

**Development of Combined Ant Colony  
Optimization Algorithm and Numerical  
Simulation for Optimal Management of  
Coastal Aquifers***H. Ketabchi<sup>1\*</sup> and B. Ataie-Ashtiani<sup>2</sup>***Abstract**

Groundwater aquifers are important and vital resources in coastal zones. Serious environmental problems often occur in coastal areas that are densely populated or have been industrialized. The common problem is the saltwater intrusion into the freshwater aquifer system, due to inappropriate exploitation and over-pumping of coastal aquifers. This causes more limitations for the meaningful operation policies. A proper and reliable picture of the groundwater system in the coastal aquifer and the saltwater intrusion phenomenon are required to keep away from the possible threats and to develop sufficient management strategies. This study, presented an efficient combined numerical simulation-optimization model for optimal management of a coastal aquifer, while controlling the saltwater intrusion process through controlled pumping. The proposed approach employs improved Elitist Continuous Ant Colony Optimization (ECACO) algorithm as an optimization tool in the model. In the numerical simulation approach, objective functions with extensive range of constraints for coastal aquifer management is considered. In this model, through some simple scheme, such as continuity equations in the porous media cells and existing hydraulic systems in the study area, more complex phenomenon representing real systems can be investigated. This model is verified using application examples available in the literature. The success and efficiency of the proposed ECACO algorithm in optimal management of actual coastal aquifers is shown.

**Keywords:** Ant Colony Optimization, Coastal Aquifer, Optimal Management, Saltwater Intrusion, Numerical Simulation.

Received: August 4, 2009

Accepted: February 22, 2011

توسعه الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه‌ها به صورت  
تلفیقی با مدل شبیه سازی عددی  
برای مدیریت بهینه آبخوان‌های ساحلی

حامد کتابچی<sup>۱\*</sup> و بهزاد عطایی آشتیانی<sup>۲</sup>**چکیده**

آبخوان‌های ساحلی یکی از منابع حیاتی موجود در مناطق ساحلی می‌باشند. در این مناطق از سطح جهان که اغلب، مناطقی پرجمعیت، صنعتی و پراهمیت هستند، به دلیل فشارهای وارده، امکان بروز چالش‌های زیست محیطی، وجود دارد. از معمول‌ترین آنها، می‌توان به رخ دادن پدیده پیشروی آب شور به دلیل برداشت نادرست و بیش از حد آب زیرزمینی ساحلی و کاهش کیفیت آن اشاره نمود که محدودیت‌های زیادی را در نحوه بهره‌برداری از آبخوان‌های ساحلی فراهم می‌نماید. شناخت صحیح سیستم آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی و پدیده پیشروی آب شور به سمت آن، در تدوین سیاست‌های نحوه بهره‌برداری از منابع آب موجود و کنترل پیشروی آب شور ضروری است. در این مطالعه، مدل تلفیقی شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی به روش جامعه مورچه‌ها در محیط‌های پیوسته و با اعمال استراتژی *Elitist* برای مدیریت بهینه آبخوان‌های ساحلی با هدف کنترل خطر پیشروی آب شور دریا ارائه می‌گردد. در مدل شبیه‌سازی عددی بر اساس گسسته‌سازی تفاضلات محدود، ایده‌ای ساده مبتنی بر برقراری معادله پیوستگی جریان با امکان افزودن پیچیدگی‌های بیشتر منطبق بر واقعیت، توسعه داده شده و ابزار بررسی توابع هدف متنوع‌تر با گستره وسیع‌تری از قیود مورد توجه در مباحث مدیریت آبخوان ساحلی، در تنظیم معادلات و روند کار، لحاظ شده است. کارایی مدل با به کار بردن آن در چندین مثال حل شده و مقایسه با کارهای پیشین، ارزیابی شده که نتایج این ارزیابی، نشان دهنده دقت و اعتبار مدل تدوین شده بوده و قابلیت کاربرد آن را در مدیریت بهینه آبخوان‌های ساحلی در مطالعه‌های واقعی نمایان می‌سازد.

**کلمات کلیدی:** روش بهینه سازی جامعه مورچه‌ها، آبخوان ساحلی، مدیریت بهینه، پیشروی آب شور دریا، شبیه سازی عددی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳ مرداد ۱۳۸۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۳ اسفند ۱۳۸۹

1- Ph.D. Candidate, Civil Engineering Dept., Sharif University of Technology, P.O. Box 11155-9313, Tehran, Iran, Email: hketabchi@civil.sharif.edu

2- Professor, Civil Engineering Dept., Sharif University of Technology, P.O. Box 11155-9313, Tehran, Iran, Email: ataie@sharif.edu

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

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

\*- نویسنده مسئول

تابع هدف حداقل نمودن هزینه پمپاژ را ارائه نمودند. قیودی که در تحقیقات (Cheng et al. (2000)، (Mantoglou (2003)، (Park and Aral (2004) و (Mantoglou et al. (2004) Haie and Silva (2007) اعمال شد، برای کنترل حد پیشروی آب شور با توجه به نقطه بحرانی منطقه تأثیر چاه‌های در حال پمپاژ بوده است. از سایر قیودی که مورد توجه بوده است، می‌توان به سطح مطلوب هد آب در چاه‌ها، غلظت شوری در آب برداشت شده از چاه‌ها، انرژی مصرفی برای برداشت یا تغذیه، شاخص‌های زیست محیطی و... اشاره نمود. همچنین در کارها و تحقیقات مختلفی چندین تابع هدف نیز مدنظر بوده است.

(Voss and Gorelick (1984)، مدل شبیه سازی جریان و انتقال، SUTRA را با سیستم بهینه سازی MINOS به عنوان یک بخش مستقلی در برنامه تلفیق نمودند. برنامه SUTRA به عنوان یک زیر برنامه در این کار، در فرآیند بهینه‌سازی برای ارزیابی تابع و ژاکوبین فراخوانی شده است. (Finney et al. (1992) برنامه MINOS و SHARP را ترکیب نمودند و مقدار مربع حجم آب شور وارد شده در هر آبخوان در سیستم لایه‌ای را حداقل نمودند.

(Emch and Yeh (1998) برنامه MINOS و SHARP را ترکیب نمودند و به بهینه سازی مسأله با چند تابع هدف مورد نظر پرداختند. در این مطالعه، مدل SHARP به صورت یک زیر برنامه در الگوریتم بهینه‌سازی به کار رفته است. متغیر تصمیم‌گیری در این کار، میزان پمپاژ بود. مدل SHARP، مقادیر هد و محل مرز بین آب شور و آب شیرین را محاسبه نموده و به وسیله زیربرنامه‌های موجود در الگوریتم، مقدار تابع هدف و توابع قیود به دست آمد. روش تفاضل محدود برای تعیین تغییرات تابع هدف و قیود در مسأله مدیریتی به کار رفت.

(Shamir et al. (1984) بهره برداری سالانه یا فصلی را برای یک آبخوان ساحلی بر اساس برنامه‌ریزی خطی و با ساده‌سازی‌هایی منطبق بر واقعیت انجام دادند. حالت سطح تماس اختلاط ناپذیر خطی متغیر با زمان در این مطالعه در یک آبخوان ساحلی همگن غیرمحصور فرض شده است و شبیه سازی پدیده در قیود مسأله بهینه سازی انجام شده و اهداف چندگانه از جمله تراز آب زیرزمینی مطلوب، محل سطح مرزی مطلوب آب شور و آب شیرین، کیفیت آب، انرژی مصرفی حداقل و... در دستیابی به سیاست بهره برداری مطلوب مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه بر روی آبخوان ساحلی مجاور با دریای مدیترانه در سرزمین‌های فلسطین اشغالی انجام شده است.

