

پیش‌بینی نرخ فرونشست زمین با برآورد متغیرهای هیدرولیکی آبخوان، حاصل شده از داده‌های آزمون پمپاژ و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در منطقه ۱۹ تهران

مجتبی ارجمندی^۱، علی صارمی^۲، امیرپویا صراف^۳، حسین صدقی^۴ و مه‌آسا روستایی^۵

^۱دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۲استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۳استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، رودهن، ایران

^۴استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۵دکتر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۱۷

چکیده

مدل‌سازی آب زیرزمینی، بررسی خطر فرونشست و مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی نیازمند برآورد دقیق متغیرهای هیدرولیکی آبخوان است. افزون بر این، روش‌های پیشین و روش‌های گرافیکی معمول تقریبی، گران و زمان‌بر هستند. در این پژوهش، ده سری از داده‌های آزمون پمپاژ، ثبت شده طی پنج سال (۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱) در یک چاه در منطقه ۱۹ در جنوب دشت تهران انتخاب شدند. همچنین، طی سال‌های یاد شده نرخ فرونشست برای هر سال توسط روش ژئودزی زمینی ارزیابی شد. برای رفع مشکلات روش‌های پیشین، ۳ کد کامپیوتری با به کارگیری الگوریتم‌های ژنتیک و الگوریتم چندمنجه‌گرایی بهینه‌سازی گروهی ذرات توسعه یافتند تا متغیرهای هیدرولیکی آبخوان را برآورد کنند. کفایت و کارایی کدهای توسعه یافته، با به کارگیری ۱۰ دسته داده مربوط به آبخوان محبوس آزموده شد و سپس نتایج آنها با نتایج حاصل شده از روش گرافیکی حاصله از نرم افزار AquiferTest مقایسه شدند. بر پایه نتایج تابع شایستگی، الگوریتم بهینه‌سازی چندمنجه‌گرایی گروهی ذرات و الگوریتم‌های ژنتیک به ترتیب قابل اعتمادتر از روش گرافیکی برای برآورد متغیرهای هیدرولیکی آب زیرزمینی بودند. افزون بر این، تجزیه حساسیت متغیرهای هیدرولیکی در طول عملکرد روش‌های بهینه‌سازی یاد شده اثبات کرد که نتایج بسیار دقیق و قابل اعتماد هستند. سپس با توجه به مقادیر هدایت هیدرولیکی حاصل طی سال‌های مختلف با استفاده از الگوریتم چندمنجه‌گرایی بهینه‌سازی گروهی ذرات رابطه‌ای ارایه شد تا بتواند تغییرات هدایت هیدرولیکی را طی زمان پیش‌بینی کند و سپس رابطه دیگری به دست آمد تا با توجه به مقادیر هدایت هیدرولیکی طی زمان مقدار نرخ فرونشست برای سال‌های آینده تعیین شود. همچنین در این مقاله فرض شده است با رسیدن هدایت هیدرولیکی آبخوان مربوطه به مقدار 1×10^{-6} m/sec آب زیرزمینی برداشت نمی‌شود. در پایان با توجه به روابط به‌دست آمده و برداشت پیوسته آب زیرزمینی در منطقه مربوط، ۳۰ سال طول می‌کشد تا هدایت هیدرولیکی به 1×10^{-6} m/sec برسد و در طول زمان ۱۳۸۷ تا ۱۴۱۷ در منطقه مربوط، ۵۲ متر فرونشست زمین حاصل می‌شود. داده‌های نرخ فرونشست زمین حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای (InSAR) نیز درستی روابط حاصل را تأیید کردند.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی گروهی ذرات، جنوب دشت تهران، مدل‌سازی آب زیرزمینی، نرخ فرونشست زمین، InSAR

E-mail: iranma4@gmail.com

*نویسنده مسئول: علی صارمی

۱- پیش‌نوشتار

و غیرمحدب هستند؛ چرا که عوامل زمین‌شناسی بسیاری بر ساختار تشکیل نهایی آبخوان طی زمان تأثیر می‌گذارند که ممکن است موجب افزایش و یا کاهش هدایت هیدرولیکی یک آبخوان شوند (Sun, 1994). در نتیجه هیچ تضمینی وجود ندارد که بهترین پاسخ (یا بهینه عمومی) با به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی پیشین یافت شود. الگوریتم ژنتیک یک روش جایگزین خوب را برای حل کردن مسائل بهینه‌سازی غیرخطی و پیچیده، بدون نیاز به مشتق‌گیری تهیه می‌کند (Davis, 1991; Goldberg, 1989) و افزون بر آن، یک نظام‌نامه پژوهش تصادفی بر گرفته از تکامل موجودات را دنبال می‌کند (Gwo, 2001; Meier and Barkdoll, 2000; Davis, 1991).

تاریخچه مطالعاتی در این زمینه نشان می‌دهد که پژوهش‌های گسترده‌ای توسط پژوهشگران مختلف صورت گرفته است. (Simpson et al., 1994) از الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات برای کاهش هزینه پمپاژ سود بردند. (Sun et al., 1999) از متغیرهای هیدرولیکی آبخوان و InSAR برای برآورد فرونشست زمین در منطقه نیوجرسی آمریکا استفاده کردند و نشان دادند که نرخ فرونشست حدود ۳ سانتی‌متر در سال است. (Prasad and Rastogi, 2001) الگوریتم ژنتیک با یک مدل شبیه‌سازی جریان المان متناهی را برای برآورد متغیرهای هیدرولیکی آبخوان به کار بردند. (Abd-Elhamid and Javadi, 2011) الگوریتم ژنتیک را با مدل SUTRA برای کنترل نفوذ آب شور در مناطق ساحلی تلفیق کردند. (Mahmoodpour, 2015) با تلفیق مدل عددی MODFLOW و InSAR عنوان کرد که منطقه شهریار نرخ فرونشست حدود ۳۳ سانتی‌متر بر سال را تجربه می‌کند. (Erban et al., 2014) نرخ فرونشست

در جنوب دشت تهران، آب زیرزمینی به‌عنوان یک منبع حیاتی برای اهداف زیادی همچون کاربردهای صنعتی، دامداری، کشاورزی و مسکونی به کار می‌رود. همچنین، با توجه به رشد روزافزون جمعیت، آلوده شدن آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در دشت تهران مدیریت صحیح این منبع حیاتی ضروری است. افزون بر این، داشتن آگاهی اولیه از متغیرهای آبخوان برای بررسی نتایج مدل‌سازی قابل اعتماد اهمیت دارد تا بتوان آبخوان‌های این دشت را حفظ و از خطراتی چون فرونشست و در پی آسیب رسیدن به زیرساخت‌های صنعتی، کشاورزی و مسکونی جلوگیری کرد. متغیرهای هیدرولیکی آبخوان تحت فشار شامل قابلیت انتقال پذیری (T) و ضریب ذخیره (S) و هدایت هیدرولیکی (K) هستند که به‌طور متداول و معمول توسط آزمون پمپاژ به‌دست می‌آیند (Samuel and Jha, 2003). داده‌های آزمون پمپاژ افت-زمان با به کارگیری مدل‌های تحلیلی غیرخطی، همچون مدل تاپس، مدل تاپس تصحیح شده، مدل هانتوش، مدل نیومن و دیگر موارد بسته به نوع آبخوان تجزیه می‌شوند. همچنین این تجزیه‌ها توسط روش گرافیکی به عنوان یک روش استاندارد برای برآورد متغیرهای آبخوان پیشنهاد می‌شود (Bateni et al., 2015; Samuel and Jha, 2003). روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی پیشین به وسیله چندین پژوهشگر نقد شده‌اند (Gentry et al., 2001; Wardlaw and Sharif, 1999; Goulter, 1992). روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته همچون الگوریتم ژنتیک (GA)، شبیه‌سازی تحلیلی، شبکه عصبی (ANN) و روش تکامل تدریجی پیچیده جهش قورباغه، توجه پژوهشگران منابع آب زیرزمینی را به خود جذب کرده است (Khu et al., 2001; Simpson et al., 1994). مسائل مدیریتی آب زیرزمینی همانند بررسی برداشت آب زیرزمینی و در پی آن فرونشست زمین در طبیعت غیرخطی

