

مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی جزیره کیش: تحلیل حساسیت راهبردهای بهینه نسبت به تغییرات محیطی مختلف

داود محمودزاده^۱، حامد کتابچی^۲، بهزاد عطایی آشتیانی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) ۰۹۱۲۲۰۳۴۶۰۰ dmahmoodzadeh@alum.sharif.edu

۲- استادیار، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

(دریافت ۹۳/۷/۳ پذیرش ۹۴/۱/۳۰)

چکیده

آب‌های زیرزمینی در مناطق ساحلی، یکی از منابع اصلی آب شیرین محسوب می‌شوند به طوری که حفاظت این منابع از خطر پیشروی آب شور بر اساس یک الگوی مدیریتی بهینه، یک اولویت است. برای این منظور، می‌توان از مدل‌های تصمیم‌گیری برای تعیین راهبردهای مدیریتی بهینه استفاده نمود. آثار تغییرات محیطی بر روی منابع آب زیرزمینی در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تحقق این هدف، مدل تلفیقی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی منابع آب زیرزمینی جزیره کیش با بهره‌گیری از مدل عددی سوترا و روش بهینه‌سازی فراکاوشی جامعه مورچه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بررسی سناریوهای مختلف فرضی تغییرات محیطی نشان داد که اثر تغییرات خط ساحلی ناشی از افزایش سطح آب دریا به خصوص در مناطق پست، عامل مهم تأثیرگذار بر لنز آب شیرین است و تغییرات نرخ تغذیه نیز از عوامل بسیار مهم و مؤثر بر سیستم آب زیرزمینی تلقی می‌شود. همچنین لحاظ نمودن آثار تغییرات محیطی در مدیریت بهینه آبخوان جزیره کیش، منجر به کاهش بیش از ۲۰ درصدی مقدار مجاز برداشت شده است که نشان دهنده حساسیت بالای مدیریت منابع آب زیرزمینی جزایر کوچک به این تغییرات است.

واژه‌های کلیدی: تغییرات محیطی، جزیره کیش، لنز آب شیرین، مدل تلفیقی شبیه‌سازی-بهینه سازی، مدیریت بهینه

۱- مقدمه

برداشت بیش از حد آب یا به دلیل عوامل طبیعی مانند تغییرات محیطی رخ دهد، آب برداشتی از آبخوان برای مدتی طولانی قابل استفاده نخواهد بود. جزئیاتی بیشتر در این زمینه در مراجع مختلف آمده است [۲، ۴ و ۵]. جلوگیری از پیشروی آب شور، بهترین سیاست بهره‌برداری از این آبخوان‌ها و راه حل بهینه این مسئله است [۵ و ۶].

مطالعات زیادی برای مدلسازی سیستم آب زیرزمینی در آبخوان‌های ساحلی، به جهت بررسی و پیش‌بینی رفتار آب شیرین و آب شور در اندرکنش با یکدیگر و در شرایط مختلف بهره‌برداری، انجام شده است و شرایط و حالات مختلف بررسی شده است. تدوین راهبردهای مدیریتی بهینه، به طوری که برآوردکننده اهداف مورد نظر باشد، نیازمند مدل‌هایی متشکل از روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی است که قادراند پاسخ‌دهی سیستم به انواع سناریوهای محتمل آبی را مدل‌سازی کنند و پیش‌بینی‌های منطقی در اختیار مدیران این حوزه قرار دهند. امروزه مدل‌های تلفیقی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی یکی از پرکاربردترین روش‌ها در فرایند تصمیم‌گیری

مناطق ساحلی به لحاظ جمعیت فراوان ساکن، توسعه اقتصادی و اجتماعی روزافزون، صنعت گردشگری، محیط زیست و اکوسیستم خاص، یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین نقاط جهان محسوب می‌شوند. این مناطق که فقط حدود ۸ درصد سطح جهان را به خود اختصاص داده‌اند، ۲۵ درصد تولیدات و بهره‌وری را داشته و حدود ۶۰ درصد شهرهای جهان را در بر می‌گیرند [۱ و ۲]. منابع آب زیرزمینی، حجم اندکی از منابع آب جهان (حدود ۰/۷۶ درصد) را تشکیل می‌دهند، این منابع در نواحی خشک و نیمه خشک و نیز در مناطقی خاص مانند مناطق ساحلی و جزایر کوچک، منبع اصلی ارزان و مهم تأمین نیازهای آب شیرین می‌باشند [۴-۱].

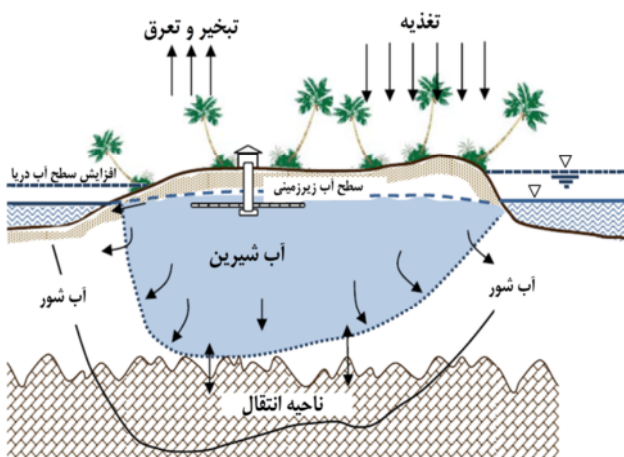
آبخوان‌های ساحلی به عنوان میزبان منابع بسیار حائز اهمیت آب زیرزمینی در مناطق ساحلی، محیطی بسیار حساس و آسیب‌پذیر تلقی می‌شوند. پتانسیل بالای پیشروی آب شور دریا به سمت آبخوان‌های ساحلی یکی از این عوامل آسیب‌زننده است. چنانچه پیشروی نامتعارف آب شور دریا به آبخوان ساحلی در اثر

جزایر کوچک، سیستم آبخوان ساحلی که لنز آب شیرین را در بر می‌گیرد، دارای ویژگی‌هایی است که سبب می‌شود مدیران حوزه آب با یک سیستم کاملاً حساس به مخاطرات موجود، مواجه باشند [۱۳] و [۱۴]. این آبخوان‌ها هم به شرایط طبیعی (مانند تغییرات محیطی از جمله افزایش سطح آب دریاها و تغییرات در میزان تغذیه که در واقعیت می‌تواند ناشی از تغییرات اقلیم هم باشد و همچنین پدیده‌های دریایی مانند امواج و طوفان‌ها) و هم به دلایل فعالیت‌های انسانی (مانند برداشت بی‌رویه از آبخوان به دلیل نیاز روزافزون به آب با رشد جمعیت و صنعتی‌سازی تغییر کاربری زمین و توسعه متداوم جوامع مانند توسعه گردشگری) بسیار حساس هستند. پدیده پیشروی آب شور، یکی از نگرانی‌های عمده و معمول در جزایر کوچک بوده و کنترل آن، چالشی مدیریتی محسوب می‌شود [۷، ۱۴ و ۱۵].