آبخوان‌های ساحلی یکی از منابع مهم تأمین آب در مناطق ساحلی بوده و به دلیل پتانسیل بالای پیشروی آب شور دریا به سمت آنها از اهمیت بالایی در مبحث مدیریت بهره‌برداری برخوردارند. چنانچه پیشروی نامتعارف آب شور دریا به آبخوان ساحلی در اثر برداشت بیش از حد آب رخ دهد، آب برداشتی از آبخوان برای مدتی طولانی قابل استفاده نخواهد بود (Ataie-Ashtiani et al., 1999a, 1999b, 2001). (Ataie-Ashtiani, 2007).

(Bear (1979) به بررسی جامع این مقوله و حل‌های موجود در زمینه آبخوان‌های ساحلی پرداخته و مرور و مقایسه‌ای بین آنها ارائه نموده است. (Reilly and Goodman (1985) نگاهی جامع به تاریخچه بررسی پدیده پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی داشته‌اند. در این کار با جمع بندی کارهای گذشته دو دیدگاه کلی برای بررسی پیشروی آب شور دریا به سمت آبخوان‌های ساحلی ارائه شده که روش‌های سطح تماس اختلاط ناپذیر و مرز مشترک اختلاطی نامیده می‌شوند. مدل‌های سطح تماس اختلاط ناپذیر، محل مرز آب شور و آب شیرین را به صورت یک سطح بدون ضخامت در نظر گرفته و حل مسأله را ارائه می‌نمایند. زمانی که آب شور و آب شیرین، دو سیال اختلاط پذیر فرض می‌شوند که در واقعیت نیز چنین است، یک ناحیه انتقالی بین این دو ایجاد می‌شود و برای حل مسأله، نیاز به حل معادلات انتقال، همزمان با معادلات جریان آب زیرزمینی می‌باشد که روش مرز مشترک اختلاطی نامیده می‌شود (Ataie-Ashtiani, 1999a, 1999b, 2001).

در زمینه مدیریت بهینه آبخوان‌های ساحلی با خطر پیشروی آب شور دریا، در کارهای گذشته، راه حل‌های بهینه با درجه‌های مختلفی از موفقیت به دست آمده‌اند. جلوگیری از پیشروی آب شور، بهترین سیاست بهره برداری از آبخوان‌های ساحلی و راه حل بهینه این مسأله در بسیاری از آبخوان‌های ساحلی است. اهداف مختلفی از مدیریت بهینه آبخوان‌های ساحلی می‌تواند دنبال شود. (Shamir et al. (1984)، (Hallaji and Yazicigil (1996)، (Mantoglou (2003)، (Mantoglou et al. (2004) Cheng et al (2000) و (Park and Aral (2004) تابع هدف خود را بر مبنای حداکثر نمودن کل پمپاژ از منطقه، برنامه‌ریزی نمودند. (Das and Datta (1999) میزان شوری آب برداشت شده از چاه‌ها را حداقل نمودند. (Emch and Yeh (1998)، (Gordon et al. (2000)، (Katsifarakis et al. (1999) مدلی با

(1999) Naji et al. محل سطح تماس اختلاط ناپذیر آب شور و آب شیرین را در یک آبخوان ساحلی به صورت احتمالی و با فرض عدم قطعیت در پارامترهای ورودی مانند هدایت هیدرولیکی، خروجی آب شیرین، نرخ پمپاژ و ... به روش المان مرزی تعیین نمودند. روش المان مرزی در این مطالعه با یک ابزار بهینه سازی تلفیقی شده و برای دستیابی به جواب قطعی به کار برده شده است.

(2000) Cheng et al. ابزار بهینه سازی الگوریتم ژنتیک را با مدل پیشروی آب شور با فرض اختلاط ناپذیر بودن آب شور و آب شیرین، ترکیب نمودند. در این کار، هدف برداشت حداکثر آب شیرین زیرزمینی، بدون مشاهده شدن آب شور ناشی از پیشروی آب دریا به چاهها می باشد. در برنامه تدوین شده برای بهینه سازی، قیود ذکر شده به صورت یک مؤلفه جریمه به تابع هدف افزوده می شود و مسأله به صورت یک مسأله بهینه سازی بدون قید حل می شود. کارآیی مدل بر روی سه مثال که برای اولین بار تدوین شده اند بررسی شده و نتایج حاصل موفقیت این روش تلفیقی شبیه سازی و بهینه سازی را نشان می دهد.

(2004) Park and Aral یک رویکرد بهینه سازی چند هدفی را جهت تعیین نرخ پمپاژ و محل چاهها در آبخوان ساحلی در نظر داشتند تا از پیشروی آب شور به سمت آبخوان جلوگیری به عمل آید و نیز برداشت مطلوب آب انجام پذیرد. روش ارائه شده، روشی تکراری بوده که الگوریتم تهیه شده، جواب بهینه را با جستجو در محل چاهها و نرخهای پمپاژ، به صورت همزمان به دست می آورد. متغیرهای تصمیم گیری برای مسأله بهینه سازی به صورت متغیرهای مستقل از هم پیوسته، مدل شده اند و فرض سطح تماس اختلاط ناپذیر و حالت دائمی جریان و محیط همگن در مدل پذیرفته شده است. برای بهینه سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. کارآیی این الگوریتم تدوین شده با توجه به مثالهای بررسی شده (2000) Cheng et al. مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است.

(2006) Katsifarakis and Petala طی یک روند محاسباتی، یک مدل تلفیقی بهینه سازی و یک ابزار شبیه سازی جریان را ارائه نمودند که جهت مدیریت بهینه آبخوان ساحلی با هدف حداکثر نمودن برداشت آب از آبخوان با شرط جلوگیری از پیشروی آب شور به کار می رود. کار شبیه سازی روند مذکور، توسط یک برنامه المان مرزی انجام می گیرد و اعتبارسنجی آن به کمک یک راه تحلیلی صورت گرفته و بهینه سازی جواب با یک برنامه الگوریتم ژنتیک انجام می شود.

(2007) Ferreira da silva and Haie یک مدل مدیریتی در مقیاس منطقه ای عرضه آب را برای آبخوانهای ساحلی ارائه نموده اند که تکنیک بهینه سازی به کار رفته در آن، بهترین محل چاهها را با توجه به ملاحظات اقتصادی و تأمین تقاضای آب، مشخص می سازد.

(2007) Bhattachajya et al. با توجه به طبیعت غیرخطی و پیچیدگی بالای جریان و حرکت آب زیرزمینی به خصوص در جریانهای وابسته به چگالی و دشوار و زمان بر بودن مدل سازی عددی آن در پیشروی آب شور به سمت آبخوانهای ساحلی، یک مدل شبکه عصبی مصنوعی را برای مدل سازی پدیده، آموزش دادند. داده های اولیه برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی توسط نرم افزار شبیه ساز عددی FEMWATER فراهم گردید. کارآیی شبکه عصبی مصنوعی آموزش دیده شده به عنوان شبیه ساز روند پیشروی آب شور وابسته به چگالی در آبخوان ساحلی و جریان سه بعدی آب زیرزمینی، با مقایسه های نتایج حاصل شده رضایت بخش بود.

در این مطالعه، روش نوین بهینه سازی جامعه مورچه ها در محیط پیوسته بر اساس کار (2006) Afshar et al. در ترکیب با مدل شبیه سازی عددی توسعه داده شده و نتایج حاصل با مطالعه ها و نتایج برخی کارهای پیشین مقایسه گردیده و مطابقت بین نتایج به دست آمده از مدل، تحلیل شده است.