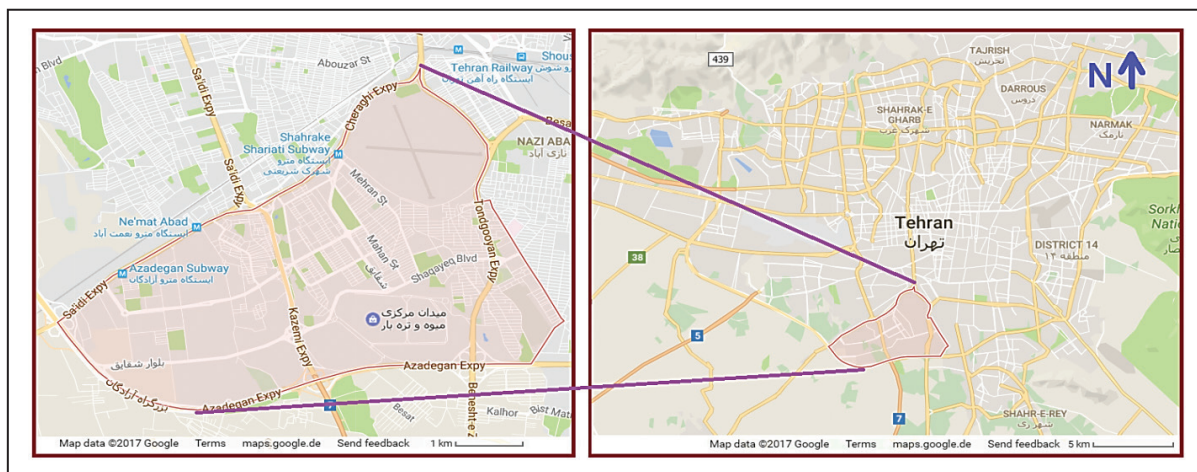
مقدار فرونشست در سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۸۹ به طریق ترازبایی به‌طور بسیار دقیق تعیین شد. مساحت منطقه فرونشست در حدود ۶۰ کیلومتر مربع است و به مرکزیت $35/6^{\circ}$ عرض شمالی و $51/3^{\circ}$ طول خاوری قرار دارد (Mahmoodpour, 2015). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و ناحیه فرونشست را نشان می‌دهد (Aghanabati, 1993). آبخوان‌های آبرفتی منطقه از نهشته‌های گراولی، ماسه‌ای، سیلتی و رسی با میان‌لایه‌ها یا لته‌های رسی نفوذناپذیر تشکیل شده‌اند. آبرفت‌های تهران شامل ۴ واحد چینه‌شناسی است (درویش‌زاده، ۱۳۸۲) که به ترتیب از قدیم به جدید سازند A (هزاردره)، سازند B (کهریزک، Qt1)، سازند C (آبرفتی تهران، Qt2) و سازند D (آبرفت اخیر) نامیده می‌شوند. سازند هزاردره شامل کنگلومراهایی با لته‌های سیلتی، ماسه‌ای و رسی است. ستبرای این سازند در حدود ۱۲۰۰ متر است (درویش‌زاده، ۱۳۸۲). سازند هزاردره یک واحد سنگی نفوذناپذیر است. سازند کهریزک شامل ماسه سنگ‌های درشت‌دانه، ماسه‌سنگ‌های ریزدانه و سیلت‌های رسی است که هم اکنون از آن آب زیرزمینی برداشت می‌شود (درویش‌زاده، ۱۳۸۲). مقدار هدایت هیدرولیکی در این سازند از $1*10^{-2}$ m/sec تا $1*10^{-7}$ m/sec تغییر می‌کند. آبرفت تهران (سازند C) به آبرفت جدید نهشته‌های کواترنری اخیر ارجاع داده می‌شود که در بخش‌های شمالی این سازند بیشتر لایه‌های گراولی هستند و در بخش‌های جنوبی سازند C بیشتر نهشته‌های سیلتی لومی و ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز وجود دارد (درویش‌زاده، ۱۳۸۲). واحد D جوان‌ترین واحد چینه‌شناسی در دشت تهران است و به عنوان نهشته‌های آبرفتی و رودخانه‌ای معرفی می‌شوند. این واحد شامل سیلت‌های ریزدانه، رس و ماسه است. رخنمون‌های سنگی قدیمی شامل توف، آندزیت و آذرآواری متعلق به دوره ائوسن نیز در این سازند دیده می‌شود (درویش‌زاده، ۱۳۸۲). داده‌های چند ایستگاه موقت GPS در دشت تهران نشان می‌دهد که نرخ کوتاه‌شدگی کم‌وبیش ۵ میلی‌متر در سال با راستای شمالی-جنوبی و نرخ تنش برشی ۳ میلی‌متر در سال است (درویش‌زاده، ۱۳۸۲). واحدهای هیدروژئولوژیکی منطقه ۱۹ تهران (در جنوب دشت تهران) به سه آبخوان و سه اکتیارد مجزا می‌شوند که سامانه آبخوان منطقه را تشکیل می‌دهند. در یک چاه در جنوب منطقه ۱۹ تهران به مدت پنج سال و در هر سال دو دسته داده افت-زمان آبخوان محبوس ثبت شده است. ژرفای سنگ بستر نسبت به سطح زمین به‌طور میانگین در حدود ۱۲۰ متر است. ستبرای آبخوان محبوس در چاه مربوط ۲۰ متر و ارتفاع سطح پیرومتریک نسبت به سنگ بستر در حدود ۳۸ متر است. افت سطح پیرومتریک در سال‌های اخیر حدود ۳۰ سانتی‌متر در سال بوده (Molaei et al., 2016) و روی بخش تراوا، لایه‌های اکتیارد از جنس رس و سیلت جای گرفته است.

در سواحل دلتای مکانگ ویتنام را با توجه به تغییر متغیر ذخیره و با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی و InSAR بررسی کردند. نتایج نشان داد که در منطقه یاد شده نرخ فرونشست در حدود ۳ سانتی‌متر در سال است.

بررسی مقالاتی در مورد مدیریت منابع آب زیرزمینی نشان داد که مطالعات بسیار کمی راجع به برآورد متغیرهای هیدرولیکی آبخوان و به‌کارگیری متغیرهای حاصل برای پیش‌بینی نرخ فرونشست طی زمان به وسیله روش‌های MEPSO و GA انجام شده است. در این نوشتار، کارآمدی روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و MEPSO در برآورد متغیرهای هیدرولیکی یک سامانه آبخوان محبوس در نهشته‌های کواترنری سازند کهریزک منطقه ۱۹ در جنوب دشت تهران و پیش‌بینی نرخ فرونشست با به‌کارگیری ۱۰ دسته داده افت-زمان آزمون پمپاژ طی ۵ سال ارزیابی می‌شود. آبخوان محبوس یاد شده از ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز و میان‌لایه‌های رسی کوچک تشکیل شده است. سنگ بستر لایه‌های ناتراوا از جنس شیل، سنگ‌های آذرآواری و توف است. روی آبخوان محبوس مربوطه لایه‌های ناتراوا از جنس رس و سیلت قرار دارد که مقدار نشت در این لایه آن قدر کم است که از این مؤلفه صرف نظر شد. ۳ کد کامپیوتری توسعه یافته‌اند تا بهترین مقادیر بهینه متغیرهای آبخوان محبوس مربوط را با به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی GA و MEPSO برآورد کنند. در هر سال (۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱) ۲ دسته داده افت-زمان آزمون پمپاژ ثبت شد. کارآمدی و دقت مدل‌های توسعه یافته با به‌کارگیری ۱۰ دسته داده افت-زمان سامانه آبخوان محبوس به دست آمده توسط سازمان مدیریت منابع آب کشور (آب منطقه‌ای استان تهران) آزموده شد. مقادیر فرونشست توسط روش ژنودزی طی ۵ سال یاد شده نیز ثبت شد (Molaei et al., 2016). همچنین، با توجه به کاهش هدایت هیدرولیکی طی پنج سال، داده‌های فرونشست ثبت و با استفاده از الگوریتم MEPSO رابطه‌ای ارائه شد تا بتواند مقدار فرونشست را برای سال‌های آینده برآورد کند. درستی این رابطه با داده‌های تداخل سنجی راداری ماهواره‌ای سنجیده شد. افزون بر این، فرض شد که بیشینه افت سطح آب زیرزمینی در دشت یاد شده طی هر سال برابر با ۰/۵ متر باشد و زمانی که هدایت هیدرولیکی آبخوان مربوط به $1*10^{-6}$ m/sec می‌رسد؛ آب زیرزمینی از آبخوان مربوط برداشت و فرونشستی حاصل نمی‌شود.

۲- زمین‌شناسی و ساختار هیدروژئولوژی منطقه

حوضه تهران یک منطقه خشک تا نیمه‌خشک با مساحت ۲۲۵۰ کیلومتر مربع با میانگین بارش سالانه حدود ۲۰۰ میلی‌متر و میانگین تبخیر سالانه حدود ۲۵۰۰ میلی‌متر است. بخش‌های جنوب، جنوب باختر و جنوب خاور منطقه به دلیل ازدیاد برداشت آب زیرزمینی در معرض فرونشست قرار گرفته‌اند (Molaei et al., 2016).

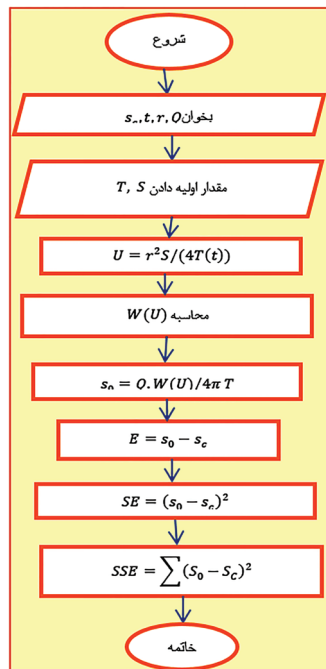


شکل ۱- موقعیت شهر تهران (میان طول جغرافیایی ۵۱ تا ۵۲ درجه طول خاوری و ۳۵/۵ تا ۳۶ درجه عرض شمالی جغرافیایی) و منطقه ۱۹ تهران (در جنوب دشت تهران).

الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی گروهی ذرات به‌طور طبیعی یک الگوریتم پیشینه با یک مقدار شایستگی مثبت است؛ در نتیجه، مقدار تابع هدف (SSE) درون تابع شایستگی به‌صورت زیر انتقال می‌یابد (Deb et al., 2002):

$$\text{Fitness function} = f(x) = 1 / (1 + \text{SSE}) \quad (3)$$

شکل ۲ فلوجارت چگونگی محاسبه تابع شایستگی برای آبخوان‌های تحت فشار را نشان می‌دهد و معیارهای خاتمه الگوریتم‌های مربوط در این مقاله زمانی حاصل می‌شود که تعداد پیشینه تکرارها یا نسل‌ها بیشتر از ۱۰۰۰ و تابع هدف بزرگ‌تر از ۰/۰۹ نشود.



شکل ۲- نمودار گردش محاسبه تابع شایستگی برای آبخوان‌های تحت فشار.

الگوریتم ژنتیک: دو پاسخ ممکن در این الگوریتم مقدار متغیر هدایت هیدرولیکی (K) و مقدار متغیر ضریب ذخیره (S) است. در هر فرایند تابع شایستگی هر کروموزوم ارزیابی می‌شود. عملگر ترکیب‌شدگی شماری از جفت کروموزوم‌ها را بر پایه یک احتمال به عنوان کروموزوم‌های والدین انتخاب می‌کند. داده‌ها از یک کروموزوم به کروموزوم دیگر انتخابی تبادل می‌یابند. سپس عملگر جهش مقادیر داده‌ها را با زیاد یا کم کردن مقدار آن در هر کروموزوم با یک احتمال تغییر خواهد داد تا کروموزوم‌های نوزاد جدید تولید کند. تابع شایستگی هر کروموزوم که دو مقدار پاسخ جدید دارد؛ ارزیابی می‌شود سپس هر کروموزوم نوزاد که مقدار بهتری از تابع شایستگی نسبت به والدینش دارد؛ حفظ می‌شود و در غیر اینصورت حذف خواهد شد. کروموزوم مناسب جدید به درون فرایند باز می‌گردد. این فرایند چندین مرتبه تکرار می‌شود تا معیار خاتمه به دست بیاید. پاسخ بهترین کروموزوم نهایی همان مقادیر متغیرهای مجهول است. از محدودیت‌های الگوریتم ژنتیک این است که تابع هدف نباید بزرگ‌تر از ۰/۰۹ باشد و تعداد گردش برابر با ۱۰۰۰ است.

الگوریتم چندمنجبه‌گرایی گروهی ذرات (MEPSO): این الگوریتم به عنوان یک روش پژوهشی و تقلیدی سودمند متداول است. در این الگوریتم، در ابتدا یک جمعیت از ذرات یا پاسخ‌های بهینه ممکن در فضای تعریف شده (فضای پاسخ‌های ممکن) به‌طور تصادفی پخش می‌شوند (Shang et al., 2016). در الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات (PSO)، هر ذره یا عامل با موقعیت تصادفی Z و سرعت‌های V و یک تابع f به عنوان مقادیر اولیه ارزیابی می‌شود. در یک فضای پژوهش n بعدی، $V_L = (V_{L1}, V_{L2}, V_{L3}, \dots, V_{Ln})$ و $Z_L = (Z_{L1}, Z_{L2}, Z_{L3}, \dots, Z_{Ln})$ سرعت‌ها و موقعیت‌ها سازگار می‌شوند و تابع با مختصات‌های جدید در هر گام زمانی ارزیابی می‌شود. معادلات به روز شده پایه‌ای برای بعد d و ذره i در PSO به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

همچنین در بخش تراوا چندین میان‌لایه رسی وجود دارد که پلاستیسته بسیار بالایی دارند. در صورتی که آبی بتواند از میان‌لایه‌های رسی آزاد شود؛ فرونشست ناگهانی رخ می‌دهد و هدایت هیدرولیکی آنها طی زمان کمی کم می‌شود (Kresic, 1996 and 2006). همچنین سطح آب زیرزمینی از سال ۲۰۰۰ (۱۳۷۹ شمسی) تا ۲۰۱۵ (۱۳۹۴ شمسی) در حدود ۷ متر کاهش یافته و نرخ کاهش افت سطح آب زیرزمینی طی سال‌های گذشته رو به کاهش بوده است. به‌طوری که در سال ۱۳۷۴ در حدود ۵۰ سانتی‌متر و در سال ۱۳۸۹ در حدود ۳۰ سانتی‌متر بوده است. محاسبات تعادلی آب زیرزمینی (در منطقه‌ی جنوب دشت تهران) نشان می‌دهد که از ۶۸۴۸ چاه در حدود ۸۱۰/۰۹ میلیون متر مکعب بر سال آب زیرزمینی از سیستم آبخوان برداشت می‌شود. در حالی که تغذیه سالانه آب زیرزمینی سامانه آبخوان ۷۹۳/۹۴ متر مکعب است. همچنین حجم آبخوان از سال ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۳، ۱۶۳ میلیون متر مکعب کاهش یافت (Mahmoodpour, 2015). مقدار فرونشست طی سال بر حسب مشاهدات و محاسبات ژئودزی در سال ۱۳۸۷ برابر با ۱۰ سانتی‌متر بر سال، در سال ۱۳۸۸ برابر با ۸ سانتی‌متر بر سال، در سال ۱۳۸۹ برابر با ۷ سانتی‌متر بر سال، در سال ۱۳۹۰ برابر با ۴ سانتی‌متر بر سال و در سال ۱۳۹۱ برابر با ۴ سانتی‌متر بر سال بوده است (Molaei et al., 2016). همچنین بر طبق محاسبات تعادلی آب، حدود ۳/۷۸ میلیون متر مکعب آب زیرزمینی از ۳۸ چاه طی یک سال برداشت می‌شود. در حالی که میزان آب تغذیه کننده آبخوان در حدود ۳/۶۷ میلیون متر مکعب طی یک سال است و نشان می‌دهد میزان آب تغذیه شونده نیاز آبخوان یاد شده را تأمین نمی‌کند و طی زمان در منطقه فرونشست زمین حاصل می‌شود تا جایی که قابلیت انتقال‌پذیری آبخوان آنقدر کم شود که نتوان آبی از آبخوان یاد شده برداشت کرد.

۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ۱۰ دسته داده افت-زمان آزمون پمپاژ یک چاه استفاده و مدل تائیس برای تجزیه و تحلیل آنها به کار گرفته شد (Gershenwald et al., 1998; Theis, 1935). این داده‌ها در یک آبخوان تحت فشار با ترکیب سنگی سیلت، ماسه و میان‌لایه‌های رسی قرار دارند که ویژگی‌های آن به شرح زیر است:

- نرخ ثابت پمپاژ (Q) برای چاه پمپاژ طی هر آزمون پمپاژ در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱ معادل به ۰/۰۰۳ متر مکعب بر ثانیه است.
- شعاع چاه پمپاژ (r) معادل ۰/۱۵ متر است.
- ستبرای آبخوان تحت فشار برابر با ۲۰ متر است.

با توجه به اطلاعات موجود، روش‌های بهینه‌سازی ژنتیک و چندمنجبه‌گرایی گروهی ذرات اعمال شد. استفاده از تابع هدف و معیار خاتمه در الگوریتم‌ها این امکان را فراهم می‌آورد تا متغیرهای هیدرولیکی آبخوان مربوط بدست آید و سپس با توجه به تغییرات هدایت هیدرولیکی در طی زمان و داده‌های ترازیبی دقیق رابطه‌ای ارائه شود که فرونشست سال‌های بعد را برآورد کند. در پایان برای بررسی درستی سنجی رابطه ارائه شده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری برای مقایسه استفاده شد. به دلیل نیاز الگوریتم‌ها به تابع هدف و معیار خاتمه، ابتدا اشاره کوتاهی به آنها خواهد شد.

