

## Global Sensitivity Analysis of a Coastal Groundwater Simulation Model Using Five Methods (Lahijan-Chaboksar Aquifer)

ESMAEIL KARAMI-MOGHADDAM<sup>1</sup>, HAMED KETABCHI<sup>\*</sup>

1. Water Resources Engineering Dept., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
(Received: Oct. 13, 2019- Revised: Nov. 26, 2019- Accepted: Dec. 14, 2019)

### ABSTRACT

Water supply from groundwater resources because of rapid population growth and coastal zones development, converts the intensity of seawater intrusion to a global concern in these areas. Analyzing the sensitivity of coastal aquifers' behavior to different controlling factors, preventing the seawater intrusion to these resources and the related adverse consequences is an essential effort. This study aimed to analyze the global sensitivity of factors controlling the seawater intrusion and the interaction of Caspian Sea water and the considered coastal aquifer. To assess the seawater intrusion, SUTRA, a three-dimensional density-dependent calibrated and validated numerical model, was employed. For this purpose, five well-known global sensitivity analysis methods have been employed and the sensitivity indices of each methods have been calculated. The permeability of first layer was the most sensitive parameter based on FAST, VBSA, PAWN and RSA methods among five considered methods. The fifth layer's permeability was found to be the most sensitive parameter by applying EE. Overall, the higher the permeability of extended layers nearer to coastline, the larger the seawater intrusion. Therefore, the permeability of such layers effectively contributes to seawater intrusion. These findings can be used to support the management-related decisions and prioritize the measurements conducted on the aquifer in the study area. Such decisions are not based on the local findings and consider all possible changes of layers' permeability, therefore cause to more reliability.

**Keywords:** Aquifer permeability, Seawater intrusion, Coastal aquifer, Sensitivity analysis methods, SUTRA.

## تحلیل حساسیت کلی مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی ساحلی با استفاده از پنج روش (آبخوان لاهیجان - چابکسر)

اسماعیل کرمی‌مقدم<sup>۱</sup>، حامد کتابچی<sup>۱\*</sup>

۱. گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۹/۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۹/۲۳)

### چکیده

تأمین تقاضای آب به دلیل رشد سریع جمعیت و توسعه مناطق ساحلی، تشدید پیشروی آب شور به سمت آب‌های زیرزمینی ساحلی را به یک مسئله جهانی در این مناطق تبدیل کرده است. تحلیل حساسیت رفتار آبخوان‌های ساحلی نسبت به عوامل مختلف مؤثر در کنترل، جلوگیری از پیشروی آب شور به سمت آنها و ممانعت از ضررهای متعاقب آن، اقدامی حیاتی بشمار می‌آید. هدف مطالعه حاضر، تحلیل حساسیت کلی عوامل مؤثر بر پدیده پیشروی آب شور و اندرکنش آب دریای خزر و آبخوان ساحلی منطقه مطالعاتی است. برای ارزیابی میزان پیشروی، مدل عددی واسنجی و صحت‌سنجی سه‌بعدی وابسته به چگالی SUTRA به کار گرفته شد. در این روند از پنج روش شناخته شده تحلیل حساسیت کلی بهره گرفته شده و مقایسه‌های لازم با استفاده از محاسبه شاخص‌های حساسیتی هر یک از روش‌ها انجام گردیده است. از بین پنج روش بکار گرفته شده، روش‌های آزمون حساسیت دامنه فوری، مبتنی بر وارینانس، PAWN و ناحیه‌ای، نفوذپذیری لایه اول را به عنوان عامل حساس‌تر شناسایی کردند. اما در روش اثرات ابتدایی، نفوذپذیری لایه پنجم به عنوان عامل حساس‌تر معرفی شد. به طور کلی هرچه نفوذپذیری لایه‌های با گستردگی زیاد در سمت دریا بیشتر شود، پیشروی آب شور نیز بیشتر می‌شود. بنابراین، پیشروی آب شور حساسیت بیشتری به نفوذپذیری این لایه‌ها دارد. این یافته‌ها در هدایت تصمیمات مدیریتی محدوده و نیز اولویت‌بندی اندازه‌گیری‌های مربوط به آبخوان می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این تصمیمات مبتنی بر یافته‌های موضعی نبوده و کل تغییرات محتمل نفوذپذیری لایه‌ها را مدنظر قرار می‌دهد، در نتیجه اطمینان بیشتری را سبب می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** نفوذپذیری آبخوان، پیشروی آب شور، آبخوان ساحلی، روش‌های تحلیل حساسیت، SUTRA.

### مقدمه

ذخایر ارزشمند آب زیرزمینی به عنوان منبعی راهبردی، نقشی مهم و حیاتی را در تأمین نیازهای آبی مختلف بشر از جمله شرب، صنعت و کشاورزی ایفا می‌نمایند. این ذخایر از اصلی‌ترین منابع تأمین آب در ایران می‌باشند (Saghi-Jadid and Ketabchi, 2019). منابع آب زیرزمینی در نواحی خشک و نیمه‌خشک و نیز در مناطقی خاص مانند مناطق ساحلی، به‌عنوان منبع اصلی ارزان و مهم برای تأمین نیازهای آب شیرین می‌باشند (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015).

آبخوان‌های ساحلی به سبب مدیریت نادرست، سریع‌تر از آبخوان‌هایی که با دریا ارتباط ندارند در معرض مخاطرات طبیعی قرار دارند (Nakhaei and Vadiati, 2014). افزایش نیازهای آبی

و استخراج آب زیرزمینی بیش از حد، باعث به هم خوردن تعادل آب شور و شیرین و آلوده شدن این منابع توسط عوامل مختلف از جمله پیشروی آب شور دریا<sup>۲</sup> شده است (Karatzas and Dokou, 2015). پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی، به دلیل تفاوت در چگالی آب شور و آب شیرین اتفاق می‌افتد. وسعت پیشروی می‌تواند به صورت متغیر از چند متر تا چند کیلومتر ادامه یابد (Mahmoodzadeh et al., 2016). جلوگیری از پیشروی آب شور، بهترین سیاست بهره‌برداری و راه حل استفاده بهینه از آبخوان‌های ساحلی است و تعیین حساسیت‌ها در کنترل این روند موضوعی حیاتی بشمار می‌آید (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2011). روش‌های تحلیل حساسیت به دو دسته موضعی (معمول) و کلی طبقه‌بندی می‌شوند. در تحلیل حساسیت موضعی<sup>۳</sup> هر عاملی به نوبه خود تغییر می‌کند و مقدار آن ثابت نگه داشته

\* نویسنده مسئول: h.ketabchi@modares.ac.ir

1. Coastal Aquifer  
2. Seawater Intrusion  
3. Local Sensitivity Analysis

آب پس از آبیاری، منطقه غیر زراعی، میزان یارانه‌های اروپایی، هزینه‌های اولیه سیستم آبیاری به ترتیب در رتبه‌های بعدی میزان حساسیت قرار دارند. در مطالعه (Khorashadi Zadeh *et al.*, 2017)، به بررسی مقایسه روش‌های تحلیل حساسیت کلی مبتنی بر واریانس<sup>۲</sup> (Sobol) و مستقل از لنگر با استفاده از مدل SWAT پرداخته شد. برای رتبه‌بندی و تجزیه و تحلیل پارامترهای مدل SWAT، ۲۶ پارامتر که بر چرخه هیدرولوژیکی مدل SWAT تاثیر می‌گذارند انتخاب شدند. با توجه به نتایج نشان داده شد که در شرایط همگرایی تفاوتی بین روش‌های مذکور وجود ندارد و هر دو روش قادر به شناسایی مجموعه ای از ۱۴ پارامتر مدل که تاثیر بر خروجی مدل (جریان در خروجی حوضه) ندارند، می‌باشند. در این بررسی با توجه به شاخص‌های حساسیت هر دو روش، مؤثرترین پارامتر، پارامتر شماره منحنی (CN) شناخته شد. با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه تحلیل حساسیت ذکر این نکته ضروری است که مطالعات اندکی در زمینه آب زیرزمینی انجام شده است. با توجه به مطالعات انجام شده در رابطه با آب زیرزمینی، بسیاری از آن‌ها تنها از یک روش تحلیل حساسیت برای بررسی پارامتر حساس استفاده نموده‌اند و مطالعات کمی از دو یا چند روش برای تحلیل بهره برده‌اند. لذا تحلیل حساسیت کلی پارامترها با استفاده از چندین روش و مقایسه روش‌ها با یکدیگر از نکات ضعف موجود در مطالعات قبلی بوده است. بنابراین این مطالعه با هدف استفاده از چندین روش برای تحلیل حساسیت پارامترهای دارای عدم قطعیت بر روی یک مطالعه موردی واقعی در آبخوان ساحلی واقع در استان گیلان صورت پذیرفت تا نتایج کسب شده از اطمینان بیشتری برخوردار باشند.