## ۲- الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها در محیطهای پیوسته

روش نوین بهینه سازی به شیوه جامعه مورچه ها روشی است که جایگاه خود را در مسائل بهینه سازی پیچیده باز نموده است. این روش اولین بار توسط Dorigo در سال ۱۹۹۲ معرفی گردید و در یک سری از امور مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفت و بعد از آن، ویرایشها و انواع مختلفی از آن ارائه گردید (Dorigo, 2007). در سالهای اخیر این روش از اقبال بالایی برای استفاده به عنوان ابزار بهینه سازی در طراحی، مدیریت و برنامه ریزی منابع آب، برخوردار شده است. از جمله کاربردهای صورت گرفته می توان به بهره برداری از مخازن، سیستمهای توزیع آب و آبرسانی و فاضلاب، طراحی چاهکهای مشاهداتی آب زیرزمینی، تخمین مشخصه های هیدرولیکی خاکها و ... اشاره نمود (جلالی، ۱۳۸۴، کتابچی، ۱۳۸۷، Afshar et al., 2006, Abbaspour et al., 2001, Afshar, 2005, 2007, Madadgar and Afshar, 2009 (Zechin, 2007, Amy and Hilton, 2007

براساس مطالعه‌های زیست‌شناختی، در مدت زمانی مشخص، جامعه مورچه‌ها قادر به تعیین کوتاه‌ترین مسیر به سمت منبع غذایی می‌باشند. این امر از طریق نشانه گذاری جامعه مورچه‌ها با ماده‌ای شیمیایی به نام فرومون و به جهت آگاه ساختن سایر مورچه‌ها از اطلاعات کسب شده می‌باشد. با گذشت زمان، کوتاه‌ترین مسیر دارای بیشترین مقدار این ماده شیمیایی خواهد بود. بهینه سازی به روش جامعه مورچه‌ها بر پایه این طبیعت ذکر شده مورچه‌ها می‌باشد و در یک روند تکراری مبتنی بر سعی و خطا این رفتار شبیه سازی می‌شود (Afshar et al., 2006).

روش استفاده شده در الگوریتم بهبود یافته بهینه سازی جامعه مورچه‌ها در محیط پیوسته و با به کارگیری استراتژی Elitist (ECACO) در این مطالعه، بدین صورت است که در هر تکرار، اطلاعات مورچه‌ای که بهترین راه حل را برگزیده است، به عنوان اطلاعات فرومون، مدنظر قرار می‌گیرد. این تابع برای محاسبه اطلاعات فرومون به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (Afshar, 2006):

$$\tau(x) = \frac{1}{2\sigma\sqrt{\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

که در آن  $\mu$ ، بهترین جواب یافته شده در تکرار قبلی و  $\sigma$  انحراف استاندارد مورچه‌ها حول این جواب می‌باشد. در الگوریتم ECACO، به روز رسانی اطلاعات فرومون، فرآیندی است که در طول هر تکرار با استفاده از نتایج جستجوی مورچه‌ها، تابع توزیع احتمالاتی را اصلاح می‌کند. با این اصلاحات، مورچه‌ها به سمت جواب‌های بهتر، هدایت می‌شوند (Dorigo, 2007, Afshar, 2006). جهت ارضاء همزمان شاخص‌های دستیابی سریع به بهترین جواب و کاهش احتمال انحراف به جواب‌های موضعی، تابع وزنی انحراف استاندارد، به صورت رابطه (۲) تعریف شده و استفاده می‌گردد (Afshar, 2006):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \frac{1}{f_i - f_{opt}} [x_i - x_{opt}]^2}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{f_i - f_{opt}}}} \quad (2)$$

که در آن  $m$  تعداد مورچه‌ها،  $x_i$  متغیر تصمیم‌گیری تولید شده توسط مورچه  $i$  (راه حل)،  $f_i$  مقدار تابع هدف که به صورت  $f: S \rightarrow \mathbb{R}$  برای راه حل  $i$  تعریف شده است،  $x_{opt}$

بهترین متغیر تصمیم‌گیری انتخاب شده توسط جامعه در تکرار مدنظر (بهترین جواب یافته شده) و  $f_{opt}$  مقدار متناظر تابع هدف با آن است. در هر تکرار با نزدیک شدن به بهترین جواب، مقادیر کوچکتر  $\sigma$  در بروز رسانی اطلاعات تکرار بعدی استفاده می‌شود. قابل ذکر است، زمانی که تابع احتمالاتی داخل مرزهای محدودی از متغیرهای تصمیم‌گیری نرمال می‌گردد، ارتفاع تابع توزیع احتمال نسبت به تکرار قبلی بیشتر شده و از پهنای آن کاسته شده و باریک‌تر می‌شود. با استفاده از این تکنیک که توضیح داده شد، افزایش مقدار فرومون در اطراف جواب‌های بهینه و تبخیر آن در نواحی دیگر، شبیه سازی می‌شود (Afshar, 2006).

با توجه به پتانسیل مشاهده شده این ابزار بهینه سازی در مسائل مدیریت منابع آب، در این مطالعه سعی بر استفاده از روش بهینه سازی جامعه مورچه‌ها به عنوان برنامه بهینه ساز در روند کار مدیریت بهینه آبخوان‌های ساحلی خواهد بود.

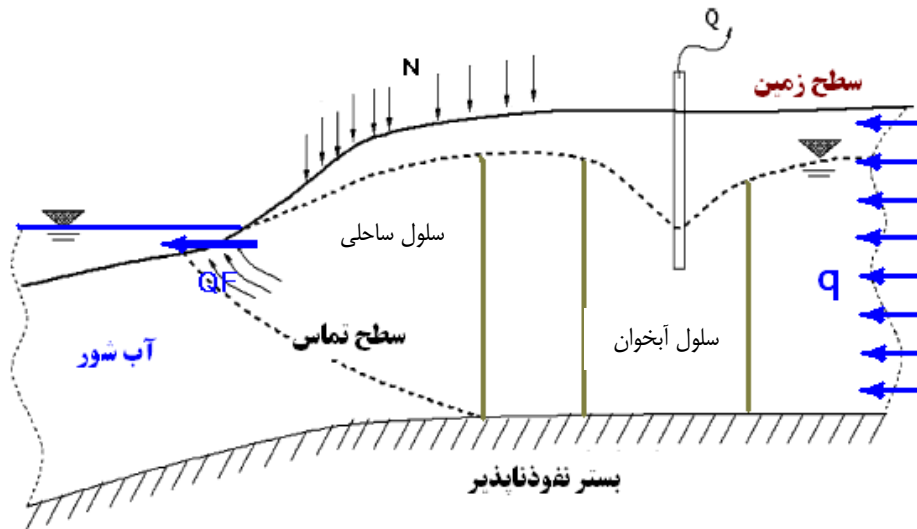
### ۳- معرفی مدل عددی

شکل ۱ نمایی از پیشروی آب شور دریا به سمت آبخوان ساحلی را نشان می‌دهد. در این مدل فرض سطح تماس اختلاط ناپذیر در یک آبخوان ساحلی تک لایه، همگن و همسان، پذیرفته شده است.

سلول‌های آبخوان براساس ویژگی‌های هیدرولوژیکی آبخوان، پروژه‌های آبی موجود مانند چاه‌ها، شبکه‌های هیدرولیکی سطحی و زیرسطحی، کاربری زمین‌ها و ... تقسیم بندی می‌شوند و ساختار برنامه، امکان داشتن ابعاد مختلف و چندضلعی بودن آنها را می‌دهد. فرض می‌شود که در مدل‌سازی، سیستم‌های هیدرولیکی امکانات برداشت آب و یا تغذیه مصنوعی برای تأمین نیازها و یا اعمال سیاست‌های مدیریتی، در سلول‌های آبخوان، قرار دارد و امکان اعمال تغذیه طبیعی بر روی کل منطقه مورد نظر وجود دارد.

