

## مدل سازی عددی لنز آب شیرین در جزایر کوچک (مطالعه موردی جزیره کیش)

محمد مهدی رجبی<sup>۱\*</sup>، حامد کتابچی<sup>۲</sup>، بهزاد عطائی آشتیانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

\* تهران، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۱۱۵۵

mmrajabi@mehr.sharif.edu

**چکیده-** در بسیاری از جزایر کوچک، آبخوان ثقلی حاوی یک لنز آب شیرین است که توسط آب دریا احاطه شده است. بین لنز آب شیرین و آب شور که آن را احاطه کرده، یک ناحیه انتقالی وجود دارد که شوری نسبی آن از ۱۰۰ درصد تا صفر درصد کاهش می یابد. پیشروی آب شور به داخل آبخوان های جزیره ها، جدی ترین مسأله ای است که کیفیت آب را در جزایر کوچک به خطر می اندازد. جزیره کیش یکی از معدود جزایر خلیج فارس است که منابع آب زیرزمینی شیرین و قابل استحصال دارد. در این تحقیق پدیده پیشروی آب شور در لنز آب شیرین جزیره کیش توسط مدل عددی SUTRA به صورت سه بعدی شبیه سازی و مطالعه شده است. برای واسنجی مدل از روش مدل سازی معکوس استفاده شده است. برای این منظور نرم افزار مدل سازی معکوس PEST با مدل عددی SUTRA ترکیب شده است. پژوهش حاضر نشان می دهد که مدل عددی SUTRA می تواند ابزار مناسبی برای مدل سازی عددی فرایند پیشروی آب شور باشد. این ناشی از عواملی مانند توانایی مدل عددی SUTRA در حل همزمان معادلات جریان سیال و انتقال ماده محلول، قابلیت در نظر گرفتن ناحیه انتقالی بین آب شور و شیرین، توانایی مدل سازی به دو شکل اشباع و اشباع غیر اشباع و امکان مدل سازی سه بعدی است. عملیات واسنجی، یکی از فرآیندهای جدایی ناپذیر در مدل سازی کاربردی است. واسنجی مدل با متغیر در نظر گرفتن تمامی مشخصه ها، کاری بسیار دشوار و اغلب غیر عملی است، ضمن این که موجب می شود موضوع یکتا نبودن جواب در عملیات واسنجی به یک مسأله ای حل نشدنی تبدیل شود. از این رو در واسنجی مدل باید دست به انتخاب زد و از میان مشخصه های تأثیرگذار تعدادی را متغیر و بقیه را ثابت فرض کرد. در این مطالعه ضرایب همبستگی و حساسیت، مبنای انتخاب مشخصه های ثابت و متغیر بوده است. با توجه به ماهیت پیچیده و طولانی پاسخ دهی سیستم آب زیرزمینی مورد بحث نسبت به تغییرات، نیاز به برنامه های شبیه سازی نزدیک به واقعیت - که بتواند شرایط مختلف را در آینده پیش بینی رفتاری کند به طوری

که نتایج حاصل در بهره‌برداری و مدیریت منابع آب قابل استفاده باشد- یکی از جنبه‌های مورد تأکید تلقی می‌شود.

**کلیدواژگان:** مدل‌سازی عددی، لنز آب شیرین، پیشروی آب شور، مدل‌سازی معکوس، SUTRA.

## ۱- مقدمه

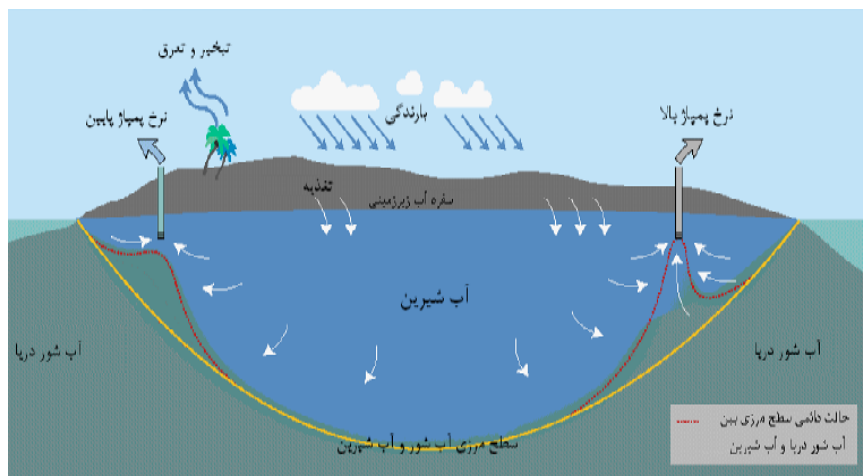
منابع آب زیرزمینی در نواحی خشک و نیمه‌خشک و مناطق ویژه‌ای مانند جزایر کوچک، منبع اصلی و مهم تأمین نیازهای آبی به‌شمار می‌روند. از سوی دیگر در بسیاری از کشورهای جهان، جزایر کوچک تبدیل به مراکز مهم تجاری، اقتصادی و گردشگری شده و جمعیت بسیاری را در خود جای داده‌اند و از این رو تأمین آب شیرین در آنها اهمیت ویژه‌ای دارد. به‌علاوه، جزایر کوچک شرایط اقلیمی و آب و هوایی ویژه‌ای دارند که آنها را از جزایر بزرگ مجزا می‌سازد. در این جزایر به علت کوچک بودن حوضه آبریز و نامنظم بودن بارش، منابع آب سطحی قابل اطمینانی برای بهره‌برداری وجود ندارد و تنها منبع طبیعی تأمین آب شیرین، آب زیرزمینی ذخیره شده در آبخوان جزیره است (عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹ و Ataie-Ashtiani and Ketabchi, 2011).