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

برای به‌کارگیری مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ارائه شده در این مطالعه بر روی نمونه‌های واقعی و بزرگ مقیاس، سیستم آب زیرزمینی جزیره کیش، واقع در کشور ایران انتخاب شد که یکی از جزایر راهبردی و مهم محسوب می‌شود. پژوهش‌های مختلفی، بر روی سیستم آب زیرزمینی جزیره کیش، البته با درجات مختلفی از فرضیات و پیچیدگی‌ها و با توجه به هدف‌گذاری‌های مربوطه انجام شده است [۶، ۱۱ و ۱۳].



شکل ۱- نمایی از سیستم آبخوان ساحلی در جزایر کوچک و لنز آب شیرین تشکیل شده [۲]

حوزه مدیریت آبخوان‌های ساحلی محسوب می‌شوند. در این زمینه محققان زیادی مطالعاتی را انجام داده‌اند که از آن جمله می‌توان به استفاده از روش بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها^۱ برای طراحی سیستم پایش آب‌های زیرزمینی اشاره کرد [۷]. در پژوهش دیگری از روش بهینه‌سازی پرندگان^۲ در حل دو مسئله بهینه‌سازی هیدرولیک آب‌های زیرزمینی در حوضه رودخانه در^۳ در فرانسه استفاده شده است [۸]. مسائل بهینه‌سازی مطالعه شده شامل حداکثر نمودن برداشت از آبخوان و حداقل کردن هزینه توسعه سیستم جدید چاه‌های برداشت بوده است. آیواز یک مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای آبخوان نامحضور فرضی و نیز برای حوضه تاحتالی در از میر ترکیه را مورد استفاده قرار داده است [۹ و ۱۰]. حل مسئله حداقل نمودن هزینه‌های پمپاژ آب زیرزمینی از چاه‌های موجود و جدید با بهره‌گیری از مدل شبیه‌سازی مادفلو^۴ و روش بهینه‌سازی جستجوی هارمونیک در این دو مطالعه بررسی شده است.

در پژوهش‌های مختلف مرور کامل و جامعی بر روی مدل‌های تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی انجام گرفته است [۱۱ و ۱۲]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که غالب مطالعات انجام شده در مقیاس‌های کوچک فرضی یا منطقه‌ای بوده و دارای فرضیات ساده‌کننده زیادی است. در مسائل واقعی، ارائه یک مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای آبخوان‌های ساحلی مهم و ضروری است که تا به امروز به ندرت در مطالعات دیده شده است. از این‌رو هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تلفیقی سیستم آب زیرزمینی جزیره کیش در جنوب کشور ایران واقع در خلیج فارس است که تحت سناریوهای مختلف فرضی، از جمله در نظر گرفتن افزایش سطح آب دریا و کاهش نرخ تغذیه به‌عنوان پتانسیل آثار تغییرات محیطی و مدنظر قرار دادن سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از سیستم آب زیرزمینی این جزیره برای ۵۰ سال آینده، مورد مطالعه قرار گرفت.

۱-۱- اهمیت مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی جزایر کوچک

آب زیرزمینی در جزایر کوچک یکی از منابع حیاتی تأمین آب شیرین است که معمولاً به شکل یک لنز، تشکیل شده و بالاتر از آب شور به‌صورت شناور بر روی آن قرار می‌گیرد (شکل ۱). در

^۱ Ant Colony Optimization
^۲ Particle Swarm Optimization
^۳ Dore
^۴ Modflow



شکل ۲- موقعیت منطقه مطالعاتی، جزیره کیش در خلیج فارس [۳]

شبهه ساز را مکرراً فراخوانی نموده و مقادیر تابع هدف مربوطه را محاسبه و ارزیابی می‌کند. سپس بروزرسانی مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری صورت می‌گیرد. این روند تا برآورده شدن معیار توقف الگوریتم مدل تلفیقی ادامه می‌یابد و در نهایت جواب‌های بهینه مسئله به دست می‌آید [۱۵].

۲-۲-۱- روش شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی سیستم آبخوان ساحلی جزیره کیش از مدل عددی سوترا^۱ استفاده شد [۱۹]. این مدل قابلیت مدل‌سازی با رویکرد شبیه‌سازی جریان‌های وابسته به چگالی و انتقال آلاینده محلول به صورت یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی را دارا است و می‌تواند ناحیه اشباع و غیراشباع محیط متخلخل خاک را نیز مدل نماید و تاکنون محققان مختلفی از این مدل برای شبیه‌سازی جریان‌های وابسته به چگالی در آبخوان‌های ساحلی استفاده نموده‌اند [۱۱، ۱۳ و ۲۰]. مدل سه بعدی این جزیره مشابه پژوهش کتابچی و همکاران ساخته شد که در شکل ۴، دامنه مدل سه بعدی آن نشان داده شده است [۳ و ۱۳].

۲-۲-۲- روش بهینه‌سازی

در دهه‌های اخیر، الگوریتم‌های فراکاوشی با درجات مختلفی از پیچیدگی برای حل مسائل بهینه‌سازی در حوزه منابع آب‌های زیرزمینی و به خصوص مدیریت این منابع در آبخوان‌های ساحلی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۱]. بر اساس مطالعات انجام شده و موفقیت کاربرد روش بهینه‌سازی پیوسته جامعه مورچه‌ها^۲ در حوزه مدیریت بهینه آبخوان‌های ساحلی، در این مطالعه از این الگوریتم فراکاوشی استفاده شد [۱۵].