معادله پیوستگی جریان آب زیرزمینی در هرکدام از سلول‌های چند ضلعی آبخوان در فضای گسسته سازی شده منطقه موردنظر برای مطالعه را می‌توان به صورت رابطه (۳) برای سلول  $i$  نوشت [Shamir et al., 1984] که این رابطه دارای بعد  $[LT^{-1}]$  می‌باشد:

$$\frac{1}{A_i} \sum_j \left[ \frac{W_{ji} T_{ji}}{L_{ji}} \times (h_{2j} - h_{2i}) \right] + N_i + \frac{R_i + \beta_i (DP_i + DM_i) - PP_i - PM_i}{A_i} = S_i \times \left( \frac{h_{2i} - h_{1i}}{\Delta t} \right) \quad (3)$$



شکل ۱- نمایی از منطقه موردنظر و تقسیم بندی آن

که در آن  $W_i$  برابر عرض سلول  $i$  در راستای خط ساحلی و  $QF_i$  برابر مقدار دبی در واحد عرض آب شیرین تخلیه شده از سلول  $i$  به دریا می‌باشد و از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$QF_i = \frac{2 \times T_i \times (h_{1i} - d)}{L_i} \quad (5)$$

که در آن  $d$  عمق متوسط دریا نسبت به سطح مینا،  $T_i$  و  $L_i$  به ترتیب ضریب انتقال پذیری و طول متوسط پیشروی آب شور (همان طول) سلول ساحلی  $i$  می‌باشد. چون آبخوان مورد نظر در این مطالعه، آبخوان غیرمحصور می‌باشد، ضریب انتقال پذیری را می‌توان از رابطه  $T_i = K_i \times h_i$  محاسبه نمود که در آن  $h_i$  و  $K_i$  برابر هد متوسط آب زیرزمینی و هدایت هیدرولیکی در سلول  $i$  است. رابطه (۵) که مقدار آب تخلیه شده به دریا از سلول  $i$  را تخمین می‌زند، رابطه ای تقریبی است که با رابطه ارائه شده توسط Bear (1979) قابل مقایسه می‌باشد. معادله پیوستگی برای سیستم‌های هیدرولیکی موجود در هر سلول  $i$  نیز برقرار می‌باشد که به صورت رابطه (۶) خواهد بود:

$$PP_i + PM_i - R_i + Q_i^{trmsf} = DP_i + DM_i \quad (6)$$

که در آن  $Q_i^{trmsf}$  مقدار خالص آب انتقال یافته و خارج شده به صورت ورودی به سیستم هیدرولیکی موجود در سلول  $i$  می‌باشد. منظور از انتقال آب، برقراری ارتباط بین سلول‌های خاص و یا خارج از منطقه موردنظر به وسیله لوله و یا ... می‌باشد که در محدوده

که در آن  $A_i$  برابر سطح سلول  $i$ ،  $W_{ji}$  و  $T_{ji}$  به ترتیب برابر طول مرز و ضریب انتقال پذیری بین سلول  $i$  با سلول مجاور  $j$ ،  $L_{ji}$  فاصله بین مراکز دو سلول  $i$  و  $j$ ،  $N_i$  تغذیه طبیعی در سطح سلول  $i$ ،  $R_i$  تغذیه مصنوعی در سطح سلول  $i$ ،  $S_i$  ضریب ذخیره پذیری سلول  $i$ ،  $\Delta t$  طول گام زمانی می‌باشد. همچنین برای سلول  $i$ ،  $DP_i$  مقدار تقاضای بخش خصوصی،  $DM_i$  مقدار تقاضای دولتی،  $PP_i$  پمپاژ بخش خصوصی (مقدار ثابت)،  $PM_i$  پمپاژ بخش دولتی (متغیر تصمیم گیری)،  $\beta_i$  کسری از مقدار آب عرضه شده به مصرف که به صورت آب برگشتی به آب زیرزمینی برمی‌گردد، است.  $h_{1i}$  و  $h_{2i}$  هد آب زیرزمینی در ابتدا و انتهای فاصله زمانی موردنظر، می‌باشد. شرایط مرزی مختلفی می‌توان در این معادله لحاظ کرد. در شرایط مرز نفوذناپذیر، ضریب انتقال پذیری بین سلول مربوطه و مرز، صفر فرض می‌شود. در مرزهایی که جریان یکنواخت آب شیرین به سمت تخلیه به دریا، وارد سلول می‌گردد، مقدار ثابت این جریان برابر  $q$  در واحد عرض سلول در معادله پیوستگی وارد می‌شود، بدین صورت که به طرف اول معادله (۳) عبارت  $\frac{q \times W_i}{A_i}$  اضافه می‌شود. در این عبارت،  $W_i$  برابر عرض سلول  $i$  عمود بر راستای جریان یکنواخت  $q$  می‌باشد.

معادله پیوستگی جریان آب زیرزمینی در هر کدام از سلول‌های ساحلی به صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود:

$$N_i + \frac{2 \times W_i \times T_i \times d}{A_i \times L_i} = \frac{1}{A_i} \sum_j \left[ \frac{W_{ji} \cdot T_{ji}}{L_{ji}} \times (h_i - h_j) \right] + \frac{2 \times W_i \times T_i \times h_i}{A_i \times L_i} \quad (4)$$

برای حل این دستگاه معادلات خطی، از روش‌های تکراری، استفاده می‌شود. مدل بر اساس مثال انتخاب شده (Bear, 1979) مورد تأیید اولیه قرار گرفته و سپس بر روی مثال‌های کاربردی، اعمال شده و نتایج حاصل مقایسه می‌گردد. مدل بهینه سازی برای این مثال ساده را می‌توان به صورت رابطه (۱۱) نوشت، طوری که مقدار کل هزینه‌ها حداقل شود :

$$\text{Minimize } F : \text{Cost} = \sum_{i=6}^{20} C_i \times P_i \quad (11)$$

که در آن  $P_i$  پمپاژ آب و  $C_i$  هزینه کل محاسبه شده برای پمپاژ و انتقال آن از سلول شماره  $i$  به مصرف کننده در سلول معلوم است. برای جلوگیری از برعکس شدن جهت جریان آب شیرین، مقدار مجاز برداشت آب از سلول‌ها تعیین شده است، در راه حل (Bear, 1979) از روش بهینه سازی ریاضی برنامه ریزی خطی (LP) استفاده شده است. ابزار بهینه سازی در کار حاضر، روش بهینه سازی جامعه مورچه‌ها می‌باشد که به تعداد جمعیت مورچه برابر ۱۵۰ و ۲۰۰ تکرار، تنظیم شده است. نتایج گزارش شده براساس ۱۰ اجرای مستقل برنامه، هزینه کل محاسبه شده با ارضاء قیود را برابر  $13.427 \times 10^6 \text{ MU / yr}$  ارائه می‌دهد، در حالی که هزینه گزارش توسط (Bear, 1979)  $14.440 \times 10^6 \text{ MU / yr}$  بود. انطباق نسبی راه حل ارائه شده در این مطالعه نسبت به کار قبلی، مشهود می‌باشد.

مثال‌های کاربردی مدنظر، اقتباس شده از داده‌های مثال‌های کار (Cheng et al., 2000)، Park and Aral (2004) و کتابچی (۱۳۸۷) می‌باشد. سلول بندی انتخاب شده، یکسان و مربعی شکل بوده، دارای ابعاد  $1000 \times 1000$  متر می‌باشد. جهت شبیه سازی شرایط مرزی بی نهایت، در سه سمت خشکی، در گسسته سازی صورت گرفته در این حل و با توجه به محل قرارگیری چاه‌های برداشت آب، ابعاد محدوده مطالعاتی را افزایش داده و ۲۰۰۰ متر در سمت غرب منطقه و ۱۰۰۰ متر در سمت شمالی و شرقی، به محدوده مورد بررسی، اضافه شده است. شکل ۲ شمایی کلی از منطقه مطالعاتی موردنظر در این مثال‌ها را نشان می‌دهد. جدول ۱ نیز خلاصه‌ای از مشخصه‌های سیستم آبخوان ساحلی را بیان می‌کند.

خاصی اجازه جابه‌جایی آب را می‌دهد. با تلفیق این برنامه شبیه ساز با برنامه بهینه سازی و پس از وارد نمودن اطلاعات و مشخصه‌های لازم که به آنها اشاره گردید، می‌توان مدیریت آبخوان‌های ساحلی را با اهداف مختلف انجام داد.

