است. سرعت توپ نام در بُعد d ام نیز همانند قوانین حرکت به صورت زیر محاسبه می شود:

$$v_i^d(t) = \frac{x_{best}^d(t) - x_i^d(t)}{\Delta t} \quad (22)$$

که در آن x_{best}^d تویی با بهترین برانزنگی در کل تکرارها می باشد. با استفاده از قوانین حرکت بروزرسانی موقعیت توپ ها را محاسبه می نماییم.

$$x_i^d(t+1) = k_1 \cdot r_1 \cdot a_i^d(t) \cdot \Delta t^2 + k_2 \cdot r_2 \cdot v_i^d(t) \cdot \Delta t + x_i^d(t) \quad (23)$$

که در آن r_1 و r_2 دو عدد تصادفی در بازه $[0, 1]$ هستند. k_1 و k_2 نیز دو ضریب جهت کنترل فرآیند الگوریتم هستند که با آزمون و خطا دو عدد ثابت در نظر گرفته شده اند.

معرفی روش MOIPO

در الگوریتم چند هدفه ی بهینه سازی سطوح شیب دار (MOIPO) از روش بهینگی پرتو برای شناسایی موقعیت های غیر غالب و از یک مخزن بیرونی برای نگهداری این موقعیت ها استفاده می شود. ابتدا جمعیت اولیه با توجه به محدوده مشخص شده به صورت تصادفی ایجاد می شود، برانزنگی جمعیت محاسبه می شود و از میان آن ها،

پرداخت. در این مطالعه مینیم سازی افت سطح آب در آبخوان با استفاده از تابع OBJ بهینه می گردد.

$$\min C = \sum_k (A_2 L_k + \frac{8.76 \rho g Q_k h_k R_e}{\zeta}) + \alpha P(Q) \quad (12)$$

$$\min OBJ = \sum_k (h'_k - h_k) + \xi P(Q) \quad (13)$$

در معادله (۱۳) مقدار h'_k هد بدست آمده برای هر چاه بعد از t روز پمپاژ، h_k هد هر چاه در شبیه سازی، ξ عدد ثابت در این جا مقدار یک برای آن در نظر گرفته شده است، $P(Q)$ تابع پنالتی می باشد که با قیود (۱۴ و ۱۵) باید برقرار گردد. در معادله (۱۲)، C مقدار تابع هزینه جهت مینیم سازی هزینه ی پمپاژ چاه ها در آبخوان Q_k دبی پمپاژ شده از هر چاه، h_k هد بدست آمده هر چاه در شبیه سازی، α عدد ثابت در این جا مقدار یک برای آن در نظر گرفته شده است، $P(Q)$ تابع پنالتی می باشد که با قیود زیر تابع C و OBJ باید برقرار گردد:

$$\text{if } \sum_k Q_k < Q_{demand}, \quad P(Q) = Q_{demand} - \sum_k Q_k \quad (14)$$

$$\text{if } \sum_k Q_k \geq Q_{demand}, \quad P(Q) = 0 \quad (15)$$

$$Q_{min} \leq Q_k \leq Q_{max}$$

Q_{demand} میزان دبی تقاضای آبی که باید از هر چاه برداشت

شود، Q_{max} حداکثر دبی مجاز پمپاژ در هر چاه، Q_{min} حداقل دبی مجاز پمپاژ در هر چاه می باشد.

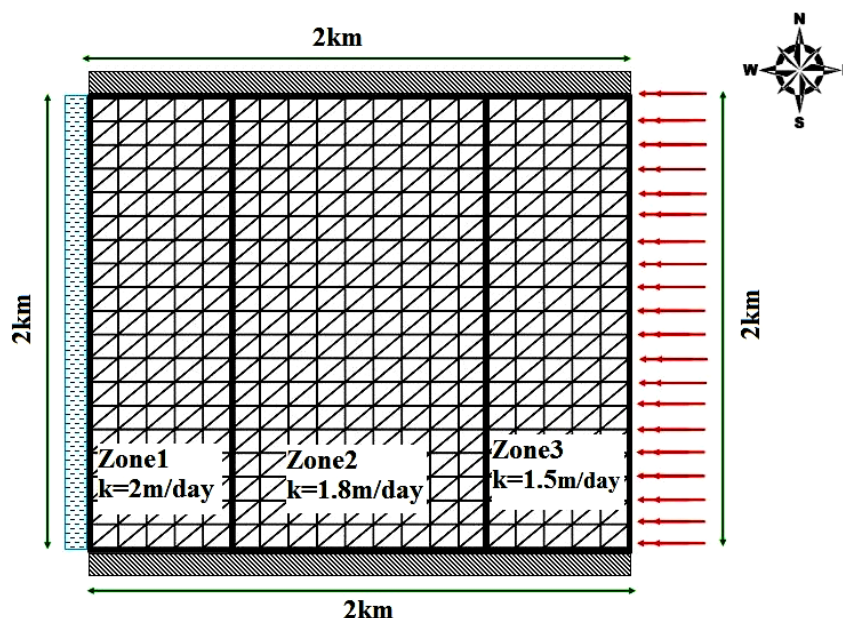
الگوریتم بهینه سازی سطوح شیب دار

بسیاری از مسائل بهینه سازی در مهندسی، طبیعتاً پیچیده تر و مشکل تر از آن هستند که با روش های مرسوم بهینه سازی نظیر روش برنامه ریزی ریاضی و نظایر آن قابل حل باشند. از جمله راه حل های موجود در برخورد با این گونه مسائل، استفاده از الگوریتم های تقریبی یا ابتکاری است. الگوریتم بهینه سازی صفحات شیب دار (IPO) نمونه ای از الگوریتم های ابتکاری و هوشمند است که در جهت پیدا کردن نقاط بهینه با استفاده از قوانین حاکم بر طبیعت الهام گرفته است (Mozaffari and Zahiri, 2014).