در بسیاری از جزایر، آبخوان ثقلی حاوی یک لنز آب شیرین است که توسط آب دریا احاطه شده (مریدی، ۱۳۸۱). بین لنز آب شیرین و آب شوری که آن را احاطه کرده، یک ناحیه انتقالی وجود دارد که شوری نسبی آن از ۱۰۰ درصد تا صفر کاهش می‌یابد. در شرایط طبیعی، گرادیان هیدرولیکی<sup>۱</sup> در آبخوان‌های ساحلی (که آبخوان جزایر را نیز در بر می‌گیرند) به سمت دریا است. در این حالت، مقدار اضافه آب شیرین زیرزمینی به دریا تخلیه می‌شود. آب دریا که در انتهای آبخوان ساحلی قرار دارد،

به علت داشتن املاحی مانند نمک، سنگین‌تر از آب شیرین است. چگالی آب دریا حدود ۲/۵ درصد بیشتر از چگالی آب شیرین است (تقی زاده ساحلی، ۱۳۸۷). چگالی بیشتر آب شور دریا سبب قرارگیری آن در زیر آب شیرین می‌شود و در سطح تماس، آب دریا به شکل یک گوه در آب شیرین نفوذ می‌کند (عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹ و Ataie-Ashtiani, 1999). تغییرات گرادیان و هد آب شیرین بر اثر ازدیاد برداشت یا کاهش تغذیه سطحی ناشی از عواملی مانند خشکسالی- شکل و موقعیت مرز مشترک را تغییر می‌دهد که این، پیشروی آب شور در آبخوان را به دنبال دارد. در نتیجه این پیشروی، شرایط هیدرولیکی جریان آب در نواحی ساحلی پیچیده‌تر شده و این، شناخت دقیق پدیده پیشروی آب شور دریا را دشوارتر می‌سازد. شکل ۱ نحوه تشکیل آبخوان ثقلی از لنز آب شیرین احاطه شده توسط دریا را به‌صورت طرحواره نشان می‌دهد.

پیشروی آب شور به داخل آبخوان‌های جزایر، جدی‌ترین مسأله‌ای است که کیفیت آب را در جزایر کوچک به خطر می‌اندازد، به‌ویژه اگر استخراج آب شیرین، به‌دلیل افزایش جمعیت و پیشرفت‌های صنعتی و کشاورزی افزایش یابد (Griggs et al., 1993 و Ataie-Ashtiani, 2007). برای پیش‌بینی وضعیت لنز آب شیرین در جزایری که در معرض پیشروی آب شور قرار دارند و نیز تحلیل و بررسی سناریوهای مدیریتی مختلف به‌منظور پیش‌گیری از پیشروی آب شور و بهبود کیفیت آب زیرزمینی، از ابزار مدل‌سازی استفاده می‌شود.

### 1. Hydraulic Gradient



شکل ۱ نحوه تشکیل آبخوان ثقلی حاوی لنز آب شیرین در جزایر کوچک

فاصله ۱۷ کیلومتری از ساحل جنوبی ایران در خلیج فارس و ۲۴۰ کیلومتری غرب بندرعباس قرار گرفته است. جزایر ایرانی در خلیج فارس یا به صورت رشته‌های طولی موازی با ساحل قرار دارند یا کم و بیش مدورند و جزیره کیش را می‌توان در گروه اول قرار داد. این جزیره به شکل بیضی بوده و در جهت ساحل غربی به ساحل شرقی (فاصله مجتمع مرجان و میدان هور)، ۱۵/۴۵ کیلومتر طول دارد. بیشترین عرض جزیره در راستای ساحل جنوبی به ساحل شمالی (فاصله بندرگاه گمرک و فانوس دریایی) برابر ۷/۵ کیلومتر است (عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹).

سطح جزیره کیش توپوگرافی ویژه‌ای مانند کوه و حتی تپه مرتفع ندارد و نسبتاً مسطح است. مرکز آن دارای بیشترین ارتفاع بوده و با شیب ملایمی به سمت سواحل از ارتفاع آن کاسته می‌شود (شرکت مهندسان مشاور سازه پردازی، ۱۳۸۵). توپوگرافی جزیره کیش، از به وجود آمدن آبراهه‌های دائمی جلوگیری می‌کند. از نظر زمین‌شناسی در جزیره کیش دو لایه با جنس متفاوت وجود دارد: یکی لایه متخلخل و نفوذپذیر که در بخش فوقانی قرار گرفته و دیگری لایه‌ای از جنس مارن با نفوذپذیری در زیر لایه فوقانی. ضخامت لایه فوقانی از مرکز جزیره به سمت

مدلسازی عددی پدیده پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی در چند دهه گذشته، موضوع پژوهش‌های متعددی بوده است.

بیشتر این پژوهش‌ها به شبیه‌سازی دوبعدی پدیده پیشروی آب شور پرداخته‌اند و مدلسازی سه‌بعدی فقط در کمتر از یک دهه گذشته به‌طور جدی در دستور کار قرار گرفته است. در جزایر کوچک به خلاف سایر آبخوان‌های ساحلی - که در آنها پیشروی آب شور فقط در یک جهت رخ می‌دهد - امکان پیشروی آب شور در تمامی جهت‌ها وجود دارد. این پدیده، اهمیت شبیه‌سازی سه‌بعدی منابع آب زیر زمینی در این جزایر و پدیده پیشروی آب شور را افزایش می‌دهد.

## ۲- شرح مسأله

جزیره کیش، جزیره‌ای راهبردی در منطقه خلیج فارس با ویژگی‌هایی منحصر به فرد است. این جزیره با وسعت ۹۰/۴۵۷ کیلومتر مربع در نیمه جنوبی منطقه معتدل شمالی بین عرض ۲۶ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۲۶ درجه و ۳۴ دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۵۳ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی قرار دارد. جزیره کیش در

هدف از مطالعه حاضر، استفاده از مدل‌سازی عددی به منظور بررسی لنز آب شیرین جزیره کیش و پیش‌بینی گستره پیشروی آب شور در آبخوان جزیره است. نتایج این مطالعات برای پی‌ریزی برنامه‌های بهره‌برداری مناسب و بهینه از منابع آب زیرزمینی جزیره استفاده خواهد شد.