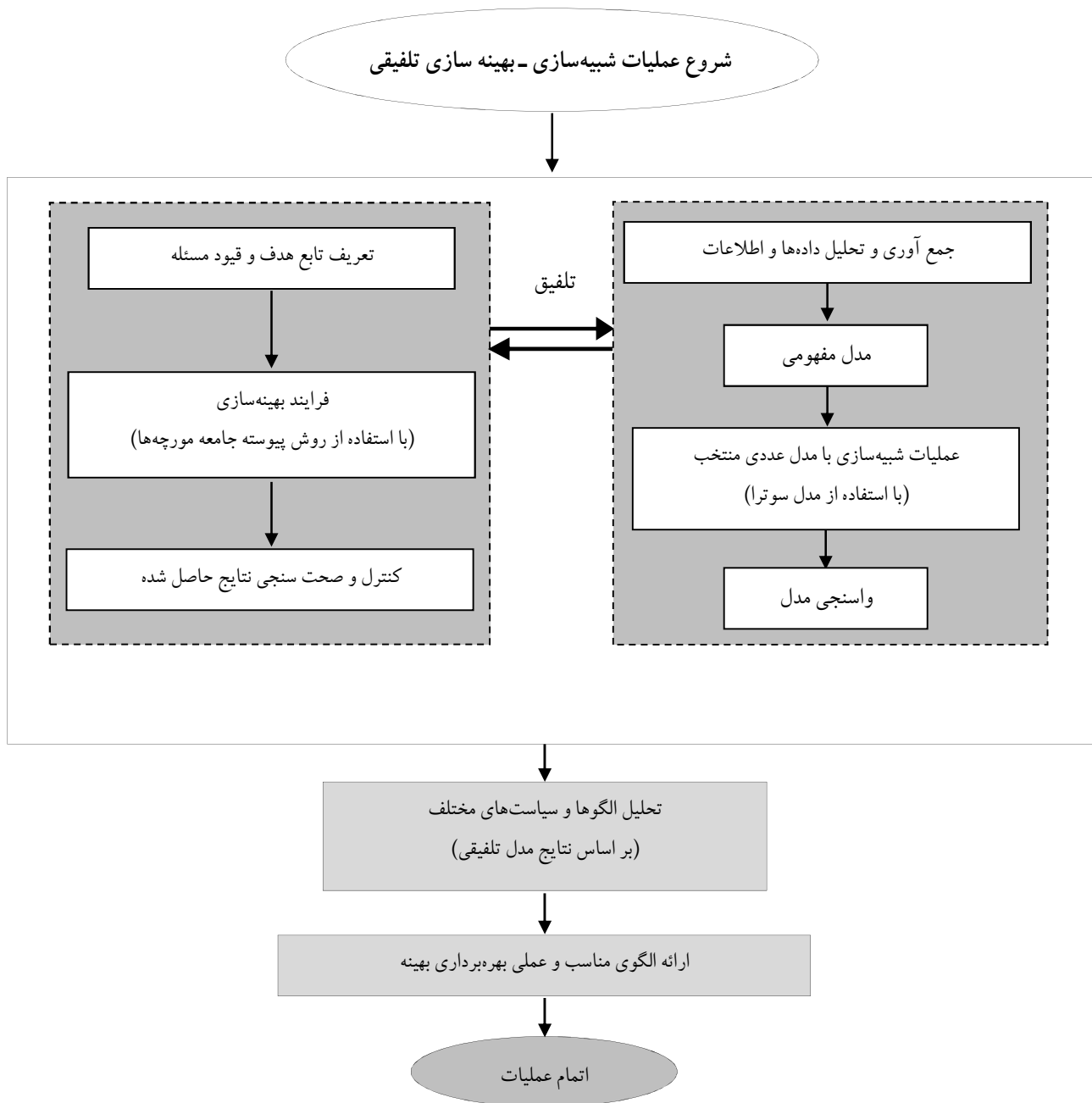
جزیره کیش با وسعت بیش از ۹۰ کیلومترمربع در بین عرض ۲۶ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۲۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۵۳ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی از مبدأ نصف النهار گرینویچ قرار دارد. در شکل ۲، این جزیره و موقعیت قرارگیری آن نشان داده شده است. این جزیره در فاصله ۱۷ کیلومتری از ساحل جنوبی ایران در خلیج فارس و ۲۴۰ کیلومتری غرب بندرعباس قرار گرفته است. میانگین بارندگی بیست ساله کیش طبق آمار، حدود ۲۰۰ میلی‌متر ذکر شده است. بر اساس اطلاعات تجزیه و تحلیل شده، حدود ۲۰ درصد از بارندگی سالانه جزیره کیش (۴۰ میلی‌متر بر سال معادل ۳/۶ میلیون مترمکعب بر سال)، پس از نفوذ به محیط متخلخل خاک به لنز آب شیرین جزیره تغذیه می‌شود. در حال حاضر نیز بر اساس برنامه‌های موجود، حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد از این حجم تغذیه (۱۶ تا ۲۰ میلی‌متر بر سال معادل ۱/۴ تا ۱/۸ میلیون مترمکعب بر سال)، با استفاده از چاه‌های موجود برداشت می‌شود. بنابراین نرخ تغذیه خالص آبخوان (تغذیه کل منهای برداشت) در حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد کل بارندگی سالانه جزیره (۲۰ تا ۲۴ میلی‌متر بر سال معادل ۱/۸ تا ۲/۲ میلیون مترمکعب بر سال) خواهد بود [۱۱، ۱۳ و ۱۴]. اطلاعات بیشتر در این زمینه، هیدروژئولوژی منطقه، نحوه برآورد نرخ تغذیه و سایر مشخصه‌ها در مطالعات انجام شده در مراجع [۵، ۱۱ و ۱۳] آمده است.

۲-۲-۳- ساختار مدل تلفیقی شبیه‌سازی - بهینه‌سازی

رویکرد مدنظر در مدل تلفیقی شبیه‌سازی - بهینه‌سازی این تحقیق، در شکل ۳ ارائه شده است. چنین رویکردی در برخی پژوهش‌ها به دلیل مزایای آن در مقایسه با سایر رویکردها پیشنهاد شده است [۱۶، ۱۷ و ۱۸]. دو جزء اصلی رویکرد مدنظر در مدل‌های تلفیقی شبیه‌سازی - بهینه‌سازی، مدل شبیه‌ساز و روش بهینه‌سازی است. روش بهینه‌سازی در این مطالعه به‌عنوان ابزار بهینه‌ساز، مدل‌های

¹ Saturated-Unsaturated Variable-Density Groundwater Flow with Solute or Energy Transport (SUTRA)

² Continuous Ant Colony Optimization (CACO)

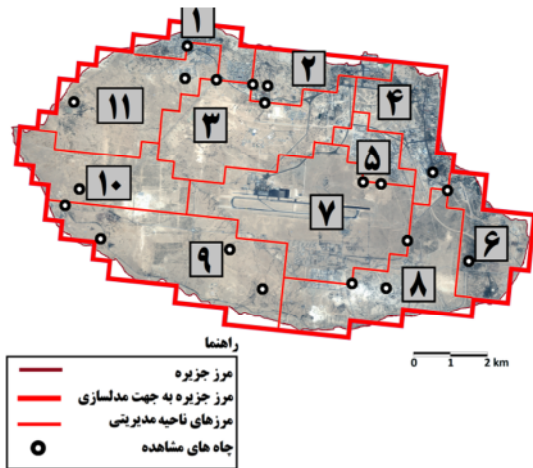


شکل ۳- الگوی کلی مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی تلفیقی

۳-۲- معرفی مسئله بهینه‌سازی

در این مطالعه برای مدیریت برداشت از آب‌های زیرزمینی جزیره کیش، از نواحی مدیریتی به‌جای چاه‌های برداشت آب، بهره‌گرفته شده است [۵]. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، سطح جزیره بر پایه تعدادی از ملاحظات به ۱۱ ناحیه مدیریتی تقسیم شده است. هدف مدنظر در مدل‌های تلفیقی شبیه‌سازی - بهینه‌سازی در این

روش پیوسته جامعه مورچه‌ها بر اساس هوش جمعی موجود در جامعه است. این روش در ابتدا برای مسائل گسسته ارائه شد و سپس به کاربردهای در فضای پیوسته نیز تعمیم پیدا کرد [۲۱ و ۲۲]. در این مطالعه، این ویرایش توسعه یافته به فضاهای پیوسته به‌کار رفت. جزئیات بیشتر در مورد این روش فراکاشی و نحوه کار آن، در مراجع مختلف آورده شده است [۱۵، ۲۱ و ۲۲].