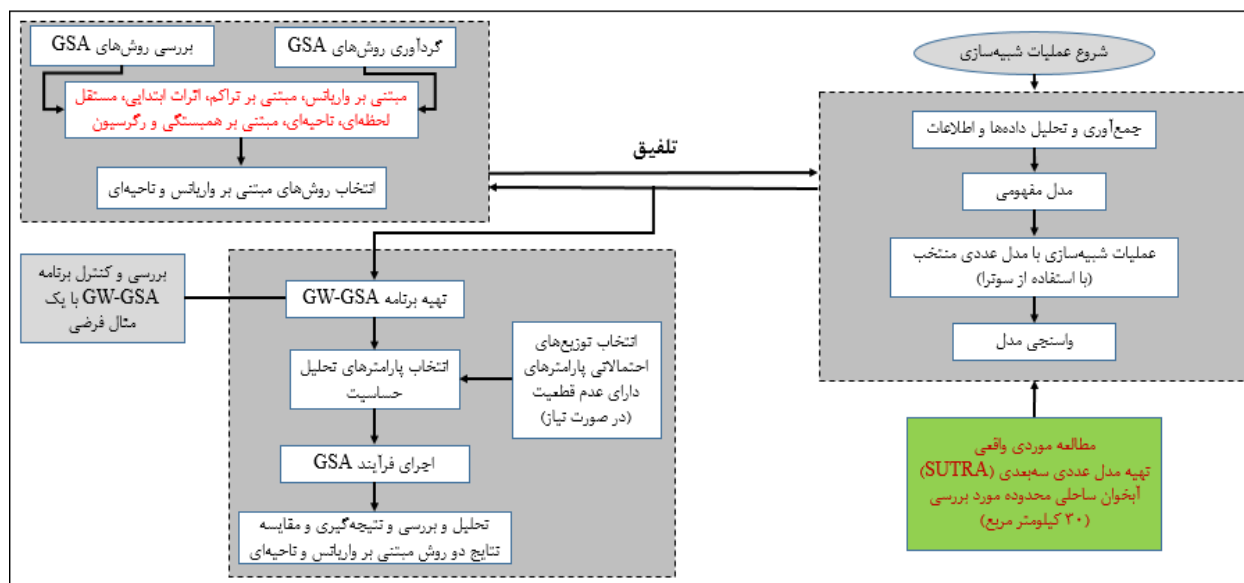
### مواد و روش‌ها

در شکل (۱) مراحل مدل‌سازی نشان داده شده است. عملیات شبیه‌سازی برگرفته و به‌روز شده از مطالعه (Kazemi *et al.*, 2019) می‌باشد. اطلاعات مورد نیاز منطقه، پس از تجزیه و تحلیل، برای مدل‌سازی آبخوان با مدل SUTRA مورد استفاده قرار گرفته و پس از آن برای واسنجی مدل از الگوریتم PEST که یک الگوریتم خودکار واسنجی بر مبنای کاهش گرادیان خطای ایجاد شده در مدل می‌باشد، استفاده شده است. در نهایت پس از صحت‌سنجی پارامترهای تحت واسنجی، به تحلیل حساسیت کلی پارامترهای منتخب دارای عدم قطعیت، پرداخته شد.

می‌شود (Pianosi and Wagener, 2015). در تحلیل حساسیت کلی اثرات تغییرات ورودی خروجی در کل محدوده مجاز فضای ورودی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و اثرات متقابل بین ورودی‌های مختلف بر روی خروجی محاسبه می‌شوند (Saltelli *et al.*, 2008).

مطالعات مختلفی در سالیان اخیر به مدل‌سازی عددی آبخوان‌های ساحلی پرداخته‌اند. در مطالعه (Kazemi *et al.*, 2019) به شبیه‌سازی عددی آبخوان ساحلی لاهیجان-چابکسر با استفاده از مدل SUTRA، پرداخته شد. اثرات کاهش تراز آبخوان در مرز خشکی، کاهش تراز آبخوان در مرز خشکی توأم با افزایش تخلیه خالص از آبخوان، تخلیه پساب دستگاه آب‌شیرین‌کن به آبخوان و دریا از نمونه گزینه‌های مختلف محتمل آینده در منطقه بوده که شبیه‌سازی و ارزیابی شد. در مطالعه (Chun *et al.*, 2018) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر افزایش سطح آب دریا و نرخ جریان آب شیرین و بررسی دو عامل مذکور بر پیشروی آب شور دریا به آبخوان ساحلی با استفاده از مدل SUTRA پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن تأثیر نرخ جریان آب شیرین و افزایش سطح آب دریا، درک بهتری از تأثیر تغییر اقلیم در پیشروی آب دریا ارائه می‌دهد.

مطالعات مختلفی نیز در زمینه به کارگیری روش‌های تحلیل حساسیت موضعی و کلی انجام شده است. در مطالعه (Pianosi and Wagener, 2015) از مدل Hymod برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب و از روش PAWN برای تحلیل حساسیت استفاده شد. در بررسی (Lathashri and Mahesha, 2016)، شبیه‌سازی آبخوان ساحلی با استفاده از مدل عددی MODFLOW انجام گرفت. تحلیل حساسیت موضعی پارامترهای مدل نشان داد که هدایت هیدرولیکی و نرخ تغذیه، حساس‌ترین پارامترها هستند. بر اساس تخمین‌های فصلی، مشخص شد که پیشروی آب شور دریا نسبت به مشخصات آبخوان حساسیت کمتری داشته و بیشتر به نرخ پمپاژ و تغذیه حساس است. در مطالعه (Ganji *et al.*, 2016)، روش تحلیل حساسیت Sobol اصلاح شده برای تصمیم‌گیری در مسائل محیطی معرفی شد. این مطالعه با هدف تعیین بهترین گزینه برای آبیاری با استفاده از ۱۰ معیار و ۷ گزینه صورت گرفت. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت کلی، رتبه‌بندی نسبت به وزن معیارها حساس‌تر از معیار عملکرد است. معیار وزنی بهره‌وری مصرف آب بیشترین حساسیت را دارا است و بعد از آن معیار وزنی استخدام کارگر روستایی قرار دارد. معیارهای وزنی سودآوری محصولات کشاورزی، حجم آب، کیفیت



GSA: Global sensitivity analysis  
GW: Groundwater

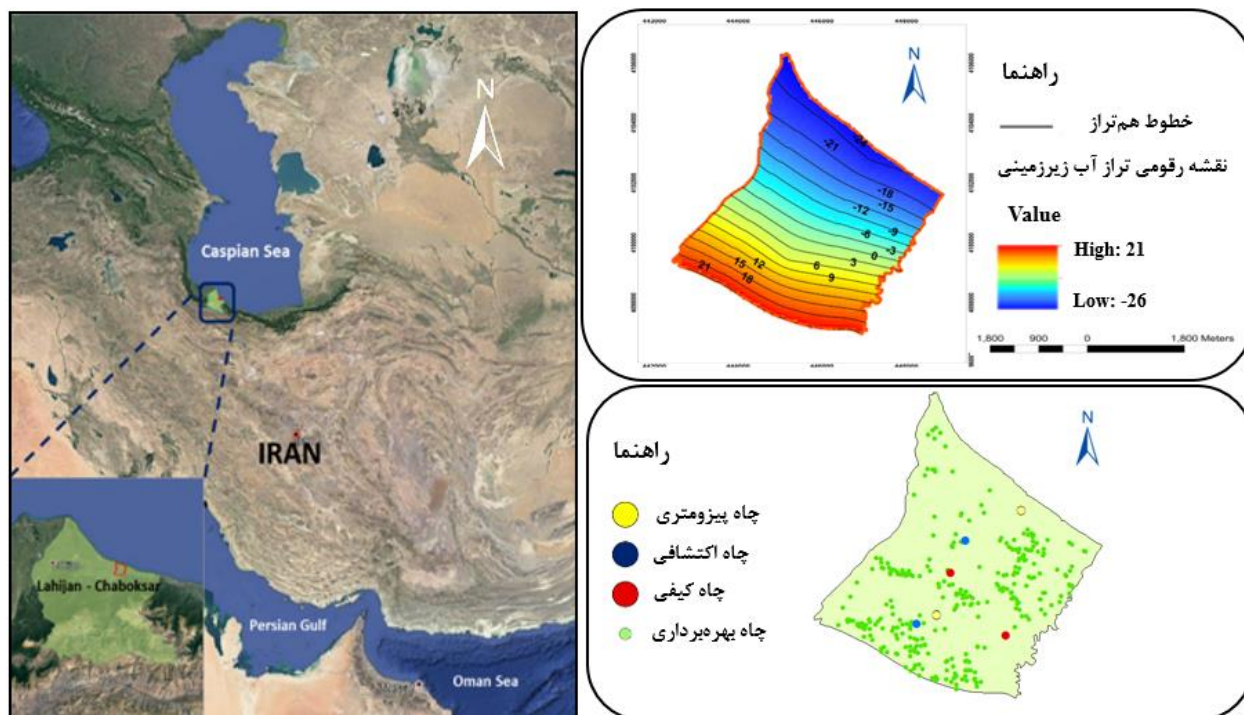
شکل ۱. روند مدل‌سازی آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی

### محدوده مطالعاتی

محدوده مطالعاتی در نظر گرفته شده در این مطالعه، بخشی از حوضه آبریز لاهیجان-چابکسر (شرق استان گیلان) به مساحت ۳۰ کیلومترمربع است که بین طول‌های شرقی ۵۰ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۶ دقیقه و بین عرض‌های شمالی ۳۷ درجه و ۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۶ دقیقه قرار گرفته است. در شکل (۲) موقعیت قرارگیری محدوده مطالعاتی، چاه‌های موجود در منطقه و خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی به صورت میانگین (۱۳۸۲-۱۳۹۳) نشان داده شده است. مرزهای محدوده در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی از سمت شمال به دریای خزر، از شرق و غرب به ترتیب به رودخانه‌های خشکه‌رود و پلرود و از جنوب، به خط هم‌تراز متوسط سطح آب زیرزمینی ۲۱ متری محدود گردید. اراضی زراعی و شالیزار ۶۰ درصد (مساحتی در حدود ۱۸ کیلومترمربع) و بافت شهری و روستایی ۴۰ درصد باقیمانده از اراضی موجود این محدوده را تشکیل می‌دهد. جنوب دشت مطالعاتی با ارتفاع ۲۸ متر و ساحل دریای خزر با ارتفاع ۲۶-متری بالاترین و پایین‌ترین نقطه ارتفاعی را دارا می‌باشند. سطح آب زیرزمینی در این ناحیه دارای نوسانات فصلی می‌باشد. با توجه به افت سطح آب زیرزمینی در فصول بهره‌برداری و جبران آن در فصول پاییز و زمستان و کم بودن افت سطح آب زیرزمینی، می‌توان آبخوان آبرفتی موجود در این دشت را در حالت تعادل فرض نمود. بررسی نقشه هم‌قابلیت انتقال آبخوان نشان می‌دهد قابلیت انتقال رسوبات آبرفتی در اراضی جنوب شرقی ۱۰۰، در نواحی مرکزی و به سمت غرب و جنوب غرب مقدار آن تا ۱۰۰۰ مترمربع

بر روز افزایش می‌یابد و مجدداً به سمت دریا به واسطه کاهش ضخامت لایه آب شیرین رقوم منحنی‌های هم‌قابلیت انتقال رسوبات آبرفتی کاهش می‌یابد. با توجه به اطلاعات چاه‌های اکتشافی موجود، نواحی غربی و جنوبی، به ترتیب بیشترین (۰/۶۷ درصد) و کمترین (۰/۰۳ درصد) مقدار ضریب ذخیره را دارا می‌باشند. این ضریب در نواحی مرکزی و شرقی نیز به طور متوسط برابر ۰/۲ درصد می‌باشد. بیشترین عمق آب زیرزمینی مربوط به نواحی جنوب غربی با عمق ۵/۵ تا ۶ متر است. با توجه به شیب توپوگرافی سطح زمین از جنوب به شمال، جهت جریان آب زیرزمینی در این محدوده مشخص و خروجی سفره مستقیماً وارد دریا می‌شود (Iran Water Resources Management Company, 2016; Kazemi et al., 2019).

روند منحنی‌های تراز آب زیرزمینی جنوبی - شمالی بوده و رقوم آن‌ها در راستای جریان آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. مقدار آن در جنوب منطقه ۲۱ متر و در نواحی ساحلی ۲۶-متر است. برای تعیین مرزهای محدوده و همچنین درون‌یابی جهت ترسیم خطوط هم‌مقدار تراز، عمق و غیره علاوه بر دو چاه پی‌زومتری در منطقه (شکل ۲) از اطلاعات مربوط به چاه‌های خارج از منطقه (حدوداً ۴۰ چاه) نیز استفاده شده است. با استفاده از لوگ حفاری چاه‌های اکتشافی موجود در منطقه و اطراف آن و بررسی ضخامت خاک‌ها، لایه‌بندی طبقات آبخوان بدست آمده است. زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی از ۷ لایه اصلی از ترکیب چهار نوع رس، سیلت، ماسه و شن تشکیل شده است.



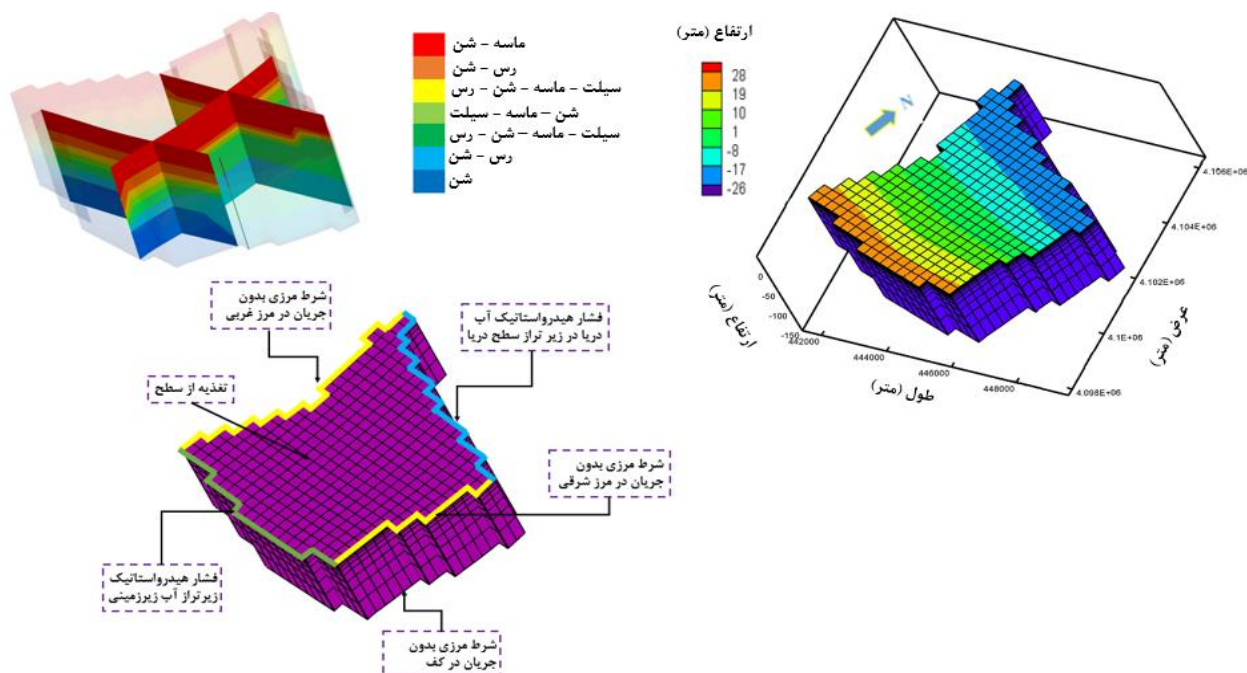
شکل ۲. محدوده مطالعاتی، چاه‌های موجود و نقشه متوسط (دوره ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۳) تراز آب زیرزمینی

می‌یابد (تنظیم شده توسط کاربر در ورودی برنامه). همچنین برای شرایط غیردائمی، گام‌های زمانی ۳۰ روزه در نظر گرفته شده است. گسسته‌سازی زمانی هم براساس شاخص‌های پایداری مربوط به سرعت جریان و گسسته‌سازی مکانی، تصمیم‌گیری شده تا عدد کورانت کوچک‌تر از  $0.75$  (Voss and Souza 1987) باقی بماند و ملاحظات مربوط به زمان محاسبات و دقت لازم هم برآورد شود.

شکل (۳) نمای سه‌بعدی از لایه‌بندی، مرزهای محدوده و سیستم آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد. برای دامنه مدل‌سازی موردنظر، مرز فشار هیدرواستاتیک به تمامی گرهِ‌های محاسباتی پایین‌تر از تراز آب دریا و در تماس با این آب و همچنین بخش‌هایی از مرز خشکی بر اساس تراز آب زیرزمینی مشاهده شده، وارد می‌شود. جریان ورودی از این گرهِ‌ها به داخل آبخوان، در بخش ساحلی دارای غلظت شوری آب دریای خزر معادل  $0.13$  کیلوگرم بر کیلوگرم (معادل حدود  $13000$  میلی-گرم بر لیتر) و در مرز خشکی دارای غلظت شوری ورودی از بالادست و ارتفاعات محدوده می‌باشد که از روی خطوط هم‌غلظت شوری سالانه تنظیم شد. شرایط مرزی سطح زمین در مرز فوقانی به عنوان مرز تغذیه/تخلیه آبخوان است. در مرز تحتانی کف و در مرزهای شرقی (رودخانه خشکه‌رود) و غربی (رودخانه پلرود) با توجه به تحلیل بردارهای جریان و نقشه خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی شرط مرزی بدون جریان مدنظر قرار می‌گیرد و این مرزها نفوذناپذیر فرض شده‌اند.