نحوه ی کار این الگوریتم حرکت دینامیکی اجسام کروی بر روی سطح شیب دار بدون اصطکاک و تمایل آن ها برای رسیدن به پایین ترین نقطه است. این توپ ها فضای جستجوی را برای یافتن نقطه ی بهینه که همان پایین ترین نقطه (نسبت به یک نقطه مرجع) بر روی سطح است، جستجو می کنند. در این الگوریتم، به هر توپ یک ارتفاع داده می شود که این ارتفاع بر اساس تابع برانزنگی هر توپ که جوابی از مسئله است به دست می آید. طبق قوانین فیزیک، توپ ها تمایل دارد شتاب گرفته و انرژی پتانسیل خود را برای رسیدن به پایین ترین نقطه از دست بدهند. در این الگوریتم هر توپ سه مختصات دارد: موقعیت، ارتفاع و زاویه نسبت به توپ های دیگر، سیستمی با N توپ را در نظر گرفته شده است. موقعیت هر توپ را می توان به صورت زیر نشان داد (اسماعیلی و ظهیری، ۱۳۹۳).

مثال مورد مطالعه

در این مطالعه یک آبخوان آزاد به مساحت ۴ کیلومتر مربع به شرح شکل (۱) در نظر گرفته شد که دارای شرایط متفاوت از نظر ضرایب هیدرودینامیکی می‌باشد. این محدوده به ۸۰۰ المان‌های مثلثی تقسیم شده است که تعداد ۲۰۰ المان شرقی منطقه هدایت هیدرولیکی برابر با ۱/۵ متر در روز، ۴۰۰ المان مرکزی هدایت هیدرولیکی برابر با ۱/۸ متر در روز و ۲۰۰ المان غربی منطقه هدایت هیدرولیکی برابر با ۲ متر در روز را دارا می‌باشد. ضخامت این آبخوان برابر با ۵۰ متر است. آبخوان مورد مطالعه در نظر گرفته شده از سمت جنوب و شمال بدون تغذیه و تخلیه می‌باشد. این آبخوان از سمت شرق تغذیه می‌شود و در قسمت غربی آبخوان نیز یک رودخانه با هدایت ثابت قرار دارد. دبی تغذیه از قسمت شرقی حوضه از هر گره بین صفر تا ۵۰ مترمکعب بر روز متغیر می‌باشد.



شکل ۱- نمای شماتیک آبخوان مورد مطالعه

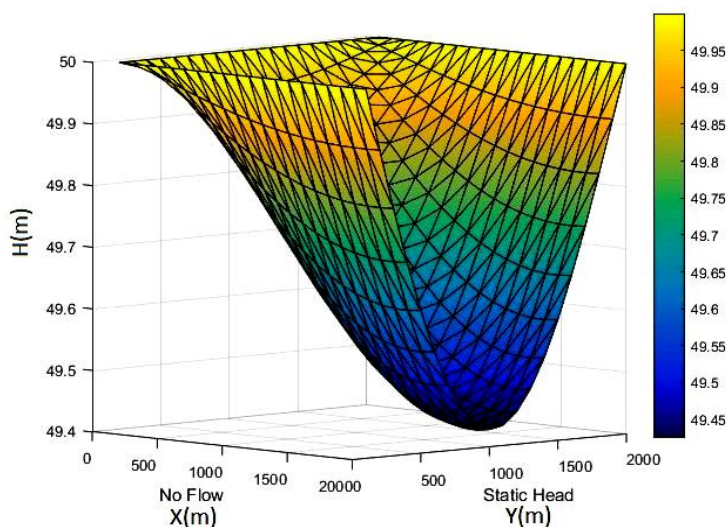
واقع در مرکز آبخوان مورد بررسی قرار گرفته است. در سناریوی اول ۵ حلقه چاه و در سناریوی دوم ۶ حلقه چاه و در سناریوی سوم ۷ حلقه چاه به عنوان چاه‌های برداشت فعال در نظر گرفته شده است و بقیه‌ی چاه‌ها غیر فعال گشته‌است. در این تحقیق توابع هدف مورد استفاده کاهش هزینه‌ی پمپاژ از آب زیرزمینی در مجموع گره‌های آبخوان و کاهش افت سطح آب زیرزمینی با توجه به نیاز آبی الگوی کشت مورد نظر بمدت ۲۴۰ روز با دبی ۳/۷۶ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که قبل از این که هر عضو از جمعیت گره‌ای را انتخاب کند، گره‌های موجود در چهار ضلع آبخوان از مجموع گره‌های قابل انتخاب حذف شده‌اند. بدین معنی که هیچ یک از اعضای جمعیت نمی‌توانند در این گره‌ها (مرزهای آبخوان) موقعیتی را اخذ کند.

بهترین توپ‌ها در یک مخزن بیرونی شامل پاسخ‌های پرتو نگهداری می‌شود. سپس با توجه به الگوریتم IPO، موقعیت هر توپ برای تکرار بعدی الگوریتم بروز رسانی می‌شود. این بروز رسانی شامل قرار دادن توپ‌ها غیر چیره شده فعلی در مخزن است. به‌طور همزمان هر توپ چیره نشده در فرآیندی از مخزن حذف می‌شود. از آن جایی که ظرفیت مخزن محدود می‌باشد هر زمان که ظرفیت مخزن از حد استاندارد گذشت، به هر ابر مکعب احتمالی متناسب با تعداد توپ در هر ابر مکعب نسبت می‌دهیم و از طریق چرخ رولت ابر مکعب انتخاب و به‌طور تصادف نقطه مازاد حذف می‌شود این روند تا زمانی که حجم مخزن به حد نصاب برسد ادامه می‌یابد (صیادی و ظهیری، ۱۳۹۵).