شکل ۵- یازده ناحیه مدیریتی و چاه‌های مشاهده‌ای در سطح جزیره کیش [۶]

تابع جریمه است، به صورت زیر است

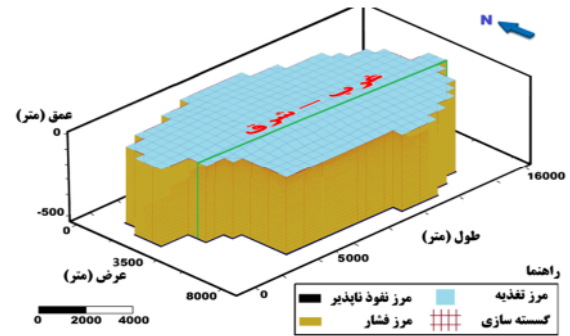
$$f_{\text{modified}} = f - C_{sc} \times Pen \quad (2)$$

که C_{sc} ضریب جریمه است. زمانی که قیود تخطی نشده اند، C_{sc} برابر صفر است، ولی وقتی تخطی از قیود صورت می‌گیرد، یک مقدار بسیار بزرگ منفی به خود می‌گیرد. به عبارت دیگر در صورت تخطی از قیود، به طور قابل ملاحظه‌ای مقدار تابع هدف را افزایش می‌دهد [۱۵]. این رویکرد در کلیه ارزیابی‌های صورت پذیرفته در این مطالعه در حل مسئله بهینه‌سازی آبخوان‌های ساحلی، مدنظر قرار گرفته است.

تحلیل حساسیت سیاست‌های مدیریتی در آبخوان‌های ساحلی نسبت به عوامل محیطی یکی از حوزه‌هایی است که نیازمند بررسی بیشتر است تا مشخص شود این آثار چه تأثیری بر روی سیاست‌های بهینه‌سازی خواهند داشت [۱۳ و ۲۳]. بنابراین آثار آن در مسئله بهینه‌سازی فوق در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۴- معرفی سناریوهای تغییرات محیطی

در جدول ۱، سناریوهای مدنظر برای ارزیابی آثار ناشی از عوامل اشاره شده، ارائه شده است. اثر زیر آب رفتن مناطق پست ساحلی به دلیل بالا آمدن سطح آب دریاها و تغییر محل خطوط ساحلی، در مطالعات مختلف مدنظر قرار گرفته است [۲، ۱۳ و ۲۳]. اثر زیر آب رفتن مناطق پست ساحلی به دلیل بالا آمدن سطح آب دریاها و تغییر محل خطوط ساحلی، در تمام بررسی‌ها در نظر گرفته شده است. سناریوی ۱ وضعیت کنونی لنز آب شیرین زیرزمینی جزیره کیش را نشان می‌دهد. سناریوهای ۳ و ۵ نیز با هدف مقایسه اثر



شکل ۴- دامنه مدل سه بعدی جزیره کیش در خلیج فارس، ایران [۲]

مطالعه برای مدیریت برداشت آب زیرزمینی از آبخوان ساحلی جزیره کیش، تعیین مقادیر برداشت آب زیرزمینی از این ناحیه مدیریتی و کنترل پیشروی آب شور به سوی لنز آب شیرین جزیره است [۵].

حداکثر نمودن آب برداشت شده با رعایت عدم تجاوز غلظت شوری چاه‌های مشاهده‌ای از وضع فعلی، هدف مدنظر در این مسئله بهینه‌سازی است. برای تحقق این هدف، حداقل شدن $W_{net} [L^3 \cdot T^{-1}]$ (تغذیه خالص کل آبخوان به یازده ناحیه مدیریتی) در مسئله تعریف شده، دنبال می‌شود. این مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف می‌شود [۵]

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \sum_{i=1}^{11} (W_j \times A_j) \quad \text{Mm}^3/\text{year} \quad (1) \\ & 0 \leq c_{i,50} \leq c_{i,0} \quad i = 1, 2, \dots, 20 \quad \text{kg/kg} \\ & -10 \leq W_j \leq 40 \quad \text{mm/year} \end{aligned}$$

که در این روابط

$c_{i,50}$ و $c_{i,0}$ با واحد $[M_s/M]$ به ترتیب غلظت شوری در چاه i در ابتدا و انتهای دوره بهینه‌سازی ۵۰ ساله می‌باشد. $W_j [L \cdot T^{-1}]$ برابر تغذیه خالص آبخوان در ناحیه مدیریتی j است. $A_j [L^2]$ برابر مساحت ناحیه مدیریتی j است.

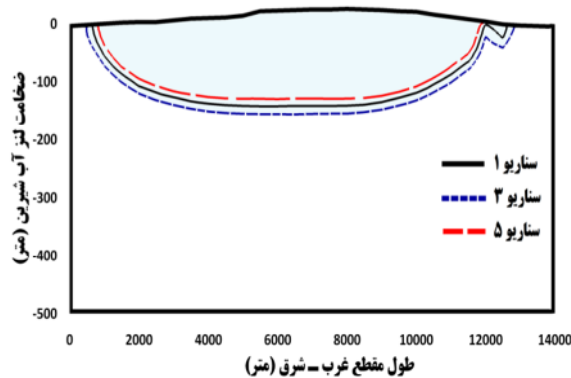
مسائل بهینه‌سازی مقید، با استفاده از توابع جریمه^۱ به مسائل بهینه‌سازی نامقید تبدیل می‌شوند و امکان بررسی و حل آنها با الگوریتم‌های توسعه داده شده برای مسائل نامقید مقدور می‌شود [۱۵]. مقدار جریمه که بستگی به مقدار تخطی از قیود دارد، در داخل الگوریتم روش فراکاوشی تنظیم می‌شود. برای اطمینان از ارضاء تمامی قیود مسئله، تابع هدف اصلاح شده که متأثر از