۳-۱. رابطه تابع هدف و معیار خاتمه

اگر S_0 افت دیده شده در یک چاه مشاهده‌ای در یک فاصله r از چاه پمپاژ در زمان t و S_e افت به دست آمده با به‌کارگیری یک مدل مناسب برای آبخوان معین در موقعیت و زمان مشابه باشد؛ خطای باقی مانده (E) به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$E = S_0 - S_e \quad (1)$$

بنابراین برای افت‌هایی در یک موقعیت معین اندازه‌گیری شده در فواصل زمانی مختلف، مجموع مربعات خطا (SSE) به‌صورت زیر به دست می‌آید:

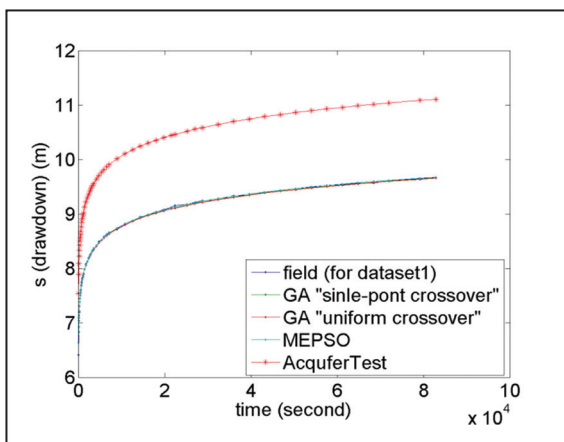
$$\text{SSE} = \sum_{i=1}^n (S_0 - S_e)^2 \quad (2)$$

که n برابر با تعداد کل داده‌های افت دیده شده است. معادله ۲ به عنوان تابع هدف در این مطالعه انتخاب شد و هدف کوچک کردن SSE بود. همچنین هر یک از

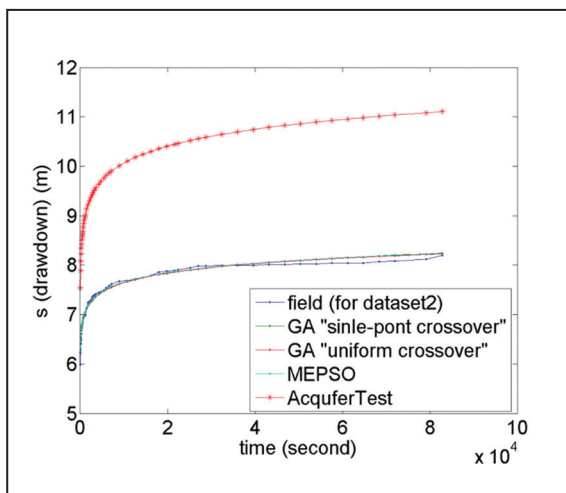
است که توسط الگوریتم چندمنجه‌گرایی گروهی ذرات به دست آمده‌اند. در هر سال نتایج آن دسته داده‌ای انتخاب می‌شود که SSE کمتری دارد.

۴-۲. بررسی کفایت الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی چندمنجه‌گرایی گروهی ذرات با بازیابی بصری منحنی‌های افت- زمان به دست آمده

کفایت روش‌های یاد شده در برآورد متغیرهای هیدرولیکی آبخوان تحت فشار مربوطه به وسیله مقایسه روش‌های گرافیکی، الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی چندمنجه‌گرایی گروهی ذرات با منحنی‌های افت- زمان دیده شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این ارزیابی نیز نشان داد که الگوریتم‌های به کار رفته می‌توانند با دقت بسیار زیادی متغیرهای هیدرولیکی آبخوان‌های تحت فشار را برآورد کنند. شکل‌های ۳ و ۴ مقایسه روش‌های مربوطه برای دسته‌داده‌های ۱ (سال ۱۳۹۱) و ۲ (سال ۱۳۸۷) را نشان می‌دهند.



شکل ۳- مقایسه منحنی‌های افت- زمان حاصل شده با به‌کارگیری متغیرهای آبخوان حاصل شده به‌وسیله روش‌های گرافیکی، الگوریتم ژنتیک (با به‌کارگیری ترکیب‌شدگی تک‌نقطه‌ای)، الگوریتم ژنتیک (با به‌کارگیری ترکیب‌شدگی یکنواخت) و MEPSO با منحنی افت- زمان صحرائی مشاهده‌ای برای دسته داده ۱ (سال ۱۳۹۱)؛ محور افقی زمان و محور عمودی افت را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقایسه منحنی‌های افت- زمان حاصل شده با به‌کارگیری متغیرهای آبخوان حاصل شده به‌وسیله روش‌های گرافیکی، الگوریتم ژنتیک (با به‌کارگیری ترکیب‌شدگی تک‌نقطه‌ای)، الگوریتم ژنتیک (با به‌کارگیری ترکیب‌شدگی یکنواخت) و MEPSO با منحنی افت- زمان صحرائی مشاهده‌ای برای دسته داده ۲ (سال ۱۳۸۷)؛ محور افقی زمان و محور عمودی افت را نشان می‌دهد.

$$V_{id}(t+1) = \omega \cdot V_{id}(t) + C_1 \cdot \varphi_1 \cdot (P_{id} - X_{id}(t)) + C_2 \cdot \varphi_2 \cdot (P_{gd} - X_{id}(t)) \quad (4)$$

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + V_{id}(t+1) \quad (5)$$

متغیرهای φ_1 و φ_2 اعداد مثبت تصادفی هستند که از یک توزیع یکنواخت مشتق گرفته‌اند و به وسیله یک حد بالایی φ_{max} مشخص تعیین می‌شوند که متغیری از سامانه است. C_1 و C_2 ضرایب شتاب‌دهنده، ω ضریب اینرسی، P_i بهترین پاسخ محلی یافت شده به‌وسیله ذره i و P_g بهترین موقعیت یافت شده ذره i در میان کل ذرات است. در پایان انتظار می‌رود تا بیشتر ذرات به یک شعاع کوچک پیرامون بهینه عمومی همگرا شوند (Eberhart, 2001; Poli et al., 2007). در این مقاله، برای جلوگیری از گرفتار شدن در پاسخ‌های بهینه محلی یک استراتژی نخبه‌گرایی برای یافتن بهترین بهینه عمومی پیشنهاد شد. این نوع جدید MEPSO، نامیده می‌شود (Deb et al., 2002). در این الگوریتم، یک نرخ رشد β برای هر ذره تعریف می‌شود. موقعی که مقدار شایستگی یک ذره در تکرار مربوطه، بیشتر از مقدار شایستگی همان ذره در تکرار $(t-1)$ باشد، مقدار β افزایش می‌یابد. بهترین بهینه محلی هر ذره، در هر تکرار مشخص شد؛ بهترین بهینه محلی که مقدار شایستگی بیشتری نسبت به بهینه عمومی دارد در فضای کاندید قرار می‌گیرد. سپس بهترین بهینه عمومی به وسیله بهترین محلی که بیشترین نرخ رشد را دارد و از بهینه عمومی مرحله پیش هم بهتر است؛ جایگزین می‌شود (Das et al., 2008).

– **روش گرافیکی:** در این روش داده‌های افت- زمان آزمون پمپاژ به کار گرفته می‌شود تا متغیرهای هیدرولیکی آبخوان با به‌کارگیری مدل‌های تحلیلی مانند مدل تاپس برآورد شوند. در این پژوهش روش گرافیکی با استفاده از نرم‌افزار گرافیکی AquiferTest انجام شد که به وسیله مؤسسه هیدروژئولوژی واترلو کانادا (<http://www.aqtesolv.com>) توسعه یافته است.

۴- توسعه الگوریتم‌ها در راستای برآورد متغیرهای هیدرولیکی آب زیرزمینی

الگوریتم‌های یاد شده بر پایه کدهای کامپیوتری در زبان برنامه‌نویسی MATLAB برای مدل تاپس توسعه داده شد تا متغیرهای هیدرولیکی (قابلیت انتقال پذیری (T) و ضریب ذخیره (S)) به دست آید. موفقیت و اجرای کدهای توسعه یافته به متغیرهای عمومی وابسته هستند که در الگوریتم‌ها به کار گرفته شده‌اند. افزون بر این، متغیرهای عمومی در الگوریتم ژنتیک احتمالات ترکیب‌شدگی و جهش و متغیرهای عمومی در الگوریتم چندمنجه‌گرایی بهینه‌سازی گروهی ذرات φ_1 ، φ_2 ، C_1 ، C_2 و ω هستند. متغیرهای عمومی اندازه جمعیت و تعداد نسل‌ها یا تکرارها در هر دو الگوریتم مشترک هستند. متغیرهای یاد شده پس از تجزیه حساسیت پاسخ‌های بهینه به دست آمدند؛ احتمال ترکیب‌شدگی ۴۰٪ و یک احتمال جهش ۱۰٪ برای رویکرد ترکیب‌شدگی تک‌نقطه‌ای و یک احتمال ترکیب‌شدگی ۶۰٪ و یک احتمال جهش ۶۰٪ برای رویکرد ترکیب‌شدگی یکنواخت قرار داده شد. پخش پاسخ‌ها یا ذرات، اعداد مثبت تصادفی (φ_1 ، φ_2) و ضرایب شتاب‌دهنده (C_1 ، C_2) میان صفر تا یک قرار گرفت. مقدار ضریب اینرسی (ω) از 0.3 تا 0.9 ، اندازه جمعیت از 20 تا 56 و تعداد نسل‌ها یا تکرارها از 500 تا 1000 متغیر است.