### ۳- روش تحقیق

شبیه‌سازی لنز آب شیرین در جزیره کیش در این پژوهش با بهره‌گیری از مدل SUTRA انجام شده است. SUTRA مدلی عددی است که برای مدل‌سازی حرکت سیال و جابه‌جایی ماده محلول (یا انرژی) در محیط خاک طراحی شده است. این مدل نخستین بار در سال ۱۹۸۴ توسط ووس<sup>۲</sup> ارائه شد و سپس توسط ووس و پرووست<sup>۳</sup> بازبینی شد. محاسبات جریان وابسته به چگالی در محیط متخلخل در این مدل به روش المان محدود و محاسبات در گام‌های زمانی به روش تفاضل محدود انجام می‌شود. یکی از ویژگی‌های مهم این مدل - که در انتخاب آن در پژوهش حاضر نقش اساسی داشته است - قابلیت در نظر گرفتن ناحیه انتقالی است (Voss and Souza, 1987). معادله اصلی حاکم بر جریان سیال در محیط اشباع در مدل عددی به صورت زیر است (Voss and Provost, 2008):

$$\left( \rho S_{op} \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \left( \varepsilon \frac{\partial p}{\partial U} \right) \frac{\partial U}{\partial t} - \nabla \cdot \left[ \left( \frac{k\rho}{\mu} \right) (\nabla p - \rho g) \right] = Q_p \quad (1)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی سیال،  $S_{op}$  فشار مخصوص،  $p$  فشار سیال،  $\varepsilon$  تخلخل خاک،  $c$  غلظت سیال (نسبت وزن ماده محلول به وزن سیال)،  $k$  نفوذپذیری ماتریس خاک،  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال،  $g$  شتاب ثقل و  $Q_p$  منبع سیال است.

سواحل کاهش می‌یابد. میانگین بارندگی بیست ساله، برطبق آمار، برابر ۱۹۰ میلی‌متر (۶۵٪ در زمستان، ۲۸٪ پاییز، ۱۴٪ در تابستان) و میانگین دمای سالیانه آن برابر ۲۶/۶ درجه سانتی‌گراد است (عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹).

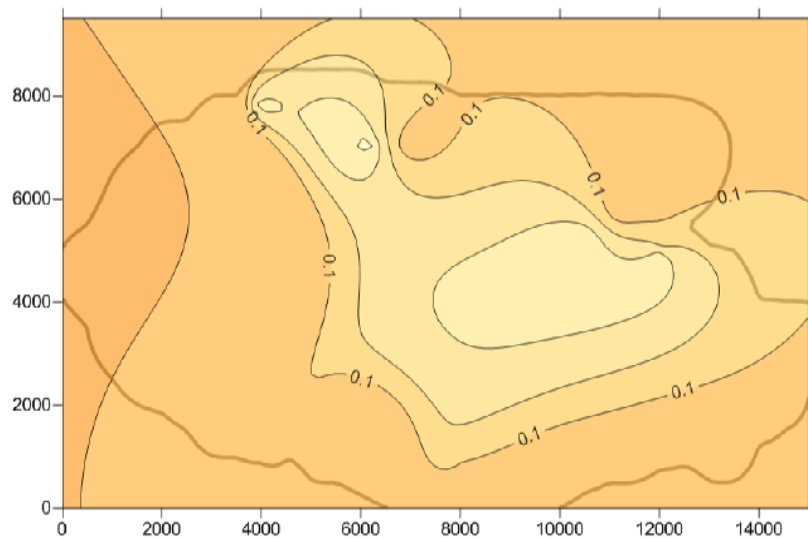
جزیره کیش یکی از معدود جزایر خلیج فارس است که منابع زیرزمینی آب شیرین قابل استحصال دارد. با وجود این با شروع طرح‌های توسعه، منابع آب زیرزمینی در عمل نقش خود را در تأمین آب از دست داده‌اند، به‌گونه‌ای که هم‌اکنون تأسیسات آب شیرین کن، منبع اصلی فراهم‌آوری آب در جزیره کیش به‌شمار می‌روند (عطائی آشتیانی، ۱۳۸۹).

هزینه بالا و خطرهای زیست محیطی مرتبط با فرآیند شیرین‌سازی آب، لزوم توجه دوباره به منابع شیرین آب زیرزمینی را بیشتر می‌کند. با وجود این که منابع متعدد آلودگی مانند دفع غیراصولی فاضلاب، استفاده از کود و سموم شیمیایی در فضای سبز و کشاورزی و نشت از مخازن ذخیره‌سازی سوخت، کیفیت منابع آب شیرین جزیره کیش را تهدید می‌کنند، اما پیشروی آب شور دریا را می‌توان مهم‌ترین خطر برای کیفیت آب زیرزمینی این جزیره دانست. این مسأله با توجه به این که منابع آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین اجزای زیست محیطی در منطقه هستند، اهمیت بیشتری می‌یابد.

به‌منظور شناسایی گستره لنز آب شیرین، نسبت به جمع‌آوری و تحلیل نمونه‌های آب زیرزمینی از ۱۸ گمانه در سطح جزیره کیش اقدام شده است. شکل ۲ خطوط هم‌غلظت شوری حاصل از تعمیم داده‌های نقطه‌ای غلظت به کل سطح جزیره را با استفاده از روش کریجینگ<sup>۱</sup> نشان می‌دهد. نمونه‌برداری در فروردین ماه ۱۳۸۹ انجام شده است.

2. Voss  
3. Provost

1. Kriging



شکل ۲ گستره لنز آب شیرین در جزیره کیش بر مبنای خطوط هم‌غلظت شوری ۱۰٪ (فروردین ۱۳۸۹)

است با استفاده از روش های تکرار شونده<sup>۱</sup> حل شوند (Voss and Provost, 2008).