### مدل عددی

به منظور پیش‌بینی وضعیت آب شور و شیرین در آبخوان ساحلی و پیشروی آب شور از ابزار مدل‌سازی عددی استفاده می‌شود. در این راستا برای شبیه‌سازی عددی، مدل شبیه‌سازی انتقال املاح و انرژی حرارتی و جریان وابسته به چگالی، شرایط اشباع/غیراشباع و سه‌بعدی SUTRA (Voss and Provost, 2010)، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در گسسته‌سازی مدل سه‌بعدی بعدی محدوده، برگرفته از مطالعه Kazemi et al. (2019)، دامنه مدل‌سازی از  $3564$  جزء و  $4476$  گرهِ محاسباتی با ابعاد مساوی  $300$  متر در صفحه افقی و ابعاد متغیر به دلیل وقوع تغییرات شدیدتر در نزدیکی سطح زمین،  $0.5$  تا  $35/4$  متر در جهت قائم تشکیل شده است. نحوه گسسته‌سازی مکانی و همگرایی مش-بندی مسئله با توجه به عدد پکلت کنترل شده است، به طوری که عدد پکلت (برابر با نسبت طول سلول در راستای جریان به ضریب پراکندگی طولی) کمتر از  $4$  شود (Voss and Provost, 2010). در این مطالعه با در نظر گرفتن طول سلول  $300$  متر و ضریب پراکندگی طولی  $80$  متر، عدد پکلت کمتر از  $4$  بدست آمد و آزمون استقلال نتایج از ابعاد مش‌بندی نیز انجام پذیرفت. گسسته‌سازی زمانی برای شبیه‌سازی‌های عددی برای شرایط دائمی به این صورت است که گام زمانی از  $60$  ثانیه شروع شده و پس از هر  $10$  گام زمانی با ضریب  $1/2$  افزایش می‌یابد که بیشترین گام زمانی  $10^7$  ثانیه می‌باشد. پس از رسیدن گام زمانی به بیشترین مقدار خود، با همین گام ثابت، مراحل شبیه‌سازی ادامه

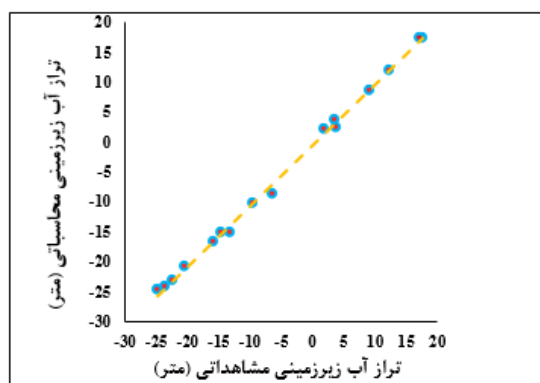


شکل ۳. نمای سه بعدی لایه بندی خاک منطقه، مرزهای محدوده و سیستم آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی

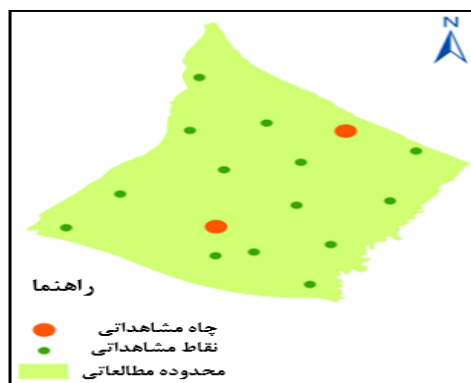
#### واسنجی و صحت سنجی مدل عددی

در شبیه سازی به صورت دائمی، مدل بر اساس اطلاعات متوسط سالانه پارامترهای تغذیه و تخلیه و متوسط تراز آب زیرزمینی در طول دوره ۱۱ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۳)، اجرا می شود. در مرحله اجرای مدل، اطلاعات تخلیه و تغذیه در مدل لحاظ می شوند که برای این منظور میزان تغذیه ناشی از بارش، تخلیه ناشی از چاه های بهره برداری و آب برگشتی اعمالی در نظر گرفته می شوند. برای تسهیل در روند واسنجی مدل، از الگوریتم PEST استفاده شده است. بر اساس فرآیند واسنجی، مشخصه های واسنجی به مقدار نفوذپذیری لایه های مختلف آبخوان و تخلیه خالص منطقه (مجموع تغذیه ناشی از بارش، آب برگشتی از چاه ها و تخلیه از چاه ها) محدود است. جهت کنترل و مقایسه نتایج محاسباتی و مشاهدات، علاوه بر دو چاه موجود، ۱۴ نقطه کنترلی بعنوان نقاط مشاهداتی در منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد. این ۱۶ نقطه

در شکل (۴-الف) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۴-ب) مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)  $0.78$  متر بدست آمد. همچنین اختلاف مقدار اندازه گیری شده و مشاهدات در دو چاه مشاهداتی (شکل ۲) به طور متوسط  $0.5$  متر برآورد شده است. با توجه به خروجی مدل دائمی آبخوان ساحلی مورد مطالعه که در جدول (۱) نشان داده شده است، مشاهده می شود که میزان ورودی و خروجی دشت برابر بوده و بیلان در حالت تعادل قرار دارد. برای شبیه سازی غیردائمی اطلاعات مربوط به تغذیه و تخلیه از آبخوان به صورت ماهانه برای هر ماه در دوره مورد نظر وارد مدل شد. مدل مورد نظر در طول دوره ۸ ساله (از سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ تا سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۰) به صورت ماهانه اجرا شده و به صورت کمی و کیفی، مورد واسنجی قرار گرفت و در طول دوره ۳ ساله (از سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۰ تا سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۲) صحت سنجی شد (Kazemi et al., 2019).



(ب)



(الف)

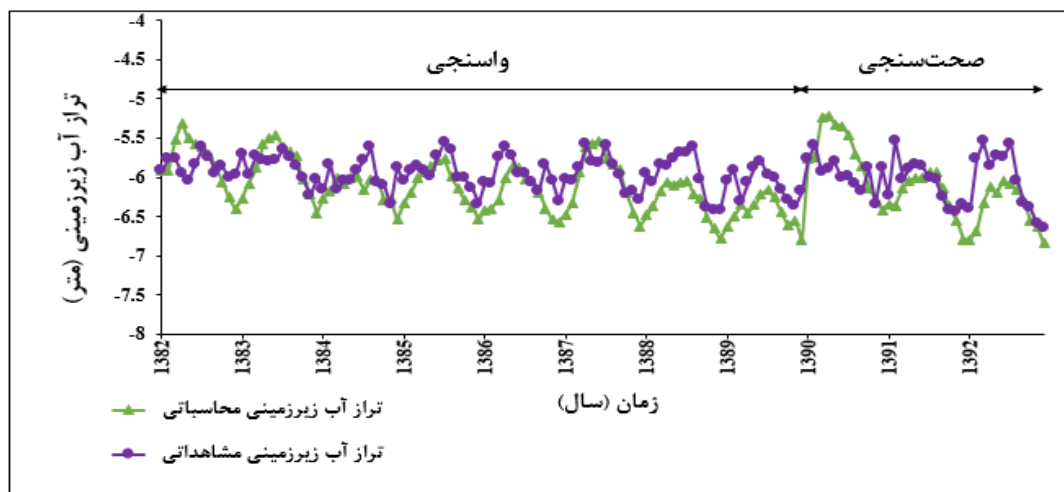
شکل ۴. (الف). چاه های مشاهداتی در منطقه و (ب). نمودار پراکنندگی سطح آب زیرزمینی مشاهده ای و محاسباتی

جدول ۱. بیلان آب زیرزمینی شبیه سازی توسط مدل در حالت دائمی

| تعادل سالانه آب زیرزمینی       |      |  |      |
|--------------------------------|------|--|------|
| حجم آب ورودی (میلیون متر مکعب) |      | حجم آب خروجی (میلیون متر مکعب)               |      |
| تغذیه ناشی از بارندگی          | ۴/۲۶ | مرز دریا                                     | ۶/۰۷ |
| مرز دریا                       | ۰/۹۳ | خروج از جریان آب زیرزمینی                    | ۰    |
| ورود به آب زیرزمینی            | ۸/۶۸ | برداشت چاه‌ها پس از کسر سهم برگشتی به آبخوان | ۷/۷۹ |

مشاهده شده مربوط به ماه آبان سال ۱۳۹۲ برابر ۰/۷۸ متر است که مقدار محاسبه شده کمتر از مقدار مشاهداتی است. واسنجی مدل کیفی آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی، با تنظیم مقادیر غلظت دارای عدم قطعیت در مرزهای خشکی، مقادیر غلظت آب تخلیه شده توسط چاه‌های بهره‌بردار و ورودی توسط آب برگشتی و آب بارش با استفاده از الگوریتم PEST، صورت گرفت. مقدار جذر میانگین مربعات خطا برابر با ۵۹ میلی گرم بر لیتر و حداکثر خطا ۲۵۲ میلی گرم بر لیتر برآورد گردید (Kazemi et al., 2019). در جدول (۲) مقادیر واسنجی شده نفوذپذیری در جهت افقی و قائم نشان داده شده است. مقادیر تخلیه خالص نواحی واسنجی شده در شکل (۶) نشان داده شده است.

