

## Modeling and Evaluation of Flood Spreading in Aquifer Using MODFLOW Code (Case Study: Salmas Plain Aquifer)

R. Shekari Tapeh<sup>1</sup>, A. Parvishi<sup>2\*</sup>, M. Ghanbarzadeh Lak<sup>3</sup>

### Abstract

Today, with the expansion of communities and their increasing groundwater exploitation, the scarcity of groundwater resources as a serious problem in most arid and semi-arid regions, is the main concern of managers and planners of the country's water sector. In the present study, it is intended to provide practical solutions by modeling the aquifer and applying the scenario of flood distribution to maintain and improve the aquifer condition. Since Salmas plain is located in the semi-arid region and also due to the uncontrolled abstraction, the Salmas aquifer suffers a severe crisis. To study the changes in groundwater level in Salmas aquifer after applying the flood distribution scenario, the MODFLOW mathematical code in GIS was used. The mathematical model was prepared and implemented for both steady and transient states. Then the flood spreading scenario was applied and the results showed that 2.6 million cubic meters is stored in the aquifer, which is equivalent to 44.7% of the total water fed to the aquifer. Applying the scenario, the water level increased on average by 13 cm at the end of October 2012, and the change in groundwater level was in the southern and middle part of the aquifer.

**Keywords:** Floodwater, MODFLOW, Groundwater Level, Salmas Plain, Artificial Recharge.

Received: July 24, 2021

Accepted: November 15, 2021

## مدل سازی و ارزیابی پخش سیلاب در آبخوان با استفاده از کد MODFLOW (مطالعه موردی: آبخوان دشت سلماس)

رضا شکاری تپه<sup>۱</sup>، علیرضا پرویشی<sup>۲\*</sup> و مهدی قنبرزاده لک<sup>۳</sup>

### چکیده

امروزه کمبود منابع آب زیرزمینی در اکثر مناطق خشک و نیمه خشک، با گسترش جوامع و بهره برداری روزافزون از آنها، بعنوان یک معضل جدی، دغدغه اصلی متولیان و برنامه ریزان بخش آب کشور می باشد. در تحقیق حاضر در نظر است با مدل سازی آبخوان و اعمال سناریوی پخش سیلاب جهت حفظ و بهبود وضعیت آن، راهکارهای عملی ارائه شود. باتوجه به قرارگیری دشت سلماس در منطقه نیمه خشک و همچنین برداشت بی رویه از آبخوان دشت، آبخوان سلماس به شدت دچار بحران شده است. برای بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان سلماس پس از اعمال سناریوی پخش سیلاب، از کد ریاضی MODFLOW موجود در GIS، استفاده شد. مدل ریاضی برای دو حالت پایدار و ناپایدار تهیه و اجرا شد و سپس سناریوی پخش سیلاب در مدل اعمال و خروجی ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد حجم آبی معادل ۲/۶ میلیون مترمکعب در داخل آبخوان ذخیره می شود که معادل ۴۴/۷ درصد کل آب تغذیه شده به آبخوان است و پس از اعمال سناریو در پایان مهر ۱۳۹۱، به طور متوسط، سطح آب ۱۳ سانتی متر افزایش یافت که تغییرات در سطح آب زیرزمینی در قسمت جنوبی و میانی آبخوان است.

**کلمات کلیدی:** سیلاب، MODFLOW، سطح آب زیرزمینی، دشت سلماس، تغذیه مصنوعی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۵/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲۴

1-M.Sc. Graduate of Water Resources Management Engineering, Department of Civil Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran. Email: reza.shekari1992@gmail.com

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran. Email: a.parvishi@gmail.com

3- Assistant Professor, School of Engineering, Civil Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran. Email: m.ghanbarzadehlak@urmia.ac.ir

\*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.3.21.6](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.3.21.6)

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.