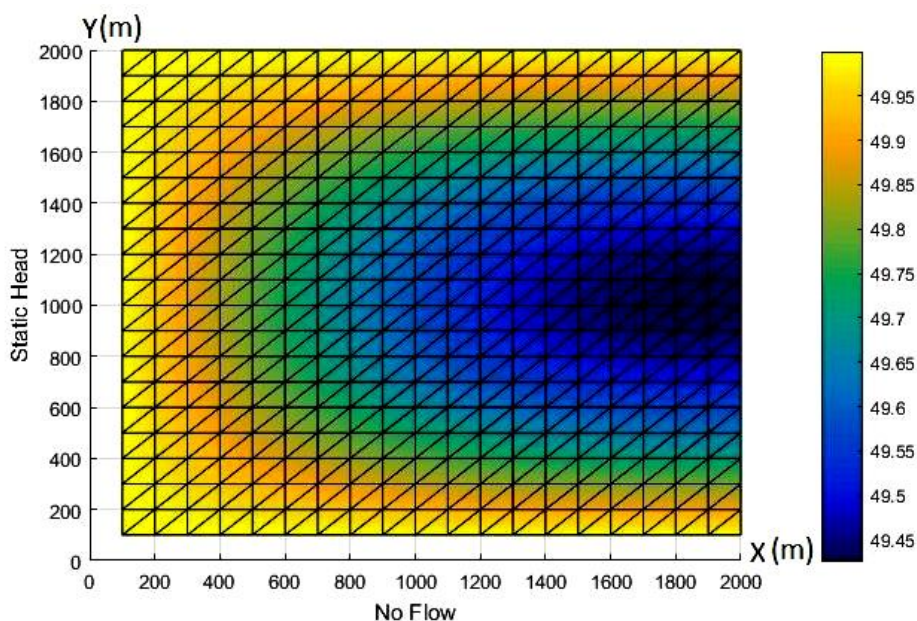
بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که بیان گردید، در این مطالعه جهت بهینه‌سازی هزینه‌ی پمپاژ چاه‌ها در یک آبخوان مصنوعی از تلفیق دو روش اجزاء محدود و سطوح شیب‌دار استفاده شد. سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در آبخوان ذکر شده با استفاده از روش اجزاء محدود در هر گره اجزای محدود و بدون در نظر گرفتن پمپاژ اولیه به صورت شکل ۲ ارائه گردید.

مطابق شکل ۳ تعداد ۱۸ چاه پمپاژ در آبخوان در موقعیت‌های متفاوت قرار گرفته است. در این مطالعه تعداد ۳ سناریو برای بررسی هزینه‌ی بهینه برای برداشت از آبخوان جهت آبیاری زمین کشاورزی



(الف)

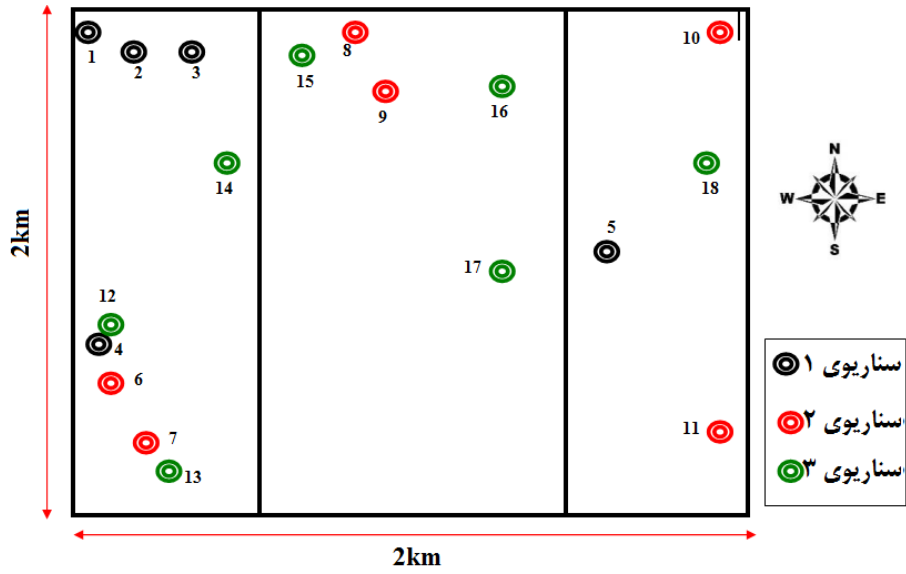


(ب)

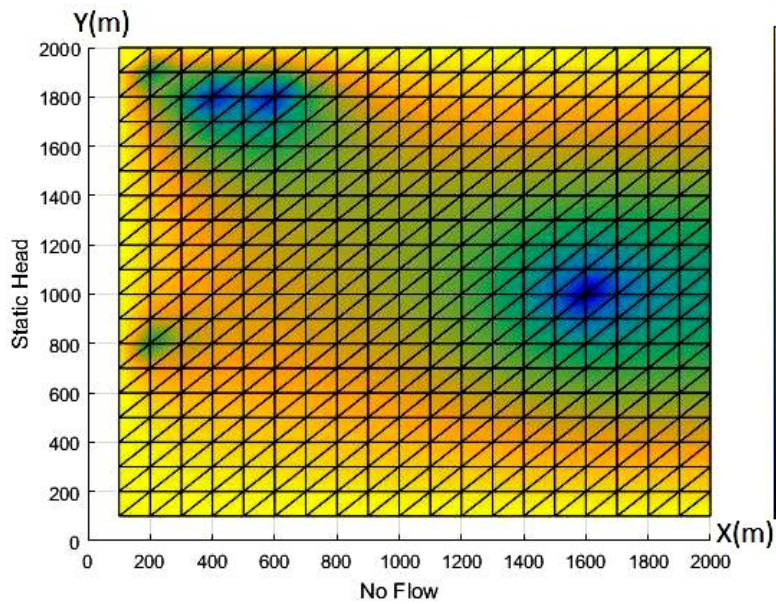
شکل ۲- سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بر حسب متر
(الف: سطح سه بعدی آبخوان و ب: سطح دو بعدی آبخوان)

مشاهده شد. همچنین مشاهده می‌شود که اعضای جمعیت در الگوریتم استفاده شده در این تحقیق تمایل به انتخاب موقعیت‌هایی نزدیک به ضلع غربی آبخوان (در نزدیکی رودخانه با هد ثابت) داشته و چاه‌های برداشت را در این گره‌ها مکان‌یابی کرده است (جدول ۱).