۴-۱. کارایی الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی چندمنجه‌گرایی گروهی ذرات در برآورد زدن متغیرهای آبخوان تحت فشار

ابتدا ۱۰ دسته داده افت- زمان آبخوان تحت فشار منطقه ۱۹ در جنوب دشت تهران به‌طور گرافیکی با به‌کارگیری نرم‌افزار AquiferTest تجزیه و تحلیل شدند. سپس نتایج روش‌های الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی گروهی ذرات با نتایج حاصل از روش گرافیکی بر پایه کمترین مربعات خطا (SSE) مقایسه و در جدول‌های ۱ و ۲ برای دسته‌داده‌های ۱ (سال ۱۳۹۱) و ۲ (سال ۱۳۸۷) نشان داده شد. نتایج این دو دسته‌داده و دیگر دسته‌داده‌ها سازگار با روش گرافیکی هستند.

در جدول ۳ تغییرات هدایت هیدرولیکی طی زمان برای هر ۱۰ دسته داده ارائه شده

جدول ۱- مقایسه متغیرهای آبخوان تحت فشار حاصل شده به وسیله روش‌های گرافیکی، الگوریتم بهینه‌سازی چندمنجه گرای گروهی ذرات و الگوریتم‌های ژنتیک برای دسته داده ۱ (به دست آمده در سال ۲۰۱۲).

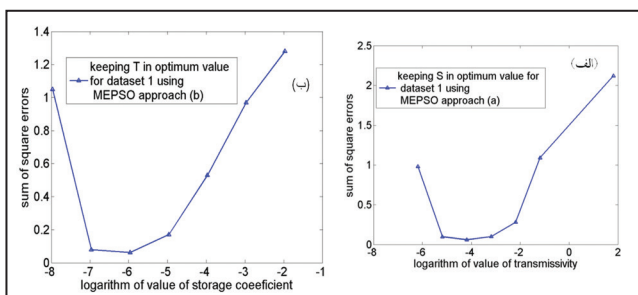
دسته داده افت زمان شماره ۱ آبخوان تحت فشار				
روش گرافیکی (نرم افزار AquiferTest)	MEPSO	GA (ترکیب‌شدگی یکنواخت)	GA (ترکیب‌شدگی تک‌نقطه‌ای)	روش
8.604	0.061	0.076	0.070	SSE (کمینه مربعات خطا)
4.79×10^{-5}	6.58×10^{-5}	6.53×10^{-5}	6.49×10^{-5}	K (m/sec) (هدایت هیدرولیکی)
9.07×10^{-10}	9.88378×10^{-10}	9.28382×10^{-10}	1.41901×10^{-9}	S (ضریب ذخیره)
9.58×10^{-4}	1.316×10^{-4}	1.306×10^{-4}	1.1298×10^{-4}	T=K*B (m ² /sec) قابلیت انتقال پذیری

جدول ۲- مقایسه متغیرهای آبخوان تحت فشار حاصل شده به وسیله روش‌های گرافیکی، الگوریتم بهینه‌سازی چندمنجه گرای گروهی ذرات و الگوریتم‌های ژنتیک برای دسته داده ۲ (به دست آمده در سال ۱۳۸۷).

دسته داده افت زمان شماره ۲ آبخوان تحت فشار				
روش گرافیکی (نرم افزار AquiferTest)	MEPSO	GA (ترکیب‌شدگی یکنواخت)	GA (ترکیب‌شدگی تک‌نقطه‌ای)	روش
8.3719	0.232882	0.261213	0.240215	SSE (کمینه مربعات خطا)
8.3×10^{-5}	0.000100146	0.000102146	0.00010048	K (m/sec) (هدایت هیدرولیکی)
9.66×10^{-7}	1.08×10^{-6}	1.11×10^{-6}	1.26×10^{-6}	S (ضریب ذخیره)
1.63×10^{-4}	0.00200	0.00204	0.00200	T=K*B (m ² /sec) قابلیت انتقال پذیری

جدول ۳- تغییرات هدایت هیدرولیکی در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱ (با به کارگیری آزمون پمپاژ و الگوریتم چندمنجه گرای بهینه‌سازی گروهی ذرات).

1391		1390		1389		1388		1387		زمان (سال)
2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	شماره دسته داده افت- زمان آزمون پمپاژ
6.51×10^{-5}	6.58×10^{-5}	6.6×10^{-5}	6.8×10^{-5}	7×10^{-5}	7.1×10^{-5}	9.1×10^{-5}	9.2×10^{-5}	1×10^{-4}	1.3×10^{-4}	K (m/sec) (by MEPSO)
0.081	0.020	0.042	0.193	0.091	0.073	0.016	0.065	0.202	0.295	SSE



شکل ۵- نتایج تجزیه حساسیت. الف) هدایت هیدرولیکی (K) برای دسته داده ۱ (سال ۱۳۹۱) و نگاه داشتن (S) در مقدار بهینه؛ ب) ضریب ذخیره (S) برای دسته داده ۱ (سال ۱۳۹۱) و نگاه داشتن (K) در مقدار بهینه. محورهای عمودی مجموع مربعات خطا و در شکل الف محور افقی لگاریتم مقدار هدایت هیدرولیکی و در شکل ب محور افقی لگاریتم مقدار ضریب ذخیره را نشان می‌دهند.

۵- برآورد نرخ فرونشست برای سال‌های آینده

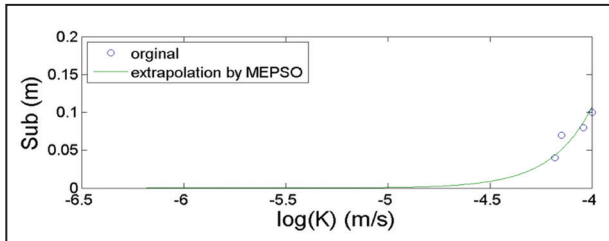
کولین و پوتما در سال ۱۹۹۴ معادله زیر را برای تعیین نرخ فرونشست ارائه کردند (شمشکی و همکاران، ۱۳۸۴):

$$Sub = Z_i * \left(\frac{C_c}{e_i + 1} \right) * \log \left(\frac{P_{2i}}{P_{1i}} \right) \quad (6)$$

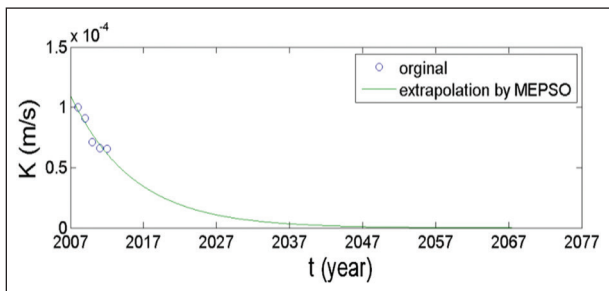
۴-۳. تجزیه حساسیت

برای ارزیابی کیفیت مقادیر متغیرهای آبخوان تحت فشار حاصل شده از روش‌های بهینه‌سازی یاد شده، یک تجزیه حساسیت متغیرهای آبخوان تحت فشار (یعنی K و S) برای هر ۱۰ دسته داده انجام شد تا اثر تغییر در متغیرهای مربوط روی مقدار SSE امتحان شود. این تجزیه حساسیت، کیفیت متغیرهای حاصل به وسیله الگوریتم‌های ژنتیک و MEPSO را نشان می‌دهد. نتایج تجزیه حساسیت برای دسته داده ۱ (سال ۱۳۹۱) با به کارگیری روش بهینه‌سازی MEPSO در شکل‌های ۵-الف و ب به عنوان نمونه نشان داده شده است. در طول تجزیه حساسیت قابلیت انتقال‌پذیری (T) برای دسته داده ۱ (سال ۱۳۹۱)، مقدار بهینه ضریب ذخیره (S) انتخاب می‌شود و مقدار T از حد پایینی به حد بالایی تغییر می‌کند. همچنین یک نظام‌نامه مشابه برای تجزیه حساسیت S (شکل ۵-ب) دنبال شده است. واضح است که دسته واحدی از مقادیر T و S به وسیله روش بهینه‌سازی MEPSO حاصل شده‌اند که کمترین مقدار SSE را دارند. افزون بر این، مقایسه میان جدول‌های ۱ و ۲ و شکل‌های ۵-الف و ب آشکار می‌کند که مقادیر S و T حاصل برای دسته داده ۱ (سال ۱۳۹۱) کاملاً بهینه هستند. افزون بر این، تجزیه حساسیت در یک سبک مشابه برای دسته داده ۲ (سال ۱۳۸۷) با به کارگیری الگوریتم‌های ژنتیک یاد شده و برای ۹ دسته داده دیگر با به کارگیری همه الگوریتم‌های یاد شده در این مطالعه انجام شد و نتایج تجزیه‌های حساسیت اثبات کردند که همه مقادیر T و S حاصل از روش‌های بهینه‌سازی قابل اعتماد هستند.