### ۳-۱- تحلیل اطلاعات جزیره کیش و تهیه مدل مفهومی

برای مدل‌سازی لنز آب شیرین نخست باید محدوده ناحیه شبیه‌سازی در هر سه بعد تعیین شود. این کار با توجه به جغرافیای جزیره، ماهیت و گستردگی لنز آب شیرین انجام می‌شود. بررسی سناریوهای مختلف شبیه‌سازی لنز آب شیرین نشان می‌دهد که بخش‌های عمیق‌تر از ۵۰۰ متر فقط در برگیرنده آب شور هستند، از این رو مدل‌سازی نواحی عمیق‌تر از آن ضرورتی ندارد. به این ترتیب بر مبنای مدل‌سازی‌های سه‌بعدی انجام شده، عمق ۵۰۰ متر نسبت به سطح تراز آب دریا برای محدوده مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی‌ها به صورت اشباع-غیر اشباع انجام شده است. برای انتخاب گسسته‌سازی مکانی در شبیه‌سازی عددی از عدد پکلت<sup>۲</sup> استفاده شده است. در گسسته‌سازی مکانی مناسب،

از آن جا که مدل SUTRA فقط اجازه در نظر گرفتن یکی از دو مشخصه غلظت (C) یا حرارت (T) را در هر زمان می‌دهد، از علامت کلی U برای بیان هر دو یک از این دو مشخصه در رابطه بالا استفاده شده است. معادله حاکم بر انتقال ماده محلول در مدل به صورت زیر تعریف می‌شود (Voss and Provost, 2008):

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho v c) - \nabla \cdot [\varepsilon\rho(D_m I + D)\nabla c] = Q_p(c^* - c) \quad (2)$$

که در آن  $v$  میانگین سرعت سیال،  $D_m$  ضریب پخش ملکولی،  $I$  ماتریس همانی،  $D$  ماتریس پراکندگی مکانیکی و  $c^*$  غلظت ماده محلول در منبع سیال است. روابط بالا از نوشتن معادلات بقای جرم برای سیال و ماده محلول به دست آمده است. حل معادلات دیفرانسیل مشتقات جزئی در مدل SUTRA با روش های عددی المان محدود و تفاضل محدود با فرض جداپذیر بودن فضا و مکان انجام می‌شود. گسسته‌سازی زمانی و مکانی منجر به سیستم معادلات جبری غیرخطی می‌شود که لازم

1. Iterative  
2. Peclet Number

شوری نسبی در کنار آب دریا برابر یک است. شکل ۳ شرایط مرزی مدل را نشان می‌دهد. شرایط اولیه به سناریوی تعریف شده بستگی دارد. شرایط اولیه برای سناریوهای دائمی<sup>۲</sup> به صورت فشار و غلظت آب شور در قسمت زیر سطح دریا و فشار موینگی و غلظت صفر در بالای سطح دریا در مدل اعمال می‌شود. در این سناریوهای مسأله تا زمان رسیدن به حالت پایدار حل می‌شود. برای سناریوهای غیردائمی<sup>۳</sup> (تغذیه فصلی، تغذیه ماهیانه، وجود خشکسالی و مانند آن) با توجه به سناریو، شرایط اولیه برابر نتایج سناریوهای دائمی مشابه قرار داده می‌شود. در این سناریوها برای بررسی تأثیر تغییر مقدار تغذیه، مدل برای زمان محدودی حل و نتایج تغییر تغذیه بررسی می‌شود. البته در این مطالعه، به واسنجی مدل بر اساس حالت دائمی مدلسازی و اجرای برنامه تا رسیدن به حالت پایدار تمرکز شده، که قابلیت مدلسازی در حالت‌های بالا را دارد.

### ۲-۳- واسنجی مدل

در این مطالعه از نرم‌افزار مدلسازی معکوس PEST<sup>۴</sup> برای واسنجی مدل استفاده شده که دو دلیل مهم دارد. نخست این که نرم‌افزار PEST تاکنون به طور گسترده‌ای و در ترکیب با مدل‌های مختلف و در زمینه‌های مختلف استفاده شده است. گستردگی استفاده از این نرم‌افزار ناشی از توان بالای آن در انطباق با هر مدلی است که امکان دریافت مشخصه‌های ورودی را از فایل‌های متنی داشته و بتواند خروجی مدل را نیز در قالب فایل متنی ارائه کند. برای انجام عملیات واسنجی به هیچ‌گونه تغییری در مدل اصلی نیاز نیست و نرم‌افزار PEST خود را با مدل تطبیق می‌دهد.

معمولاً بعد افقی مان‌ها بیشتر از بعد عمودی آنها است (Aquiterria Consulting Pty Ltd, 2000). بر این اساس ابعاد شبکه در راستای محور افق و قائم برابر ۵۰۰ متر در نظر گرفته شده است. همچنین ابعاد شبکه در راستای عمودی، از ۲/۱۹ متر در بالاترین لایه آغاز شده و با ضریب افزایش ۱/۰۵، تا ۲۷/۱۱ متر در پایین‌ترین لایه افزایش می‌یابد. برای مدلسازی سه‌بعدی جزیره کیش به کمک نرم‌افزار تولید شبکه GiD9.0.2 و برنامه‌نویسی ++C شبکه سه‌بعدی ساختار یافته تولید شده است.

محدوده گسسته‌سازی زمانی با توجه به معیار عدد کورانت<sup>۱</sup> انتخاب شده است. در آغاز حل مسأله، گام‌های زمانی کوچک و با گذشت زمان، گام‌های زمانی بزرگ‌تری در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین گسسته‌سازی زمانی مسأله تشکیل لنز آب شیرین در جزیره کیش، با انجام تعدادی مدلسازی با گسسته‌سازی‌های زمانی و مکانی مختلف، محدوده سرعت جریان به دست آمد. گام‌های زمانی مورد استفاده در مدلسازی از ۱۸۰۰ ثانیه شروع شده و با ضریب افزایش ۱/۲ پس از هر ۱۰ گام، حداکثر تا  $2 \times 10^6$  ثانیه (۶/۳۴ سال) افزایش می‌یابد.

