

Optimal Extraction from Coastal Groundwater Resources Using Parallel-Processing Based Simulation-Optimization Decision Model (Case Study of Ajabshir Coastal Aquifer, Iran)

M. Mostafaei-Avandari¹ and H. Ketabchi^{2*}

Abstract

Groundwater is one of the main sources of freshwater in coastal areas and it is accordingly essential to prevent excessive seawater intrusion. In case of seawater intrusion into coastal aquifers, remediation of aquifer requires long-term and expensive efforts. Therefore and for the purpose of determining the optimal management strategies, a simulation - optimization model can be used as a decision model. In this study, a simulation - optimization decision model has been developed for Ajabshir plain aquifer via the SUTRA numerical model and the evolutionary optimization algorithm of ant colony optimization. In order to reduce the runtime of simulation - optimization decision model, parallel processing in the population computations of optimization algorithm was used. Two management problems have been examined in this study with objective functions and constraints under opposite behavior; minimizing the net recharge rate (meaning the maximizing extraction from the aquifer) and controlling the seawater intrusion (preventing the deterioration of groundwater due to salinity at the control points). Results from simulation - optimization decision model exhibited that by changing the extraction pattern in different aquifer zones, the net recharge of the aquifer in the second half of year decreases by -1.87 million cubic meters compared to the current situation (Increase extraction) in the first management problem. In the second management problem, the average salinity concentration at the control points decreases 30%.

Keywords: Ajabshir Plain Aquifer, Groundwater Extraction, Parallel Processing, Seawater Intrusion, Simulation-Optimization Decision Model.

Received: December 15, 2018
Accepted: March 6, 2019

بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی ساحلی با استفاده از مدل تصمیم‌شبییه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر پردازش موازی (مطالعه موردی آبخوان ساحلی عجب‌شیر، ایران)

محمد مصطفایی اوندی^۱ و حامد کتابچی^{۲*}

چکیده

آب زیرزمینی در مناطق ساحلی یکی از منابع اصلی آب شیرین به شمار می‌آید. در صورت پیشروی آب شور دریا به آبخوان‌های ساحلی، بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی نیازمند اقدامات درازمدت و پرهزینه می‌باشد. لذا پیشگیری از وقوع پیشروی بی‌رویه آب شور دریا امری ضروری است. برای این منظور می‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تلفیقی به‌عنوان مدل تصمیم برای تعیین راهبردهای مدیریتی بهینه استفاده نمود. در این مطالعه از مدل تصمیم‌شبییه‌سازی- بهینه‌سازی آبخوان ساحلی دشت عجب‌شیر با بهره‌گیری از مدل عددی سوترا و الگوریتم بهینه‌سازی فراکوشی جامعه مورچه‌ها برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی مدنظر، استفاده شده است. به‌منظور کاهش زمان اجرای مدل، از پردازش موازی در محاسبات جمعیت الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده است و این امر سبب تسریع محاسبات گردید. دو مسأله مدیریتی مورد بررسی در این مطالعه شامل توابع هدف و قیودی با رفتار متضاد بوده است که حداقل نمودن نرخ تغذیه خالص (به معنی حداکثر کردن برداشت از آبخوان) و کنترل پیشروی آب شور (جلوگیری از بدتر شدن وضعیت شوری در نقاط کنترلی) را سبب می‌شود. نتایج حاصل از اجرای مدل تصمیم‌شبییه‌سازی- بهینه‌سازی نشان داد که با تغییر الگوی برداشت از نواحی مختلف آبخوان، در مسئله اول تغذیه خالص آبخوان در نیمه دوم سال نسبت به شرایط فعلی ۱/۸۷- میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد (افزایش برداشت) و در مسأله دوم، متوسط غلظت شوری در نقاط کنترل، ۳۰ درصد کاهش پیدا می‌کند.

کلمات کلیدی: آبخوان دشت عجب‌شیر، برداشت آب زیرزمینی، پردازش موازی، پیشروی آب شور، مدل تصمیم‌شبییه‌سازی- بهینه‌سازی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۹/۲۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۲/۱۵

1- M.Sc., Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: h.ketabchi@modares.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲- استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

رویکرد وابسته به چگالی و در مطالعه Rao et al. (2003) نیز از مدل‌های عددی با رویکرد اختلاط‌ناپذیر استفاده شده است.

گام دوم در راستای توسعه راهبرد مدیریت بهینه، انتخاب مدل بهینه‌سازی مناسب می‌باشد که همراه با مدل شبیه‌سازی، می‌تواند انواع مشکلات مدیریتی را با توجه به جنبه‌های مختلف حل کند. محققان به منظور حل مسأله بهینه‌سازی از سه نوع اصلی مدل‌های مدیریتی را استفاده کرده‌اند که شامل (۱) روش‌های برنامه‌ریزی خطی^۳، (۲) برنامه‌ریزی غیرخطی^۴ و (۳) الگوریتم‌های فراکاوشی^۵ است. در مطالعه Kourakos and Mantoglou (2009) از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی استفاده شده است و مطالعاتی مانند (Sreekanth and Datta, 2010) و (Song et al., 2018) الگوریتم‌های فراکاوشی را به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده کرده‌اند. مشکلات مدیریت آبخوان ساحلی به‌طور معمول مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی ریاضی هستند، از طرفی عدم توانایی مدل‌های برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی در برخورد با مشکلات غیرخطی و دشواری در رسیدن به بهینه مطلق و امکان همگرایی به مقادیر بهینه محلی، اقبال بیشتری را برای استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی سبب شده است. این الگوریتم‌ها به‌راحتی می‌توانند راه‌حل‌های بهینه مشکلات بهینه‌سازی پیچیده را در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی پیدا کنند (Ataie-Ashtiani and Ketabchi, 2011; Singh, 2015).

تاکنون محققان زیادی مانند (Christelis and Mantoglou, 2016) و (Huang and Chiu, 2018) از چارچوب شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تلفیقی برای مدیریت آبخوان‌های ساحلی استفاده کرده‌اند. یک کار چالش برانگیز در کاربرد چنین روش‌هایی در مقیاس بزرگ، زمان محاسباتی قابل توجه آن به دلیل نیاز به تعداد زیادی شبیه‌سازی می‌باشد، به‌عنوان مثال در (Song et al., 2018) برای اجرای و فراخوانی ۲۰۲۰۰ مرتبه شبیه‌سازی عددی توسط الگوریتم بهینه‌سازی، زمان اجرایی برابر ۳۳۲ ساعت لازم بود. از این‌رو، کاهش کل زمان محاسبات و تعداد شبیه‌سازی‌ها تأثیر قابل توجهی بر کارایی نهایی محاسباتی دارد (Werner et al., 2013). رویکردهایی نظیر پردازش موازی (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015b,c) و استفاده از شبه‌مدل‌هایی نظیر شبکه عصبی مصنوعی (Bhattacharjya and Datta, 2005, 2009) به‌جای مدل عددی اصلی از جمله رویکردهایی است که در مطالعات پیشین برای کاهش زمان محاسبات در چارچوب شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تلفیقی استفاده شده است. استفاده از شبه‌مدل‌ها می‌تواند سبب بروز مشکلاتی از جمله افزایش عدم قطعیت در عوامل پیش‌بینی شده و خطا در روند

آب‌های زیرزمینی سهم قابل توجهی از کل آب‌های شیرین موجود را تشکیل می‌دهند و با توجه به در دسترس بودن آن‌ها یکی از منابع مهم تأمین آب در مناطق مختلف جهان و بخصوص مناطق خشک و نیمه‌خشک که فاقد آب‌های سطحی می‌باشند، هستند. سفره‌های آب زیرزمینی در مناطق ساحلی نیز منبع مهم تأمین آب به شمار می‌آیند. مناطق ساحلی اغلب پرجمعیت و صنعتی می‌باشند و امکان بروز مشکلات محیط‌زیستی نیز برای آن‌ها وجود دارد (Werner et al., 2013). یکی از مشکلات رایج در بسیاری از آبخوان‌های ساحلی در سراسر جهان پیشروی آب شور^۱ می‌باشد که می‌تواند با اعمال فشارهای طبیعی و انسانی مانند افزایش سطح آب دریاها یا تغییر در وضعیت بارندگی و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی اتفاق بیفتد، به طوری که تعادل بین آب شور و شیرین بهم خورده و سبب آلودگی منابع آب شیرین زیرزمینی گردد (Dentoni et al., 2015). با افزایش پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی، پاک‌سازی آبخوان‌ها امری ضروری بوده و نیازمند اقدامات و راهکارهای عملی در درازمدت است و تشدید این پدیده هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی فراوانی را به وجود می‌آورد (Sreekanth and Datta, 2010). با توجه به اهمیت آبخوان‌های ساحلی و برای جلوگیری از به وجود آمدن مشکلات ذکر شده، اتخاذ راهبردهای برنامه‌ریزی شده برای تصمیم‌گیری‌های صحیح در مورد آبخوان‌های ساحلی امری ضروری است. چارچوب شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تلفیقی^۲، ساختاری قدرتمند است که می‌تواند چارچوبی کارآمد برای مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی ساحلی، فراهم کند و ابزار تصمیم‌گیری توانمندی را بدین منظور فراهم نماید (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015b).

اولین گام در برپایی مدل تصمیم شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تلفیقی، توسعه مدل شبیه‌سازی می‌باشد. روش‌هایی که برای شبیه‌سازی سیستم آبخوان ساحلی به کار گرفته می‌شوند عبارت‌اند از مدل‌های تحلیلی و مدل‌های عددی. دو رویکرد برای بررسی پیشروی آب شور به سمت آبخوان‌های ساحلی وجود دارد؛ رویکرد شبیه‌سازی سیالات اختلاط‌ناپذیر و رویکرد شبیه‌سازی جریان و انتقال وابسته به چگالی (Werner et al., 2013). رویکرد شبیه‌سازی سیالات اختلاط‌ناپذیر برای مدل‌سازی ساده‌تر استفاده شده و بار محاسباتی کمتری دارد، ولی نمی‌تواند وضعیت واقع‌بینانه را نمایش دهد درحالی‌که مدل جریان و انتقال وابسته به چگالی تطابق بیشتری با واقعیت دارد (Qahman et al., 2005). در مطالعات مربوط به مدیریت آبخوان‌های ساحلی، محققانی مانند (Mantoglou, 2003) از روش‌های تحلیلی برای شبیه‌سازی آبخوان‌های ساحلی استفاده کرده‌اند و مطالعات (Javadi

بهینه‌سازی شود. همچنین روند آموزش شبه‌مدل‌ها یک کار زمان‌گیر و چالشی است به‌خصوص اگر زمان شبیه‌سازی مدل عددی اصلی، قابل توجه باشد (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015b).