^۱ Penalty Functions

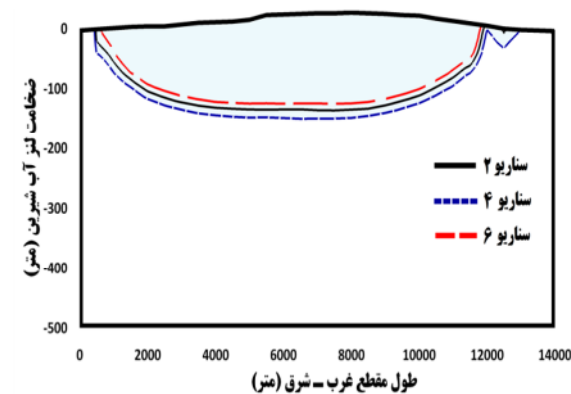
جدول ۱- سناریوهای تغییرات محیطی [۱۳]

نام سناریو	افزایش سطح آب دریا (متر)	تغییرات خط ساحلی	تغذیه خالص	
			تغییر (درصد)	نرخ (میلی متر بر سال)
۱	۰	-	۰	۲۰
۲	۱	بله	۰	۲۰
۳	۰	-	+۲۰	۲۴
۴	۱	بله	+۲۰	۲۴
۵	۰	-	-۱۵	۱۷
۶	۱	بله	-۱۵	۱۷

آب دریا به طور قابل ملاحظه‌ای می‌تواند باعث تغییرات خطوط ساحلی به ویژه در مناطق پست شود. مقایسه نتایج سناریوهای ۱ و ۲ نشان می‌دهد، در صورتی که سطح آب دریا ۱ متر افزایش یابد و تغییرات خط ساحلی، به همراه آن زیر آب رفتن مناطق پست نیز در نظر گرفته شود، حجم لنز به دلیل کاهش سطح جزیره کوچک شده و در این حالت ضخامت لنز نیز نسبت به حالت کنونی ۵/۱ درصد کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن تأثیر توأمان افزایش سطح آب دریا و افزایش نرخ تغذیه خالص (سناریو ۴)، می‌توان دریافت که در این حالت، تأثیر معکوس این دو اثر بر لنز آب شیرین جزیره اعمال می‌شود. در این حالت ضخامت لنز نسبت به سناریو ۱، ۵/۲ درصد افزایش یافته است. سناریو ۶ بیشترین اثر تغییرات محیطی بر لنز آب شیرین جزیره کیش را داشت. کاهش نرخ تغذیه خالص، لنز را کوچک نموده و اثر هم‌افزایی با افزایش سطح آب دریا دارد. تحت سناریو ۶، ضخامت لنز در مقایسه با سناریو ۱، ۱۲/۴ درصد کاهش یافت. نتایج شبیه‌سازی‌های به دست آمده تحت سناریوهای ۱ تا ۶ در جدول ۲ آمده است که منطبق با پژوهش‌های قبلی است [۲، ۸ و ۱۳].



شکل ۶- لنز آب شیرین جزیره کیش بر اساس خطوط هم‌غلظت ۵۰ درصد شوری در سناریوهای ۱، ۳ و ۵



شکل ۷- لنز آب شیرین جزیره کیش بر اساس خطوط هم‌غلظت ۵۰ درصد شوری در سناریوهای ۲، ۴ و ۶

افزایش ۲۰ درصدی و کاهش ۱۵ درصدی نرخ تغذیه خالص نسبت به حالت متوسط ۲۰ میلی‌متر بر سال، ارائه شده است [۱۳ و ۲۱]. در سناریو ۲ مقدار نرخ تغذیه خالص برابر با حالت متوسط ۲۰ میلی‌متر بر سال است و افزایش سطح آب دریا به میزان ۱ متر فرض می‌شود که مشابه فرضیات مدنظر در پژوهش‌های زیادی است [۲، ۱۳، ۲۴ و ۲۵]. سناریوهای ۴ و ۶ نیز به منظور بررسی اثر توأمان افزایش سطح آب دریا و تغییرات نرخ تغذیه خالص بر لنز آب شیرین جزیره کیش تعریف شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی حساسیت منابع آب زیرزمینی جزیره کیش نسبت به تغییرات محیطی

به منظور مشاهده نتایج سناریوهای ارائه شده در حالت دائمی، مقطع غرب-شرق انتخاب شد (شکل ۴). در ابتدا به منظور بررسی وضعیت لنز آب شیرین جزیره کیش، شبیه‌سازی برای حالت فعلی (سناریو ۱) صورت گرفت. برای این حالت، ضخامت لنز آب شیرین جزیره در عمق ۱۳۶/۴ متری از سطح آب دریا برآورد شد. در شکل ۶، ضخامت لنز آب شیرین جزیره کیش برای سناریو ۳ و ۵ به ترتیب برای حالات افزایش نرخ تغذیه خالص به میزان ۲۰ درصد و کاهش آن به میزان ۱۵ درصد ارائه شده است. ضخامت لنز در سناریو ۳ و نسبت به حالت متوسط (سناریو ۱) ۹/۸ درصد افزایش یافت، اما برای سناریو ۵ که نرخ تغذیه خالص ۱۵ درصد کاهش یافت، ضخامت لنز ۹ درصد کم شد. با توجه به اینکه مقدار هدایت هیدرولیکی لایه فوقانی جزیره کیش بزرگ‌تر از لایه تحتانی است، افزایش یا کاهش نرخ تغذیه خالص، موجب افزایش و یا کاهش آب شیرین ورودی از سطح جزیره کیش به داخل آبخوان خواهد شد. بنابراین تأثیر قابل ملاحظه با اندک تغییری در نرخ تغذیه خاص، مشهود است. شکل ۷ ضخامت لنز آب شیرین جزیره کیش تحت سناریوهای ۲، ۴ و ۶ را نشان می‌دهد. افزایش سطح

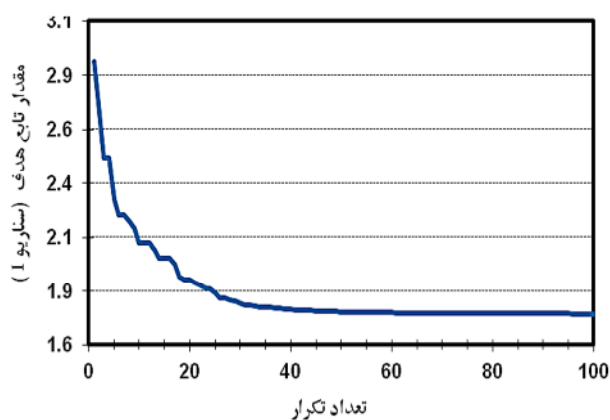
جدول ۳- خلاصه‌ای از نتایج حاصل از حل مسائل بهینه‌سازی با مدل تلفیقی تصمیم‌گیری