#### ۴- مسأله بهینه سازی

تابع هدف مدل بهینه سازی در بررسی مدل، حداکثر نمودن مقدار پمپاژ از سلول‌های موجود در آبخوان ساحلی می‌باشد، به طوری که از پیشروی آب شور دریا به آب درون آنها ممانعت به عمل آید. پمپاژ از آب زیرزمینی، به عنوان متغیر تصمیم گیری مدنظر بوده و از سلول‌های از پیش انتخاب شده، انجام می‌پذیرد. این سلول‌ها به تعداد  $n$  عدد و در مختصات معلوم مرکز  $(x_i, y_i)$  به ازای  $i = 1, \dots, n$  می‌باشند. مسأله بهینه سازی برداشت آب از آبخوان ساحلی با کنترل پیشروی آب شور، به صورت ریاضی و در حالت کلی، می‌تواند به صورت رابطه (۷) بیان گردد :

$$\text{Maximize } F : Q_{total} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (7)$$

با قیود زیر (رابطه (۸)) که باید ارضاء گردند :

$$\begin{aligned} Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max} & \quad i = 1, \dots, n \\ x_i^{toe} < x_i^S & \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (8)$$

در این رابطه  $Q_i^{\max}$  و  $Q_i^{\min}$  مقدار پمپاژ حداقل و حداکثر مجاز از سلول شماره  $i$  می‌باشد. این حدود برداشت از سلول‌ها، مرتبط با میزان تقاضا برای آب، امکانات و تجهیزات بهره‌برداری و محدودیت‌های مربوطه و سایر ملاحظات عملی و کاربردی می‌باشد (Park and Aral, 2004). قید دوم نیز میزان مجاز برای پیشروی آب شور را نشان می‌دهد.

#### ۴- بررسی نتایج و صحت سنجی مدل

برای کنترل برنامه تدوین شده و صحت سنجی آن با توجه به مثال‌های حل شده در کارهای پیشین، حالت دائمی جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نتیجه معادلات (۳) و (۴) به صورت معادلات (۹) و (۱۰) ساده می‌شوند :

$$N_i + \frac{R_i + \beta_i(DP_i + DM_i) - PP_i - PM_i}{A_i} + \frac{q \times W_i}{A_i} = \frac{1}{A_i} \sum_j \left[ \frac{W_{ji} \cdot T_{ji}}{L_{ji}} \times (h_i - h_j) \right] \quad (9)$$

$$N_i + \frac{2 \times W_i \times T_i \times d}{A_i \times L_i} = \frac{1}{A_i} \sum_j \left[ \frac{W_{ji} \cdot T_{ji}}{L_{ji}} \times (h_i - h_j) \right] + \frac{2 \times W_i \times T_i \times h_i}{A_i \times L_i} \quad (10)$$

در ادامه مثال‌های کاربردی مدنظر بررسی می‌شود. با توجه به این که افزایش تعداد مورچه‌ها، به صورت نمایی زمان اجرای برنامه را می‌افزاید، جهت دستیابی به کیفیت مطلوب جواب‌ها، جمعیت مورچه‌ها پس از بررسی‌های لازم برابر ۱۰۰ مورچه، در نتایج ارائه شده حل مثال‌ها، فرض شده است. کلیه بررسی‌ها براساس تعداد حداکثر ۲۰۰ تکرار در فرآیند محاسبات بوده و نتایج گزارش شده براساس خروجی‌های ۱۰ اجرای مستقل از هم می‌باشد.

### مثال کاربردی (۱) : بهره برداری از هفت چاه پراکنده با پیشروی آب شور ثابت

مقدار پیشروی آب شور براساس اصل در نظر گرفته شده در طراحی این مدل، به طول در راستای عمود بر خط ساحلی (طول سلول‌های ساحلی) محدود می‌شود. طول پیشروی مجاز آب شور در این مثال در کل منطقه ثابت و برابر  $L = 1000\text{ m}$  است. نمایی از منطقه مطالعاتی در شکل ۲ با هفت چاه فعال نمایش داده شده است.

نتایج اجرای مدل برای این مثال نیز در جدول ۳ ارائه شده است. در تنظیم داده‌های ورودی به این مدل، اطلاعاتی که در این مثال به آنها اشاره نشده است، مانند اطلاعات تقاضا، مقادیر تغذیه طبیعی و مصنوعی، متغیرهای تصمیم‌گیری تغذیه در سلول‌ها، انتقال آب در بین مناطق مختلف و محدوده‌های مجاز آن و ... مسکوت گذاشته می‌شود. به جهت جلوگیری از عوض شدن جریان در خط ساحلی و برقرار بودن معادله‌های استفاده شده، برقرار بودن قید  $h_2^i > d$  در آبخوان‌های ساحلی کنترل می‌شود، که در آن  $d$ ، سطح متوسط آب دریا و  $h_2^i$  مقدار نهایی هد آب زیرزمینی محاسبه شده در سلول‌های ساحلی ( $i = 41, \dots, 50$ ) است. نگاهی تحلیلی به نتایج به دست آمده، انطباق نسبی سیاست بهره برداری بهینه به دست آمده را با کارهای پیشین نشان می‌دهد.

### جدول ۳ - جواب بهینه (سیاست بهینه پمپاژ) مسأله مدیریت بهره برداری آبخوان ساحلی در مثال کاربردی (۱)

شماره چاه	شماره سلول	$x_w$ (m)	$y_w$ (m)	مقدار پمپاژ بهینه ( $m^3 / day$ )	
				مدل حاضر	مدل‌های پیشین*
1	13	3500	-3000	1499.40	1303.35
2	15	3500	-1000	977.75	959.98
3	24	2500	-2000	150.00	150.08
4	33	1500	-3000	150.00	150.15
5	36	1500	0	163.10	193.37
6	37	1500	1000	182.32	231.04
7	38	1500	2000	572.53	708.34
مقدار کل پمپاژ				3695.1	3696.31

\* (Cheng et al. (2000), Park and Aral (2004), کتابچی (۱۳۸۷)

حدود مجاز پمپاژ آب از سلول‌های دارای چاه فعال، یعنی  $Q^{\min}$  و  $Q^{\max}$  به ترتیب برابر  $1500\text{ m}^3 / day$  و  $150\text{ m}^3 / day$  فرض می‌گردد.

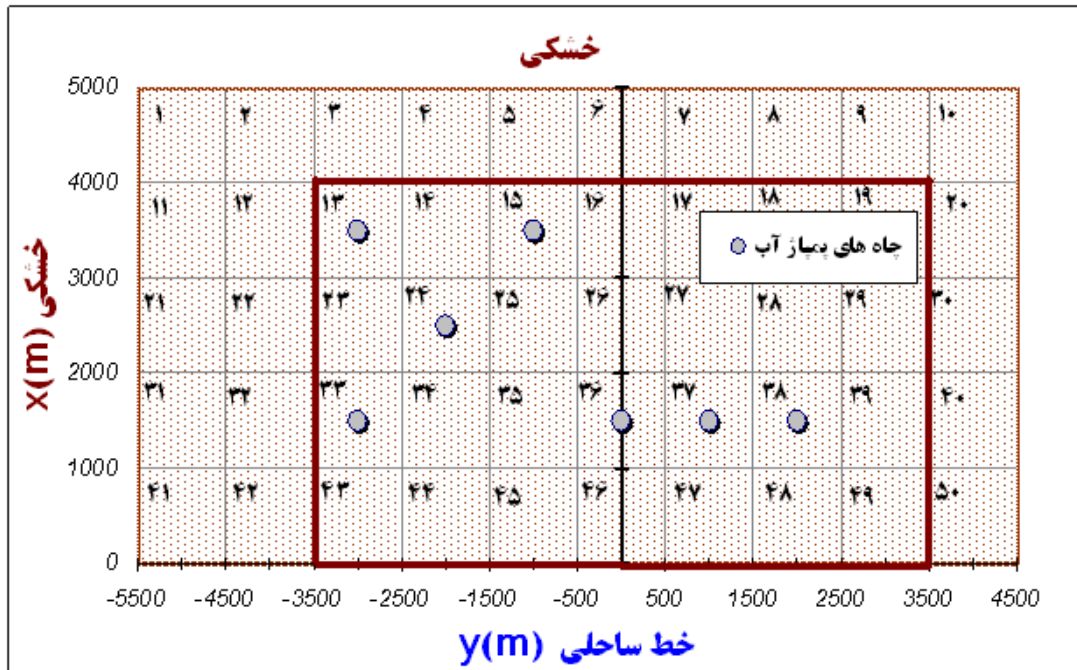
### جدول ۱ - خلاصه‌ای از مشخصه‌های سیستم آبخوان ساحلی Ketabchi, Park and Aral (2004), Cheng et al. (2000) (1387)