شرایط مرزی باید در ارتباط با جریان سیال و نیز ماده محلول تعریف شود. برای جریان سیال فرض می‌شود که در سطح زیرین ناحیه شبیه‌سازی، جریان ورودی یا خروجی وجود ندارد. فشار هد در سطوح جانبی و در نزدیکی دریا ثابت بوده و برابر فشار هیدرواستاتیک است. در سطح آبخوان امکان نفوذ آب حاصل از بارش وجود دارد. بر این اساس تغذیه طبیعی ناشی از آب باران - که عامل اصلی تشکیل لنز آب شیرین است - به صورت درصدی از بارندگی سالیانه در نظر گرفته می‌شود. آبی که از بالا به داخل آبخوان نفوذ می‌کند شوری برابر صفر دارد. گرادیان غلظت در سطح زیرین نیز برابر صفر است.

2. Steady State  
3. Transient  
4. Parameter Estimate

1. Courant Number



شکل ۳ شرایط مرزی مدل‌سازی جزیره کیش

این مشخصه‌ها، کاری بسیار دشوار و اغلب غیرعملی است، ضمن این که موجب می‌شود موضوع یکتا نبودن جواب در عملیات واسنجی به مسأله‌ای حل نشدنی تبدیل شود. از این رو در واسنجی مدل باید دست به انتخاب زد و از میان مشخصه‌های تأثیرگذار، تعدادی را متغیر و بقیه را ثابت فرض کرد. موارد زیر مبنای انتخاب مشخصه‌های متغیر در فرآیند مدل‌سازی معکوس قرار گرفت:

- ۱- از میان متغیرهایی که ضریب همبستگی بالایی دارند، انتخاب یکی به‌عنوان متغیر مستقل کفایت می‌کند و مشخصه‌های دیگر را می‌توان ثابت فرض کرد یا با اعمال ضرایب مشخص، به‌عنوان مشخصه وابسته در نظر گرفت.
- ۲- متغیرهایی که حساسیت خروجی‌های مدل نسبت به آنها بیشتر است، در اولویت انتخاب قرار می‌گیرند.
- ۳- تعداد کل مشخصه‌های مستقل باید در حدی باشد که زمان محاسبات در فرآیند مدل‌سازی معکوس در حد معقولی باقی بماند.

بر این اساس، محاسبه ضرایب همبستگی و حساسیت مدل عددی برای شش متغیر کلیدی هدایت هیدرولیکی بستر مارنی ( $K_1$ )، هدایت هیدرولیکی لایه نفوذپذیر سطحی ( $K_2$ )، ضریب پخش طولی  $^1(\alpha_L)$ ، ضریب پخش عرضی  $^2(\alpha_T)$ ، نرخ تغذیه ( $R$ ) و تخلخل ( $\varepsilon$ ) انجام شده است. نتایج حاصل در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

علت دوم آن است که این نرم‌افزار پیش از این به‌طور موفقیت‌آمیزی در ترکیب با مدل SUTRA در پژوهش‌های مشابه به‌کار رفته است. تخمین غیرخطی مشخصه‌های مدل توسط نرم‌افزار PEST با تکیه بر معادله ماتریسی زیر انجام می‌شود (Doherty, 2004):

$$u = (J^T Q J)^{-1} J^T Q (c - c_0) \quad (3)$$

در این رابطه  $u$  بردار بهبود مشخصه‌ها است. به بیانی دیگر در هر مرحله از فرآیند بهبود مقادیر مشخصه‌های بردار  $u$  با مقادیر قبلی مشخصه جمع می‌شود. ماتریس  $Q$  یک ماتریس قطری  $m \times m$  است که هر عضو  $q_{ii}$  (قطر اصلی) مجذور ضریب وزنی متناظر با خروجی  $i$ -ام مدل است. لازم است ذکر شود که در مطالعه حاضر، تمامی ضرایب وزنی برابر یک فرض شده است. تابع هدف در نرم‌افزار PEST مجموع مجذور فاصله مقادیر مدل‌سازی شده از مقادیر حاصل از مطالعات میدانی است.

#### ۴- تحلیل نتایج

داده‌های شوری و فشار هیدرواستاتیک در ۱۸ گمانه در سطح جزیره کیش، مبنای مدل‌سازی معکوس قرار گرفته است. جدول ۱ مقادیر مشخصه‌های کلیدی را در مدل عددی و فرآیند مدل‌سازی معکوس نشان می‌دهد. در مدل‌های پیچیده (مانند آنچه در مطالعه حاضر مورد نظر است)، مشخصه‌های متعددی خروجی مدل را تحت تأثیر قرار می‌دهند. واسنجی مدل با متغیر در نظر گرفتن تمامی

1. Longitudinal Dispersivity  
2. Transverse Dispersivity

جدول ۱ مقادیر عددی مشخصه‌های کلیدی در فرآیند مدل‌سازی و واسنجی

مقدار عددی	مشخصه	
المان محدود گالرگین <sup>۱</sup>	روش حل	مشخصه‌های کلیدی مدل عددی
شبکه نامنظم سه‌بعدی	ساختار شبکه المان محدود	
۱۸۰۰۰	تعداد المان‌ها در شبکه	
۲۰۸۰۸	تعداد گره‌ها در شبکه	
۴۷۹۴	تعداد گره‌های دارای فشار ثابت (شرایط مرزی)	
۴۷۹۴	تعداد گره‌های دارای شوری ثابت (شرایط مرزی)	
۳۱۴	تعداد گره‌های منبع سیال	
۰	تعداد گره‌های منبع شوری	
۲۵۰۰	حداکثر تعداد گام‌های زمانی	
۱۸۰۰ ثانیه	طول گام زمانی اولیه	
۱۰	دوره تناوب افزایش طول گام‌های زمانی (بر حسب تعداد گام زمانی)	
۱/۲	ضریب افزایش طول گام زمانی	
$2 \times 10^8$ ثانیه	حداکثر طول گام زمانی	
۲	تعداد مشخصه‌های مستقل	
۲	تعداد مشخصه‌های وابسته	
۱۸	تعداد نقاط اندازه‌گیری شده	
۵/۰	مقدار اولیه ضریب مارکوورت لامبدا <sup>۲</sup>	
۲	ضریب تعدیل مارکوورت <sup>۳</sup>	
۵	حداکثر تعداد آزمون و خطای ضریب لامبدا به‌ازای هر تکرار <sup>۴</sup>	
۳	حداکثر تعداد مجاز تکرار منجر به عدم موفقیت در کاهش مقدار پی <sup>۵</sup>	