در مطالعات (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015a, b) مرور کامل و جامعی بر مطالعات پیشین در حوزه مدیریت آبخوان‌های ساحلی انجام شده است. بر این اساس، از جمله اهداف و محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای مدیریت آبخوان‌های ساحلی عبارت‌اند از به حداکثر رساندن نرخ برداشت (Christelis et al., 2018)، کم کردن میزان افت (Karatzas and Dokou, 2015)، به حداقل رساندن حجم آب شور پیشروی کرده به آبخوان (Kourakos and Mantoglou, 2015)، تعیین مکان چاه‌ها (Park and Aral, 2004) و حداقل کردن هزینه (Qahman et al., 2005; Javadi et al., 2015).

۲- معرفی منطقه مطالعاتی

محدوده مطالعاتی عجب‌شیر واقع در استان آذربایجان شرقی با مساحت ۶۹۹/۴ کیلومتر مربع، حدود ۱/۳ درصد از کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه را در برمی‌گیرد. از این میزان ۱۲۱ کیلومتر مربع مربوط به وسعت دشت و ۵۷۸/۴ کیلومتر مربع را ارتفاعات محدوده تشکیل می‌دهد. آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی عجب‌شیر از نوع آزاد با وسعت ۸۸ کیلومتر مربع بوده که ۷۲/۷۲ درصد از گستره دشت را فراگرفته است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی عجب‌شیر نشان داده شده است که در ۹۰ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان تبریز در محدوده طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۳ دقیقه واقع شده است. همچنین در این شکل مرز دشت و محل قرارگیری رودخانه قلعه‌چای نیز نمایش داده شده است.

استفاده از مدل‌های تصمیم‌شبه‌سازی - بهینه‌سازی تلفیقی در تصمیم‌گیری علمی و عملی به‌منظور مدیریت آبخوان‌های ساحلی به دلیل پیچیدگی موضوع و عدم امکان تصمیم‌گیری به شیوه‌های سنتی امری ضروری است (Saghi-Jadid and Ketabchi, 2019). اکثر مطالعات انجام شده در زمینه مدیریت آبخوان‌های ساحلی از یک منطقه مطالعاتی فرضی استفاده کرده‌اند و تعداد زیادی از این مطالعات برای کاهش زمان محاسبات به‌جای مدل عددی اصلی از شبه‌مدل‌هایی نظیر شبکه عصبی مصنوعی بهره برده‌اند. با توجه به مشکلاتی که در رابطه با استفاده از شبه‌مدل‌ها ذکر شد این امر می‌تواند سبب بروز مشکلاتی از جمله افزایش عدم قطعیت و خطا در روند بهینه‌سازی شود. لذا رجوع به تکنیک‌های دیگر مانند پردازش موازی نیز می‌تواند مفید باشد و چنین مسائلی را هم نداشته باشد.

در این مطالعه چارچوب مدل تصمیم‌شبه‌سازی - بهینه‌سازی برای مدیریت بهینه آبخوان ساحلی دشت عجب‌شیر توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته است، ساختار مدل شبیه‌سازی، برگرفته از مطالعه Farhoudi- and Farhoudi-Hafadaran and Ketabchi (2018) و Hafadaran (2017) می‌باشد که در آن برای شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی دشت عجب‌شیر و شبیه‌سازی پدیده پیشروی آب شور و ناحیه انتقالی ایجاد شده از مدل عددی سوتره^۶ استفاده شده است، تابع هدف و محدودیت‌های در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر عبارت‌اند از حداقل‌سازی نرخ تغذیه خالص (نرخ تغذیه منهای نرخ برداشت) و کنترل پیشروی آب شور. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی پیوسته جامعه مورچه‌ها (CACO⁷) به‌عنوان ابزار

کمترین و بیشترین تراز مربوط به سطح سنگ کف آبخوان مطالعاتی عجب‌شیر به ترتیب ۱۲۲۰ و ۱۲۹۰ متر می‌باشد. سنگ کف آبخوان در مناطق مرز دریاچه ارومیه، جنوب و جنوب‌شرقی دشت دارای تراز ۱۲۶۰ متری بوده که به سمت مرکز دشت کاهش یافته و به تراز ۱۲۲۰ متری می‌رسد. همچنین شمال و شمال‌شرقی دشت که مشرف به کوه‌های اطراف می‌باشند دارای تراز ۱۲۹۰ متری می‌باشند. با استفاده از لوگ حفاری چاه‌های اکتشافی، نحوه لایه‌بندی طبقات آبخوان به دست آمده است. بدین صورت که زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی دشت عجب‌شیر از ۱۰ لایه اصلی از ترکیب سه نوع خاک رس، ماسه و شن تشکیل شده است. قسمت شمال‌شرقی دشت با تراز حدود ۱۳۴۵ متر دارای بیشترین ارتفاع بوده و با شیبی به سمت سواحل دریاچه ختم می‌گردد و در قسمت جنوبی دشت به تراز ۱۲۸۴ متر می‌رسد (Farhoudi-Hafadaran and Ketabchi, 2018). با توجه به نتایج بررسی‌ها در این محدوده مطالعاتی، میانگین بارندگی سالیانه درازمدت (بر مبنای سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۱) در دشت ۲۶۵ میلی‌متر می‌باشد. مقدار متوسط دما و تبخیر سالانه در دشت عجب‌شیر به ترتیب برابر ۱۲ درجه سانتی‌گراد و ۱۷۰۰ میلی‌متر می‌باشد، مقدار نفوذ از

بارندگی در نواحی مختلف آبخوان ۱۰ تا ۱۵ درصد از بارندگی سالانه دشت عجبشیر می‌باشد (Farhoudi-Hafadaran, 2017). هیدروگراف آبخوان ابرفتی دشت عجبشیر در شکل ۲ ارائه گردیده است. بر اساس این هیدروگراف، تراز متوسط آبخوان طی سال‌های ۱۹۸۴ تا ۱۹۹۵ تقریباً ثابت بوده و تغییرات زیادی نداشته است و از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۱ این هیدروگراف سیر نزولی داشته و تراز آبخوان کاهش یافته است و در کل دوره آماری متوسط تغییرات سطح آب زیرزمینی ۰/۱۷- متر بوده است.

بارندگی در نواحی مختلف آبخوان ۱۰ تا ۱۵ درصد از بارندگی سالانه دشت عجبشیر می‌باشد (Farhoudi-Hafadaran, 2017). هیدروگراف آبخوان ابرفتی دشت عجبشیر در شکل ۲ ارائه گردیده است. بر اساس این هیدروگراف، تراز متوسط آبخوان طی سال‌های ۱۹۸۴ تا ۱۹۹۵ تقریباً ثابت بوده و تغییرات زیادی نداشته است و از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۱ این هیدروگراف سیر نزولی داشته و تراز آبخوان کاهش یافته است و در کل دوره آماری متوسط تغییرات سطح آب زیرزمینی ۰/۱۷- متر بوده است.

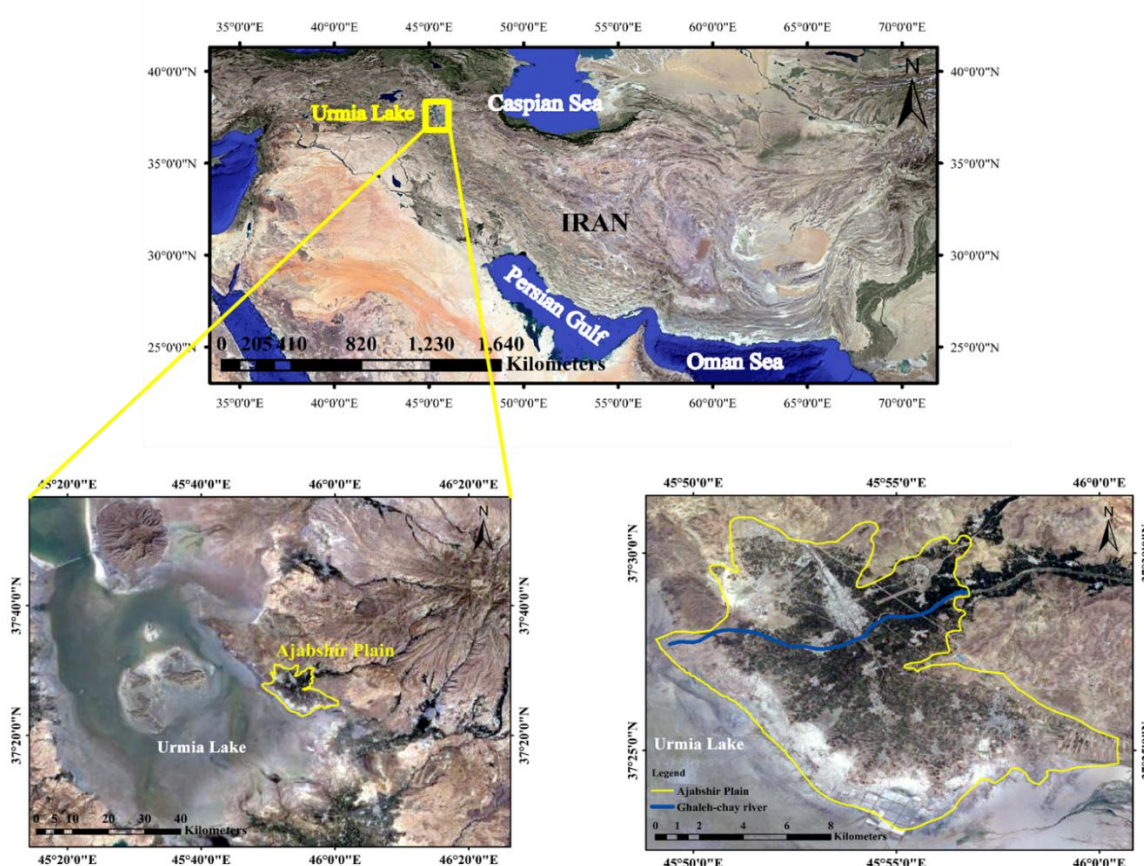


Fig. 1- Study area of Ajabshir plain
شکل ۱- منطقه مطالعاتی دشت عجبشیر

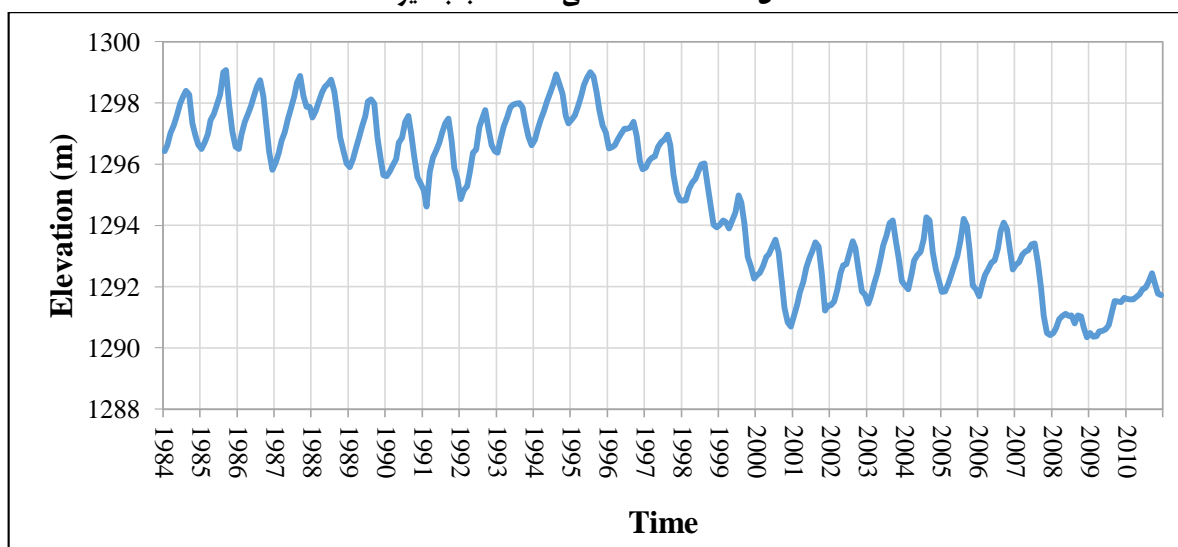


Fig. 2- Ajabshir plain Aquifer hydrograph (Water and sustainable development Engineering Co., 2013)
شکل ۲- هیدروگراف آبخوان دشت عجبشیر (Water and sustainable development Engineering Co., 2013)

الگوریتم فراکوشی به تعداد جمعیت الگوریتم فراکوشی یکبار فراخوانی و اجرا می‌شود، با توجه به اینکه این اجراها از یکدیگر مستقل می‌باشند این امکان وجود دارد که جمعیت هر نسل به صورت هم‌زمان و جداگانه مدل شبیه‌سازی را فراخوانی کنند و به تعداد جمعیت، مدل شبیه‌سازی به صورت موازی اجرا شود.