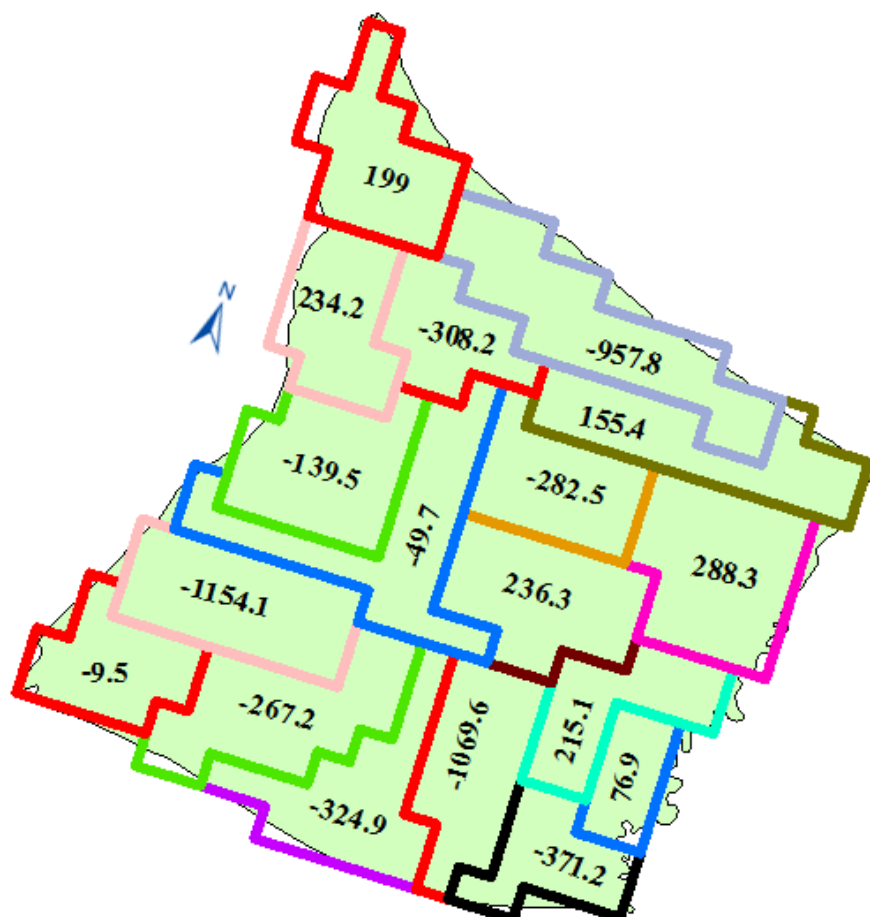
بر اساس هیدروگراف واسنجی در شکل (۵)، تطابق مطلوبی بین سطح آب زیرزمینی محاسباتی و مشاهداتی بدست آمد. به طور میانگین خطای میان مقادیر سطح آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی برابر ۰/۱۸ متر می‌باشد. همچنین حداکثر خطای مشاهده شده مربوط به دی ماه سال ۱۳۸۲ برابر ۰/۵ متر است. برای صحت‌سنجی غیردائمی، مطابق با دوره واسنجی، مقدار تخلیه خالص واسنجی شده بر حسب بارش، میزان تخلیه و آب برگشتی به آبخوان در دوره موردنظر در نظر گرفته شد و دیگر پارامترهای ورودی به مدل، مشابه دوره واسنجی دائمی فرض شدند. مطابق با شکل (۵) هیدروگراف شبیه‌سازی شده، تطابق مطلوبی با هیدروگراف اندازه‌گیری شده متناظر آن داشته است. به طور میانگین خطای میان مقادیر سطح آب زیرزمینی مشاهده‌اتی و محاسباتی برابر ۰/۲۹ متر می‌باشد. همچنین حداکثر خطای



شکل ۵. هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان لاهیجان-چابکسر در شرایط واسنجی و صحت‌سنجی

جدول ۲. مقادیر واسنجی شده نفوذپذیری لایه‌های مختلف آبخوان

| شماره لایه خاک | جنس لایه‌های خاک      | نفوذپذیری واسنجی شده (متر مربع) | Kv                     | Kh                     |
|----------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| 1              | ماسه - شن             | $1/25 \times 10^{-11}$          | $1/25 \times 10^{-11}$ | $1/25 \times 10^{-12}$ |
| 2              | رس - شن               | $4/09 \times 10^{-13}$          | $4/09 \times 10^{-13}$ | $4/09 \times 10^{-14}$ |
| 3              | سیلت - ماسه - شن - رس | $1/97 \times 10^{-12}$          | $1/97 \times 10^{-12}$ | $1/97 \times 10^{-13}$ |
| 4              | شن - ماسه - سیلت      | $1/74 \times 10^{-11}$          | $1/74 \times 10^{-11}$ | $1/74 \times 10^{-12}$ |
| 5              | سیلت - ماسه - شن - رس | $9/00 \times 10^{-13}$          | $9/00 \times 10^{-13}$ | $9/00 \times 10^{-14}$ |
| 6              | رس - شن               | $8/26 \times 10^{-13}$          | $8/26 \times 10^{-13}$ | $8/26 \times 10^{-14}$ |
| 7              | شن                    | $2/31 \times 10^{-11}$          | $2/31 \times 10^{-11}$ | $2/31 \times 10^{-12}$ |



شکل ۶. مقادیر تخلیه خالص واسنچی شده هر ناحیه بر حسب هزارمکعب در سال

متوسط مشتقات روی فضای عوامل است. یک مدل با  $k$  عامل ورودی مستقل  $X_i$  و  $i=1,2,\dots,k$  که در  $k$  جهت و  $p$  سطح تغییر می‌کنند در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، فضای ورودی در سطح  $p$  و شبکه  $\Omega$  شرح داده شده است. برای یک مقدار مشخص از  $X$  اثر ابتدایی عامل ورودی  $i$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

(رابطه ۱)

$$EE_i = \frac{Y(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_i + \Delta, \dots, X_k) - Y(X_1, X_2, \dots, X_k)}{\Delta}$$

$P$  تعداد سطوح می‌باشد و  $\Delta$  مقداری است که در  $\{-\frac{1}{p-1}, \dots, 1 - \frac{1}{p-1}\}$  می‌باشد و  $X = (X_1, X_2, \dots, X_k)$  می‌باشد. سپس با توجه به مقادیر به دست آمده برای اثرات ابتدایی ( $EE$ )، میانگین ( $\mu_i$ ) و واریانس ( $\sigma_i^2$ ) اثرات ابتدایی هر یک از پارامترها با توجه به معادلات (۲) و (۳) محاسبه می‌شود (Saltelli *et al.*, 2008).

$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r EE_i^j \quad (\text{رابطه ۲})$$

### روش‌های تحلیل حساسیت کلی

در این تحقیق، از روش‌های اثرات ابتدایی، آزمون حساسیت دامنه فوریه، مبتنی بر واریانس، PAWN و ناحیه‌ای برای تحلیل حساسیت پارامترهای منطقه مورد نظر (نفوذپذیری لایه‌های مختلف) استفاده شد. برای به کارگیری روش‌های تحلیل حساسیت در محیط MATLAB از بسته نرم‌افزاری Safetoolbox که توسط Pianosi *et al.* (2015) برای مثال مدل بارش - رواناب ارائه شده استفاده و کد آن برای مدل آب زیرزمینی مورد نظر به‌روز شد. برای این کار، مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی SUTRA جایگزین مدل بارش - رواناب شد و بعد از اجرای مدل، خروجی مدل (غلظت) به دست آمد. با توجه به روابط موجود برای هر یک از روش‌ها، شاخص حساسیت برای هر یک از پارامترهای دارای عدم قطعیت محاسبه گردید و تحلیل حساسیت پارامترها صورت گرفت که مستلزم تعداد زیادی اجرای مدل عددی نامبرده است.

### روش اثرات ابتدایی (EE)

روش اثرات ابتدایی روش بسیار ساده‌ای است که در حقیقت



متغیر نام ( $X_i$ ) ثابت باشند و تنها متغیر  $X_i$  مقادیر مختلفی روی دامنه تغییراتش اختیار نموده و خروجی الگو برای هر تنظیم محاسبه شود. اگر متغیر موردنظر یک عامل تاثیرگذار باشد، باید خروجی الگو با نوسانات شدیدی همراه باشد. این اندازه حساسیت از دیدگاه ریاضی به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$V_i = V_{X_i} (E_{X \sim i} (Y | X_i)) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که  $X \sim i$  نشان دهنده تمام عوامل به جز  $X_i$  است. عملگر  $E$  امید ریاضی  $Y$  را وقتی که فقط عامل  $X_i$  ثابت باشد اندازه‌گیری می‌کند. واریانس این مقادیر توسط عملگر  $V$  به ازای تمام مقادیر ممکن  $X_i$  محاسبه می‌شود. میزان حساسیت خروجی الگو نسبت به پارامتر ورودی نام با تقسیم این کمیت بر واریانس  $Y$  مطابق رابطه (۱۳) تعیین می‌شود.

$$S_i = \frac{V(E(Y | X_i))}{V(Y)} \quad 0 \leq S_i \leq 1$$

هر چه میزان اهمیت متغیر  $X_i$  بیشتر باشد، مقدار  $S_i$  به یک نزدیک‌تر خواهد بود و بالعکس اگر متغیر مورد بررسی بی‌اهمیت یا کم اهمیت باشد آنگاه  $S_i$  به صفر میل خواهد کرد. این شاخص، یک کمیت بدون مقیاس است که آن را شاخص حساسیت مرتبه اول یا اثر اصلی  $X_i$  می‌نامند.