جدول ۲ ضرایب همبستگی مشخصه‌های کلیدی مدل عددی

	$K_1$	$K_2$	$\alpha_T$	$\alpha_L$	R	$\varepsilon$
$K_1$	1.000	0.916	-0.184	0.344	0.935	0.286
$K_2$	0.916	1.000	0.059	0.110	0.944	0.355
$\alpha_T$	-0.184	0.059	1.000	0.843	0.169	0.282
$\alpha_L$	0.344	0.110	-0.843	1.000	0.069	0.042
R	0.935	0.944	0.169	0.069	1.000	0.431
e	0.286	0.355	0.282	0.042	0.431	1.000

1. Galerkin Finite Elements
2. Initial Marquardt Lambda
3. Lambda Adjustment Factor
4. Maximum Trial Lambdas Per Iteration
5. Maximum Number of Consecutive Failures to Lower Phi



همان‌طوری در جدول ۲ نشان داده شده، هدایت هیدرولیکی لایه نفوذپذیر سطحی و بستر مارنی، ضریب همبستگی برابر ۰/۹۱۶ دارند. از سوی دیگر جدول ۳ نشان می‌دهد که ضریب حساسیت خروجی‌های مدل عددی نسبت به هدایت هیدرولیکی بستر مارنی بیشتر از هدایت هیدرولیکی لایه نفوذپذیر سطحی است. از این رو در مدل‌سازی معکوس، هدایت هیدرولیکی بستر مارنی به‌عنوان مشخصه مستقل و هدایت هیدرولیکی لایه نفوذپذیر سطحی به‌عنوان مشخصه وابسته (با اعمال ضریب ۱۰ بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای) تعریف شده است. به روشی مشابه، ضریب پخش طولی به‌عنوان متغیر مستقل، و ضریب پخش عرضی به‌عنوان متغیر وابسته (با اعمال ضریب ۰/۱) انتخاب شده است. با توجه به پایین بودن ضریب حساسیت خروجی‌های مدل عددی نسبت به ضریب تخلخل، این مشخصه در فرآیند مدل‌سازی معکوس ثابت فرض شده است. علاوه بر این، با توجه به بالا بودن ضریب همبستگی میان نرخ تغذیه و هدایت هیدرولیکی آبخوان، نرخ تغذیه ثابت فرض شده است.

موفقیت نسبی فرایند واسنجی است. در شکل ۴ مقادیر شوری نسبی حاصل از مدل‌سازی عددی با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری میدانی مقایسه شده است. همچنین به‌منظور بررسی کیفیت نتایج مدل‌سازی معکوس، نمودار شوری نسبی محاسبه شده در کنار شوری نسبی اندازه‌گیری شده در شکل ۵ آورده شده است.

خطا از تفریق شوری نسبی محاسبه شده از شوری نسبی اندازه‌گیری شده به‌دست می‌آید. بر این اساس حداقل، میانگین و حداکثر خطا به‌ترتیب برابر با ۳/۸۹-، ۰/۵۵- و ۳/۹۸ است. وجود خطا در نتایج مدل عددی را می‌توان به موارد زیر نسبت داد:

(۱) در این مطالعه به علت در دسترس نبودن داده‌های بلندمدت شوری و مانند بسیاری از مطالعات مشابه دیگر (که در (Ghassemi et al, 2000) می‌توان دید)، واسنجی با فرض برقراری شرایط دائمی پیشروی آب شور در آبخوان جزیره کیش انجام شد. از یک سو بروز خشکسالی و برداشت بی‌رویه از لنز آب شیرین جزیره کیش و از سوی دیگر تخلیه فاضلاب شهری و پساب دستگاه‌های آب شربین کن به درون محیط آب زیرزمینی، سبب شده که شرایط واقعی سیستم آب زیرزمینی این جزیره در نقاط مختلف تا حدودی از شرایط دائمی فاصله بگیرد.

(۲) دیگر فرضها در پی‌ریزی مدل پیشروی آب شور مانند صرف‌نظر کردن از نوسانات سطح آب دریا و مسیرهای ترجیحی جریان آب زیرزمینی، و قائم فرض نمودن ساحل جزیره. البته در نظر نگرفتن این فرضها، زمان و پیچیدگی فرایند مدل‌سازی عددی را به‌شدت افزایش می‌دهد، و لذا چنین فرضهایی در مدل‌سازی عددی پیشروی آب شور بسیار رایج است (Ghassemi et al, 2000 و Wheat et al, 2010).