در پردازش سری، یک فرآیند هم‌زمان انجام می‌شود، درحالی‌که در پردازش موازی، تعداد فرآیندهای هم‌زمان به تعداد تعیین شده کارهای هم‌زمان^{۱۰} افزایش می‌یابد و بنابراین زمان محاسبه کاهش می‌یابد. از این رو برای کاهش زمان محاسبات از رویکرد پردازش موازی استفاده شده است. برای مقایسه زمان اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به صورت سری و موازی از شاخصی به نام نسبت تسریع استفاده شده است که طبق رابطه ۱ برابر با نسبت زمان اجرای مدل به صورت سری (T_{Serial}) بر زمان اجرای مدل به صورت موازی ($T_{Parallel}$) می‌باشد، در پایان اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تلفیقی، خروجی‌ها (متغیرهای تصمیم) برای مسئله مورد نظر حاصل می‌شود.

$$Speed\ Ratio = \frac{T_{Serial}}{T_{Parallel}} \quad (1)$$

۳-۲- مدل شبیه‌سازی

ساختار مدل شبیه‌سازی مورد استفاده در این مطالعه برگرفته از مطالعه Farhoudi- and Farhoudi-Hafdaran and Ketabchi (2018) و Hafdaran (2017) برای آبخوان ساحلی دشت عجب‌شیر می‌باشد. برای این منظور از مدل عددی سوترا استفاده شده است.

غلظت دریاچه ارومیه $0/3181$ کیلوگرم بر کیلوگرم ($318/1$ گرم بر لیتر) است (Sima and Tajrishy, 2015). کموگراف آبخوان آبرفتی دشت عجب‌شیر در شکل ۳ ارائه گردیده است. بر اساس کموگراف مذکور، متوسط شوری آب از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۹ افزایش یافته است و از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ سیر کموگراف نزولی بوده و متوسط شوری آب زیرزمینی در این دشت کاهش یافته است، ولیکن در طول دوره آماری موجود، سیر کلی کموگراف صعودی بوده و متوسط شوری آب زیرزمینی در این دشت افزایش یافته است. جزئیات بیشتر در مورد این منطقه مطالعاتی در مطالعه (Farhoudi-Hafdaran (2017 ارائه شده است.

۳- روش تحقیق

۳-۱- مراحل تحقیق

مراحل روش‌شناسی تحقیق، مطابق شکل ۴ می‌باشد. در این مطالعه، مدل شبیه‌سازی توسط الگوریتم بهینه‌سازی فراخوانی می‌شود و با توجه به ورودی‌هایی که توسط الگوریتم بهینه‌سازی (جمعیت تولید شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی) دریافت می‌کند، اجرا شده و خروجی‌های خود را به الگوریتم بهینه‌سازی عرضه می‌کند. مدل بهینه‌سازی با ارزیابی تابع هدف و محدودیت‌ها و با توجه به جمعیت قبلی، نسل جدیدی از متغیرهای تصمیم را تولید می‌کند و دوباره مدل شبیه‌سازی را فراخوانی می‌کند. این فرآیند تا برآورده شدن معیارهای خاتمه الگوریتم، ادامه می‌یابد. در فراخوانی جمعیت‌ها اعمال پردازش موازی مورد توجه قرار می‌گیرد (Parhami, 2002; Ketabchi and (Ataie-Ashtiani, 2015b,c). مدل شبیه‌سازی عددی در هر نسل از

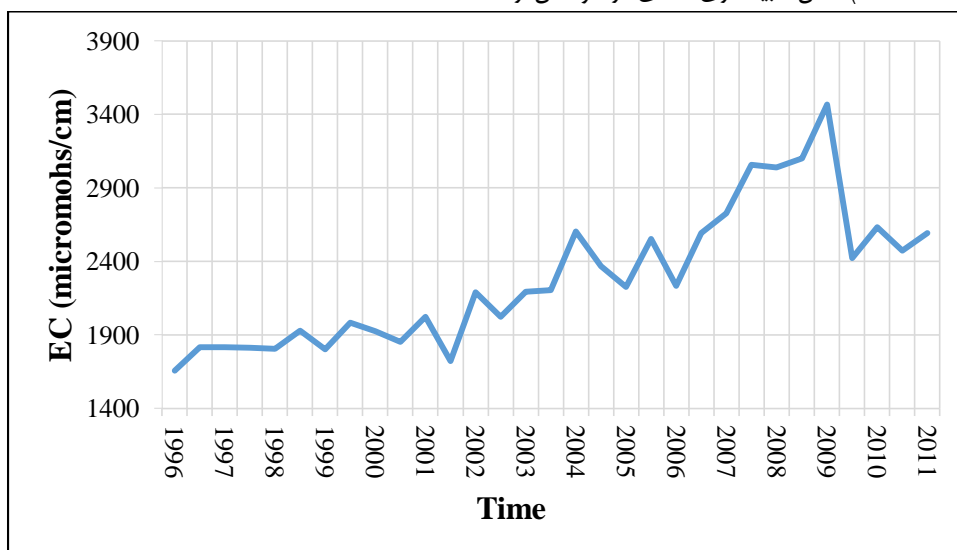


Fig. 3- Ajabshir plain Chemograph (Water and sustainable development Engineering Co., 2014)
 شکل ۳- کموگراف دشت عجب‌شیر (Water and sustainable development Engineering Co., 2014)

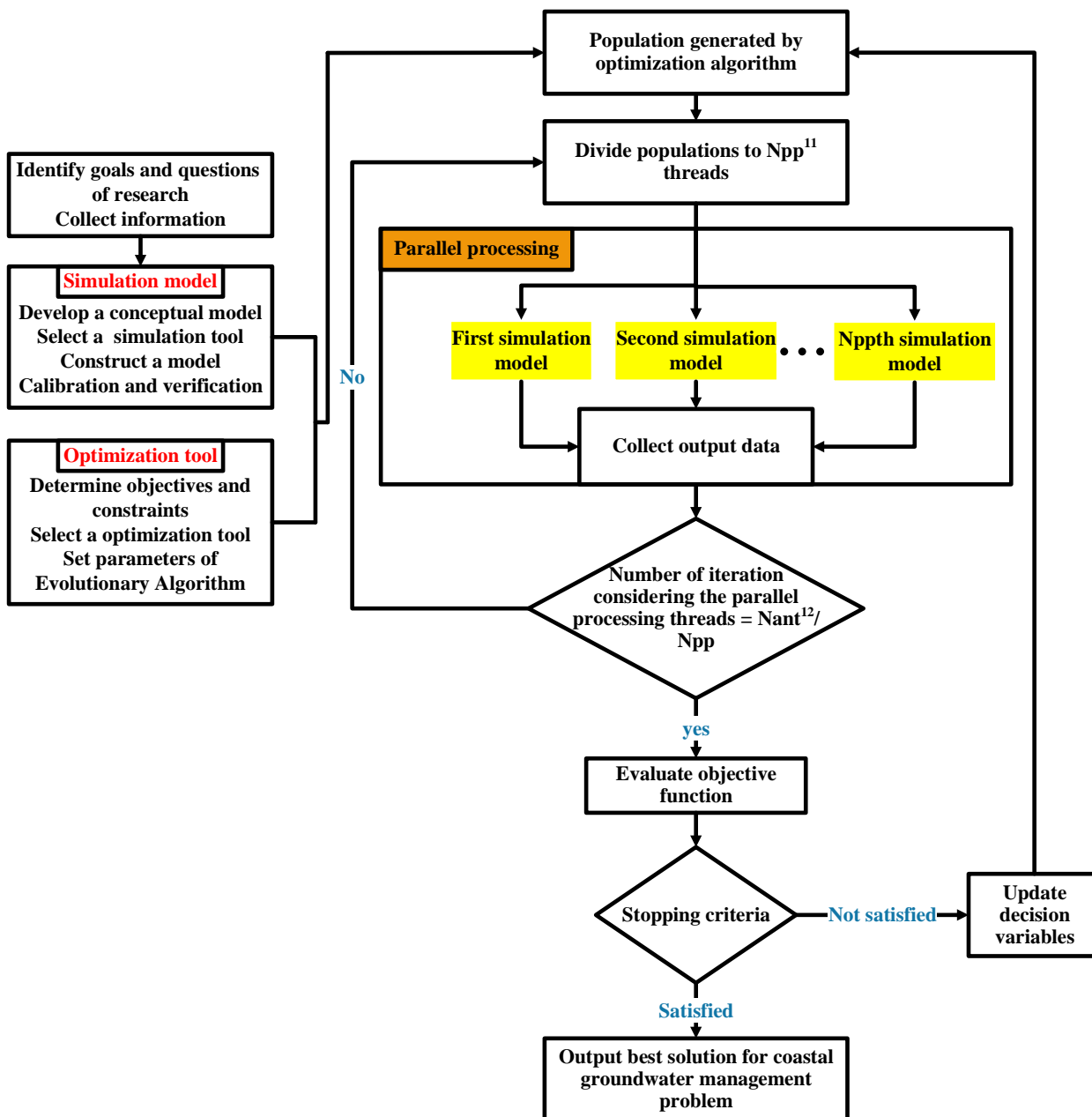


Fig. 4- Methodology of the research

شکل ۴- روش‌شناسی تحقیق

در آبخوان ساحلی فراهم می‌شود (Voss and Provost, 2010). در گسسته‌سازی مدل سه‌بعدی، دامنه مدل‌سازی از ۴۸۴۰ جزء و ۶۱۴۹ گره محاسباتی با ابعاد مساوی ۵۰۰ متر در صفحه افقی و ابعاد متغیر ۰/۵ تا ۱۶/۹۷ متر در جهت قائم تشکیل شده است که از سطح زمین تا کف آبخوان ابعاد درشت‌تر می‌شوند. همچنین گام زمانی ماهانه و نیم‌سال در محاسبات استفاده شده است. گسسته‌سازی مکانی و زمانی بر اساس مطالعه Farhoudi-Hafdaran and Ketabchi (2018) بوده و معیارهای پایداری گسسته‌سازی مکانی و زمانی (مانند عدد