#### شاخص حساسیت کل (Total effect)

ایده اصلی این شاخص مانند شاخص حساسیت مرتبه اول است. تمامی متغیرهای ورودی در این حالت به جز  $X_i$ ، یعنی  $X \sim i$  را بر روی دامنه تغییرات تغییر می‌کنند و خروجی الگو محاسبه می‌شود. تمامی اثراتی که متغیر نام در آن دخالت دارد با اندازه‌گیری نوسانات خروجی الگو می‌تواند محاسبه شود. این شاخص را شاخص حساسیت کل می‌نامند و آن را با نماد  $ST$  نشان می‌دهند. شاخص حساسیت کل مطابق رابطه (۱۴) معرفی می‌شود.

$$S_{Ti} = 1 - \frac{V(E(Y | X_{\sim i}))}{V(Y)} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

می‌توان اثرات بین متغیر  $X_i$  و سایر متغیرهای ورودی را با استفاده از اثر کل و اثر اصلی اندازه‌گیری کرد. محاسبه تفاضل  $S_{Ti} - S_i$  برای این منظور کافی است (Saltelli et al., 2008).

#### روش PAWN

در این روش که رویکردی جدید از روش‌های مستقل از لنگر است، حساسیت نسبت به متغیر  $X_i$  با اندازه‌گیری فاصله منحنی توزیع احتمال خروجی در حالت تغییر تمامی ورودی‌ها (بدون شرط) و حالت ثابت (مشروط) در نظر گرفتن متغیر  $X_i$  محاسبه می‌کنند. برای محاسبه فاصله بین حالت بدون شرط و مشروط از آمار کولموگروف - اسمیرنوف طبق معادله (۱۵) استفاده می‌شود. تابع

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (EE_i^j - \mu)^2 \quad (\text{رابطه ۳})$$

#### روش آزمون حساسیت دامنه فوریه (FAST)

در این روش با توجه به ضرایب فوریه، واریانس خروجی و واریانس مربوط به هر پارامتر و به تبع آن شاخص حساسیت هر پارامتر با توجه به معادلات زیر محاسبه می‌شود:

(رابطه ۴)

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(s) = A_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} \{A_k \cos(ks) + B_k \sin(ks)\}$$

که بعد از گسسته‌سازی ضرایب  $A_k$  و  $B_k$  را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$A_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(s_j) \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$A_k = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N f(s_j) \cos(s_j k) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$B_k = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N f(s_j) \sin(s_j k) \quad (\text{رابطه ۷})$$

که  $k = 1, \dots, (N-1)/2$  و  $N$  تعداد نمونه می‌باشد. همچنین مقدار تابع  $s$  به صورت زیر می‌باشد (Xu and Gertner, 2007):

$$f(s_j) = f(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nj}) \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$V = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{(n-1)/2} (A_k^2 + B_k^2) \quad (\text{رابطه ۹})$$

(۱۰) رابطه

$$V_i = \sum_p \Lambda_p \omega_i$$

که  $P = \{1, 2, \dots\}$  و  $p \omega_i \leq (N-1)/2$  و  $\omega$  تناوب زاویه‌ای مربوط به ضرایب فوریه می‌باشد.

$$\Lambda_k = \frac{1}{2} (A_k^2 + B_k^2) (k \text{ } \delta Z) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

با توجه به روابط ۶ و ۷ مقادیر ضرایب  $A$  و  $B$  به دست می‌آید که این ضرایب در روابط (۹) و (۱۱) جایگذاری شده و مقادیر واریانس خروجی کل و واریانس خروجی برای هر یک از پارامترهای دارای عدم قطعیت محاسبه شده و از تقسیم واریانس خروجی هر پارامتر بر واریانس خروجی کل، شاخص حساسیت برای پارامترهای مذکور به دست می‌آید.

#### روش مبتنی بر واریانس (VBSA)

##### شاخص حساسیت مرتبه اول یا اثر اصلی (Main effect)

یکی از راهکارهای اندازه‌گیری حساسیت خروجی الگو نسبت به متغیرهای ورودی، این است که تمامی متغیرهای ورودی بجز

شاخص‌های آماری را برای تخمین حساسیت بکار می‌گیرد. مزیت اصلی این رویکردها این است که این رویکردها نسبتاً ساده و هزینه محاسباتی کمتری دارند. بنابراین از آنجایی که این روش‌ها براساس رابطه خطی بین متغیرهای ورودی و خروجی هستند ممکن است در حالت روابط غیرخطی ضعیف عمل کنند (Helton and Davis, 2000). در رویکردهای مبتنی بر واریانس، مانند Sobol و روش‌های خانواده FAST حساسیت خروجی به متغیر ورودی براساس مقدار واریانس خروجی که به وسیله ورودی ایجاد می‌شود، اندازه‌گیری می‌گردد (Cukier et al., 1978; Sobol, 2001). این روش‌ها واریانس خروجی را به قسمت‌های قابل استناد متغیرهای ورودی منحصر به فرد و همچنین به ترکیبات آن‌ها تجزیه می‌کنند. اگرچه روش‌های مبتنی بر واریانس محاسبه‌محور هستند (Makler-Pick et al., 2011)، این روش‌ها امکان بررسی تمام فضای ورودی را می‌دهند و همچنین تعاملات، حتی در واکنش‌های غیرخطی را به حساب می‌آورند. به این دلایل، این روش‌ها به روش برتر در تعدادی از موارد قابل استفاده تبدیل شده‌اند و به ویژه استفاده از روش Sobol در مدل‌سازی محیطی، رایج شده است (Confalonieri et al., 2010). شاخص‌های حساسیتی مبتنی بر تراکم، شاخص‌های مستقل لحظه‌ای هستند، زیرا بر اساس تعریف، توزیع احتمالات کلی خروجی را به جای لحظه‌ای، در نظر می‌گیرند (Pianosi and Wagener, 2015). در روش‌های ناحیه‌ای، نمونه‌های ورودی به دو گروه یا بیشتر تقسیم می‌گردند و با توجه به اینکه آیا خروجی مربوطه مدل، شرایط را برآورده می‌کنند، بالا یا پایین یک آستانه معین می‌باشند. سپس، توابع توزیعی تجربی ورودی در هر گروه محاسبه و مقایسه می‌گردند. تحلیل حساسیت ناحیه‌ای تغییرات را در تابع توزیع تجمعی ورودی‌ها مورد ملاحظه قرار می‌دهد (Pianosi and Wagener, 2015).

با توجه به روابط موجود برای محاسبه شاخص حساسیت هر یک از روش‌های مذکور، کد MATLAB نوشته شده، استفاده شد. بدین صورت که برای هر یک از پارامترهای دارای عدم قطعیت توزیع احتمالاتی و دامنه تغییرات لحاظ گردید و با توجه به توزیع احتمالاتی، نمونه‌گیری انجام شد و مقادیر هر یک از پارامترها در فایل ورودی مدل SUTRA جایگزین گردید و خروجی مدل (غلظت) محاسبه شد و با توجه به روابط مذکور مقادیر شاخص حساسیت به دست آمد.

## نتایج

روش‌های تحلیل حساسیت نامبرده شده در برنامه MATLAB به

توزیع تجمعی خروجی  $y$  را در حالت بدون شرط با  $F_y(y)$  و در حالت مشروط به ثابت در نظر گرفتن ورودی  $X_i$  با  $F_{y|X_i}(y)$  نشان داده می‌شود.

$$KS(X_i) = \max_y |F_y(y) - F_{y|X_i}(y)| \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

از آنجایی که  $KS$  به مقداری که ورودی  $X_i$  را در آن ثابت در نظر گرفته شده وابسته است، شاخص حساسیت PAWN که با  $T_i$  نشان داده می‌شود به عنوان آماره (بیشترین یا میانگین) تمامی حالاتی که  $X_i$  می‌تواند داشته باشد، به صورت معادله (۱۶) تعریف می‌شود.

$$T_i(X_i) = \text{stat}_{X_i} [KS(X_i)] \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

با توجه به رابطه (۱۶)  $T_i$  بین ۰ و ۱ تغییر می‌کند. هرچه مقدار  $T_i$  کمتر باشد تأثیر  $x$  کمتر است. اگر  $T_i = 0$  باشد ورودی  $X_i$  تأثیری بر خروجی ندارد (Pianosi and Wagener, 2015).