معادله‌ی (۱۵) با توجه به قیود (۱۳) و (۱۴) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی سطوح شیبدار با حداکثر تعداد ۳۰ تکرار مورد بررسی قرار گرفت. پس از عملکرد مدل بهینه‌ساز سطح آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه و موقعیت چاه‌های برداشت به شرح شکل‌های ۴ تا ۶



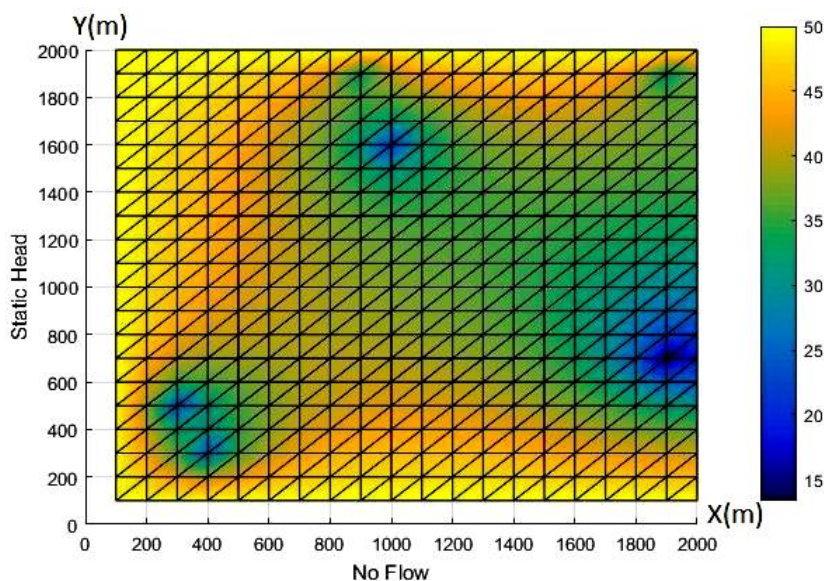
شکل ۳- نحوه‌ی قرارگیری چاه‌های پمپاژ در آبخوان مورد مطالعه



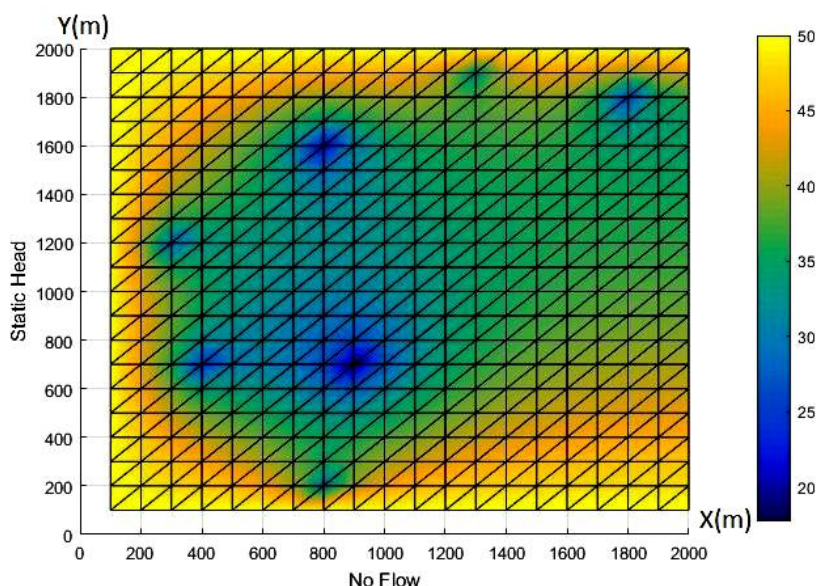
شکل ۴- نتایج درون‌یابی سطح آب زیرزمینی آبخوان در سناریوی ۱ (بر حسب متر)

جدول ۱- مختصات بهینه‌ی چاه‌ها

تعداد	شماره	X(متر)	Y(متر)	تعداد	شماره	X(متر)	Y(متر)	تعداد	شماره	X(متر)	Y(متر)
	۱	۲۰۰	۱۹۰۰	۶	۶	۳۰۰	۵۰۰	۱۲	۱۲	۳۰۰	۱۲۰۰
	۲	۲۰۰	۸۰۰	۷	۷	۴۰۰	۳۰۰	۱۳	۱۳	۴۰۰	۷۰۰
	۳	۴۰۰	۱۸۰۰	۸	۸	۹۰۰	۱۹۰۰	۱۴	۱۴	۸۰۰	۲۰۰
۵	۴	۶۰۰	۱۸۰۰	۹	۹	۱۰۰۰	۱۶۰۰	۱۵	۱۵	۸۰۰	۱۶۰۰
	۵	۱۰۰۰	۱۶۰۰	۱۰	۱۰	۱۹۰۰	۱۹۰۰	۱۶	۱۶	۹۰۰	۷۰۰
				۱۱	۱۱	۱۹۰۰	۷۰۰	۱۷	۱۷	۱۳۰۰	۱۹۰۰
								۱۸	۱۸	۱۸۰۰	۱۸۰۰



شکل ۵- نتایج درون‌یابی سطح آب زیرزمینی در سناریوی ۲ (بر حسب متر)



شکل ۶- نتایج درون‌یابی سطح آب زیرزمینی در سناریوی ۳ (بر حسب متر)

بهینه‌سازی سطح شیبدار در آبخوان مورد مطالعه و پس از ۳۰ تکرار در سه سناریوی ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۱۰۵/۸۲، ۱۵۶/۸۹ و ۱۷۲/۳۷ متر می‌باشد. لذا در این مرحله می‌توان سناریوی اول را به عنوان سناریوی بهینه جهت تعداد و موقعیت بهینه‌ی چاه‌ها انتخاب نمود. همچنین نتایج نشان داد که پتانسیل آبدهی آبخوان در ناحیه‌ی ۱ با مرز رودخانه با هد ثابت بالاتر از ناحیه‌ی ۳ می‌باشد. مطابق با جدول ۳، سطح آب در چاه‌های ناحیه‌ی ۱ بالاتر از سطح آب در ناحیه ۲ و ۳ می‌باشد.

معادله‌ی (۱۲) و (۱۳) با توجه به قیود (۱۴) و (۱۵) با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز صفحات شیبدار چند هدفه مورد بررسی قرار گرفت.