سوترا مدل شبیه‌سازی انتقال املاح و جریان وابسته به چگالی در شرایط اشباع/غیراشباع به صورت سه‌بعدی می‌باشد. محاسبات جریان وابسته به چگالی در محیط متخلخل در این مدل به روش اجزاء محدود و محاسبات در گام‌های زمانی به روش تفاضل محدود انجام می‌شود. در این مدل، معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی (معادله بقای جرم سیال) و انتقال آلاینده محلول (معادله بقای جرم ماده محلول) به صورت هم‌زمان و به روش‌های عددی حل می‌گردد. بر این اساس امکان مدل‌سازی پدیده پیشروی آب شور و ناحیه انتقالی ایجاد شده

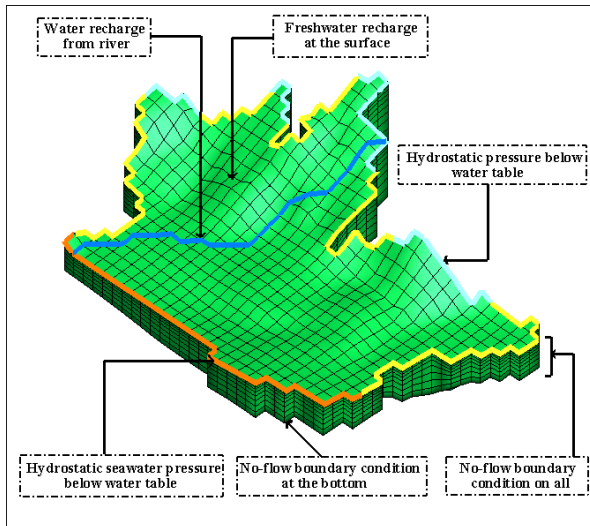


Fig. 5- Boundary conditions of three-dimensional modeling domain

شکل ۵- شرایط مرزی دامنه مدل سازی سه بعدی

در شکل ۶ موقعیت این نواحی نشان داده شده است. همچنین به منظور کنترل پیشروی آب شور نقاط کنترل به گونه‌ای در نظر گرفته شدند که جبهه پیشروی آب شور به چاه‌های بهره‌برداری که در نزدیکی خط ساحلی قرار دارند نرسد، محل قرارگیری این نقاط نیز در شکل ۶ نشان داده شده است.

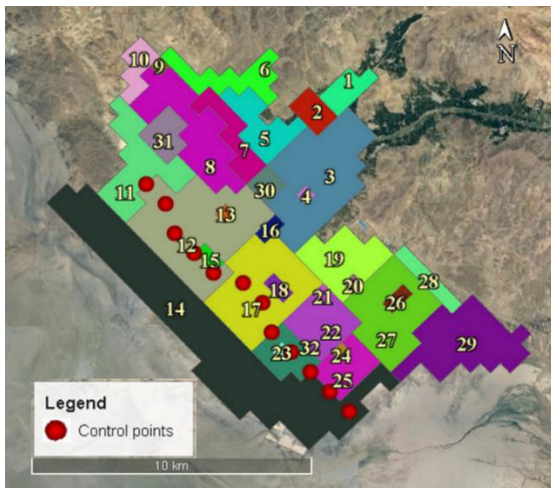


Fig. 6- Location of the 32 extraction zones and control points

شکل ۶- موقعیت ۳۲ ناحیه برداشت پیشنهادی و نقاط کنترل

۳-۳- مدل بهینه‌سازی

در این مطالعه از الگوریتم پیوسته جامعه مورچه‌ها (CACO) به عنوان مدل بهینه‌سازی استفاده شده است. ACO از رفتار جمعی مورچه‌ها برای جستجوی غذا الهام گرفته است و در ابتدا توسط (Dorigo (1992 معرفی شده است. این روش ابتدا برای

پکلت و عدد کورانت) برای آن کنترل و ارزیابی شده است. در شکل ۵ دامنه مدل سازی و شرایط مرزی نشان داده شده است.

مدل شبیه‌سازی محدوده مطالعاتی مورد نظر بر اساس اطلاعات سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۷ توسعه داده شده است، واسنجی^{۱۱} مدل طی یک فرآیند دو مرحله‌ای شامل واسنجی مدل در حالت دائمی و غیردائمی انجام شد. واسنجی مدل کمی آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر در حالت شبیه‌سازی دائمی، با تنظیم ضرایب هدایت هیدرولیکی در ۱۰ لایه زمین‌شناسی آبخوان با استفاده از الگوریتم PEST انجام پذیرفت، همچنین واسنجی مدل در حالت شبیه‌سازی غیردائمی با تعدیل مقادیر تغذیه و تخلیه از آبخوان از سال ۲۰۰۷ تا سال ۲۰۱۱ صورت گرفت که ضریب تبیین ۰/۸۶ در مقایسه بین اندازه‌گیری‌های سطح تراز آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای در طول دوره واسنجی با سطح تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده نشان دهنده دقت نتایج مدل و تطابق آن‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. واسنجی مدل کیفی نیز با تنظیم مقادیر غلظت آب تخلیه‌شده توسط چاه‌های بهره‌برداری و ورودی توسط آب برگشتی و آب بارش در محیط متخلخل آبخوان ابرفتی دشت عجب‌شیر با استفاده از الگوریتم PEST، از سال ۲۰۰۷ تا سال ۲۰۱۱ صورت گرفت و مقدار ضریب تبیین ۰/۸۰ و جذر میانگین مربعات خطا ۰/۰۰۳ کیلوگرم بر کیلوگرم از مقایسه مقادیر مشاهده‌ای غلظت آب زیرزمینی در چاه‌های شبکه کیفی در طول دوره واسنجی با غلظت آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده به دست آمد. برای صحت‌سنجی^{۱۲} مدل آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر، ابتدا برای سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ پیش‌بینی توسط مدل صورت گرفت و سپس نتایج به دست آمده با نتایج مشاهداتی مقایسه شد و نتایج نشان‌دهنده تطابق مناسبی می‌باشد. جزئیات بیشتر در مورد مدل‌سازی عددی آبخوان ابرفتی دشت عجب‌شیر در مطالعات Farhoudi- Mostafaei-Avandari و Hafdaran and Ketabchi (2018) and Ketabchi (2018) ارائه شده است.

برای انجام مطالعات مدیریتی و امکان ارائه راهکارهای بهینه و عملیاتی در سطح دشت عجب‌شیر برای نحوه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، سطح دشت بر اساس زمین‌شناسی منطقه، کاربری اراضی کشاورزی، منطقه مسکونی، مرتع، زمین بایر، نوع خاک شور، دریاچه‌ای، ابرفتی غیرنمکی منطقه به ۳۲ ناحیه تقسیم شده است. استفاده از ناحیه‌بندی و فرض یکنواختی نرخ تغذیه خالص در هر یک از نواحی مدیریتی امکان اعمال مدیریت منعطف‌تر بر روی برداشت آب زیرزمینی را فراهم می‌کند، چنین رویکردی به جهت انعطاف در قابلیت کاربرد مدل شبیه‌سازی در چارچوب مدل تصمیم در مطالعه (Ataie-Ashtiani et al. (2014) نیز توصیه شده است.

پایین و حد بالای نرخ تغذیه خالص در زامین ناحیه مدیریتی و در دوره زمانی ۱۰ام هستند.

تابع هدف در این مسأله حداقل کردن تغذیه خالص یا به عبارتی حداکثرسازی برداشت می‌باشد و معادله دوم محدودیت مربوط به پیشروی آب شور را اعمال می‌کند بدین صورت که غلظت شوری در هر نقطه کنترل و در پایان دوره مدیریت نباید از غلظت در پایان دوره برنامه‌ریزی در صورتی که برداشت با شرایط فعلی ادامه یابد بیشتر باشد، رابطه ۴ نیز یک حداقل و حداکثر برای نرخ تغذیه خالص در هر ناحیه مدیریتی و در دوره زمانی مورد نظر تعیین می‌کند که بر اساس تاریخچه برداشت‌های رخ داده در هر کدام از نواحی مدیریتی تعیین شده است.

۳-۴-۲- مسأله مدیریت دوم

در دومین مسأله مدیریتی تابع هدف حداقل‌سازی مجموع غلظت شوری در نقاط کنترل در نظر گرفته شد و همچنین در نظر گرفته شد که تغذیه خالص آبخوان در هر دوره زمانی بزرگ‌تر از تغذیه خالص آبخوان در شرایط فعلی و در همان دوره زمانی نباشد که به صورت روابط ۵، ۶ و ۷ در نظر گرفته شدند:

$$\text{Minimize } F = \sum_{t=1}^2 \sum_{i=1}^{12} C_{i,10}^{t,opt} \quad (5)$$

$$W_{total}^{t,opt} \leq W_{total}^{t,curr} : t = 1,2 \quad (6)$$

$$Lb_j^t \leq W_j^{t,opt} \leq Rb_j^t : j = 1,2, \dots, 32; t = 1,2 \quad (7)$$

در این روابط $W_{total}^{t,curr}$ [L³] حجم تغذیه خالص فعلی از کل سطح آبخوان در دوره زمانی ۱۰ام می‌باشد این مقدار بر اساس شرایط فعلی (سال ۲۰۱۴) در نیمه اول سال برابر ۰.۷- میلیون مترمکعب و برای نیمه دوم سال برابر ۳/۱- میلیون مترمکعب می‌باشد. این مقدار از رابطه ۸ برای هر کدام از دوره‌های زمانی محاسبه می‌شود. $W_{total}^{t,curr}$ [L³] حجم تغذیه خالص از کل سطح آبخوان با توجه به نتایج بهینه‌سازی در دوره زمانی مورد نظر است که از رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$W_{total}^{t,curr} = \sum_{j=1}^{32} (W_j^{t,curr} \times A_j) \quad (8)$$

$$W_{total}^{t,opt} = \sum_{j=1}^{32} (W_j^{t,opt} \times A_j) \quad (9)$$

در این مسائل مدیریتی، محدودیت‌ها با استفاده از تابع جریمه در نظر گرفته شدند و مسائل بهینه‌سازی مقید به مسائل بهینه‌سازی نامقید تبدیل شدند.