## روش ناحیه‌ای (RSA)

در این روش با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی مربع لاتین<sup>۱</sup> از فضای پارامتری مدل نمونه‌گیری می‌شود. به طوری که مجموعه پارامترهای مختلفی به صورت تصادفی تولید شده و سپس خروجی‌های مدل متناسب با آن‌ها بعد از اجرای مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. پس از انجام نمونه‌گیری از فضای پارامتری، مجموعه پارامترهای تولید شده بر اساس مقادیر تابع هدف (معیاری از تفاوت بین خروجی مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده) به دست آمده متناظرشان مرتب می‌شوند و به دو دسته مجموعه پارامتر خوب ( $X1$ ) و بد ( $X2$ ) تقسیم می‌شوند. سپس تابع توزیع تجمعی ( $CDF$ ) پارامترهای مدل توسط آزمون کولموگروف - اسمیرنوف با یکدیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرند:

$$T = \max(|F1(x) - F2(x)|) \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

در رابطه (۱۷)،  $F1$  و  $F2$ ،  $CDF$  مجموعه پارامتر اول و دوم می‌باشد. همچنین در این آزمون هرچه میزان آماره  $T$  بیشتر باشد، احتمال اینکه دو توزیع متفاوت باشند بیشتر بوده و نشان‌دهنده حساسیت بیشتر پارامتر مربوطه می‌باشد (Pianosi et al., 2016).

## تحلیلی بر مزایا و معایب روش‌های تحلیل حساسیت کلی

روش‌های اثرات ابتدایی، مانند روش موریس، یک رویکرد بسیار رایج و ساده‌تری را ارائه می‌دهد، این روش‌ها اجازه شناسایی همبستگی بین متغیرها را نمی‌دهند و نمی‌توانند ارتباط بین ورودی‌های مدل را ارائه دهند (Saltelli et al., 2000). تحلیل رگرسیون و تحلیل حساسیت مبتنی بر همبستگی تعدادی از

پارامترهای منتخب دارای عدم قطعیت (نفوذپذیری لایه‌های اول تا هفتم) هر کدام از لایه‌بندی خاصی تشکیل شده است (شکل ۳) که اطلاعات آن‌ها در جدول (۳) آورده شده است.

مدل SUTRA متصل شدند. برای تولید مجموعه پارامتر، توسط روش مربع لاتین از پارامترها نمونه‌گیری شد. در ادامه برنامه، مدل برای ۱۵۰۰ گام زمانی (۸۰ سال جهت رسیدن به شرایط دائمی شده) اجرا شده و خروجی‌های آن مورد تحلیل قرار گرفتند.

جدول ۳. مشخصات پارامترهای عدم قطعیت دار مدل SUTRA به همراه دامنه تغییرات مقادیر آنها

| پارامتر | واحد    | توزیع     | میانگین                | واریانس                | دامنه تغییرات                                   |
|---------|---------|-----------|------------------------|------------------------|---|
| K1      | مترمربع | لوگ نرمال | $1/25 \times 10^{-11}$ | $1/13 \times 10^{-20}$ | $3/704 \times 10^{-18} - 7/318 \times 10^{-10}$ |
| K2      | مترمربع | لوگ نرمال | $4/09 \times 10^{-13}$ | $3/68 \times 10^{-22}$ | $8/174 \times 10^{-25} - 3/589 \times 10^{-11}$ |
| K3      | مترمربع | لوگ نرمال | $1/97 \times 10^{-12}$ | $1/77 \times 10^{-21}$ | $9/656 \times 10^{-22} - 1/545 \times 10^{-10}$ |
| K4      | مترمربع | لوگ نرمال | $1/74 \times 10^{-11}$ | $1/57 \times 10^{-20}$ | $1/62 \times 10^{-17} - 9/424 \times 10^{-10}$  |
| K5      | مترمربع | لوگ نرمال | $9/00 \times 10^{-13}$ | $8/00 \times 10^{-22}$ | $2/961 \times 10^{-23} - 7/554 \times 10^{-11}$ |
| K6      | مترمربع | لوگ نرمال | $8/26 \times 10^{-13}$ | $7/43 \times 10^{-22}$ | $1/932 \times 10^{-23} - 6/981 \times 10^{-11}$ |
| K7      | مترمربع | لوگ نرمال | $2/31 \times 10^{-11}$ | $2/08 \times 10^{-20}$ | $5/718 \times 10^{-17} - 1/161 \times 10^{-9}$  |

لایه‌های ششم، چهارم و هفتم می‌توان از این پارامترها صرف نظر کرد. با توجه به نفوذپذیری لایه‌های اول، دوم و پنجم و همچنین گستردگی بیشتر این لایه‌ها در سمت دریا می‌توان نتیجه گرفت ترتیب حساسیت به‌دست آمده با واقعیت همخوانی داشته و لذا پیشروی آب‌شور با نفوذپذیری بالا ارتباط مستقیم داشته یعنی هرچه این نفوذپذیری بیشتر شود در نتیجه میزان پیشروی بیشتر می‌شود. در روش مبتنی بر واریانس، متغیر نفوذپذیری لایه اول تنها متغیر ضروری و حساس در اثر اصلی می‌باشد و متغیر نفوذپذیری لایه اول، دوم، سوم، پنجم و ششم جز متغیرهای ضروری و حساس در اثر کل می‌باشند. با توجه به مقادیر اثر اصلی و کل متغیرهای مذکور، نتیجه می‌شود که متغیر نفوذپذیری لایه اول با توجه به قرار داشتن آن در لایه بالایی خاک نسبت به سایر متغیرها حساسیت بیشتری داشته و در اتخاذ تصمیمات مدیریتی در این آبخوان باید متغیر مذکور در رده نخست متغیرهای حساس قرار گیرد.

با توجه به جدول (۴) نتایج هر یک از روش‌ها به اختصار شرح داده می‌شود. در روش اثرات ابتدایی متغیر نفوذپذیری لایه پنجم نسبت به لایه‌های دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد و بعد از آن، نفوذپذیری لایه دوم و اول به مراتب بیشتر از لایه‌های دیگر اهمیت دارند و پارامتر نفوذپذیری لایه هفتم از اهمیت اندکی برخوردار بوده و می‌توان از حساسیت آن چشم‌پوشی نمود. در پیشروی آب‌شور به سمت آبخوان و اعمال تغییرات و اتخاذ تصمیم درباره پارامتر حساس تر باید پارامتر نفوذپذیری لایه پنجم آبخوان (متشکل از خاک‌های سیلت، ماسه، شن و رس) را به دلیل بافت سبک‌تر و نفوذپذیرتر جز حساس‌ترین پارامترها و بعد از آن از لحاظ حساس بودن، لایه‌های دوم (رس و شن) و اول (ماسه و شن) را لحاظ نمود. در روش آزمون حساسیت دامنه فوریه، متغیر نفوذپذیری آبخوان واقعی در لایه اول از اهمیت بیشتری نسبت به لایه‌های دوم، پنجم و سوم برخوردار می‌باشد. با توجه به مقدار اثر اصلی به دست آمده و حساسیت ناچیز برای

جدول ۴. نتایج شاخص‌های روش‌های تحلیل حساسیت

| پارامتر حساس‌تر | پارامتر |       |        |        |        |       |       | روش                 |
|-----------------|---------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|---------------------|
|                 | K7      | K6    | K5     | K4     | K3     | K2    | K1    |                     |
| K5              | ۰/۰۲۴   | ۰/۱۰۵ | ۲/۰۶۵  | ۰/۰۹۲  | ۰/۰۸۸  | ۰/۷۶۸ | ۰/۲۹۵ | EE                  |
| K1              | ۰/۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۱۲۹ | ۰/۰۰۱۹ | ۰/۰۱۲۶ | ۰/۰۲۰ | ۰/۱۹۶ | FAST                |
| K1              | -۰/۰۶۱  | ۰/۰۲۳ | -۰/۰۴۴ | -۰/۰۱۷ | -۰/۰۵۱ | ۰/۰۲۶ | ۰/۳۰۲ | VBSA (main effect)  |
| K1              | ۰/۰۲۳   | ۰/۱۳۰ | ۰/۳۳۸  | ۰/۰۸۱  | ۰/۱۵۵  | ۰/۱۰۷ | ۰/۹۸۶ | VBSA (total effect) |
| K1              | ۰/۱۳۳   | ۰/۱۰۳ | ۰/۲۸۷  | ۰/۱۷   | ۰/۱۴۷  | ۰/۱۲۷ | ۰/۵۷۷ | PAWN                |
| K1              | ۰/۰۴۴   | ۰/۰۵۷ | ۰/۱۵۴  | ۰/۰۴۸  | ۰/۰۶۷  | ۰/۰۶۰ | ۰/۷۹۲ | RSA                 |

هفتم، دوم و درنهایت ششم می‌باشد. در این روش نیز لایه اول و پنجم با توجه به نوع خاک، نفوذپذیری و گستردگی آن‌ها در

در روش PAWN حساسیت پارامتر نفوذپذیری برای لایه‌های مذکور به ترتیب اولویت لایه اول، پنجم، چهارم، سوم،

لایه اول (ماسه و شن)، لایه پنجم (سیلت، ماسه، شن و رس) با توجه به گستردگی بیشتر در سمت دریا و بافت سبک‌تر و قابل نفوذتر نسبت به لایه‌های دیگر از حساسیت بالایی برای پیشروی آب‌شور برخوردار می‌باشند. به عبارت دیگر پیشروی آب‌شور به آبخوان ساحلی به نفوذپذیری دو لایه مذکور وابسته بوده و هرچه این نفوذپذیری بیشتر باشد، میزان پیشروی نیز به مراتب بیشتر می‌شود. لذا در اعمال تغییرات و اتخاذ تصمیمات مدیریتی در منطقه و توسعه مدل باید دو پارامتر مذکور به عنوان پارامترهای حساس‌تر لحاظ شوند و این یافته با اطمینان بیشتری حاصل شده است چون بر اساس نتایج تحلیل حساسیت کلی بوده که کل بازه تغییرات محتمل نفوذپذیری را مدنظر قرار داده و وابسته به تغییرات موضعی نیست.