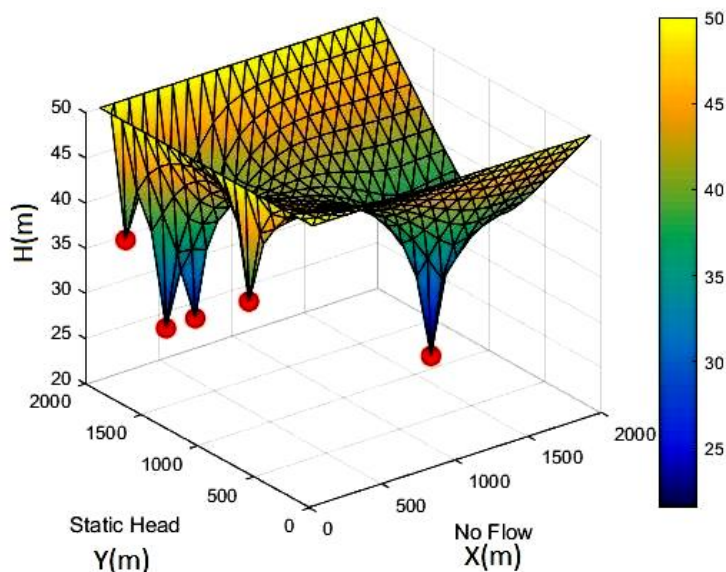
با این مکان‌یابی میزان افت سطح آب زیرزمینی آبخوان در مجموع گره‌ها به حداقل می‌رسد. لازم به ذکر است که در آبخوان مورد مطالعه، سطح اولیه آب زیرزمینی از یک سطح میناء برابر با ۵۰ متر می‌باشد که با توجه به شکل‌های ۷، ۸ و ۹ می‌توان مشاهده کرد که حداکثر افت در سناریوی اول برابر ۲۸/۴۹ متر در ضلع شرقی آبخوان، در سناریوی دوم و سوم به ترتیب ۳۶/۶۴ و ۳۲/۲۸ متر در ضلع شمال شرقی و شرق آبخوان می‌باشد. همان‌طور که در نتایج نشان داده شده است کم‌ترین افت در سناریوی ۱ (۵ حلقه چاه پمپاژ) رخ داده است. مجموع افت تمام چاه‌های پمپاژ پس از تحلیل در مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز با استفاده از تلفیق روش اجزاء محدود و الگوریتم

هم دیگر هستند سناریوی اول به عنوان سناریوی بهینه انتخاب - گردید.

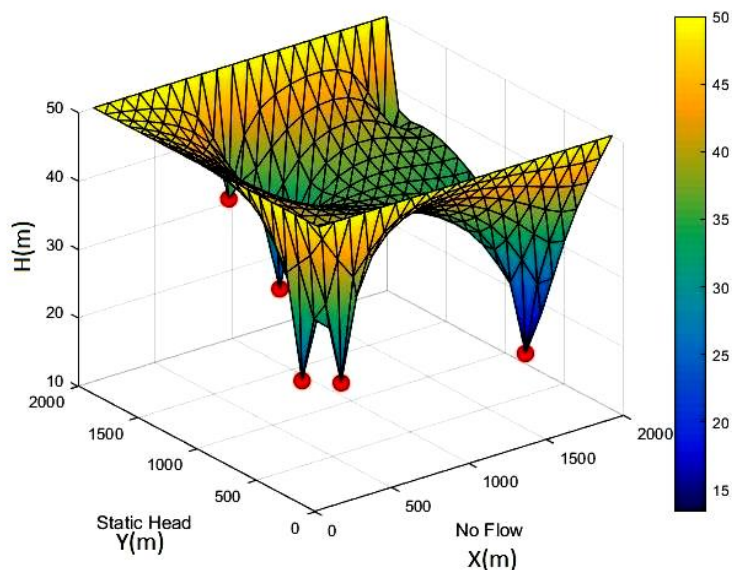
ارزیابی عملکرد مدل شبیه‌ساز اجزای محدود

خطای میانگین، خطای میانگین مطلق و خطای جذر میانگین مربعات به‌عنوان معیارهایی برای تشخیص عملکرد مدل استفاده شدند که در روابط (۲۴) تا (۲۶) ارائه می‌گردد.

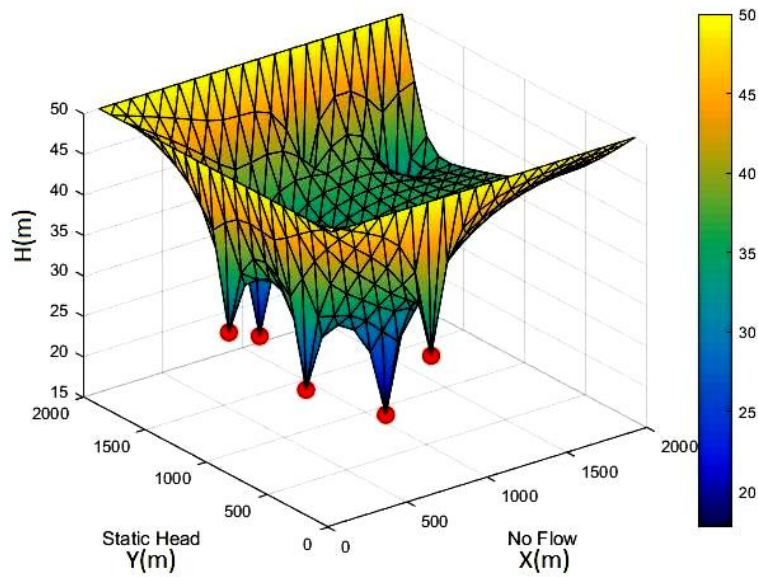
در این روابط توابع مورد استفاده در روش پیشنهادی الگوریتم MOIPO در ادامه آورده شده است. گزارش نتایج به‌دست آمده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ از انجام ۱۰۰ تکرار حلقه الگوریتم و ۲۰ بار تکرار مستقل الگوریتم در ادامه آمده است. همان‌طور که نتایج نشان داده است با افزایش تعداد چاه‌ها هزینه کلی افزایش پیدا می‌کند. با توجه به این که افت سناریوی اول با سناریوی سوم با هم برابر می‌باشد با ارزیابی هزینه با توجه به این که هزینه سناریوی سوم (۷ حلقه چاه پمپاژ) از سناریوها بالاتر می‌باشد لذا این سناریو حذف می‌گردد. از بین سناریوی اول و دوم با توجه به این هزینه‌های اجرای آن نزدیک به