آب زیرزمینی با استفاده از مدل (MODFLOW)، حوضه ریوگراند را شبیه‌سازی کردند. در تحقیقی دیگر (Yaouti et al. (2008) آبخوان آزاد بوآرگ (Bou-Areg) در شمال شرقی مراکش را تحت استرس‌های مختلف با استفاده از مدل (MODFLOW) شبیه‌سازی کردند که نتایج نشان داد تغییرات بار هیدرولیکی به تغییرات فصلی تغذیه بستگی دارد. (Callander and Thorley (2005). با استفاده از مدل MODFLOW آب‌های زیرزمینی شهر کریس چرچ در نیوزیلند را مدل‌سازی کردند. برای مدل‌سازی از داده‌های ماهیانه ۱۵۷ چاه تأمین آب شرب شهر استفاده شد. آن‌ها با استفاده از روش مدل‌سازی معکوس و کد PEST، پارامترهای هدایت هیدرولیکی و تغذیه را تخمین زده و سپس با استفاده از مدل MODPATH داده‌های ۳۱ چاه انتخابی، خطوط جریان آب زیرزمینی را جهت بررسی تغییرات جریان آب‌شور و شیرین بررسی کردند. (Jusseret et al. (2009) در تحقیقی جریان آب زیرزمینی در محدوده مرکزی شهر هانوی (Hanoi) در کشور ویتنام را با کمک کد MODFLOW 2000 به صورت مدل سه بعدی برای سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴ تهیه کردند. این مدل هم در شرایط پایدار و هم در شرایط ناپایدار اجرا شد. نتایج نشان داد که فرضیات مفهومی که برای دوره ساخت مدل پذیرفته شده، قابل قبول است. به کمک مدل جهت جریان آب زیرزمینی در این محدوده مشخص شد. همچنین، اهمیت نسبی منابع مختلف ورودی و تبادلات بین آب‌های زیرزمینی و رودخانه سرخ در این منطقه تعیین گردید. Biheri and Medhad (2009) در پژوهشی به مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی دلتای راسودر (Rassudr) واقع در وادی سودر (Sudr) در کشور مصر با استفاده از MODFLOW پرداختند. اهداف این مطالعه تعیین پارامترهای هیدرولیکی، تخمین میزان تغذیه و همچنین تعیین وضعیت هیدروشیمی آبخوان این محدوده بود. آن‌ها با استفاده از این مدل موفق به تعیین جهت جریان آب‌های زیرزمینی، محاسبه مقدار هدایت هیدرولیکی و تخمین میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی شدند.

(Gaura et al. (2011). یک روش جدید جهت ارزیابی منابع آب زیرزمینی با ترکیب مدل‌سازی عددی و به کارگیری مدل‌سازی مکانی با استفاده از GIS ارائه دادند. این مدل‌سازی ترکیبی، در حوضه رودخانه بنگانای هند استفاده شد. در این تحقیق مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی بالا، از طریق مدل‌سازی مکانی و تهیه نقشه‌های موضوعی شناسایی شد. سپس جریان آب زیرزمینی برای منطقه مورد مطالعه با کد MODFLOW مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که افزایش تخلیه از چاه‌ها، تنش بسیاری روی آبخوان اعمال می‌کند. لذا با ایجاد یک سری مناطق مستعد برای استحصال آب باران می‌توان از افت سطح آب زیرزمینی در منطقه جلوگیری کرد. (Wang et al. (2015)

مشکل کمبود آب قابل استفاده و یافتن روش‌های صحیح حفاظت و مدیریت منابع آبی، از جمله مهمترین دغدغه‌های زیست‌محیطی در جهان و به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک به شمار می‌رود. افزایش دمای کره زمین و تغییرات آب و هوایی و در نتیجه آن کاهش نزولات جوی از یک سو و از طرف دیگر، رشد جمعیت و افزایش نیاز روز افزون به آب برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی، باعث اضافه برداشت منابع آبی به خصوص منابع آب زیرزمینی در سالیان اخیر شده است (Bayat et al., 2020; Godrati and Barzegari, 2016; Navari, 2001). این مسأله به نوبه خود مشکلاتی از قبیل کاهش سطح ایستابی، فرونشست زمین، تغییر در پوشش گیاهی مناطق و کاهش عملکرد زمین‌های کشاورزی را به همراه داشته است. با توجه به برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی از آبخوان دشت سلماس در سنوات گذشته، لزوم اجرای طرح‌های مدیریت و بازیابی منابع آب زیرزمینی در این منطقه، آشکار می‌گردد (Consulting Engineers, 2014) Water and sustainable development, 2014) در این راستا یکی از روش موجود برای مدیریت و بازیابی منابع آب زیرزمینی، روش پخش سیلاب می‌باشد (Hashemi et al., 2013; Seiler and Gat, 2007) که می‌توان با مدل‌سازی با استفاده از GMS عملکرد آن را مورد بررسی و مطالعه قرار داد. GMS با استفاده از دو مؤلفه مدل مفهومی<sup>۱</sup> و مدل ریاضی<sup>۲</sup>، آبخوان‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و نتایج را ارائه می‌دهد. مدل مفهومی در واقع تصویر ساده شده از کل آبخوان و مدل ریاضی مجموعه‌ای از روابط ریاضی هستند که با فرضیاتی خاص، فرآیندهای فیزیکی درون آبخوان را مقدار دهی و محاسبه می‌کنند. پیش از این نیز محققان از این روش برای بررسی آبخوان‌ها استفاده کرده‌اند. برای مثال Dupuit, Theim, Boussinesq و Forshhaymer از اولین کسانی بودند که از قانون داریسی جهت مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی بهره برده‌اند (Zheng and Bennett, 2002).