مقدار مدنظر	مشخصه آبخوان
نوع آبخوان	غیرمحصور
چگالی آب شور ( $Kg / m^3$ )	1.025
چگالی آب شیرین ( $Kg / m^3$ )	1.000
عمق آب شور دریا (m)	15
هدایت هیدرولیکی ( $m / day$ )	40
نرخ جریان یکنواخت آب شیرین ( $m^3 / day / m$ )	0.4015

جدول ۲ با توجه به مشخصات منطقه و تحت شرایط دائمی، مقادیر هد آب زیرزمینی،  $h_1^i$  را در حالتی که هیچ گونه پمپاژی از آب زیرزمینی منطقه صورت نمی‌گیرد ارائه می‌دهد.

### جدول ۲ - مقادیر محاسبه شده هد آب زیرزمینی در شرایط دائمی بدون پمپاژ

شماره سلول	هد آب زیرزمینی (m)
1, ..., 10	17.75
11, ..., 20	17.18
21, ..., 30	16.58
31, ..., 40	15.97
41, ..., 50	15.33

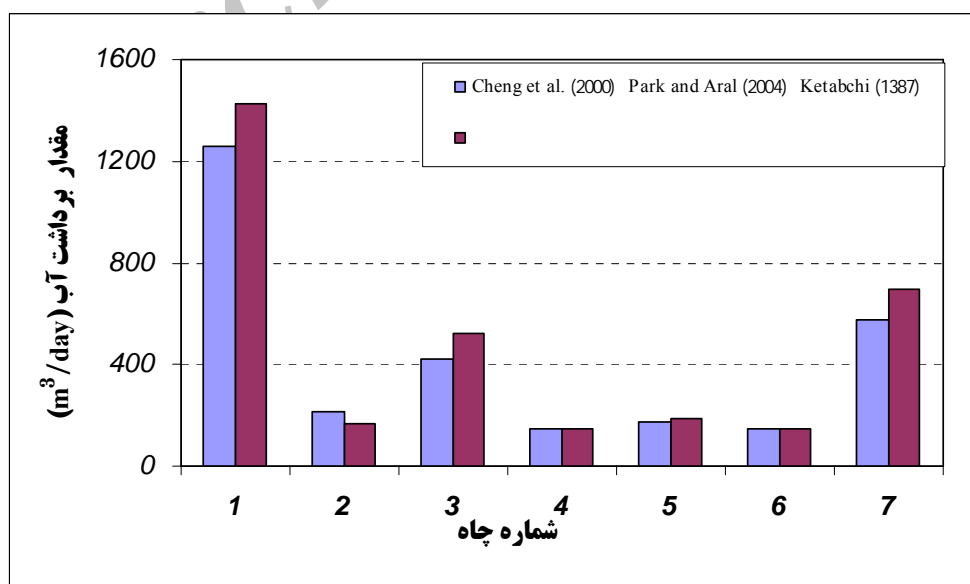


شکل ۲- شمایی کلی از منطقه مطالعاتی موردنظر (مثال کاربردی ۱)

چاه‌ها و تحلیل حساسیت مدل به مختصات نقاط بهره برداری می‌باشد. ابعاد سلول‌ها  $1000 \times 1000$  متر بوده و جریان یکنواخت آب شیرین به سمت خط ساحلی و در راستای عمود بر آن در منطقه وجود دارد. شکل ۳ مقایسه پمپاژ محاسبه شده توسط مدل برای هفت چاه موجود در منطقه را نشان داده است.

مثال کاربردی (۲): بهره برداری از هفت چاه مجتمع با پیشروی آب شور ثابت

این مثال مشابه مثال قبلی می‌باشد، با این تفاوت که مختصات محل قرارگیری چاه‌ها در آن تغییر کرده است. چاه‌های موجود در سلول‌های ۱۳، ۱۵ و ۳۳ غیرفعال و چاه‌های سلول‌های ۲۷، ۲۵ و ۳۴ فعال شده‌اند. هدف از طرح این مثال، بررسی اثر تغییر محل



شکل ۳- مقایسه پمپاژهای محاسبه شده برای چاه‌های مطرح شده در مثال کاربردی (۲)



### مثال کاربردی (۳) بهره برداری از هشت چاه پراکنده با پیشروی آب شور ثابت

با توجه به نتایج به دست آمده از چهار مثال پیشین که بررسی شد، مشاهده می‌شود که با تجمع چاه‌ها در نزدیک هم که در مثال‌های کاربردی (۲) و (۴) اتفاق افتاد، تفاوت جواب‌ها نسبت به حالات معادل این مثال‌ها که در مثال‌های (۱) و (۳) ارائه گردید، بیشتر بود. از جمله دلایل این مسأله، می‌تواند منطقه تأثیرگذاری چاه‌های آب باشد که در مدل تحلیلی به صورت چاه با آنها برخورد می‌شود، در حالی که در مدل حاضر در سلول‌هایی با ابعاد معلوم که مقدار هد آب زیرزمینی در آنها متوسط‌گیری می‌شود، شبیه‌سازی شده است.

مختصات قرارگیری هشت چاه مدنظر و نیز نتایج اجرای مدل برای این مثال در جدول ۴ ارائه شده است. چاه‌ها در سلول‌های ۱۳، ۱۶، ۲۴، ۲۶، ۳۳، ۳۵، ۳۷ و ۳۸ قرار دارند. با توجه به افزوده شدن یک چاه به تعداد چاه‌های برداشت آب در این مثال، مطابقت نتایج به دست آمده از هر دو مدل قابل مشاهده است.

### مثال کاربردی (۵) : بهره‌برداری از هفت چاه با پیشروی آب شور متغیر

این مثال مشابه مثال کاربردی (۱) انتخاب می‌شود. تعداد چاه‌های فعال نیز به مشخصات همان مثال، خواهد بود. مقدار پیشروی آب شور در این مثال، متغیر گرفته شده و براساس نتایج حاصل از مطالعه کتابچی (۱۳۸۷) در رویه‌ای که در مثال‌های مربوط به ارزیابی آن مدنظر قرار گرفته شده بود، به صورت ورودی به مدل حاضر داده می‌شود.

### مثال کاربردی (۴) : بهره‌برداری از هشت چاه مجتمع با پیشروی آب شور ثابت

شرایط حاکم در این مثال، مشابه مثال قبلی است و فقط تعدادی از چاه‌های مدنظر برای بهره برداری تغییر نموده‌اند و تعدادی غیرفعال شده‌اند. چاه‌های ۱۳، ۱۵ و ۳۳ حذف و چاه‌های در سلول‌های ۲۵، ۲۷ و ۳۴ فعال شده‌اند. مقایسه‌ای از نتایج حاصل برای مقدار برداشت آب از چاه‌ها در شکل ۴ به نمایش در آمده است.