مشخصه	واحد	بدون تغییرات محیطی	با تغییرات محیطی
سطح تغذیه	(km ²)	۹۰/۵	۷۶/۲
کل تغذیه	(Mm ³ /year)	۳/۶	۳/۱
متوسط شوری در ابتدای دوره	(%)	۴۱/۳	۴۱/۳
مقدار تابع هدف		۱/۷	۱/۵
مقدار تغذیه خالص	(Mm ³ /year)	۱/۷	۱/۵
مقدار برداشت	(Mm ³ /year)	۱/۹	۱/۶
متوسط شوری در انتهای دوره	(%)	۴۱/۳	۴۰/۴

شبیه‌سازی به دست آمد. در این مطالعه، تعداد جمعیت و تعداد تکرارهای محاسباتی روش پیوسته جامعه مورچه‌ها به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی مدنظر، بر اساس انجام تعدادی محاسبات اولیه، به ترتیب برابر ۳۰ و ۱۰۰ (معادل ۳۰۰۰ شبیه‌سازی در هر حل) تنظیم شد که زمان محاسباتی برای هر اجرای مستقل حدود ۹/۸۷ ساعت بود. در جدول ۴ مقادیر میانگین، حداکثر، حداقل و انحراف معیار جواب مسئله بهینه‌سازی که ۱۰ مرتبه محاسبه شده، آمده است. همچنین در شکل ۸ برای نمونه، نمودار همگرایی جواب‌های سناریو ۱ ترسیم شده است.

جدول ۴- جواب برای ۱۰ مرتبه حل مسئله بهینه‌سازی

مشخصه	واحد	مقدار
مقدار میانگین	(Mm ³ /year)	۱/۷
مقدار حداکثر	(Mm ³ /year)	۱/۸۴
مقدار حداقل	(Mm ³ /year)	۱/۶۹
انحراف معیار	(Mm ³ /year)	۰/۰۵



شکل ۸- نمودار همگرایی جواب‌ها (برای نمونه: سناریو ۱)

بر اساس نتایج فوق، در مسئله بهینه‌سازی مورد نظر، با توجه به آثار مشاهده شده تغییرات محیطی بر روی سیستم آب زیرزمینی، این تغییرات نیز بر روی مسئله بهینه‌سازی اضافه می‌شود تا میزان اثرگذاری آن در راهبردهای بهینه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی جزیره کیش هم مشخص شود. افزایش سطح آب دریا معادل ۱ متر به همراه زیر آب رفتن مناطق پست در اثر آن و همچنین ۱۵ درصد کاهش در نرخ تغذیه خالص (معادل نرخ تغذیه خالص برابر با ۱۷ میلی‌متر بر سال) در نظر گرفته می‌شود که بیشترین اثر محیطی مشاهده شده بر روی جزیره کیش محسوب می‌شود.

جدول ۲- نتایج سناریوهای تغییرات محیطی

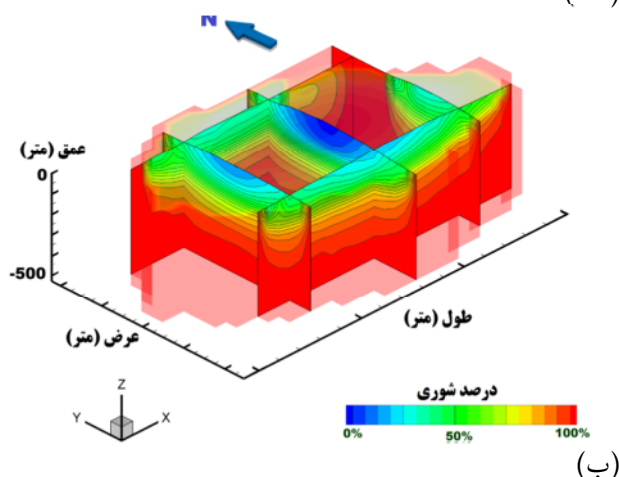
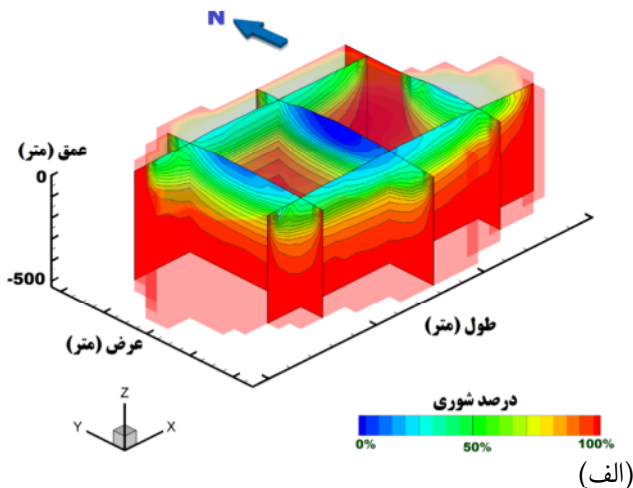
نام سناریو	افزایش سطح آب دریا (متر)	تغییرات خط ساحلی	تغذیه خالص		نتایج شبیه‌سازی	
			تغییر (درصد)	نرخ (میلی‌متر بر سال)	ضخامت لنز	درصد تغییر
۱	۰	-	۰	۲۰	۱۳۶/۴	-
۲	۱	بله	۰	۲۰	۱۲۹/۴	۵/۱
۳	۰	-	+۲۰	۲۴	۱۴۹/۶	۹/۸
۴	۱	بله	+۲۰	۲۴	۱۴۳/۵	۵/۲
۵	۰	-	-۱۵	۱۷	۱۲۴/۱	۹
۶	۱	بله	-۱۵	۱۷	۱۱۹/۵	۱۲/۴

۲-۳- بررسی نتایج مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی جزیره کیش

مسئله بهینه‌سازی مطرح در این مطالعه بدون در نظر گرفتن آثار تغییرات محیطی و با در نظر گرفتن آن (سناریو ۶) بر اساس مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی حل شد. حداقل نمودن نرخ کل تغذیه خالص (معادل حداکثر کردن برداشت کل از سیستم آب زیرزمینی جزیره) و نیز کنترل پیشروی آب شور در وضع اولیه (جلوگیری از بدتر شدن وضع شوری چاه‌های مشاهده‌ای در طول ۵۰ سال مدیریتی)، رفتار متضاد همدیگر را در مدیریت آبخوان جزیره دارند. خلاصه‌ای از نتایج حاصل از حل مسائل بهینه‌سازی با مدل تلفیقی ذکر شده در جدول ۳ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، برداشت مقدار ۱/۴ میلیون مترمکعب بر سال از سیستم آب زیرزمینی جزیره کیش در طول ۵۰ سال دوره بهینه‌سازی بدون این که از قیود مدنظر تخطی صورت گیرد، قابل انجام است. در مسئله بهینه‌سازی مدنظر که هدف حداکثر نمودن برداشت از سیستم آب زیرزمینی است، با روش پیوسته جامعه مورچه‌ها، مقدار حداکثر برداشت ۱/۹ میلیون مترمکعب بر سال بعد از ۳۰۰۰