مسائل گسسته ارائه گردید و بعداً توسط محققانی مانند Afshar et al. (2006) به کاربردهایی در فضای پیوسته نیز تعمیم پیدا کرد. در مطالعه انجام شده توسط Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2015a) CACO به‌عنوان یک الگوریتم فراکاوشی کارآمد معرفی شد، زیرا نتایج این مطالعه نشان داد که CACO سریع‌ترین و بهترین الگوریتم فراکاوشی از لحاظ کیفیت جواب است. همچنین در مقایسه با PSO¹³ و GA¹⁴، این الگوریتم تنها یک پارامتر کنترل دارد که باید تنظیم شود. علاوه بر این، الگوریتم CACO هنگامی که راهبرد موازی‌سازی اجرا شد، عملکرد مؤثرتری را نشان داد. در این مطالعه نیز برای حل مسائل بهینه‌سازی از الگوریتم فراکاوشی جامعه مورچه‌ها با رویکرد پردازش موازی استفاده شده است.

۳-۴-۳- مسائل مدیریتی

یکی از مسائل مدیریتی رایج در مورد آبخوان‌های ساحلی که در اکثر مطالعات گذشته در نظر گرفته شده، حداکثرسازی برداشت از آبخوان به صورتی است که پیشروی آب شور اتفاق نیفتد. این مسأله در مطالعات پیشین به شکل‌های مختلفی در نظر گرفته شده است، در مطالعه حاضر نیز این مسأله به دو صورت در نظر گرفته شده است که در ادامه به بیان آن‌ها پرداخته می‌شود:

۳-۴-۳-۱- مسأله مدیریت اول

اولین مسأله مدیریتی به صورت روابط ۲، ۳ و ۴ در نظر گرفته شد که برای یک دوره برنامه‌ریزی ۱۰ ساله تدوین گردیده است:

$$\text{Minimize } F = \sum_{t=1}^2 \sum_{j=1}^{32} (W_j^{t,opt} \times A_j) \quad (2)$$

$$C_{i,10}^{t,opt} \leq C_{i,10}^{t,curr} : i = 1,2, \dots, 12; t = 1,2 \quad (3)$$

$$Lb_j^t \leq W_j^{t,opt} \leq Rb_j^t : j = 1,2, \dots, 32; t = 1,2 \quad (4)$$

در این روابط $W_j^{t,opt}$ [L.T⁻¹] نرخ تغذیه خالص (نرخ تغذیه منهای نرخ برداشت) در زامین ناحیه مدیریتی و در دوره زمانی ۱۰ام (هر ۶ ماه به‌عنوان یک گام زمانی در مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است بنابراین تعداد دوره‌ها برابر ۲ می‌باشد یکی ۶ ماهه اول سال و دیگری ۶ ماهه دوم سال)، A_j [L²] مساحت ناحیه زام، $C_{i,10}^{t,opt}$ [Ms.M⁻¹] غلظت شوری حاصل از نتایج بهینه‌سازی در دوره زمانی t و در پایان دوره برنامه‌ریزی ۱۰ ساله در زامین نقطه کنترل، $C_{i,10}^{t,curr}$ [Ms.M⁻¹] غلظت شوری در دوره زمانی t و در پایان دوره برنامه‌ریزی ۱۰ ساله در زامین نقطه کنترل در صورتی است که برداشت از آبخوان تحت شرایط فعلی ادامه پیدا کند، Lb_j^t [L.T⁻¹] و Rb_j^t [L.T⁻¹] نیز به ترتیب حد

۴- نتایج و تحلیل نتایج

به صورت موازی ۱۸ ساعت و ۵۰ دقیقه به دست آمد بنابراین نسبت تسریع در این مطالعه ۲/۷ به دست آمد. از این رو استفاده از پردازش موازی می تواند یک راهبرد مناسب برای کاهش زمان اجرای مدل شبیه سازی- بهینه سازی تلفیقی باشد.

۴-۲- ارزیابی راهبرد مدیریت بهینه

به منظور ارائه نتایج حاصل از مدل شبیه سازی- بهینه سازی تلفیقی در این بخش ابتدا به ارائه نتایج کمی و سپس کیفی پرداخته می شود. در شکل های ۸ و ۹ مقادیر متغیرهای تصمیم حاصل از مدل شبیه سازی- بهینه سازی تلفیقی در هر یک از نواحی مدیریتی برحسب میلی متر بر سال در نیمه اول و دوم سال با مقادیر آن در شرایط فعلی مقایسه شده است. در شرایط فعلی مقدار تغذیه خالص از کل سطح آبخوان در نیمه اول سال ۸/۰۷- میلیون مترمکعب می باشد که این مقدار برای مسأله بهینه سازی اول ۷/۸۵- میلیون مترمکعب می باشد، با توجه به این نتایج اختلاف قابل توجهی در جمع تغذیه خالص در کل سطح آبخوان وجود ندارد ولی توزیع این مقادیر همچنان که در شکل ۸ مشاهده می شود با یکدیگر متفاوت می باشد، در بخش های شمالی تا ناحیه ۱۷ بخش مرکزی به جز ناحیه ۳۱ که افزایش محسوسی دارد، تغییرات اندک می باشد و در نواحی ۲۲، ۲۵ و ۳۲ در بخش های مرکزی مقادیر با افزایش همراه بوده است و در شمال شرق و جنوب شرق این مقادیر کاهش یافته است و در نواحی غربی و جنوبی آبخوان تغییر قابل توجهی مشاهده نمی شود.

مسائل بهینه سازی مطرح در این مطالعه دارای توابع هدف و قیود با رفتار متضاد یکی حداقل نمودن نرخ تغذیه خالص (به معنی حداکثر کردن برداشت از آبخوان) و دیگری کنترل پیشروی آب شور (جلوگیری از بدتر شدن وضعیت شوری در نقاط کنترل) با استفاده از یک مدل شبیه سازی- بهینه سازی تلفیقی حل شدند. در این بخش به منظور ارزیابی کارایی این مدل به بحث و بررسی کارایی راهبرد پردازش موازی و ارزیابی راهبردهای مدیریت بهینه و ارائه نتایج حاصل پرداخته می شود.

۴-۱- ارزیابی عملکرد پردازش موازی

در این مطالعه راه حل های بهینه مسأله بهینه سازی بر اساس ۵ الی ۱۰ اجرای مستقل به دست آمدند. تعداد جمعیت و تعداد تکرار الگوریتم بهینه سازی پیوسته جامعه مورچه ها پس از انجام یکسری ارزیابی به ترتیب برابر با ۱۰۵ و ۱۵۰ تنظیم شدند. در شکل ۷ نمودار همگرایی جواب ها برای یک نمونه اجرا برای حل مسأله ۲ قابل مشاهده می باشد.

در این مطالعه از پردازش موازی در حلقه جمعیت الگوریتم بهینه سازی استفاده شد که بسته به نوع پردازنده تعداد کارهای هم زمان قابل تنظیم می باشد. در این مطالعه با توجه به پردازنده 4 GHz core i7- 4790K تعداد کارهای هم زمان ۱۵ در نظر گرفته شد. زمان لازم برای اجرای هر بار مدل به صورت سری ۵۰ ساعت و ۵۰ دقیقه و برای مدل

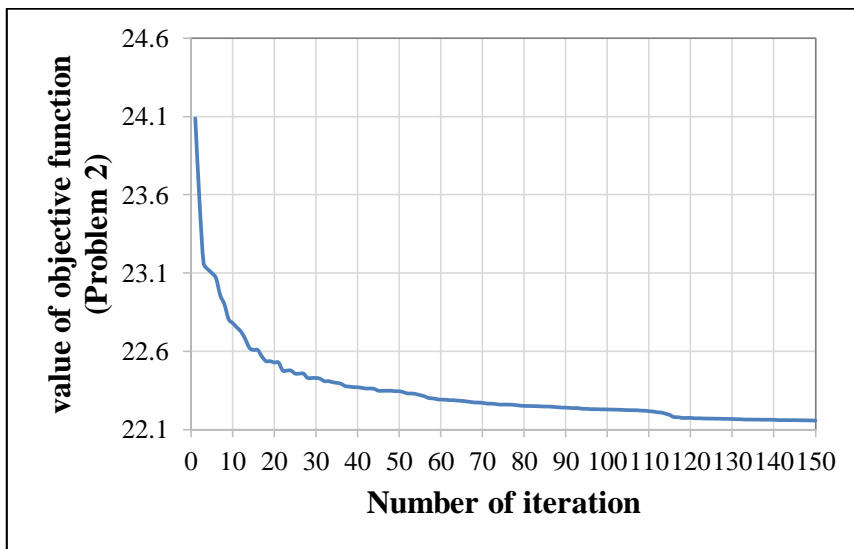


Fig. 7- Convergence behavior of objective function in problem 2

شکل ۷- روند همگرایی تابع هدف مسأله ۲

می‌شود اختلاف به دلیل کاهش نرخ‌های تغذیه در شمال و جنوب شرق آبخوان می‌باشد. در مناطق شمالی آبخوان تا ناحیه ۱۷ حجم تغذیه خالص ۱/۲- میلیون مترمکعب کاهش یافته است و در جنوب شرق آبخوان از ناحیه ۱۹ به سمت جنوب حجم تغذیه خالص ۰/۶۳۴- میلیون مترمکعب کاهش یافته است و در سایر مناطق تغییر قابل توجهی مشاهده نمی‌شود و تغییرات بسیار اندک می‌باشد.

در مورد مسأله دوم مقدار تغذیه خالص از کل سطح آبخوان در نیمه دوم سال ۳/۱۲- میلیون مترمکعب به دست آمد که تقریباً با شرایط فعلی آن برابر می‌باشد، در مورد توزیع نرخ‌های تغذیه خالص در نواحی مدیریتی نیز با توجه به شکل ۹ در مناطق شمال، شمال شرق و بخش‌های مرکزی تا ناحیه ۱۷ و ۱۸ نرخ تغذیه خالص کاهش یافته است، به این صورت که در این مناطق مقدار حجم تغذیه خالص ۲/۵۵- میلیون مترمکعب کاهش یافته است.

در مورد مسأله دوم مقدار تغذیه خالص از کل سطح آبخوان در نیمه اول سال ۸/۰۸- میلیون مترمکعب می‌باشد که تقریباً با شرایط فعلی برابر می‌باشد، در مورد توزیع نرخ‌های تغذیه خالص در نواحی مدیریتی نیز همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در مناطق شمال و بخش‌های مرکزی تا ناحیه ۱۷ و جنوب شرق نرخ تغذیه خالص کاهش یافته است، در بخش‌های شمالی حجم تغذیه خالص ۰/۳۴۲- میلیون مترمکعب و در جنوب شرق (نواحی ۲۶ تا ۲۹) حجم تغذیه خالص ۰/۱۹۳- میلیون مترمکعب کاهش یافته است. در مناطق غربی و مرکزی از ناحیه ۱۷ به سمت جنوب این مقادیر افزایش یافته است و مقدار این افزایش برابر ۰/۵۲۳ میلیون مترمکعب می‌باشد.