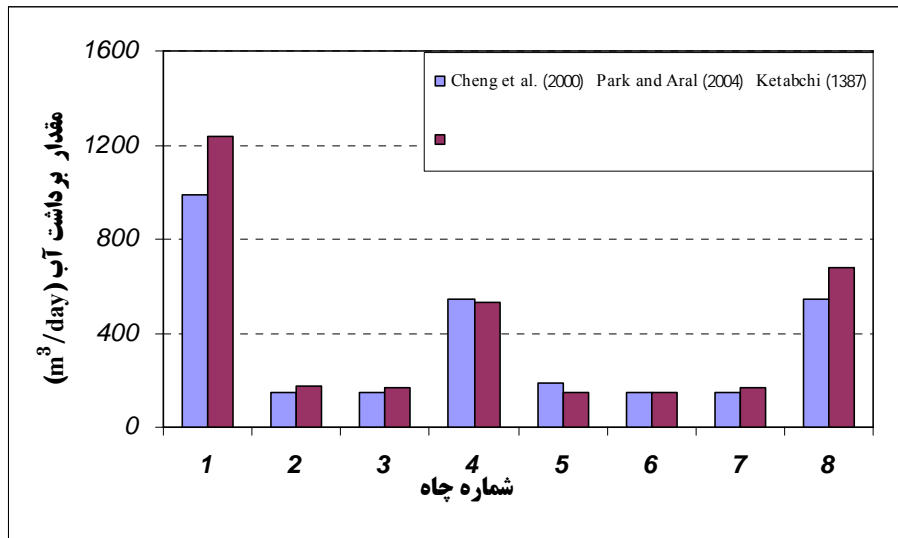
برای آماده‌سازی داده‌های ورودی به مدل، در هر سلول ساحلی، ضمن انتخاب عرض برابر ۱۰۰۰ متر، طول آن مساوی متوسط پیشروی آب شور با توجه به خط پیشروی آب شور فرض می‌شود. شکل ۵ نحوه سلول بندی در نزدیک ساحل را با توجه به توضیح فوق نشان می‌دهد. در اطلاعات ورودی، برای داده‌هایی نظیر طول تماس سلول‌ها و یا فواصل مرکز آنها، متوسط‌گیری به عمل می‌آید.

همان طور که مشاهده می‌شود، موافقت مدل‌ها با همدیگر، از نکات مورد توجه است. همانند مثال‌های قبلی حداکثر تفاوت در مقادیر تعیین شده برای پمپاژ از چاه‌ها با ارضاء محدودیت‌های دیکته شده، به ندرت تا نزدیک ۲۰٪ می‌رسد. ذکر این نکته لازم است که در کارهای پیشین از حل‌های تحلیل برای مدل‌سازی استفاده شده و هیچ گونه سلول بندی انجام نشده است.

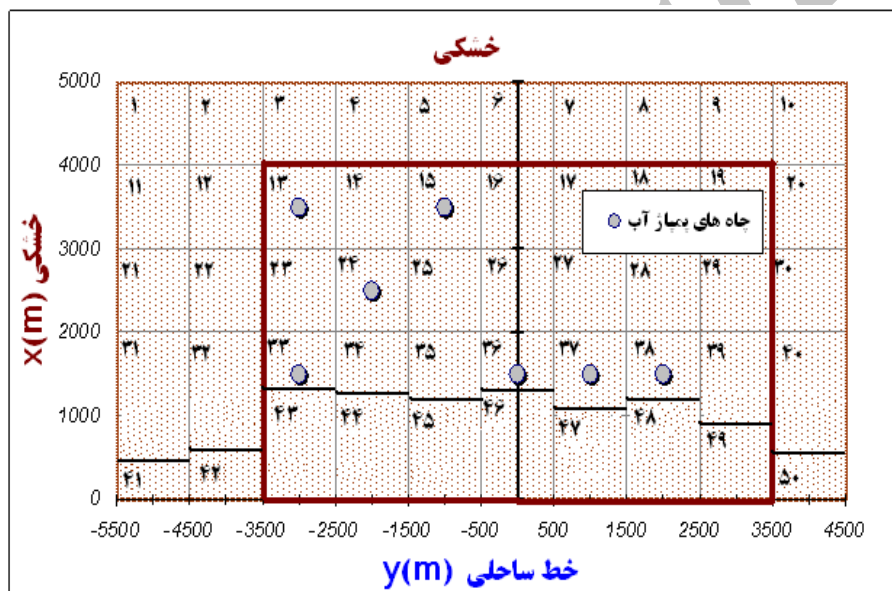
جدول ۴- جواب بهینه (سیاست بهینه پمپاژ) مسأله مدیریت بهره برداری آبخوان ساحلی در مثال کاربردی (۳)

شماره چاه	شماره سلول	$x_w$ (m)	$y_w$ (m)	مقدار پمپاژ بهینه ( $m^3 / day$ )	
				مدل حاضر	مدل های پیشین*
1	13	3500	-3000	1274.34	1500.00
2	16	3500	0	899.57	704.53
3	24	2500	-2000	157.64	150.00
4	26	2500	0	160.33	150.00
5	33	1500	-3000	215.08	236.59
6	35	1500	-1000	150.02	150.00
7	37	1500	1000	191.01	178.00
8	38	1500	2000	633.10	555.21
مقدار کل پمپاژ				3681.08	3624.33

\* (Cheng et al. (2000), Park and Aral (2004), کتابچی (۱۳۸۷))



شکل ۴- مقایسه پمپاژهای محاسبه شده برای چاه‌های مطرح شده در مثال کاربردی (۴)



شکل ۵- شمایی کلی از نحوه سلول بندی نزدیک ساحلی در مثال کاربردی (۵)

آبخوان مجاور و با دریا اعمال شده است. اما مطابقت در جواب‌های به دست آمده مشهود می‌باشد و علیرغم وجود تفاوت‌های اندکی در مقدار آب برداشتی از هرچاه، اختلاف در مجموع کل آب برداشت شده از منطقه، حدود ۷٪ است. با توجه به این مثال می‌توان نتیجه گرفت که از این مدل می‌توان برای کنترل مقادیر متغیر پیشروی آب شور در مناطق مختلف محدوده مطالعاتی استفاده نمود. در کارهای واقعی معمولاً محدودیت‌های عملی نظیر کاربری زمین در مناطق نزدیک ساحلی، وجود چاه‌های برداشت آب برای تأمین نیازها در مناطقی خاص و ...، مقدار مجاز این طول را دیکته می‌نماید.

نتایج اجرای مدل برای این مثال در جدول ۵ ارائه شده و با نتایج پیشین مقایسه شده است. باید به این نکته توجه نمود که هدف بهینه‌سازی در این مثال، در مقدار طول مجاز پیشروی آب شور تغییر نموده و همچنین در هر کدام از سلول‌ها نیز متفاوت انگاشته شده است.

مقدار اختلاف در جواب‌ها در این مثال نسبت به مثال‌های بررسی شده قبلی، بیشتر به نظر می‌رسد. عمده‌ترین دلیل برای این مسأله، به کارگیری تقریبی است که در متوسط گیری طول پیشروی آب شور و نیز اندرکنش سلول‌های ساحلی با همدیگر، با سلول‌های

جدول ۵- جواب بهینه (سیاست بهینه پمپاژ) مسأله مدیریت بهره برداری آبخوان ساحلی در مثال کاربردی (۵)

شماره چاه	شماره سلول	$x_w$ (m)	$y_w$ (m)	مقدار پمپاژ بهینه ( $m^3 / day$ )	
				مدل حاضر	مدل های پیشین*
1	13	3500	-3000	1324.58	1111.99
2	15	3500	-1000	1410.11	1051.82
3	24	2500	-2000	189.55	207.05
4	33	1500	-3000	150.01	150.02
5	36	1500	0	150.78	231.61
6	37	1500	1000	153.92	193.32
7	38	1500	2000	521.28	693.75
مقدار کل پمپاژ				3900.24	3639.56

\* (Cheng et al. (2000), Park and Aral (2004), کتابچی (۱۳۸۷)

جدید"، پایان نامه دکتری آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

کتابچی، ح. ۱۳۸۷. "مدیریت بهینه آبخوانهای ساحلی برای کنترل پیشروی آب شور دریا به روش بهینه سازی جامعه مورچه‌ها"، پایان نامه کارشناسی ارشد آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

Abbaspour, K.C., and Schlin, R. and Van Genuchten M.T. (2001) "Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization", *Advances Water Resources*, 24(8), pp. 827-933.

Afshar M.H., Ketabchi, H. Rasa, E. (2006) "Elitist continuous ant colony optimization algorithm: Application to reservoir operation problems", *International Journal of Civil Engineering*, 4(4), pp. 274-285.