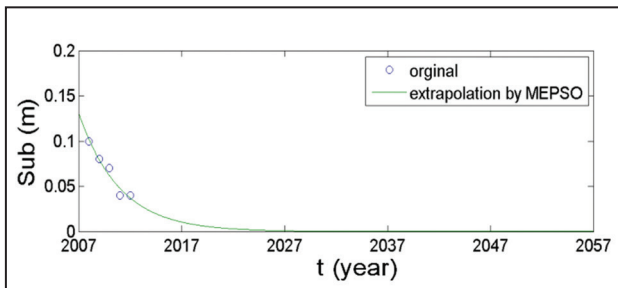
با توجه به روابط ارائه شده به نظر می‌رسد که تا سال ۲۰۳۸ مقدار کل فرورانش زمین برابر با ۵۲ سانتی‌متر باشد. تغییرات نرخ فرورانش (Sub) و هدایت هیدرولیکی (K) طی زمان و ارتباط نرخ فرورانش و هدایت هیدرولیکی در شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ مشخص شده‌اند. همچنین جدول ۴ تغییرات هدایت هیدرولیکی و فرورانش زمین را طی زمان ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱ نشان می‌دهد.



شکل ۶- تغییرات نرخ فرورانش به هدایت هیدرولیکی: دایره‌های آبی رنگ نشانگر داده‌های فرورانش به تغییرات هدایت هیدرولیکی به دست‌آمده توسط الگوریتم‌های مربوط و منحنی سبز رنگ حاصل رابطه ۱۳ به دست آمده توسط MEPSO هستند؛ محور افقی لگاریتم هدایت هیدرولیکی و محور عمودی مقدار فرورانش است.



شکل ۷- تغییرات هدایت هیدرولیکی به زمان: دایره‌های آبی رنگ نشانگر تغییرات هدایت هیدرولیکی طی زمان به دست‌آمده توسط الگوریتم‌های مربوط و منحنی سبز رنگ حاصل رابطه به دست آمده ۱۲ توسط MEPSO هستند؛ محور افقی نشانگر زمان و محور عمودی مقدار هدایت هیدرولیکی است.



شکل ۸- تغییرات نرخ فرورانش به زمان: دایره‌های آبی رنگ نشانگر داده‌های تراز یابی دقیق هستند. منحنی سبز رنگ حاصل رابطه به دست آمده ۱۱ توسط MEPSO، محور افقی نشانگر زمان و محور عمودی مقدار فرورانش است.

e_1 مقدار پوکی اولیه است که بسته به نوع خاک از ۰/۷ تا ۱/۳ تغییر می‌کند. C_c به‌طور معمول از ۰/۱ تا ۱ است و به‌طور نسبی به‌صورت خطی با حد روانی رس (Lq) مطابق با معادله Skempton (1984) تغییر می‌کند (شمشکی و همکاران، ۱۳۸۴):

$$C_c = 0.007(Lq - 10\text{percent}) \quad (7)$$

که در آن، P_{11} فشار اولیه و P_{12} فشار ثانویه است.

Taylor (1985) رابطه زیر را برای محاسبه فرورانش (Sub) ارائه کرد

(شمشکی و همکاران، ۱۳۸۴):

$$\text{Sub} = Z_1 * \left(\frac{e_1 - e_2}{e_1 + 1} \right) \quad (8)$$

ارتفاع Z_1 ، حجم کلی بر واحد سطح، e_1 مقدار پوکی اولیه و e_2 مقدار پوکی ثانویه است.

بر حسب تئوری الاستیک رابطه زیر برای محاسبه مقدار فرورانش ارائه شد:

$$\text{Sub} = (P_{12} - P_{11}) * \left(\frac{Z_1}{E} \right) \quad (9)$$

$$E = (e_1 + 1) / \left(\frac{e_1 - e_2}{P_{12} - P_{11}} \right) \quad (10)$$

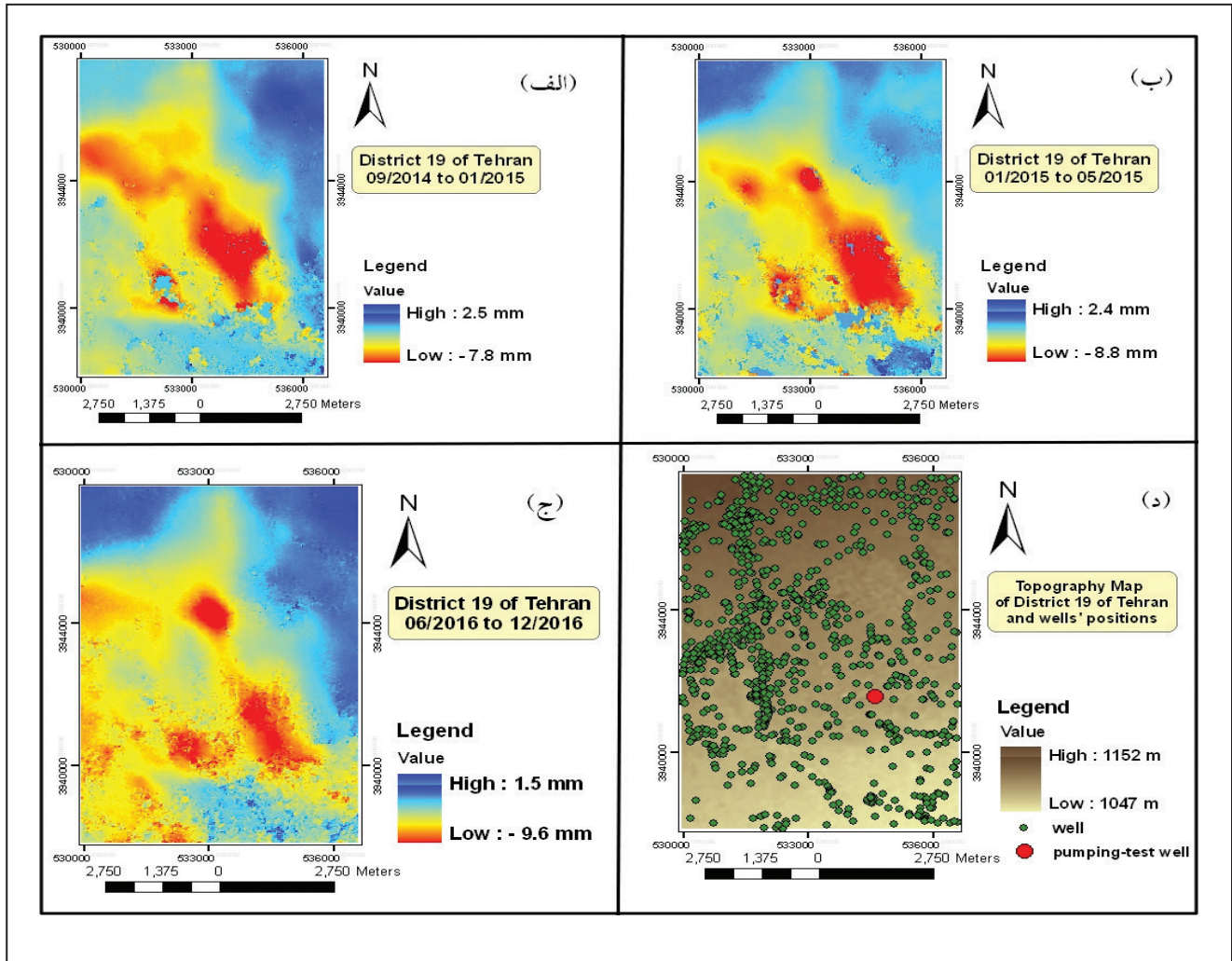
که E فاکتور تناسب به نام مدول الاستیسیته یانگ است.

در همه روابط ارائه شده نیاز به این است که نمونه یا نمونه‌هایی از خاک از ژرفاهای مختلف آبخوان برداشت شود و مقدار پوکی اولیه و یا ثانویه بدون تغییر در بافت خاک به دست آید؛ که مسلماً تغییراتی در بافت خاک حاصل می‌شود و هیچ کدام مقدار فرورانش را طی زمان برآورد نمی‌کنند. همچنین حفاری و نمونه‌برداری بسیار مشکل و پرهزینه هستند، به‌ویژه در آبخوان محبوس طی زمانی که سطح آب افت می‌کند. در نتیجه در این پژوهش با استفاده از داده‌های هدایت هیدرولیکی به دست آمده طی پنج سال توسط آزمون پمپاژ و با به‌کارگیری الگوریتم‌های ژنتیک و الگوریتم چندمنجه‌گرایی گروهی ذرات و داده‌ها مقدار فرورانش به دست آمده توسط روش ژنودزی، روابطی ارائه شده‌اند تا بتوان مقدار فرورانش در منطقه مربوط و مناطق با شرایط ترکیب سنگی مشابه و یا تقریباً مشابه را طی زمان برآورد کرد و مدیریت صحیح‌تری برای برداشت آب در این منطقه در پیش گرفت. با توجه مؤثر بودن ترکیب سنگی، زمین‌ساخت، هیدروژئولوژی، هیدرولوژی و هیدرومتئورولوژی بر ارتباط میان نرخ فرورانش زمین و هدایت هیدرولیکی آبخوان طی زمان، ضرایبی در نظر گرفته شد. برای به دست آوردن این ضرایب با توجه به روند اولیه داده‌ها و تعداد ضرایب، داده‌هایی (ذراتی) به‌طور تصادفی در فضای بهینه‌سازی پخش شده‌اند. در هر مرحله تابع شایستگی همه پاسخ‌ها با همدیگر مقایسه می‌شوند و به ذراتی که تابع شایستگی آنها بهتر از تابع شایستگی مرحله پیش باشد؛ امتیاز داده می‌شود و میان ذرات، ذره‌ای که بهترین مقدار تابع شایستگی را دارد؛ به عنوان ذره منتخب به شمار می‌رود و دوباره ذرات پخش می‌شوند و مقدار تابع شایستگی مربوط به هر یک به دست می‌آید و با مقادیر تابع شایستگی حاصله از دیگر ذرات مقایسه و در هر مرحله امتیازدهی انجام می‌شود و ذره‌ای که بهترین مقدار تابع شایستگی را دارد؛ به عنوان ذره یا پاسخ نهایی انتخاب می‌شود. این چرخه آن قدر ادامه می‌یابد تا معیارهای خاتمه حاصل شوند. در این مطالعه دو معیار خاتمه فرض شده‌اند: (۱) تعداد تکرار فرایند ۱۰۰۰۰ مرتبه است و (۲) هنگامی که هدایت هیدرولیکی آبخوان به $1 * 10^{-6}$ m/sec می‌رسد؛ نرخ فرورانش برابر با صفر می‌شود. چرا که دیگر آبی از آبخوان برداشت نمی‌شود. با توجه به روند حاصل توسط الگوریتم MEPSO و داده‌های موجود، نرخ فرورانش و هدایت هیدرولیکی ارائه شده‌اند:

$$\text{Sub} = 1/10^{0.1028 * t + 0.5775} \quad (11)$$

$$K = 1/10^{0.0503 * t + 3.9595} \quad (12)$$

$$\text{Sub} = 1/10^{\left(\frac{\log_{10} \left(\frac{1}{K} \right) - 3.9595}{0.0503} \right) + 0.5775} \quad (13)$$



شکل ۹- الف) نگاشت فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۴۰۹۲۹ تا ۲۰۱۵۰۱۱۹ (۱۱۲ روز) با استفاده از تصویر *COSMO-SkyMed4*؛ ب) نگاشت فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۵۰۱۲۹ تا ۲۰۱۵۰۵۲۷ (۱۲۸ روز) با استفاده از تصویر *COSMO-SkyMed4*؛ ج) نگاشت فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۶۰۶۱۱ تا ۲۰۱۶۱۲۲۰ (۱۹۲ روز) با استفاده از تصویر *Sentinel-1A* قدرت تفکیک مکانی در هر ۳ تداخل نما ۲۲/۵ متر است؛ د) در این شکل پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری روی نقشه توپوگرافی نشان داده شده و همچنین، چاهی که در آن آزمون پمپاژ انجام شده به رنگ سرخ نشان داده شده است.

جدول ۴- تغییرات هدایت هیدرولیکی و فرونشست زمین در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱.

سال انجام آزمون پمپاژ	1387	1388	1389	1390	1391
K (m/sec) (به دست آمده وسط الگوریتم (MEPSO))	$1 * 10^{-4}$	$9.1 * 10^{-5}$	$7.1 * 10^{-5}$	$6.6 * 10^{-5}$	$6.58 * 10^{-5}$
Sub (توسط ژنودزی زمینی)	0.10	0.08	0.07	0.04	0.04

۶- روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR)

اندازه‌گیری‌های زمینی فرونشست تنها برای مناطق با مقیاس کوچک مناسب است و مشاهدات سنجش از دور برای بررسی جامع تغییر شکل سطح زمین در مقیاس بسیار بزرگ ضروری است. روش تداخل‌سنجی راداری می‌تواند جابه‌جایی زمین را در یک محدوده بسیار بزرگ مقیاس با دقت بسیار بالا با داده‌های به هنگام ارزیابی کند. در این روش با اختلاف فاز دو تصویر ماهواره‌ای راداری (slave و master) مقدار جابه‌جایی سطح زمین در امتداد خط دید ماهواره بر پایه طول موج گرفته شده تعیین می‌شود (Erban et al., 2014). در مشاهدات SAR، دو هندسه متفاوت از تصویربرداری وجود دارد که گذر صعودکننده با مشاهده باختری و گذر نزول‌کننده با مشاهده خاوری است و گفتنی است که با وجود آشکار شدن تغییر شکل مشابه، ممکن است یک تداخل نما یا نقشه اختلاف فاز از مدارهای صعودکننده با مدارهای نزول‌کننده متفاوت باشد (Ferretti et al., 2007). در این روش نیز مانند دیگر روش‌های مطالعاتی محدودیت‌هایی وجود دارد که می‌توان به خطاهای مداری، توپوگرافی، اتمسفری و نوفه‌های رایج در تصاویر راداری اشاره کرد که سبب نبود همبستگی میان زوج تصاویر انتخابی برای پردازش می‌شوند. هر کدام از این خطاها می‌تواند با انتخاب روش مناسب پردازش به پایین‌ترین سطح ممکن برسند تا نتایج قابل قبول تری ارائه شود.

برای بررسی کمی میزان فرونشست طی ۳ سال اخیر در منطقه ۱۹ تهران (جنوب دشت تهران) از تصاویر ماهواره‌ای COSMO-SkyMed4 در محدود باند X برای سال‌های ۲۰۱۴ میلادی (۱۳۹۳ ش.) و ۲۰۱۵ میلادی (۱۳۹۴ ش.) و از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1A در محدود باند C برای سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۵ ش.) استفاده شد (روستایی، ۱۳۹۵). ۳ تداخل نما با بازه‌های زمانی ۲۰۱۵۰۱۱۹ تا ۲۰۱۴۰۹۲۹ (۱۱۲ روز)، ۲۰۱۵۰۵۲۷ تا ۲۰۱۵۰۱۲۹ (۱۲۸ روز) و ۲۰۱۶۱۲۲۰ تا ۲۰۱۶۰۶۱۱ (۱۹۲ روز) با پردازش استاندارد تهیه شد. بیشینه فرونشست به‌طور متوسط حدود ۱ سانتی‌متر است (شکل‌های ۹- الف، ب و ج). شکل ۹- د نیز تغییرات توپوگرافی منطقه ۱۹، محل چاه‌ها و محل چاهی که آزمون پمپاژ در آن انجام شده است را نشان می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

مدیریت درست آب زیرزمینی یک آبخوان محبوس نیازمند برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی سامانه‌های آبخوان همچون قابلیت انتقال‌پذیری، هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره هستند. در مطالعه حاضر کفایت و کارآمدی چندین روش بهینه‌سازی پیشرفته در برآورد متغیرهای هیدرولیکی آبخوان تحت فشار از داده‌های آزمون پمپاژ افت-زمان ارزیابی شده و سپس با داده‌های هدایت هیدرولیکی حاصل از الگوریتم MEPSO و داده‌های مقدار فرونشست برای سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱ به دست آمده توسط روش ترازایی، روابطی ارائه شدند که بتوان مقدار فرونشست را با توجه به

تغییرات هدایت هیدرولیکی در منطقه مربوط و مناطق مشابه به آن برای سال‌های آینده پیش‌بینی و از خطرات کاهش هدایت هیدرولیکی آبخوان (در پی متراکم شدن لایه‌های رسوبی) و فرونشست زمین جلوگیری کرد؛ همچنین، داده‌های روش InSAR برای بررسی درستی روابط ب دست آمده به کار رفت و نتایج زیر به دست آمد:

روش‌های الگوریتم ژنتیک و MEPSO اثبات شدند تا روش‌های قابل اعتماد و سودمندی برای برآورد متغیرهای سامانه‌های آبخوان محبوس تحت شرایط غیرپایدار باشند.

بر طبق روابط حاصل از الگوریتم MEPSO پس از ۳۰ سال هدایت هیدرولیکی آبخوان به 1×10^{-6} m/sec می‌رسد و دیگر آبی از آبخوان منطقه ۱۹ تهران برداشت نمی‌شود.

تا سال ۱۴۱۷ در منطقه ۱۹ تهران، ۵۲ سانتی‌متر فرونشست زمین رخ می‌دهد. با به‌کارگیری داده‌های نرخ فرونشست حاصل از روش InSAR اثبات شد که روابط به دست آمده با به‌کارگیری الگوریتم MEPSO برای برآورد نرخ فرونشست طی زمان (برای سال‌های آینده) کارآمد و قابل اطمینان هستند.

روش MEPSO می‌تواند پاسخ‌های بهینه را با به‌کارگیری تعداد تکرار (یا تعداد نسل) کمتر در مقایسه با روش‌های الگوریتم ژنتیک بیابد. روش الگوریتم ژنتیک با به‌کارگیری ترکیب‌شدگی تک‌نقطه‌ای می‌تواند پاسخ بهینه را با احتمال جهش کمتر در مقایسه با الگوریتم ژنتیک با به‌کارگیری ترکیب‌شدگی یکنواخت بیابد.