در نیمه دوم سال مقدار فعلی تغذیه خالص از کل سطح آبخوان ۳/۱- میلیون مترمکعب می‌باشد که این مقدار برای مسأله بهینه‌سازی اول ۴/۹۷- میلیون مترمکعب می‌باشد، همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده

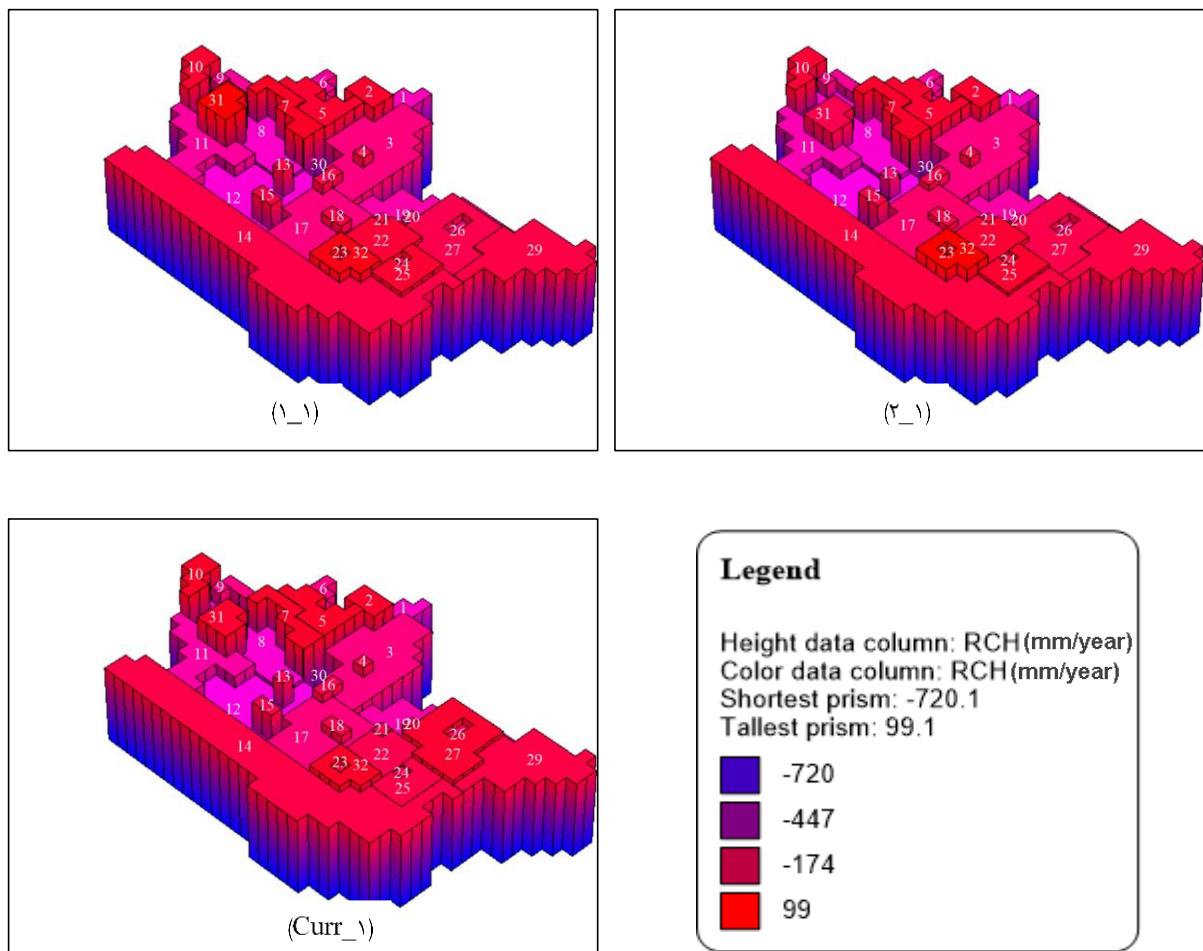


Fig. 8- Net recharge of zones in first half of the year, mm/year ((1_1) problem 1, (2_1) problem 2, (Curr_1) Current condition)

شکل ۸- نرخ تغذیه خالص نواحی در نیمه اول سال، میلی‌متر بر سال ((1_1) مسأله یک، (2_1) مسأله دو، (Curr_1) شرایط فعلی)

مرکزی آبخوان، از ناحیه ۱۷ تا ۲۵ و نواحی غربی یعنی ناحیه ۱۴ باید مقدار برداشت را کاهش دهیم و اگر هدف افزایش برداشت از آبخوان باشد این امکان در نیمه اول سال وجود نخواهد داشت و ما می‌توانیم در نیمه دوم سال برداشت از آبخوان را افزایش دهیم و این افزایش در مقدار برداشت می‌تواند از بخش‌های شمالی و جنوب‌شرق آبخوان اتفاق بیفتد.

در شکل ۱۰ هیدروگراف آبخوان برای ۱۰ سال دوره برنامه‌ریزی در سه حالت مختلف نمایش داده شده است، یکی با توجه به تغذیه خالص فعلی و دیگری تغذیه خالص حاصل از مسائل بهینه‌سازی، در مورد مسئله یک و شرایط فعلی میانگین اختلاف بین دو نمودار به‌طور متوسط در طول دوره ۱۰ ساله برنامه‌ریزی برابر ۰/۸۷- متر می‌باشد در این مسأله تابع هدف حداقل‌سازی تغذیه خالص می‌باشد لذا با کاهش تغذیه خالص یا به عبارتی افزایش برداشت از آبخوان تراز آب

در مناطق غربی، جنوب‌شرق و بخش مرکزی از ناحیه ۱۷ به سمت جنوب این مقادیر افزایش یافته است، در تمامی این مناطق به جز ناحیه ۱۴ مقدار حجم تغذیه خالص ۱/۲ میلیون مترمکعب افزایش یافته است و در ناحیه ۱۴ نرخ تغذیه خالص آن از ۱۷۴/۳۳- میلی‌متر بر سال به ۴۳/۲۴- میلی‌متر بر سال افزایش یافته است و با توجه به مساحت زیاد این ناحیه مقدار افزایش حجم تغذیه خالص از سطح این ناحیه مدیریتی برابر ۱/۴۱ میلیون مترمکعب می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار برداشت در نیمه دوم سال می‌تواند افزایش یابد و می‌توان در این منطقه برای کشت محصولات پاییزه و زمستانه و کشت‌های گلخانه‌ای برنامه‌ریزی کرد.

در صورتی که برداشت از آبخوان با شرایط فعلی ادامه یابد و هدف کاهش پیشروی آب شور در آبخوان باشد، باید توزیع برداشت از آبخوان را به این صورت تغییر دهیم که در نواحی شمالی آبخوان تا ناحیه ۱۷ و جنوب‌شرق آبخوان برداشت را بیشتر کنیم. همچنین در نواحی

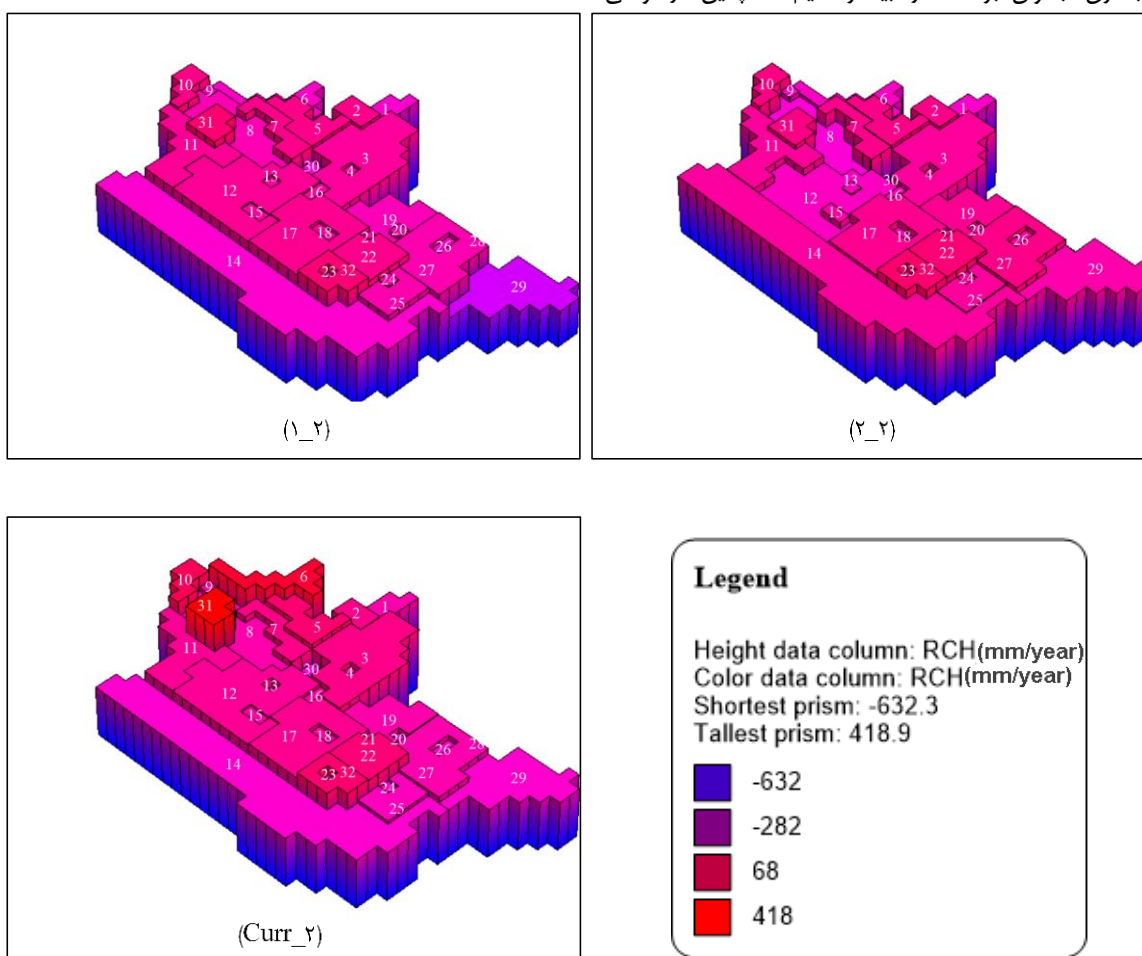


Fig. 9- Net recharge of zones in second half of the year, mm/year ((1_2) problem 1, (2_2) problem 2, (Curr_2) Current condition)

شکل ۹- تغذیه خالص نواحی در نیمه دوم سال، میلی‌متر بر سال ((1_2) مسئله یک، (2_2) مسأله دو، (Curr_2) شرایط فعلی)

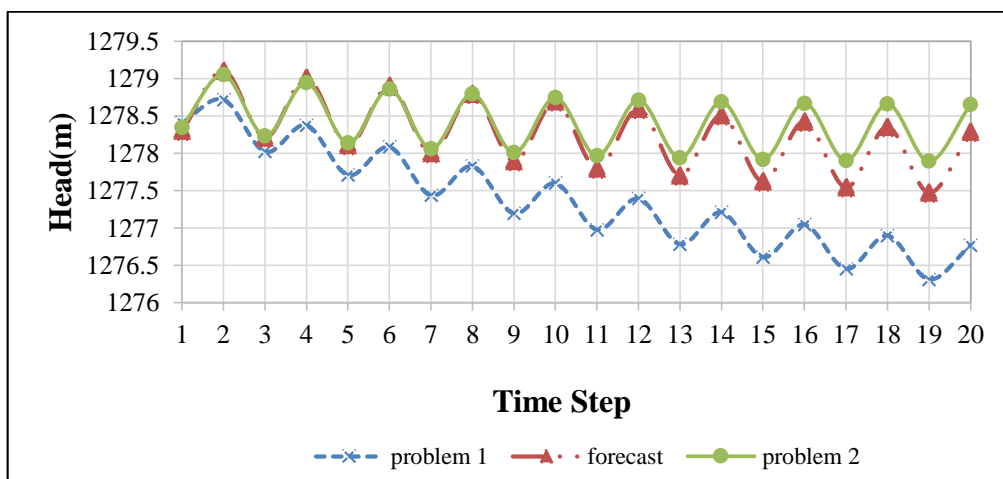


Fig. 10- Groundwater hydrograph of Ajabshir aquifer over 10-year planning period
 شکل ۱۰- هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان عجب شیر در طول دوره برنامه ریزی ۱۰ ساله

در شکل ۱۱ نیز تراز آب زیرزمینی آبخوان در پایان دوره برنامه ریزی برای نتایج حاصل از مسائل بهینه سازی و شرایط فعلی ارائه شده است، در مورد مسئله یک نسبت به شرایط فعلی در تمامی نواحی آبخوان به جز مناطق غربی، تراز آب زیرزمینی آبخوان کاهش یافته است.