جدول ۳ ضرایب حساسیت خروجی‌های مدل عددی به

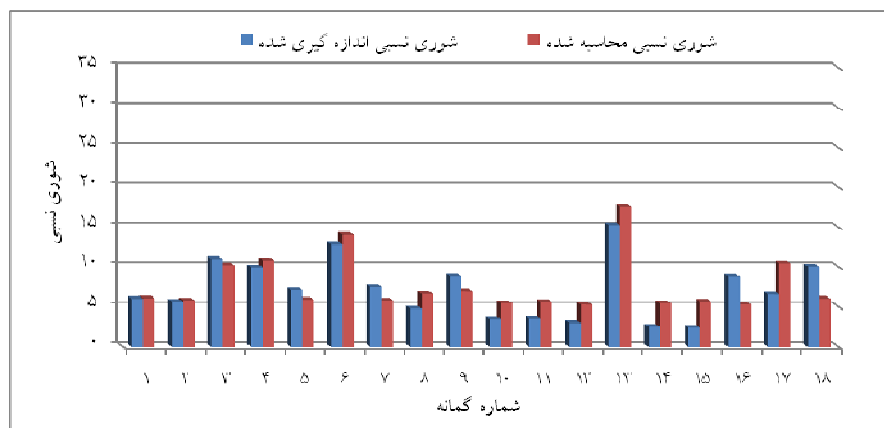
مشخصه‌های ورودی

$K_1$	0.001834
$K_2$	0.000147
$\alpha_T$	0.001008
$\alpha_L$	0.001925
R	0.001874
$\varepsilon$	0.000018

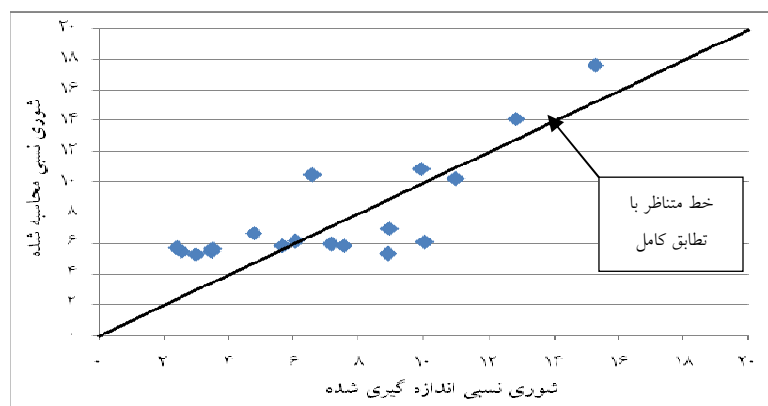
نتایج واسنجی در جدول ۴ ارائه شده است. با وجود آن که در فرایند واسنجی حدود بالا و پایین تعریف شده برای تغییر مشخصه‌های مدل، بازه وسیعی از مقادیر را در بر می‌گیرند، اما مقدار واسنجی شده همچنان در محدوده معقول و مورد انتظار قرار گرفته است. این حاکی از

جدول ۴ نتایج واسنجی مدل عددی با استفاده از نرم افزار PEST

مشخصه	نوع مشخصه	مقدار اولیه در فرآیند مدل سازی معکوس	حد پایین تغییر	حد بالای تغییر	مقدار واسنجی شده	واحد
هدایت هیدرولیکی بستر مارنی	مستقل	$1.0204 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-14}$	۱	$5.0932 \times 10^{-8}$	m/s
هدایت هیدرولیکی لایه نفوذپذیر سطحی	وابسته	$1.0204 \times 10^{-4}$	---	---	$5.0932 \times 10^{-7}$	m/s
ضریب پخش طولی	مستقل	۲۰۰	۵	۵۰۰	۳۰۲.۷۲	m
ضریب پخش عرضی	وابسته	۲۰	---	---	۳۰.۲۷	m



شکل ۴ مقایسه شوری نسبی حاصل از مدلسازی عددی با مقادیر حاصل اندازه گیری میدانی



شکل ۵ شوری نسبی محاسبه شده در کنار شوری نسبی اندازه گیری شده

در هر عمق مشخص با آنچه واقعیت دارد، تفاوت داشته باشد (Hill and Tiedeman, 2006). یک نکته قابل توجه، تأثیر حداقلی یکنواخت فرض نمودن توزیع زمانی نرخ

(۳) اختلاط سیال در چاه‌های نمونه برداری به ویژه با توجه به وجود جریان‌های قائم در سیستم آب زیرزمینی جزایر کوچک، سبب می‌شود که مقادیر شوری اندازه گیری شده

روش آزمون و خطا معیار مشخصی برای اطمینان از این که مدل واسنجی شده بهترین شرایط ممکن را از نظر انطباق با داده‌های میدانی داراست، وجود ندارد. اما در واسنجی خودکار مدل، از آنجا که انتخاب بهترین مقادیر برای مشخصه‌های واسنجی با شناسایی نقاط اکسترمم تابع هدف انجام می‌شود، می‌توان از این موضوع اطمینان داشت. با این حال به علت زمان بسیار زیاد محاسبات، واسنجی خودکار مدل‌های عددی سه‌بعدی پیشروی آب شور تا کنون کمتر در مطالعات واقعی مورد توجه قرار گرفته است. روش ارائه شده در این مطالعه که در ادامه تحقیقات (Sanz and Voss (2006) قرار دارد، هم‌چنانکه شرح داده شد می‌تواند زمان محاسبات را با کاهش روشمند تعداد مشخصه‌های متغیر، تا حدود زیادی کاهش دهد.

#### ۶- تقدیر و تشکر

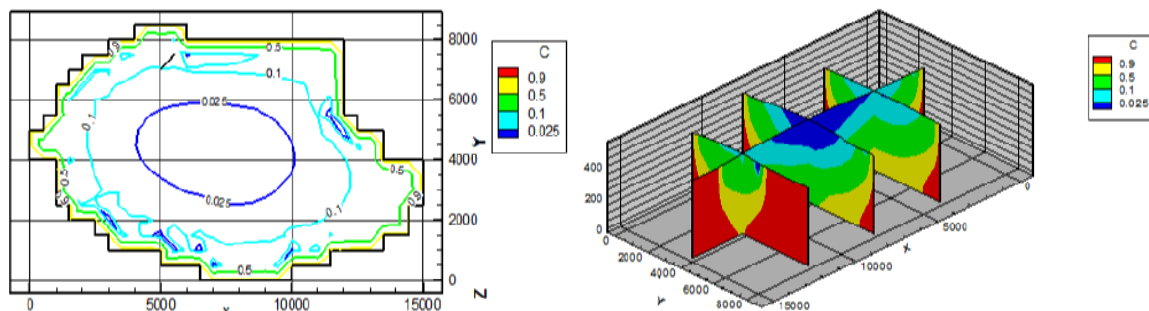
نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و سپاسگزاری خود را از سازمان منطقه آزاد کیش به سبب در اختیار گذاشتن اطلاعات و داده‌های مورد نیاز، اعلام می‌دارند.