Afshar, M.H. (2005) "A new transition rule for ant colony optimization algorithms: Application to pipe network optimization problems", *Engineering Optimization*, 37(5), pp. 525-40.

Afshar, M.H. (2007) "Partially constrained ant colony optimization algorithm for the solution of constrained optimization problems: Application to storm water network design", *Advances Water Resources*, 30, pp. 954-965.

Amy, Y.L. and Hilton, B.C. (2007) "Short communication optimal groundwater monitoring design using an ant colony optimization paradigm", *Environmental Modeling Software*, 22, pp. 110-116.

Ataie-Ashtiani, B. Volker, R.E. and Lockington, D.A. (2002) "Contaminant transport in the aquifers influenced by tide", *Australian Civil Engineering Transaction*, Inst of Eng, Australia, CE43, pp. 1-11.

Ataie-Ashtiani, B. Volker, R.E. and Lockington, D.A. (1999) "Numerical and experimental study of

### ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مطالعه، مدل تلفیقی شبیه‌سازی عددی با گسسته‌سازی تفاضلات محدود، براساس ایده‌های عملی و ساده و بهینه‌سازی به روش نوین جامعه مورچه‌ها در محیط پیوسته برای مدیریت آبخوان‌های ساحلی در معرض خطر پیشروی آب شور ارائه شد. مدل عددی تدوین شده با به کارگیری مثالی ساده (Bear, 1979) و مثال‌های کاربردی (کتابچی، ۱۳۸۷، Cheng et al., 2000، Park and Aral, 2004) مورد تأیید و صحت سنجی قرار گرفت. کارایی بالا و صرفه جویی زمانی از نکات قابل اشاره برای این مدل می‌باشد. شایان ذکر است که مهم‌ترین مزیت این مدل، تعبیه امکانات مختلفی در آن است که توانایی ورود اطلاعات و داده‌های مختلف فیزیکی و هیدرولوژیکی محدود مطالعه را دارا است و می‌تواند سیاست بهینه بهره برداری عملی‌تر و نزدیک به واقعیت را ارائه دهد. بنابراین در برنامه، امکان بررسی توابع هدف مختلف و چندگانه و نیز فعال و یا غیرفعال نمودن قیود وجود دارد. در محدوده‌های مطالعاتی واقعی، وجود محدودیت‌ها، عوارض، سیستم‌های هیدرولیکی و ... غالباً سبب می‌شود که سلول بندی منظم، مشابه آن چه که در مثال‌ها انجام شد، صورت نگیرد. از قابلیت‌های برنامه تدوین شده، امکان استفاده از سلول بندی نامنظم و چندضلعی می‌باشد که اطلاعات آن وارد برنامه می‌شود و امکان مدل سازی منطقه را فراهم می‌سازد. امکان به کارگیری این مدل در گستره وسیع‌تر قابل پیش بینی است. بنابراین در مطالعه‌های آتی به موارد پیچیده‌تر و بررسی نمونه‌های واقعی‌تر پرداخته می‌شود.

### ۶- مراجع

جلالی، م.ر. ۱۳۸۴. "طراحی و بهره برداری بهینه از سیستم‌های هیدرولیکی با الگوریتم جامعه مورچه‌ها، یک رهیافت فراکاوشی

- Gorelick, S.M. and Voss, C.I. (1984) "Aquifer reclamation design: The use of contaminant transport simulation combined with nonlinear programming", *Water Resources Research*, 20(4), pp. 415-427.
- Hallaji, K.H. and Yazicigil, H. (1996) "Optimal management of a coastal aquifer in southern Turkey", *Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(4), pp. 233-244.
- Katsifarakis, K. L., Petala, Z. (2006) "Combining genetic algorithms and boundary elements to optimize coastal aquifers' management", *Journal of Hydrology*, 327, pp. 200-207.
- Katsifarakis, K.L., Karpouzou, D.K. and Theodossiou, N. (1999) "Combined use of BEM and genetic algorithms in groundwater flow and mass transport problems", *Journal of Engineering Analytical Boundary Element*, 23, pp. 555-565.
- Madadgar, S., Afshar, A.. (2009) "An improved continuous ant algorithm for optimization of water resources problems", *Water Resources Management*, 23, pp. 2119-2139.
- Mantoglou, A., Papantoniou, M. and Giannouloupoulos, P. (2004) "Management of coastal aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms", *Journal of Hydrology*, 297, pp. 209-228.
- Mantoglou, A. (2003) "Pumping management of coastal aquifers with analytical models of saltwater intrusion", *Water Resources Research*, 39(12), (Art. No. 1335 DEC 4).
- Naji, A., Cheng, A.H.D. and Ouazar, D. (1999), "BEM solution of stochastic seawater intrusion problems", *Journal of Engineering Analytical Boundary Element*, 23, pp. 529-537.
- Park, C.H. and Aral, M.M. (1999) "Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers", *Journal of Hydrology*, 290, pp. 80-99.
- Reilly, T.E. and Goodman, A.S. (1985) "Quantitative analysis of saltwater-freshwater relationships in groundwater systems - A historical perspective", *Journal of Hydrology*, (80m) pp. 125-160.
- Shamir, U., Bear, J., Gamliel, A. (1984) "Optimal annual operation of a coastal aquifer", *Water Resources Research*, 20(4), pp. 435-444.
- Zecchin, A.C. Maier, H.R. Simpson, A.R. Leonard, M. and Nixon, J.B. (2007) "Ant colony optimization applied to water distribution system design: Comparative study of five algorithms", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 133(1), pp. 87-92.
- seepage in unconfined aquifers with a periodic boundary condition", *Journal of Hydrology*, 222(1-4), pp. 165-184.
- Ataie-Ashtiani, B. Volker, R.E. and Lockington, D.A. (2001) "Tidal effects on groundwater dynamics in unconfined aquifers", *Hydrological Process*, 15(4), pp. 655-669.
- Ataie-Ashtiani, B. Volker, R.E. and Lockington, D.A. (1999) "Tidal effects on seawater intrusion in unconfined aquifers", *Journal of Hydrology*, 216(1-2), pp. 17-31.
- Ataie-Ashtiani, B. (2007) "MODSHARP: Regional-scale numerical model for quantifying groundwater flux and contaminant discharge into the coastal zone", *Journal of Environmental Modeling Software*, 22, pp. 1307-1315.
- Bear, J. (1979) "Hydraulics of Groundwater", *McGraw-Hill*, New York.
- Bhattacharjya R.K., Datta, B., Satish, M. (2007) "Artificial neural networks approximation of density dependent saltwater intrusion process in coastal aquifers", *Journal of Hydrological Engineering*, 12(3), pp. 273-282.
- Cheng, A.H.D., Halhal, D., Naji, A. and Ouazar, D. (2000) "Pumping optimization in saltwater-intruded coastal aquifers", *Water Resources Research*, 36 (8), pp. 2155-2166.
- Das, A. and Datta, B. (1999) "Development of multi-objective management models for coastal aquifers", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 125(2), pp. 76-87.
- Dorigo, M. and Socha, T. (2007) "An Introduction to Ant Colony Optimization", *IRIDIA Technical Report Series ISSN*, pp. 1781-3794.
- Emch, P.G. and Yeh, W.W.G. (1998) "Management model for conjunctive use of coastal surface water and groundwater", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124, pp. 129-139.
- Ferreira, da Silva, J.F. and Haie, N. (2007) "Optimal locations of groundwater extractions in coastal aquifers", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 21, pp. 1299-1311.
- Finney, B., Samsuhadi, A. and Willis, R. (1992) "Quasi-three-dimensional optimization of Jakarta Basin", *Journal of Water Resources Planning and Management* ASCE, 118(1), pp. 18-31.
- Gordon, E., Shamir, U. and Bensabat, J. (2000) "Optimal management of a regional aquifer under salinization conditions", *Water Resources Research*, 36(11), pp. 3193-3203.