زیرزمینی در آبخوان کاهش یافته است و در مورد مسأله دوم و شرایط فعلی نیز میانگین اختلاف برابر ۰/۱۴ متر می باشد در مسئله دوم تابع هدف حداقل سازی مجموع غلظت شوری در نقاط کنترل در نظر گرفته شد، بنابراین برای کاهش پیشروی آب شور به شرطی که تغذیه خالص بزرگ تر از شرایط فعلی نباشد باید تراز آبخوان افزایش یابد و در شکل زیر مشاهده می شود که هیدروگراف آبخوان روندی صعودی دارد.

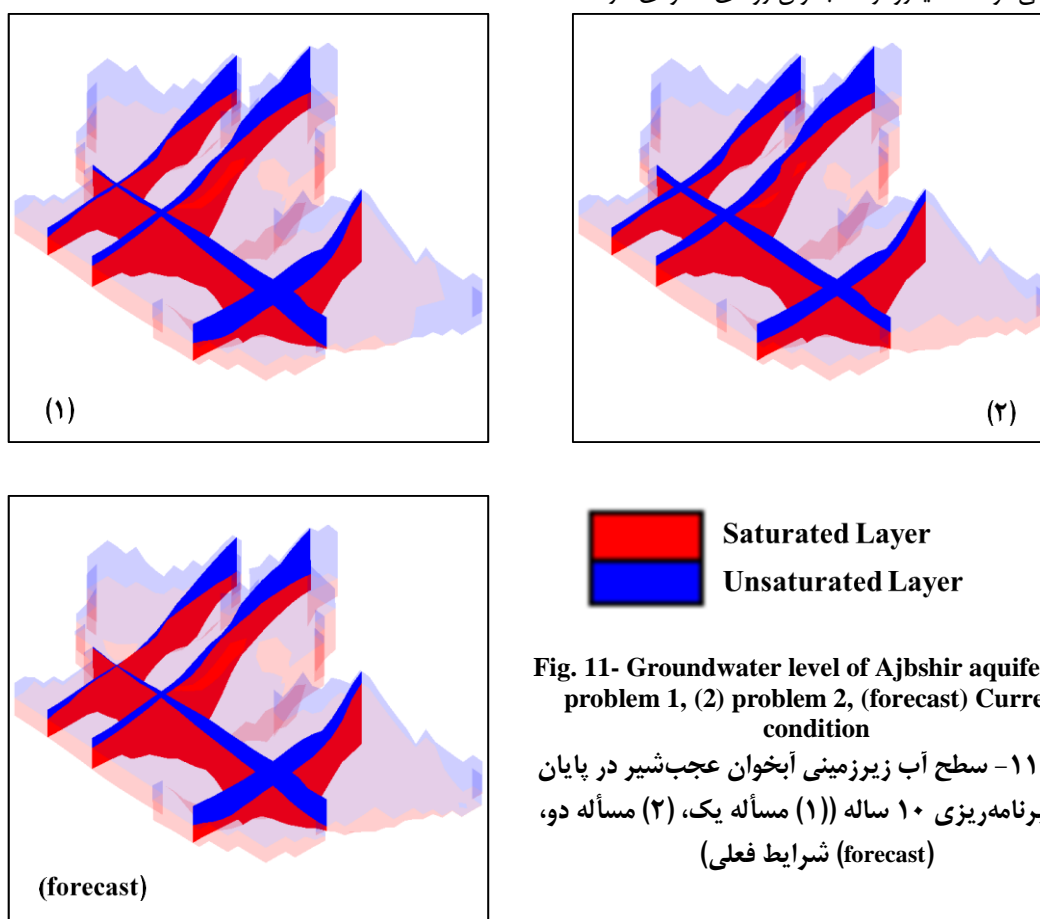


Fig. 11- Groundwater level of Ajbshir aquifer; (1) problem 1, (2) problem 2, (forecast) Current condition

شکل ۱۱- سطح آب زیرزمینی آبخوان عجب شیر در پایان دوره برنامه ریزی ۱۰ ساله ((۱) مسأله یک، (۲) مسأله دو، (forecast) شرایط فعلی)

تغییر غلظت در نقاط کنترل قابل توجه نمی‌باشد و برای مسأله دوم غلظت در پایان دوره برنامه‌ریزی تحت برداشت با شرایط فعلی از $0/0057$ کیلوگرم بر کیلوگرم ($5/7$ گرم بر لیتر) در نیمه اول سال به $0/004$ کیلوگرم بر کیلوگرم (4 گرم بر لیتر) کاهش یافته است و این مقدار برای نیمه دوم سال از $0/0059$ کیلوگرم بر کیلوگرم ($5/9$ گرم بر لیتر) به $0/0041$ کیلوگرم بر کیلوگرم ($4/1$ گرم بر لیتر) کاهش یافته است.

در جدول ۱ خلاصه‌ای از نتایج حاصل از بهینه‌سازی ارائه شده است، این نتایج نشان می‌دهد که در نیمه اول سال امکان افزایش مقدار برداشت وجود ندارد ولی در نیمه دوم سال در مسأله ۱ برداشت $1/87$ میلیون مترمکعب افزایش یافته است.

برای مسأله دوم در مناطق شمالی تا ناحیه ۱۷ تراز آب زیرزمینی با کاهش همراه بوده است که در شمال شرق و شمال غرب مقدار کاهش کمتر می‌باشد همچنین از ناحیه ۱۷ به سمت مناطق جنوبی آبخوان، تراز آب زیرزمینی افزایش یافته است.

در شکل ۱۲ نتایج مربوط به پیشروی آب شور در پایان دوره برنامه‌ریزی برای نتایج حاصل از بهینه‌سازی و شرایط فعلی ارائه شده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل مربوط به مسأله یک و شرایط فعلی تغییر قابل توجهی مشاهده نمی‌شود و در مورد مسئله ۲ در قسمت جنوب غربی آبخوان پیشروی آب شور با کاهش همراه بوده است. مقادیر متوسط غلظت ارائه شده برای نقاط کنترل در جدول ۱ نیز این نتایج را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که برای مسأله اول مقدار

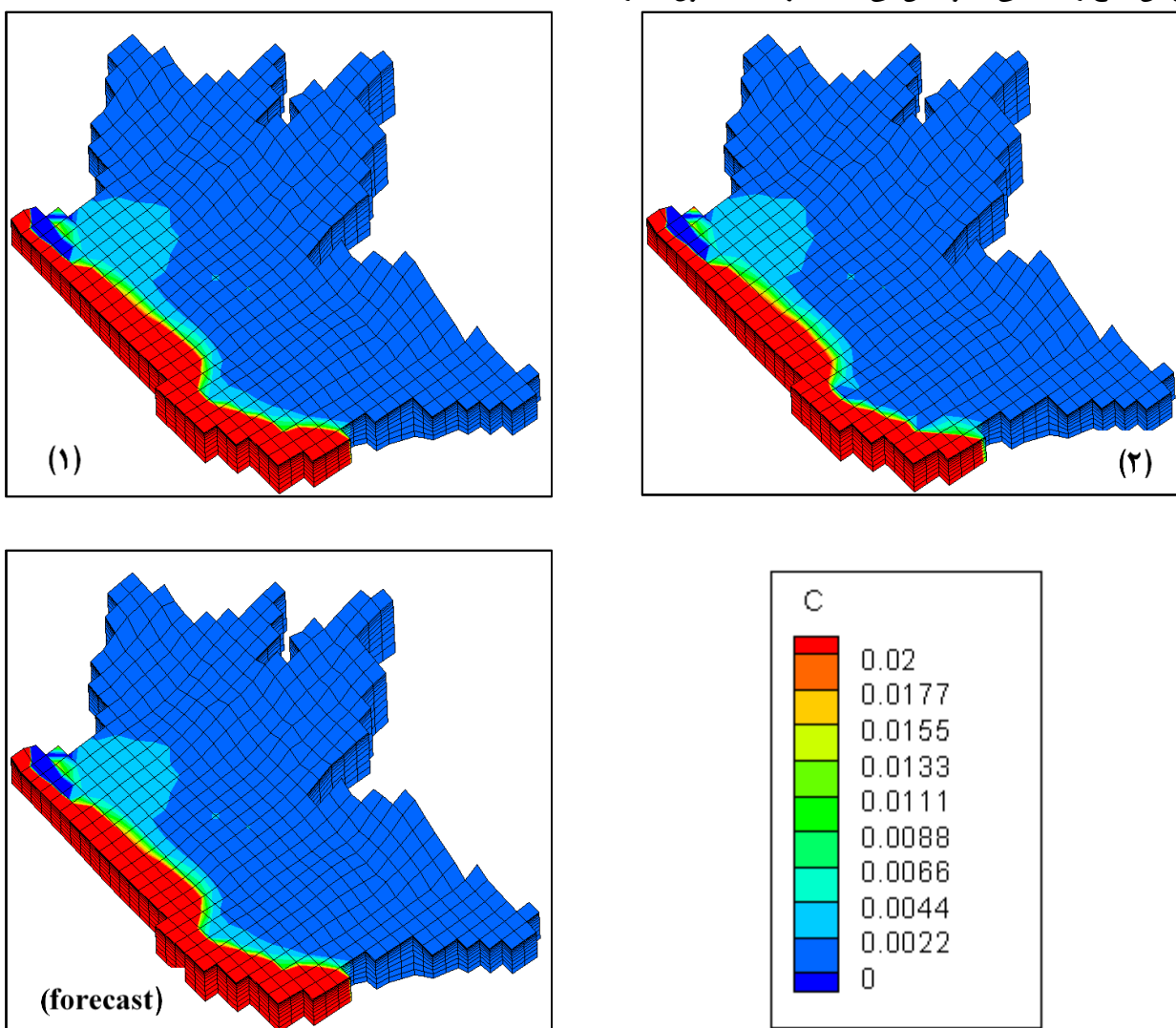


Fig. 12- Distribution of salinity at the end of 10-year planning period kg/kg; (1) problem 1, (2) problem 2, (forecast) Current condition
 شکل ۱۲- توزیع شوری در پایان دوره برنامه‌ریزی ۱۰ ساله کیلوگرم بر کیلوگرم ((۱) مسأله یک، (۲) مسأله دو، (forecast) شرایط فعلی)