(Javadi et al. (2021) در تحقیقی بر روی آبخوان یاسوج به منظور بررسی اثر بخشی پروژه پخش سیلاب، با ترکیب مدل‌های تصمیم‌گیری، مدل‌سازی عددی آب زیرزمینی با استفاده از کد MODFLOW و تکنیک خوشه‌بندی، به این نتیجه رسیدند که بیشترین افزایش سطح آب زیرزمینی در خوشه‌های ۲ و ۶ بوده که در قسمت‌های شمالی و غربی آبخوان قرار گرفته است. همچنین سطح آب زیرزمینی در این محدوده‌ها به اندازه ۴۳ و ۲۷ سانتی متر افزایش را نشان می‌داد. (Douglas and Peggy (2002). به منظور یافتن ارتباط بین جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی و همچنین تهیه مدل

درصدی آبدهی چاه‌های بهره‌بردار، این مقدار افت به طور چشم گیری بهبود پیدا خواهد نمود.

Senthilkumar (2011)، اثرات احداث یک سد زیرزمینی را بر جریان آب زیرزمینی حوضه رودخانه Palar در کشور هند با استفاده از GMS شبیه‌سازی کرد. مدل برای یک دوره ۱۱ ساله از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۲ و به کمک روش آزمون و خطا واسنجی شد. نتایج مدل‌سازی در این حوضه، افزایش ۰/۱ تا ۰/۳ متری سطح آب زیرزمینی در ۱/۵ تا ۲ کیلومتری بالادست سد را نشان داد در حالی که در قسمت پایین دست ۰/۱ تا ۰/۲ متر کاهش در سطح آب زیرزمینی مشاهده شد. Naseri et al. (2012)، به منظور بررسی نفوذ آب زیرزمینی به قطعه شرقی- غربی تونل خط هفت متروی تهران با استفاده از (GMS) به این نتیجه رسیدند که عوامل تأثیرگذار بر نوسانات سطح آب زیرزمینی و در نهایت بر میزان نشست در تونل، تراکم و میزان پمپاژ چاه‌ها، میزان فاضلاب، بارش و نفوذپذیری می‌باشد. در پایان، نتایج مدل‌سازی تفاضل محدود و روش‌های تحلیلی برای زون‌های مختلف مسیر تونل با هم مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که میزان نفوذ به دست آمده از روابط تحلیلی به نتایج مدل نزدیک است. همچنین در گذشته برخی محققان (Amineh et al., 2017; Shafiei and Ghanbarzadeh Lak, 2020-a,b; Yousefi et al., 2019) اقدام به مکان‌یابی محل مناسب اجرای تغذیه مصنوعی کرده‌اند ولی هیچ‌کدام به بررسی تأثیر و راستی آزمایشی آن در آبخوان مورد تحقیق نپرداخته‌اند.