MEPSO بهتر از الگوریتم‌های ژنتیک و روش گرافیکی برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی یک آبخوان تحت فشار بر پایه تابع شایستگی است. تجزیه‌های حساسیت پیشنهاد کردند که متغیرهای به دست آمده با به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی، کمترین مجموع مربعات خطا را دارند. به‌کارگیری کدهای توسعه یافته در این مطالعه بسیار آسان هستند و این می‌تواند کارشناسان آب زیرزمینی را یاری کند تا در زمان بسیار کم و با دقت بسیار بالایی متغیرهای هیدرولیکی آبخوان و مقدار فرونشست را طی زمان برآورد کنند.

۸- سپاسگزاری

از آقایان پروفسور استیون گورولیک از دانشگاه استنفورد، پروفسور جن زیرت از دانشگاه زوریخ، پروفسور اکبر جوادی از دانشگاه اکستر و مهندس بیاتانی از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و همه اساتیدی که در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور برای راهنمایی‌هایشان برای پایان یافتن این مطالعه علمی به‌طور درست و شایسته سپاسگزاری می‌شود.

کتابنگاری

روستایی، م.، ۱۳۹۵- بررسی فرانشست زمین استان تهران، همایش پدیده فرانشست زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 درویش‌زاده، ۱۳۸۲- زمین‌شناسی ایران، انتشارات موسسه امیرکبیر، ص. ۱ تا ۹۰۱.
 شمشکی، ع.، بلورچی، م. ج. و انصاری، ف.، ۱۳۸۴- بررسی فرانشست زمین در دشت تهران- شهریار، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ص. ۱ تا ۷۴.

References

- Aghanabati, A., 1993- Geological map of Tehran. Scale 1:100000, ed: Geological Survey of Iran (GSI).
- Abd-Elhamid, H. F. and Javadi, A. A., 2011- A cost-effective method to control seawater intrusion in coastal aquifers, *Water resources management*, vol. 25, pp. 2755-2780.
- Batani, S., Mortazavi-Naeini, M., Ataie-Ashtiani, B., Jeng, D. and Khanbilvardi, R., 2015- Evaluation of methods for estimating aquifer hydraulic parameters, *Applied Soft Computing*, vol. 28, pp. 541-549.
- Das, S., Abraham, A., and Konar, A., 2008- Automatic kernel clustering with a multi-elitist particle swarm optimization algorithm, *Pattern recognition letters*, vol. 29, pp. 688-699.
- Davis, L., 1991- *The handbook of genetic algorithms* Van Nostrand Reingold, New York.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T., 2002- A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 6, pp. 182-197.
- Eberhart, R. C., 2001- *Optimization, Particle Swarm Developments, Applications and Resources*, ed: Purdue School of Engineering and Technology 799 West Michigan Street Indianapolis, IN 46202 USA, pp. 1-145.
- Erban, L. E., Gorelick, S. M., and Zebker, H. A., 2014- groundwater extraction, land subsidence and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam, pp. 1-5.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F. and Massonet, D., 2007- *InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation* vol. 19, pp. 1-106.
- Gentry, R. W., Camp, C. V. and Anderson, J. L., 2001- Use of GA to determine areas of accretion to semiconfined aquifer, *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 127, pp. 738-746.
- Gershenwald, J. E., Colome, M. I., Lee, J. E., Mansfield, P. F., Tseng, C. H. and Lee, J. J., 1998- Patterns of recurrence following a negative sentinel lymph node biopsy in 243 patients with stage I or II melanoma, *Journal of clinical oncology*, vol. 16, pp. 2253-2260
- Golberg, D. E., 1989- *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Addison wesley, vol. 1989, pp. 102.
- Goulter, I., 1992- Systems analysis in water-distribution network design: From theory to practice, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 118, pp. 238-248.
- Gwo, J. P., 2001- In search of preferential flow paths in structured porous media using a simple genetic algorithm- *Water Resources Research*, vol. 37, pp. 1589-1601.
<http://www.aqtesolv.com>.
- Khu, S. T., Liong, S. Y., Babovic, V., Madsen, H. and Muttill, N., 2001- Genetic programming and its application in real-time runoff forecasting 1, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 37, pp. 439-451.
- Kresic, N., 1996- *Hydrogeology and groundwater modeling*: CRC press, pp. 86-183.
- Kresic, N., 2006- *Hydrogeology and groundwater modeling*: CRC press, pp. 1-53.
- Mahmoodpour, M., 2015- Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, iran, pp. 6-28.
- Meier, R. W. and Barkdoll, B. D., 2000- Sampling design for network model calibration using genetic algorithms, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 126, pp. 245-250.
- Molaei, M., Meshkat, T., Akbari, K., Nazarjani, M., Esmailzadeh Nasiri, M. and Hesami, 2016- Report of water resources' management of Tehran, water resources' management Institute of Iran, chapters 1-6.
- Poli, R., Kennedy, J. and Blackwell, T., 2007- Particle swarm optimization, *Swarm intelligence*, vol. 1, pp. 33-57.
- Prasad, K. L. and Rastogi, A., 2001- Estimating net aquifer recharge and zonal hydraulic conductivity values for Mahi Right Bank Canal project area, India by genetic algorithm, *Journal of Hydrology*, vol. 243, pp. 149-161.

- Samuel, M. P. and Jha, M. K., 2003- Estimation of aquifer parameters from pumping test data by genetic algorithm optimization technique," *Journal of irrigation and drainage engineering*, vol. 129, pp. 348-359.
- Shang, C., Srinivasan D. and Reindl, T., 2016- An improved particle swarm optimisation algorithm applied to battery sizing for stand-alone hybrid power systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 74, pp. 104-117.
- Simpson, A. R., Dandy, G. C. and Murphy, L. J., 1994- Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization," *Journal of water resources planning and management*, vol. 120, pp. 423-443.
- Skempton, A. W., 1984- The pore-pressure coefficients A and B. *Soil Mechanics Journal*, Thomas Telford Publishing, pp. 65-69.
- Sun, H., Grandstaff, D. and Shagam, R., 1999- Land subsidence due to groundwater withdrawal: potential damage of subsidence and sea level rise in southern New Jersey, USA, *Environmental Geology*, vol. 37, pp. 290-296.
- Sun, N. Z., 1994- *Inverse Problem in Groundwater Modeling*, Kluwer Academic Publishers, ed: Boston, pp. 1-24.
- Taylor, J. H. 1985- *Controlled traffic: A spin-off of soil dynamics research*, Information Systems Division, National Agricultural Library, pp. 1-186.
- Theis, C. V., 1935- The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 16, pp. 519-524.
- Wardlaw, R. and Sharif, M., 1999- Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation, *Journal of water resources planning and management*, vol. 125, pp. 25-33.

Predicting land subsidence rate by estimating aquifer hydraulic parameters, obtained from aquifer-test data and optimization algorithms in the district 19 of Tehran

M. Arjomandi¹, A. Saremi^{2*}, A. P. Sarraf³, H. Sedghi⁴ and M. Roustaei⁵

¹Ph.D. Student, Department of Water Sciences and Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

²Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

³Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Roudehen Branch, Roudehen, Iran

⁴Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

⁵Ph.D., Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 2017 February 18

Accepted: 2017 July 08

Abstract

Groundwater modeling, land subsidence hazards and proper management of groundwater resources of the alluvial aquifer in the district 19 of Tehran, south of Tehran Plain need precise estimation of aquifer hydraulic parameters. Besides, traditional techniques and usual graphical methods have been approximate, expensive and time-consuming. In this paper, ten sets of aquifer test data were selected; moreover, these data were recorded in a well located in district 19 of Tehran, southwest of Tehran Plain during five years (2008 to 2012). For solving the previous methods' problems, three computer codes have been developed to optimize aquifer parameters using three optimization approaches on the other hand, two kinds of genetic algorithms and a multi-elitist particle swarm optimization (MEPSO) which avoid getting stuck in local optima and save time. The efficacy and efficiency of the developed codes have been examined using ten sets of aquifer test data of a confined aquifer, and then their results have been compared with the results obtained by the graphical approach using AquiferTest software. Based on the fitness function, i.e. sum of square errors, the MEPSO and the GAs in descending order are more reliable for estimating the parameters contrast with the graphical method. Furthermore, the sensitivity analysis of the parameters during the performance of the optimization approaches has authenticated that the results obtained are enough precise and reliable. Then an equation has been presented according to the amounts of hydraulic conductivity which have been obtained using MEPSO during the years and the amounts of land subsidence rates which have been obtained using geodetic measurement methods to predict the amounts of land subsidence rates through the time when the amount of hydraulic conductivity will reach to 1×10^{-6} m/sec. Ultimately, based on the equation, after 30 years the amount of hydraulic conductivity will reach to 1×10^{-6} m/sec, and the total amount of land subsidence will be 0.5213 m from 2008 to 2038. Moreover, land subsidence rates' data obtained from interferometry synthetic aperture radar (InSAR) have confirmed the accuracy of the equations.

Keywords: Particle swarm optimization, South of Tehran Plain, Groundwater modeling, Land subsidence rate, InSAR

For Persian Version see pages 17 to 26

*Corresponding author: A. Saremi; E-mail: iranma4@gmail.com