تغذیه بر خط‌های واسنجی می‌باشد. در واقع واسنجی مدل عددی با متغیر فرض کردن میزان تغذیه حاصل از بارش در فصول مختلف سال، به نتایج متفاوتی منجر نخواهد شد. این ناشی از آن است که در فرایند واسنجی، شبیه‌سازی عددی در بازه زمانی بسیار طولانی تا رسیدن سیستم آب زیرزمینی به شرایط دائمی انجام می‌شود و لذا تغییرات درون سالی نرخ تغذیه بر نتایج نهایی تأثیری نخواهند داشت.

شکل ۶ طرحواره نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی لنز آب شیرین را در جزیره کیش نشان می‌دهد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

موضوع واسنجی خودکار مدل‌های عددی پیشروی آب شور که در این تحقیق مورد توجه ویژه قرار گرفته، از چند جنبه حائز اهمیت است: نخست آن که موفقیت فرآیند واسنجی مدل با روش معمول آزمون و خطا، تابع دانش و مهارت فردی و داشتن شناخت مناسب از ماهیت مدل است. در حالی که واسنجی مدل با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی معکوس، روشمند بوده و بر مبنای اصول ریاضی مشخصی صورت می‌گیرد. دوم آن که در



شکل ۶ خطوط هم‌غلظت شوری در تراز سطح دریا (بالا) و شکل سه‌بعدی خطوط هم‌غلظت شوری (پایین) در جزیره کیش در مدل واسنجی شده (واحد محورهای مختصات متر می‌باشد، کیفیت آب زیرزمینی به صورت شوری نسبی - اعداد بین ۰ تا ۱- گزارش شده است)

Aquiterria Consulting Pty Ltd (2000) "Ground Water Flow Modeling Guideline, Murray-Darling Basin Commission-Australia".

Ataie-Ashtiani, B., Ketabchi, H. (2011) "Elitist continuous ant colony optimization algorithm for optimal management of coastal aquifers", Water Resources Management, 25 (1), pp. 165-190.

Ataie-Ashtiani, B. (2007) "MODSHARP: regional-scale numerical model for quantifying groundwater flux and contaminant discharge into the coastal zone", Environmental Modeling & Software, 22 (2007), 1307-1315.

Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E. and Lockington, D.A. (1999) "Tidal effects on seawater intrusion in unconfined aquifers", Journal of Hydrology, 2-216:1, 3-17.

Doherty J. (2004) "PEST, Model independent parameter estimation, user manual: 5th edition", Watermark Numerical Computing, 336 pp.

Ghassemi F, Alam K, Howard KWF (2000) "Freshwater lenses and practical limitations of their three-dimensional simulation". Hydrogeol J 8: 521-537

Griggs, John E., Peterson, Frank L. (1993) "Groundwater flow dynamics and development strategies at the atoll", Groundwater, Vol 31, No 2, PP. 209-220

Hill M. C., Tiedeman C. R. (2006) "Effective groundwater model calibration, with analysis of data, sensitivities, predictions and uncertainties", John Wiley & Sons, USA.

Sanz, E. and Voss, C.I. (2006) "Inverse modeling for seawater intrusion in coastal aquifers: Insights about parameter sensitivities, variances, correlations and estimation procedures derived from the Henry problem", Advances in Water Resources v. 29, no. 3, p. 439-457.

Voss C. I., Provost A. M. (2008) "SUTRA: A Model for Saturated-Unsaturated, Variable-Density Ground-Water Flow with Solute or Energy Transport " U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4369.

Voss, C.I., Souza, W.R. (1987) "Variable density flow solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone", Water Resources Research, Vol. 23, No. 10, 1851-1866.

Wheater, H. S., Mathias, S. A., Li X. (2010) "Groundwater Modeling in Arid and Semi Arid Areas", Cambridge University Press. UK.

## ۶- فهرست علائم

$\rho$	چگالی سیال
$S_{op}$	فشار مخصوص
$p$	فشار سیال
$\varepsilon$	تخلخل خاک
$c$	غلظت سیال (نسبت وزن ماده محلول به وزن سیال)
$k$	نفوذپذیری ماتریس خاک
$\mu$	لزجت دینامیکی سیال
$g$	شتاب ثقل
$Q_p$	منبع سیال
$v$	سرعت میانگین حرکت سیال
$D_m$	ضریب پخش ملکولی
$D$	ماتریس پراکنندگی مکانیکی
$c^*$	غلظت ماده محلول در منبع سیال
$\alpha_L$	ضریب پخش طولی
$\alpha_T$	ضریب پخش عرضی
$R$	نرخ تغذیه
$K$	هدایت هیدرولیکی

## ۷- منابع

- تقی زاده ساحلی، پونه، ۱۳۸۷، بررسی مدل‌های مفهومی مناسب جهت شبیه سازی پیشروی آب شور، پایان نامه کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- طرح جامع ساماندهی سواحل و محیط زیست جزیره کیش، ۱۳۸۵، شرکت مهندسی مشاور سازه پردازی، سازمان منطقه آزاد کیش.
- عطائی آشتیانی، بهزاد، ۱۳۸۹، مطالعه بهره برداری مناسب و بهینه از منابع آب زیرزمینی جزیره کیش، گزارش نهایی، سازمان منطقه آزاد کیش، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- مریدی، علی، ۱۳۸۱، مدل‌سازی عددی لنز آب شیرین در جزایر کوچک، پایان نامه کارشناسی ارشد آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.