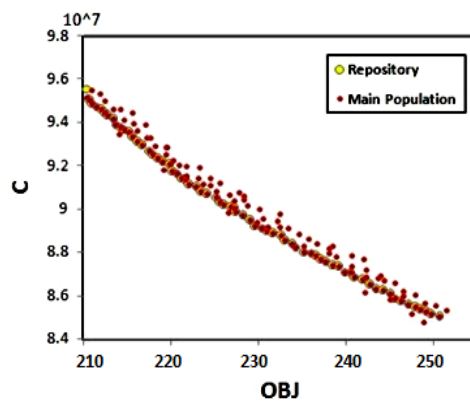
شکل ۷- میزان افت سطح آب زیرزمینی آبخوان در سناریوی ۱ (بر حسب متر)



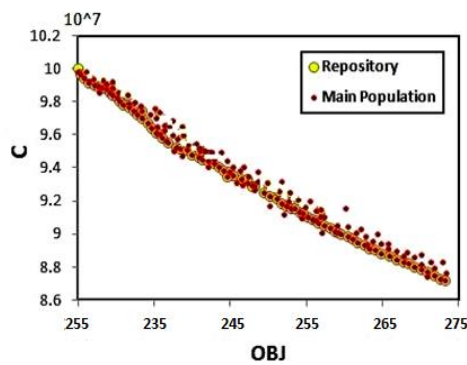
شکل ۸- میزان افت سطح آب زیرزمینی آبخوان در سناریوی ۲ (بر حسب متر)



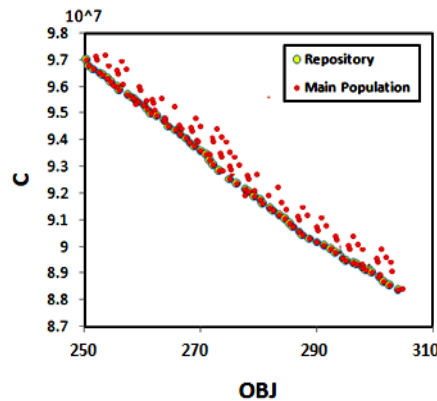
شکل ۹- میزان افت سطح آب زیرزمینی آبخوان در سناریوی ۳ (بر حسب متر)



شکل ۱۰- جبهه‌ی پرتوی تولید شده برای توابع هدف توسط MOIPO در سناریوی ۱



شکل ۱۱- جبهه‌ی پرتوی تولید شده برای توابع هدف توسط MOIPO در سناریوی ۲



شکل ۱۲- جبهه‌ی پرتوی تولید شده برای توابع هدف توسط MOIPO در سناریوی ۳

(MOIPO) معیارهای استاندارد GD^1 و SP^T استفاده می‌شود. معیار GD به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری نزدیکی پاسخ‌های یافت شده غیر چیره شده توسط الگوریتم به مجموعه بهینه‌ی جبهه‌ی پرتو استفاده می‌شود (Zitzler et al., 2000).

$$GD = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n} \quad (27)$$

در معادله (۲۷)، n تعداد پاسخ‌های یافت شده غیر چیره و d_i^2 فاصله اقلیدوسی بین هر کدام از این اعضا و نزدیک‌ترین عضو از مجموعه‌ی بهینه پرتو می‌باشد که در فضای هدف اندازه‌گیری می‌شود. واضح است که اگر $GD = 0$ شود، نشان می‌دهد که تمامی اعضا در مجموعه بهینه‌ی پرتو می‌باشد.

معیار SP نیز به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری پراکندگی پاسخ‌های یافت شده غیر چیره شده در طول جبهه پرتو استفاده می‌شود. اگر $SP = 0$ شود، نشان می‌دهد که تمامی اعضا در مجموعه بهینه‌ی پرتو با فاصله‌ی یکسان از هم‌دیگر قرار دارند (Van Veldhuizen, and Lamont, 1998).

$$SP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2}{n-1}} \quad (28)$$

در معادله (۲۸)، n تعداد پاسخ‌های یافت شده غیر چیره و \bar{d} میانگین d_i ها می‌باشد. که مقدار d_i از در معادله (۲۹) بدست می‌آید.

$$d_i = \min_j (|f_1^i(x) - f_1^j(x)| + |f_2^i(x) - f_2^j(x)|) \quad (29)$$

بررسی کمی عملکرد الگوریتم MOIPO در جدول ۳ آورده شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد الگوریتم چند هدفه‌ی بهینه‌سازی سطوح شیب‌دار از عملکرد خوبی برخوردار است.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{h}_o - h_s)}{n} \quad (24)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{h}_o - h_s|}{n} \quad (25)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{h}_o - h_s)^2}{n}} \quad (26)$$

که در آن \hat{h}_o و h_s به ترتیب سطح آب زیرزمینی مشاهده شده و مدل‌سازی شده است و n تعداد المان‌ها در آبخوان مورد مطالعه می‌باشد (Sadeghi tabas et al., 2016).

بررسی دقت و خطای روش اجزای محدود، سطح آب زیرزمینی مدل‌سازی شده از این روش با آب زیرزمینی مشاهده شده در پیژومترهای آبخوان در جدول (۲) نشان داده شده است. مقایسه‌ی سطح آب زیرزمینی مدل‌سازی شده با آب زیرزمینی مشاهده شده در آبخوان مورد مطالعه نشان از قدرت بالای روش عددی به کارگرفته شده جهت ورود این داده‌ها به مدل بهینه‌ساز الگوریتم سطوح شیب‌دار می‌باشد. سطح آب زیرزمینی محاسبه شده از مدل شبیه‌ساز اجزای محدود با سطح مشاهده‌ای جهت اعتبارسنجی با ذکر خطای نسبی در جدول (۲) ارائه گشته‌اند. در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی زمانی نتایج قابل قبول می‌شوند که خطای جذر میانگین مربعات آن در بازه‌ی ± 0.3 باشد (Anderson et al., 2015). با توجه به مقادیر جدول (۳) مقدار خطای جذر میانگین در بازه‌ی قابل قبول است، بنابراین روش استفاده شده جهت شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی کارآمد و دقیق می‌باشد.