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه از پنج روش تحلیل حساسیت برای پی بردن به حساس‌ترین پارامتر استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامتر نفوذپذیری لایه اول در روش‌های آزمون حساسیت دامنه فوریه، مبتنی بر واریانس، PAWN و ناحیه‌ای و نفوذپذیری لایه پنجم در روش اثرات ابتدایی جز حساس‌ترین پارامتر شناسایی شدند. دو پارامتر مذکور می‌توانند در اتخاذ تصمیمات مدیریتی در منطقه و توسعه مدل به عنوان پارامترهای حساس‌تر با اطمینان بیشتری نسبت به یافته‌های حاصل از تحلیل‌های موضعی در اولویت قرار گیرند. پیشروی آب شور به حساس‌ترین پارامتر شناسایی شده بیشتر وابسته بوده و این حساسیت با توجه به نوع و بافت خاک و درشت دانه بودن به دست آمده است. از نتایج این مطالعه می‌توان در هدایت تصمیمات مدیریتی محدوده و نیز اولویت‌بندی اندازه‌گیری‌های مربوط به آبخوان استفاده نمود.

### REFERENCES

- Chun, J.A., Lim, C., Kim, D., Kim, J.S. (2018). assessing impacts of climate change and sea-level rise on seawater intrusion in a coastal aquifer. *Water* 10(4), 357-368.
- Confalonieri, R., Bellocchi, G., Bregaglio, S., Donatelli, M., Acutis, M. (2010). Comparison of sensitivity analysis techniques: A case study with the rice model WARM. *Ecological Modelling* 221(16), 1897-1906.
- Cukier, R., Levine, H., Shuler, K. (1978). Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems. *Journal of computational physics* 26(1), 1-42.
- Ganji, A., Maier, H.R., Dandy, G.C. (2016). A modified sobol' sensitivity analysis method for decision-making in environmental problems. *Environmental Modelling and Software* 75, 15-27.
- Hamraz, B.S., Akbarpour, A., Pourreza Bilondi, M. (2016). Assessment of parameter uncertainty of modflow model using glue method (case study: birjand plain). *Journal of Water and Soil Conservation* 22(6), 61-79 (In Farsi)
- Helton, J.C., Davis, F.J. (2000). Sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (US); *Sandia National Labs.*
- Iran Water Resources Management Company (2016) Updating water resources studies report of Lahijan-Chaboksar subbasin, Ministry of Energy, Mazandaran Regional Water Authority, *Technical Report*. (In Farsi)
- Karatzas, G.P., 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.
- Kazemi, H., Ketabchi, H., Mohammad-Vali-Samani, J. (2019). Numerical simulation of lahijan-

سمت دریا، جز حساس‌ترین پارامترها به شمار آمده‌اند و دلیل این حساسیت، رابطه مستقیم نفوذپذیری با پیشروی آب‌شور دریا می‌باشد که هرچه نفوذپذیری بیشتر در نتیجه پیشروی نیز بیشتر می‌شود. در روش ناحیه‌ای نتایج حاکی از آن است که تأثیرگذارترین (حساس‌ترین) پارامتر برای غلظت، پارامتر نفوذپذیری لایه اول می‌باشد. به عبارتی نفوذپذیری لایه اول نسبت به نفوذپذیری لایه پنجم که هر دو دارای شدت حساسیت زیاد می‌باشند، از حساسیت و اهمیت بالاتری برای خروجی مورد نظر (غلظت) برخوردار بوده و باید نقش این متغیر در اتخاذ تصمیمات مدیریتی پررنگ‌تر باشد. بعد از دو پارامتر مذکور، ترتیب اولویت پارامترهای دیگر براساس شاخص حساسیت به ترتیب نفوذپذیری لایه سوم، دوم، ششم، چهارم و لایه هفتم در رتبه‌های سوم تا هفتم قرار دارند.

با توجه به مقایسه روش‌ها با یکدیگر مشاهده می‌گردد که در اکثر روش‌ها نتایج یکسانی به دست آمده است که در آن‌ها هرچه نوع خاک و بافت آن سبک‌تر و درشت دانه‌تر باشد، نفوذپذیری بیشتر و پیشروی بیشتر شده و پارامتر حساس‌تر می‌باشد (Rajabi et al., 2015). با استفاده از روش مستقل از لنگر به مطالعه مسأله هنری پرداختند و نتیجه گرفتند که حساسیت نفوذپذیری آبخوان بیشتر از جریان ورودی می‌باشد. در مطالعه Hamraz et al. (2016) به بررسی عدم قطعیت پارامترها در مدل MODFLOW با استفاده از روش تحلیل حساسیت GLUE پرداخته شد و پارامتر هدایت هیدرولیکی حساس‌ترین پارامتر به دست آمد. با توجه به نتایج دو مطالعه مذکور می‌توان گفت که یافته‌های این تحقیق با نتایج مطالعات (Rajabi et al. (2015) و Hamraz et al. (2016) هم راستا می‌باشد.

- chaboksar coastal aquifer: investigating the possible future scenarios. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 1-17 (In Farsi).
- Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. (2011). Development of combined ant colony optimization algorithm and numerical simulation for optimal management of coastal aquifers. *Iran-Water Resources Research*, 7(1), 1-12. (In Farsi).
- Ketabchi, H., Ataie-Ashtian, B. (2015). Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: a comparative study toward future challenges. *Journal of Hydrology* 520,193-213.
- Khorashadi Zadeh, F., Nossent, J., Sarrazin, F., Pianosi, F., van Griensven, A., Wagener, T., Bauwens, W. (2017). Comparison of variance-based and moment-independent global sensitivity analysis approaches by application to the swat model. *Environmental Modelling and Software* 91, 210-222.
- Lathashri, U.A., Mahesha, A. (2016). Predictive simulation of seawater intrusion in a tropical coastal aquifer. *Journal of Environmental Engineering* 142(12), D4015001.
- Mahmoodzadeh, D., Ketabchi, H., Ataie-Ashtiani, B. (2016). Effects of Sea Level Rise and Recharge Rate Variations on Seawater Intrusion in Confined Aquifer. *Journal of Hydraulics* 10(4), 1-15.
- Makler-Pick, V., Gal, G., Gorfine, M., Hipsey, M.R., Carmel, Y. (2011). Sensitivity analysis for complex ecological models – A new approach. *Environmental Modelling and Software* 26(2), 124-134.
- Nakhaei, M., Vadiati, M. (2014). Spatial analysis of natural hazards resulting from the over-exploration of ground water in the coastal aquifer of urmia region. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards* 1(1), 53-65 (In Farsi).
- Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J.W., Rougier, J., Stephenson, D.B., Wagener, T. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: a systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling and Software* 79, 214-232.
- Pianosi, F., Sarrazin, F., Wagener, T. (2015). A Matlab toolbox for Global Sensitivity Analysis. *Environmental Modelling and Software* 70, 80-85.
- Pianosi, F., Wagener, T. (2015). A simple and efficient method for global sensitivity analysis based on cumulative distribution functions. *Environmental Modelling and Software* 67, 1-11.
- Rajabi, M.M., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T. (2015). Polynomial chaos expansions for uncertainty propagation and moment independent sensitivity analysis of seawater intrusion simulations. *Journal of Hydrology* 520, 101-122.
- 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* 15(2), 119-133. (In Farsi).
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., Tarantola, S. (2008). Global sensitivity analysis: the primer. John Wiley and Sons
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F. (2000). Sensitivity Analysis as an Ingredient of Modeling. *Statist. Sci.* 15(4), 377-395.
- Sobol, I.M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and computers in simulation* 55(1-3), 271-280.
- 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*, 2002-4231.
- Voss, C.I., Souza, W.R. (1987). Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone. *Water Resources Research*, 23(10), 1851-1866.
- Xu, C., Gertner, G. (2007). Extending a global sensitivity analysis technique to models with correlated parameters. *Computational Statistics and Data Analysis* 51(12), 5579-5590.