جدول ۵- حساسیت توزیع نرخ تغذیه خالص و نرخ برداشت به تغییرات محیطی بر اساس حل مسئله بهینه‌سازی

شماره ناحیه مدیریتی	بدون تغییرات محیطی		با تغییرات محیطی	
	تغذیه خالص	برداشت	تغذیه خالص	برداشت
۱	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۵
۲	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۴
۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۲۲
۴	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۰۸
۵	-۰/۰۳	۰/۱۴	-۰/۰۳	۰/۱۴
۶	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۰۳
۷	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۴۲	۰/۲۲
۸	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۳۱	۰/۱۱
۹	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۳۱
۱۰	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۴
۱۱	۰/۲۱	۰/۲۰	۰/۱۷	۰/۲
جمع	۱/۷	۱/۹	۱/۵	۱/۶



شکل ۹- حساسیت توزیع شوری در سیستم آب زیرزمینی جزیره کیش به تغییرات محیطی (انتهای دوره ۵۰ ساله بهینه‌سازی الف- بدون در نظر گرفتن آثار تغییرات محیطی؛ و ب- با در نظر گرفتن آثار تغییرات محیطی)

در مسئله بعدی که آثار تغییرات محیطی هم لحاظ شد، مقدار حداکثر برداشت مجاز به $1/6$ میلیون مترمکعب بر سال تقلیل یافت که نشان دهنده کاهش بیش از ۲۰ درصد در مقدار بهینه برداشت است. همچنین از جدول ۴ می‌توان دید که متوسط مقدار شوری در چاه‌های مشاهده‌ای در ابتدای دوره برابر $41/3$ درصد بود. تغییرات کمتر از ۱ درصد در شوری چاه‌های مشاهده‌ای در طول ۵۰ سال برای سناریوی بدون تغییرات محیطی دیده می‌شود. زیر آب رفتن برخی مناطق به دلیل افزایش سطح آب دریا منجر به افزایش شوری بخصوص در بخش‌های شمال شرقی جزیره (مانند ناحیه ۴) شد. به علاوه همان‌طور که در جدول ۳ هم قابل مشاهده است، کاهش ناچیزی در متوسط شوری‌ها (کمتر از ۲ درصد) در طول دوره ۵۰ ساله بهینه‌سازی رخ می‌دهد. می‌توان جمع‌بندی نمود که فراهم کردن مقدار مورد تقاضای حداقل $1/4$ میلیون مترمکعب بر سال آب از سیستم آب زیرزمینی جزیره کیش سبب می‌شود که هیچ‌گونه بهبودی در وضعیت شوری لنز آب شیرین جزیره با اعمال هرگونه سیاست بهینه‌سازی رخ ندهد. در واقع تلاش اصلی بر این است که کمترین میزان تخریب وضعیت کیفی سیستم آب زیرزمینی با اجرای بهینه‌ترین سیاست‌ها فراهم شود مگر این که در راهبردهای جزیره، مقدار مدنظر برای برداشت سالانه از لنز تغییر نماید. در جدول ۵ توزیع نرخ تغذیه خالص و نرخ برداشت در حالت بهینه برای ۱۱ ناحیه مدیریتی ارائه شده است.

اطلاعات ارائه شده در جدول ۵ آشکار می‌سازد که برداشت از نواحی مدیریتی که به دلیل افزایش سطح آب دریا به زیر آب می‌رود، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد (مانند نواحی ۴ و ۶). در شکل ۹ نمایش سه بعدی توزیع شوری در سیستم آب زیرزمینی جزیره کیش برای انتهای یک دوره ۵۰ ساله نشان داده شده است. کل مقدار تغذیه خالص به آبخوان جزیره با توجه به سطح صرفنظر می‌شود، در حدود $3/6$ میلیون مترمکعب بر سال تخمین زده می‌شود (جدول ۳). اما زیر آب رفتن بخش‌هایی از زمین‌های نزدیک دریای جزیره به دلیل افزایش ۱ متری سطح آب دریا، سبب کاهش کل مقدار تغذیه خالص به $3/05$ میلیون مترمکعب بر سال می‌شود. سطح جزیره نیز به دلیل همین اثر تغییرات محیطی به $76/2$ کیلومترمربع تقلیل می‌یابد. افزایش سطح آب دریا سبب می‌شود که حدود $14/3$ کیلومترمربع از سطح جزیره (حدود ۱۶ درصد) به زیر آب برود. البته کاهش ۱۵ درصدی نرخ تغذیه خالص هم در آن مؤثر است.

باید توجه داشت بسیاری از آثار تغییرات محیطی مانند اثر افزایش قائم سطح آب دریا و تغییر در میزان بارندگی‌ها و در

گرفت. نتایج حالت دائمی نشان داد که افزایش سطح آب دریا، کاهش بارندگی و در نتیجه کاهش تغذیه به آبخوان و به خصوص زیر آب رفتن مناطق پست نزدیک دریا از جمله عوامل تأثیرگذار تغییرات محیطی در کاستن از ضخامت لنز آب شیرین و در نتیجه کاهش منابع آب زیرزمینی جزیره می‌باشند.

برای بررسی مسئله بهینه‌سازی تدوین شده به منظور مدیریت بهینه نحوه برداشت از منابع آب زیرزمینی جزیره کیش از مدل تلفیقی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی متشکل از مدل سه بعدی عددی سوترا و الگوریتم فراکاوشی پیوسته جامعه مورچه‌ها برای اولین بار بهره گرفته شد. نتایج حاصل از مسئله بهینه‌سازی نشان داد که در نظر گرفتن آثار تغییرات محیطی در مسائل بهینه‌سازی آبخوان‌های ساحلی جزایر کوچک، بسیار حائز اهمیت است. بر اساس نتایج حاصل در این مطالعه، در نظر گرفتن بدترین حالت آثار تغییرات محیطی که افزایش سطح آب دریا توأم با کاهش تغذیه خالص به آبخوان بود، منجر به کاهش بیش از ۲۰ درصدی حجم مجاز آب برداشتی از سیستم آب زیرزمینی نمونه مورد بررسی شد.

۵- قدردانی

نویسندگان این مقاله از سازمان منطقه آزاد جزیره کیش که در تهیه و گردآوری داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز در مطالعه موردی این تحقیق همکاری مؤثری داشتند، تشکر و سپاسگزاری می‌نمایند.