بررسی کمی عملکرد الگوریتم MOIPO

بررسی کمی عملکرد چند هدفه‌ی بهینه‌سازی سطوح شیب‌دار

- 1- Generational distance
- 2- Spacing

جدول ۲- مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی شده اجزای محدود و داده‌های مشاهداتی در چاه‌ها

تعداد چاه‌ها	شماره‌ی چاه	سطح بهینه‌ی آب پس از پمپاژ بر حسب متر	سطح آب قبل پمپاژ مشاهده‌ای بر حسب متر (ho)	سطح آب قبل پمپاژ شبیه‌سازی شده بر حسب متر (hs)	خطای نسبی (متر) ($\times 10^{-5}$)
	۱	۳۵/۰۴	۵۰	۴۹/۹۹	۲
	۲	۳۶/۲۶	۵۰	۴۹/۹۵	۱۰
۵	۳	۲۵/۴۰	۵۰	۴۹/۹۵	۱۰
	۴	۲۵/۴۶	۵۰	۴۹/۹۲	۱۶
	۵	۲۱/۵۱	۵۰	۴۹/۴۴	۱۱۲
	۶	۲۲/۴۶	۵۰	۴۹/۹۳	۱۲
	۷	۲۳/۲۵	۵۰	۴۹/۹۴	۱۰
	۸	۳۱/۹۸	۵۰	۴۹/۹۴	۱۰
۶	۹	۲۰/۸۷	۵۰	۴۹/۷۵	۴۲
	۱۰	۳۱/۱۹	۵۰	۴۹/۹۱	۱۵
	۱۱	۱۳/۳۶	۵۰	۴۹/۵۰	۸۳
	۱۲	۲۷/۵۸	۵۰	۴۹/۹۰	۱۴
	۱۳	۲۳/۸۸	۵۰	۴۹/۸۴	۲۳
	۱۴	۲۹/۶۴	۵۰	۴۹/۶۷	۴۷
۷	۱۵	۲۰/۸۳	۵۰	۴۹/۸۰	۲۹
	۱۶	۱۷/۷۲	۵۰	۴۹/۸۵	۲۱
	۱۷	۳۲/۴۳	۵۰	۴۹/۹۲	۱۱
	۱۸	۲۵/۵۵	۵۰	۴۹/۸۳	۲۴

جدول ۳- محاسبه خطای میانگین، مطلق میانگین و جذر میانگین مربعات (متر)

خطای میانگین (ME)	۰/۱۶۵
خطای مطلق میانگین (MAE)	۰/۱۶۵
خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)	۰/۲۲۴

جدول ۴- نتایج معیار نزدیکی و معیار پراکندگی توسط MOIPO

معیار	محدوده	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳	معیار	محدوده	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳
مینیم	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۲۷	مینیم	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۲۷
ماکزیم	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۷۸	ماکزیم	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۷۸
مُد	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۵۳	مُد	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۵۳
میانگین	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۶۱	میانگین	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۶۱

نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل تلفیقی شبیه‌سازی عددی با گسسته‌سازی اجزای محدود، بر اساس مدل بهینه‌سازی چند هدفه‌ی الگوریتم سطوح شیبدار ارائه شد. با توجه به دقت بالا، کارایی و صرفه‌جویی زمانی در مدل‌سازی، مدل FEM-MOIPO می‌تواند به‌عنوان یک مدل بهینه جهت بهره‌برداری بهینه از آبخوان با هدف کاهش هزینه‌های پمپاژ استفاده گردد. نتایج نشان داد که استفاده همزمان از

الگوریتم سطوح شیبدار و اجزای محدود می‌تواند در مدیریت بهینه جهت کاهش افت سطح آب زیرزمینی و هزینه‌های پمپاژ کمک شایانی نماید. همچنین نتایج این مطالعه نشان داده است که سناریوی ۱ با وجود ۵ چاه که موقعیت مکانی ۴ چاه آن در ناحیه‌ی ۱ واقع شده نسبت به دو سناریوی دیگر از افت و هزینه‌ی کم‌تری برخوردار است و به عنوان سناریوی بهینه جهت برداشت از آبخوان انتخاب شد.