Table 1- Summary of optimization results

جدول ۱- خلاصه نتایج بهینه‌سازی

Problem	Net Recharge (MCM)		Extraction (MCM)		Average concentration in control points (Kg/Kg)	
	First half of the year	Second half of the year	First half of the year	Second half of the year	First half of the year	Second half of the year
Forecast	-8.07	-3.1	-11.76	-7.28	0.0057	0.0059
Problem 1	-7.85	-4.97	-11.47	-9.73	0.0056	0.0058
Problem 2	-8.08	-3.12	-11.76	-7.3	0.004	0.0041

چارچوب شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تلفیقی مبتنی بر پردازش موازی ساختار قدرتمندی برای مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی ساحلی می‌باشد و می‌تواند به مقدار قابل توجهی زمان محاسبات را کاهش دهد و این چارچوب می‌تواند برای مدیریت سایر آبخوان‌های ساحلی به کار برده شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Seawater Intrusion
- 2- Simulation-Optimization
- 3- Linear Programming
- 4- Nonlinear Programming
- 5- Evolutionary Algorithms
- 6- SUTRA
- 7- Continuous Ant Colony Optimization
- 8- Number of Parallel Processing
- 9- Number of Ants
- 10- Threads
- 11- Calibration
- 12- Verification
- 13- Particle Swarm Optimization
- 14- Genetic Algorithm

۶- مراجع

- Afshar MH, Ketabchi H and Rasa E (2006) Elitist continuous ant colony optimization algorithm: Application to reservoir operation problems. *International Journal of Civil Engineering* 4(3):274-285
- Ataie-Ashtiani B and Ketabchi H (2011) Elitist continuous ant colony optimization algorithm for optimal management of coastal aquifers. *Water Resources Management* 25(1):165-190
- Ataie-Ashtiani B, Ketabchi H, and Rajabi MM (2014) Optimal management of a freshwater lens in a small island using surrogate models and evolutionary algorithms. *Journal of Hydrologic Engineering, American Society of Civil Engineers* 19(2):339-354

با توجه به نتایج ارائه شده در این بخش می‌توان نتیجه گرفت که امکان برداشت بیشتر در نیمه اول سال نخواهد بود و برای برداشت بیشتر می‌توان در نیمه دوم سال برنامه‌ریزی کرد، در مورد توزیع تغذیه خالص نیز نتایج نشان داد که در بخش‌های شمالی تا ناحیه ۱۷ و بخش‌هایی از جنوب شرق تغذیه خالص کاهش می‌یابد (یعنی افزایش برداشت رخ می‌دهد) و قسمت‌های جنوبی و غربی با افزایش مقدار تغذیه همراه بودند.

۵- خلاصه و جمع‌بندی

در این مطالعه برای تعیین راهبردهای مدیریتی بهینه و جلوگیری از پیشروی آب شور در آبخوان ساحلی دشت عجب‌شیر از مدل تصمیم‌گیری شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تلفیقی استفاده شد، در این چارچوب به منظور شبیه‌سازی رفتار آبخوان از مدل عددی سه‌بعدی، وابسته به چگالی سوترا استفاده شد و الگوریتم فراکاوشی پیوسته جامعه مورچه‌ها به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی انتخاب گردید. برای کاهش زمان محاسبات از پردازش موازی در حلقه‌ی جمعیت الگوریتم بهینه‌سازی با ۱۵ کار هم‌زمان استفاده شد که این امر منجر به نسبت تسریع ۲/۷ شد، همچنین به‌منظور مدیریت بهینه نحوه برداشت از آبخوان عجب‌شیر دو مسئله بهینه‌سازی تدوین شد. در مسأله اول تابع هدف حداقل نمودن نرخ تغذیه خالص (به معنی حداکثر کردن برداشت از آبخوان) و قید کنترل پیشروی آب شور (جلوگیری از بدتر شدن وضعیت شوری در نقاط کنترل) در نظر گرفته شد و در مسأله دوم، تابع هدف حداقل نمودن مجموع غلظت در نقاط کنترل با قید کوچک‌تر یا مساوی بودن تغذیه خالص نسبت به شرایط فعلی در نظر گرفته شد. این توابع هدف و قیود با رفتار متضاد با استفاده از مدل شبیه‌سازی- تلفیقی حل شدند. نتایج حاصل برای مسأله اول نشان داد که مقدار برداشت برای نیمه دوم سال می‌تواند به مقدار ۱/۸۷ میلیون مترمکعب افزایش یابد، همچنین برای مسئله دوم در قسمت‌های جنوب‌غربی آبخوان پیشروی آب شور کاهش یافت و متوسط غلظت در نقاط کنترل در پایان دوره برنامه‌ریزی ۱۰ ساله ۳۰ درصد نسبت به دوره پیش‌بینی ۱۰ ساله کاهش نشان داد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که

- Ketabchi H and Ataie-Ashtiani B (2015b) Review: Coastal groundwater optimization---advances, challenges, and practical solutions. *Hydrogeology Journal* 23(6):1129-1154
- Ketabchi H and Ataie-Ashtiani B (2015c) Assessment of a parallel evolutionary optimization approach for efficient management of coastal aquifers. *Environmental Modelling & Software* 74:21-38
- Kourakos G and Mantoglou A (2009) Pumping optimization of coastal aquifers based on evolutionary algorithms and surrogate modular neural network models. *Advances in Water Resources* 32(4):507-521
- Kourakos G and Mantoglou A (2015) An efficient simulation-optimization coupling for management of coastal aquifers. *Hydrogeology Journal* 23(6):1167-1179
- Mantoglou A (2003) Pumping management of coastal aquifers using analytical models of saltwater intrusion. *Water Resources Research* 39(12)
- Mostafaei-Avandari M and Ketabchi H (2018) Numerical simulation of saltwater intrusion in coastal aquifer of Ajbshir plain. In: Proc. of the 17th National Hydraulic Conference, 4-6 September, Shahrekord University (In Persian)
- Parhami B (2002) Introduction to parallel processing, algorithms and architectures. University of California, Santa Barbara. CA
- Park C-H and Aral MM (2004) Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers. *Journal of Hydrology* 290(1-2):80-99
- Qahman K, Larabi A, Ouazar D, Naji A, and Cheng AH-D (2005) Optimal and sustainable extraction of groundwater in coastal aquifers. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 19(2):99-110
- Rao SVN, Thandaveswara BS, Bhallamudi SM and Srinivasulu V (2003) Optimal groundwater management in deltaic regions using simulated annealing and neural networks. *Water Resources Management* 17(6):409-428
- Saghi-Jadid M, Ketabchi H (2019) Restoration management of groundwater resources using the combined model of numerical simulation-evolutionary ant colony optimization. *Iran-Water Resources Research* (In Press) (In Persian)
- Sima S and Tajrishy M (2015) Developing water quality maps of a hyper-saline lake using spatial interpolation methods. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*. Sharif University of Technology 22(1):30
- Bhattacharjya RK and Datta B (2005) Optimal management of coastal aquifers using linked simulation optimization approach. *Water Resources Management* 19(3):295-320
- Bhattacharjya RK and Datta B (2009) ANN-GA-based model for multiple objective management of coastal aquifers. *Journal of Water Resources Planning and Management, American Society of Civil Engineers* 135(5):314-322
- Christelis V and Mantoglou A (2016) Coastal aquifer management based on the joint use of density-dependent and sharp interface models. *Water Resources Management* 30(2):861-876
- Christelis V, Regis RG, and Mantoglou A (2018) Surrogate-based pumping optimization of coastal aquifers under limited computational budgets. *Journal of Hydroinformatics, IWA Publishing* 20(1):164-176
- Dentoni M, Deidda R, Paniconi C, Qahman K, and Lecca G (2015) A simulation/optimization study to assess seawater intrusion management strategies for the Gaza Strip coastal aquifer (Palestine). *Hydrogeology Journal* 23(2):249-264
- Dorigo M (1992) Optimization, learning and natural algorithms. Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano
- Farhoudi-Hafdaran R (2017) Investigation of Urmia Lake saltwater and an adjacent coastal aquifer interaction. M.Sc. Thesis, School of Agriculture, Tarbiat Modares University (In Persian)
- Farhoudi-Hafdaran R and Ketabchi H (2018) Numerical simulation of Urmia Lake and Ajabshir coastal aquifer interaction. *Iran-Water Resources Research* 14(1):45-58 (In Persian)
- Huang P-S and Chiu Y-C (2018) A simulation-optimization model for seawater intrusion management at Pingtung coastal area, Taiwan. *Water, Multidisciplinary Digital Publishing Institute* 10(3):251
- Javadi A, Hussain M, Sherif M, and Farmani R (2015) Multi-objective optimization of different management scenarios to control seawater intrusion in coastal aquifers. *Water Resources Management* 29(6):1843-1857
- Karatzas GP and Dokou Z (2015) Optimal management of saltwater intrusion in the coastal aquifer of Malia, Crete (Greece), using particle swarm optimization. *Hydrogeology Journal* 23(6):1181-1194
- Ketabchi H and Ataie-Ashtiani B (2015a) Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges. *Journal of Hydrology* 520:193-213

- Water and Sustainable Development Engineering Consultant (2013) Updating water resources studies report of Urmia Lake basin, Ministry of Energy, East-Azerbaijan Regional Water Authority. Vol 3: Groundwater Report (In Persian)
- Water and Sustainable Development Engineering Consultant (2014) Updating water resources studies report of Urmia Lake basin, Ministry of Energy, East-Azerbaijan Regional Water Authority. Vol 5: Groundwater Report (In Persian)
- Werner AD, Bakker M, Post VEA, Vandenbohede A, Lu C, Ataie-Ashtiani B, Simmons CT, and Barry DA (2013) Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources* 51:3-26
- Singh A (2015) Managing the environmental problem of seawater intrusion in coastal aquifers through simulation–optimization modeling. *Ecological Indicators* 48:498-504
- Song J, Yang Y, Wu J, Wu J, Sun X, and Lin J (2018) Adaptive surrogate model based multiobjective optimization for coastal aquifer management. *Journal of Hydrology* 561:98-111
- Sreekanth J and Datta B (2010) Multi-objective management of saltwater intrusion in coastal aquifers using genetic programming and modular neural network based surrogate models. *Journal of Hydrology* 393(3-4):245-256
- Voss CI and Provost AM (2010) SUTRA: a model for saturated-unsaturated, variable-density groundwater flow with solute or energy transport. *Water-Resources Investigations Report* 02-4231 300:300 p