نتیجه نرخ تغذیه، بسیار بلندمدت بوده و آثار سوء آنها در دوره‌های بهینه‌سازی آتی، بیشتر قابل مشاهده خواهد بود [۲ و ۱۳]. این نتایج نشان دهنده اهمیت در نظر گرفتن آثار تغییرات محیطی در برنامه‌های بهینه‌سازی آبخوان‌های ساحلی است که از نمودهای واقعی آن لزوم لحاظ نمودن آثار تغییرات اقلیم در تدوین راهبردهای مدیریتی بهینه است [۲، ۱۱ و ۱۳].

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه حساسیت راهبردهای مدیریتی منابع آب شیرین زیرزمینی یک جزیره کوچک نسبت به تغییرات محیطی از جمله افزایش سطح آب دریا و تغییرات در نرخ تغذیه با در نظر گرفتن دیدگاه جریان‌های وابسته به چگالی مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات بر روی سیستم آب زیرزمینی جزیره کیش که در شرایط آب و هوایی خشک در خلیج فارس قرار دارد، انجام پذیرفت. برای بررسی رفتار لنز آب شیرین زیرزمینی تحت تأثیر سناریوهای مختلف تغییرات محیطی در آینده، شش مجموعه سناریو که شامل اثر افزایش سطح آب دریا و تغییرات نرخ تغذیه بود، در نظر گرفته شد. در این سناریوهای فرضی، افزایش سطح آب دریا در حالت یک متر با در نظر گرفتن تغییرات خط ساحلی به کار گرفته شد و میزان تغییرات نرخ تغذیه به میزان ۱۵- و ۲۰+ درصد نسبت به نرخ خالص تغذیه اولیه (۲۰ میلی متر بر سال) نیز مورد بررسی قرار

۶- مراجع

1. Ataie-Ashtiani, B. (2010). *Study of optimum groundwater usage in Kish Island*, Final Reports, Iran Kish Free Zone Organization (KFZO). (In Persian)
2. Mahmoodzadeh, D. (2013). "Effect of sea level rise and aquifer characteristics on seawater intrusion in coastal aquifers." MSc Thesis, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Terhan. (In Persian)
3. Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. (2015). "Assessment of a parallel evolutionary optimization approach for efficient management of coastal aquifers." *Environ. Modell. Softw.* 74, 21-38.
4. Rajabi, M.M., Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. (2011). "Numerical modeling of the freshwater lens in small islands (Case study of Kish Island)." *Journal of Hydraulics*, 2, 45-86. (In Persian)
5. Ataie-Ashtiani, B., Ketabchi, H., and Rajabi, M.M. (2014). "Optimal management of freshwater lens in a small island using surrogate models and evolutionary algorithms." *J. Hydrol. Eng.*, 19 (2), 339-354.
6. Ataie-Ashtiani, B., Rajabi, M.M., and Ketabchi, H. (2013). "Inverse modeling for freshwater lens in small islands: Kish Island, Persian Gulf." *Hydrol. Process*, 27, 2759-2773.
7. Amy, Y.L., and Hilton, B.C. (2007). "Short communication optimal groundwater monitoring design using an ant colony optimization paradigm." *Environ. Modell. Softw.*, 22, 110-116.
8. Gaur, S., Chahar, B.R., and Grailot, D. (2011). "Analytic elements method and particle swarm optimization based simulation-optimization model for groundwater management." *J. Hyd.*, 402 (3), 217-227.
9. Ayvaz, M.T. (2009). "Application of harmony search algorithm to the solution of groundwater management models." *Adv. Water. Resour.*, 32, 916-924.

10. 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." *J. Hyd.*, 478, 63-76.
11. Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. (2015). "Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges." *J. Hyd.*, 520, 193-213.
12. Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. (2015). "Review: Coastal groundwater optimization - advances, challenges, and practical solutions. Special Issue Optimization for Groundwater Characterization and Management." *Hydrogol J.*, 23(6), 1129-1154.
13. Mahmoodzadeh, D., Ketabchi, H., Ataie-Ashtiani, B., and Simmons, C.T. (2014). "Conceptualization of a fresh groundwater lens influenced by climate change: A modeling study of an arid-region island in the Persian Gulf, Iran." *J. Hyd.*, 519, 399-413.
14. Ataie-Ashtiani, B., and Ketabchi, H. (2014). *Groundwater hydraulics and pollutant transport*, Sharif University of Technology Publication, Tehran. (In Persian)
15. Ataie-Ashtiani, B., and Ketabchi, H. (2011). "Elitist continuous ant colony optimization algorithm for optimal management of coastal aquifers." *Water Resour. Manage.*, 25, 165-190.
16. Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. (2010-2011). "Development of combined ant colony optimization algorithm and numerical simulation for optimal management of coastal aquifers." *IR-WRR.*, 7 (1), 1-12 (In Persian)
17. Ketabchi, H. (2014). "An efficient simulation-optimization model for coastal groundwater management." PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran. (In Persian)
18. Sreekanth, J., and Datta, B. (2014). "Stochastic and robust multi-objective optimal management of pumping from coastal aquifers under parameter uncertainty." *Water Resour. Manage.*, 28(7), 2005-2019.
19. Voss, C.I., and Provost, A.M. (2010). *SUTRA: A model for saturated-unsaturated, variable-density groundwater flow with solute or energy transport*, USGS Water-Resources Investigations Report, 02-4231, USA.
20. Michael, H.A., Russoniello, C.J., and Byron, L.A. (2013). "Global assessment of vulnerability to sea-level rise in topography-limited and recharge-limited coastal groundwater systems." *Water Resour. Res.*, 49(4), 2228-2240.
21. Afshar, M.H., Ketabchi, H., and Rasa, E. (2006). "Elitist continuous ant colony optimization algorithm: Application to reservoir operation problems." *Inter. J. Civil. Eng.*, 4(4), 274-285.
22. Pourtakdoust, S.H., and Nobahari, H. (2004). "An extension of ant colony system to continuous optimization problems." *In. Ant colony optimization and swarm intelligence*, Springer Berlin Heidelberg, 294-301
23. Ataie-Ashtiani, B., Werner, A.D., Simmons, C.T., Morgan, L.K., and Lu, C. (2013). "How important is the impact of land-surface inundation on seawater intrusion caused by sea-level rise?." *Hydrogol. J.*, 21(7), 1673-1677.
24. International Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change. (2013). *The physical science basis*, Working group 1 contribution to the fifth assessment report of the international panel on climate change, Cambridge, New York.
25. Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Ataie-Ashtiani, B., Werner, A.D., and Simmons, C.T. (2014). "Sea-level rise impact on fresh groundwater lenses in two-layer small islands." *Hydrol Process*, 28, 5938-5953.