- Hydrologic Engineering. 21. 7.
- Bear, J. 1979. *Hydraulics of ground water*. New York. NY: McGraw-Hill. 1979.
- Chiang, W.H., and Kinzelbach, W. 2001. 3D groundwater modeling with PMWIN. ed. F. Edition. Vol. ISBN 3-45067744. 2001. Springer Berlin Heidelberg New York.
- Elci, A., and Ayvaz, M. 2014. Differential-evolution algorithm best optimization for the site selection of groundwater production wells with the consideration of the vulnerability concept. *Journal of Hydrology*. 511: 736-749.
- Guar, S., Chahar, B. R., and Grailot, D. 2011. Analatic elements method and particle swarm optimization based on simulation-optimization model for groundwater management. *Journal of Hydrology*. 402: 217-227.
- Heydari, F., Saghafian, B., and Delavar, M. 2016. Coupled quantity-quality simulation-optimization model for conjunctive surface-groundwater use. *Water Resour Manag.* 30. 12: 4381-4397.
- Kontos, Y. 2013. *Optimal Management of Fractured Coastal Aquifers with Pollution Problems*, in Aristotle Univ. of Thessaloniki.
- K., Moutsopoulos, Papaspyros, J., and Tsihrintzis, V. 2017. Management of groundwater resources using surface pumps: optimization using genetic algorithms and the Tabu Search method. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 21. 7: 2968-2976.
- Katsifarakis, K., and Petala, Z. 2006. Combining genetic algorithms and boundary element to optimize coastal aquifers management. *Journal of Hydrology*. 327.1-2: 200-207.
- Katsifarakis, K.L., Nikolettos, I.A., and Stavridis, C. 2017. Minimization of Transient Groundwater Pumping Cost - Analytical and Practical Solutions. *Journal Water Resources Management*. 1-17.
- Kumar, C. S. D., Prasad, R., and Mathur, S. 2013. Optimal design of an in-situ bioremediation system using support vector machine and particle swarm optimization. *Journal of Contaminant Hydrology*. 151: 105-116.
- Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. 2015. Review: coastal groundwater optimization-advances, challenges, and practical solutions. *Journal of Hydrogeology*. 23. 6: 1129-1154.
- Mayer, A.S., Kelley, C.T., and Miller, C.T. 2002. Optimal design for problems involving flow and transport phenomena in subsurface systems. *Advances in Water Resources*. 25: 1233-1256.
- اسماعیلی م.ر.، ظهیری، س.ح. ۱۳۹۳. تشخیص صرع در سیگنال EEC با استفاده از ویژگی طول خط و طبقه بندی مبتنی بر الگوریتم IPO. دومین کنفرانس بین المللی بازشناسی الگو و تحلیل تصویر ایران، دانشگاه گیلان، ایران.
- شیخ‌خوزانی، ز.، حسینی، خ.، رحیمیان، م. ۱۳۸۹. مدلسازی بهره برداری از مخازن چندمنظوره به روش پویایی سیستم. *مجله مدل سازی در مهندسی*، ۸. ۲۱: ۵۷-۶۶.
- حاجی‌عزیزی، م.، رحمانی، م.، بیگلری، ن. ۱۳۹۳. تحلیل اجزای محدود سدهای زیرزمینی و نکات مهم در طراحی و اجرای آنها مطالعه موردی سد زیرزمینی آبخوری در استان سمنان. *مجله مدل سازی در مهندسی*، ۱۲. ۳۸: ۱۶۵-۱۵۳.
- صیادی ن.، ظهیری، س.ح. ۱۳۹۵. روش جدید برای بهینه‌سازی چند هدفه در فناوری اطلاعات MOIPO. اولین همایش ملی مهندسی رایانه و فناوری اطلاعات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سوسنگرد، ایران.
- نخعی، م.، محمدی، خ.، و رضایی، ح. ۱۳۹۴. بهینه‌یابی مدل عددی برداشت از آبخوان با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مطالعه موردی آبخوان ساحلی ارومیه. یادداشت فنی *مجله‌ی تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۲. ۳۹: ۱۱-۲۰.
- نوذری، ح.، آزادی، س. ۱۳۹۷. پیش‌بینی شوری آب زیرزمینی زیر لوله‌های زهکش با استفاده از شبکه عصبی. *مجله مدل سازی در مهندسی*، ۱۶. ۵۲: ۱۷.
- Anderson, M., Woessner, W., and Hunt, R. 2015. *Applied Groundwater Modeling Second Edition: Simulation of Flow and advective Transport in 2nd*. Academic Press. 133-135.
- Ayvaz, M.T., and Elci, A. 2013. A groundwater management tool for solving the pumping cost minimization problem for the Tahtali watershed (Izmir-Turkey) using hybrid HS-Solver optimization algorithm. *Journal of Hydrology*. 478:63-76
- Ahlfeld, D. P., and Mulligan A. E. 2000. *Optimal Management of Flow in Groundwater Systems*. Published by Academic Press. 185.
- Bayer, P., Duran, E., Baumann, R., and Finkel, M. 2009. Optimized groundwater drawdown in a subsiding urban mining area. *Journal of Hydrology*. 365.1-2: 95-104.
- Bansal, R., Lande, C., and Warke, A. 2016. Unsteady groundwater flow over sloping beds: analytical quantification of stream-aquifer interaction in presence of thin vertical clogging layer. *Journal of*

- surface and subsurface hydrology. New York. NY.: Academic Press. 1977. Steward, D. R., and Allen, A. J. 2013. The analytic element method for rectangular gridded domains, benchmark comparisons and application to the high plains aquifer. *Advances in Water Resources*. 60: 89-99.
- Van-Veldhuizen, D. A., and Lamont, G. B. 1998. Multiobjective evolutionary algorithm research: A history and analysis. Dept. Elec. Comput. Eng, Graduate School of Eng. Air Force Inst. Technol. Wright-Patterson AFB. OH. Tech. Rep. TR-98-03.
- Zitzler, E., Deb, K., and Thiele, L. 2000. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evolutionary Computation*. 8. 2: 173-195.
- Mantoglou, A., Papantoniou, M., and Giannoullopoulos, P. 2004. Management of coastal aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms, *Journal of Hydrology*. 297.1-4: 209-228.
- Mozaffari, M. H., and Zahiri, S. H. 2014. Unsupervised data and histogram clustering using Inclined Planes system Optimization algorithm. *Image Analysis and Stereology*. 33: 65-74.
- Sadeghi tabas, S., Samadi, S. Z., Akbarpour, A., and Pourreza Bilondi, M. 2016. Sustainable groundwater modeling using single-and multi-objective optimization algorithms. *Journal of Hydroinformatics*. 18. 5: 1-18. Pinder, G.F., and Gray, W.G. 1977. Finite element simulation in

Minimization of Pumping Costs of Unconfined Aquifer under Simulation - Optimization Model Using the Inclined Planes system Optimization Algorithm

Z. Baazm¹, M. Naseri^{2*}, A. Akbarpour³, S.H. Zahiri⁴

Received: Oct.22, 2018

Accepted: Jan.06, 2019

Abstract

Given the complexity of the underground water environment, the invention of new technologies and the use of advanced techniques in this area has contributed greatly to improving the management of groundwater resources. In this study, FEM-IPO simulation-optimization model was used to manage the groundwater operation. The aquifer mathematical modeling was done by the numerical simulation of the finite elements, taking into account two-dimensional equations of groundwater flow. In this study, three scenarios were considered for the optimum management. In each scenario with different and distinctive wells, the amount of losses and costs required for pumping according to water requirement was evaluated. Also, the studied area was divided into 3 regions based on the amount of hydraulic conduction coefficient. Finally, the cost of the pumping of the wells according to the target (well positioning for the optimal utilization, the reduction of the dropping level) was optimized using the sloped surface algorithm. The results showed that considering the hypothetical aquifer of 7 pumping wells, by disabling two wells in scenario 1, the aquifer had the lowest cost for pumping and water loss. The water level calculated by the finite element model was compared with the observed water level so that the relative error and root mean square error were calculated to be 0.00024 and 0.223 respectively indicating high accuracy of the model.

Keywords: Optimization, Inclined Planes system Algorithm, FEM, Groundwater, pumping

1- M. Sc. Student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

3- Associate Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

4- Professor, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

(* - Corresponding Author Email: mnaseri@birjand.ac.ir).