در تحقیق حاضر با استفاده از نتیجه حاصل از مکان‌یابی محل اجرای پخش سیلاب با استفاده از GIS و روش تحلیل سلسله‌مراتبی در دشت سلماس، یک مدل ریاضی به منظور بررسی تغییرات و نوسانات سطح آب زیرزمینی و همچنین میزان آب ذخیره شده در آبخوان دشت سلماس، در صورت اجرای پخش سیلاب، تهیه گردید. از جمله نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به بررسی اثرات پخش سیلاب در محل مورد نظر در مدت زمان کوتاهی (۶ ماه) و (۱۹ ماه) پس از اجرای پروژه پخش سیلاب در محدوده مورد نظر اشاره داشت که در پژوهش‌های پیشین مورد بررسی دیگر محققان قرار نگرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- موقعیت منطقه

محدوده مورد مطالعه در این مقاله، آبخوان دشت سلماس است. محدوده مطالعاتی سلماس با کد ۳۰۰۱، در استان آذربایجان غربی قرار گرفته و مساحت کلی آن ۲۷۴۸/۸ کیلومتر مربع می‌باشد (حدود ۵/۳ درصد کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه) که از این میزان، دشت سلماس

تحقیقی به بررسی اثرات شدت بارش بر تغذیه آب‌های زیرزمینی به صورت آزمایشگاهی پرداخته و نتایج آزمایشگاهی را با نتایج حاصل از کد MODFLOW صحت‌سنجی کردند. نتایج نشان داد که افزایش بارش تا مقدار ۲۵ میلی‌متر بر ساعت باعث افزایش سرعت جریان آب‌های زیرزمینی شده و برای بارش بیش از این مقدار، سرعت جریان آب زیرزمینی کمتر خواهد بود. (Chen et al. 2013). یک مدل ریاضی تحلیلی جریان آب زیرزمینی در حالت دائمی برای یک آبخوان آزاد تهیه کردند. در این پژوهش تغییرات میزان تبخیر و تراز آب در نظر گرفته شده و نتایج مدل تحلیلی با یک مدل عددی که بر پایه MODFLOW انجام شده بود، مقایسه شده است. نتایج نشان داد که اختلاف سطح آب فقط در نزدیکی چاه‌های بهره‌بردار که تغییرات تراز به شکل مخروطی می‌باشد، قابل توجه است. همچنین مدل تحلیلی به اندازه مناسبی با مدل عددی همخوانی دارد. (Sobeih et al. 2017)، با انجام شبیه‌سازی با استفاده از مدل عددی جریان آب زیرزمینی (MODFLOW)، به پیش‌بینی تأثیر توسعه آبی بر جریان و سطوح آب زیرزمینی در منطقه‌ای که به سمت جنوب کانال El در منطقه دلتای رود نیل غربی گسترده شده است، پرداختند. این مدل نشان داد که حدود ۲۸ میلیون متر مکعب آب‌سطحی به طور عمده از کانال‌های آبیاری و آب آبیاری اضافی به آب‌های زیرزمینی نفوذ می‌کند و در حدود همان مقدار نیز، آب‌های زیرزمینی از طریق چاه‌های تولیدی، زهکش‌های روباز و از طریق برخی از کانال‌های آبیاری، تخلیه می‌شود.

(Pourhaghi et al. 2016)، در تحقیقی بر روی منابع آب زیرزمینی دشت دلفان، لرستان، که به دلیل بهره‌برداری بیش از حد مجاز، با افت شدیدی مواجه شده است (به طوری که در خلال سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۱ به طور متوسط سالانه ۰/۸۱- متر افت داشته و از این رو نیاز به مدیریت بهینه منابع آب دارد)، نرخ تأثیرگذاری عملیات مدیریتی بر وضعیت آبخوان، از طریق مدل‌سازی عددی را بررسی نمودند. برای این منظور با استفاده از مدل (MODFLOW) برای یک دوره ۵ ساله با ۶۰ دوره تنش، مدل‌سازی انجام شد. به علت نوسانات کمتر تراز آب زیرزمینی، مهرماه سال ۱۳۸۶ به عنوان شرایط پایدار مورد واسنجی قرار گرفت. واسنجی مدل برای شرایط ناپایدار، از آبان ۱۳۸۶ تا آبان ۱۳۹۱ انجام شد و شرایط در سال ۱۴۰۳ پیش‌بینی گردید. در ادامه به منظور پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان دو گزینه ادامه روند فعلی بهره‌برداری و کاهش ۲۰ درصدی بهره‌برداری چه در شرایط خشکسالی و چه ترسالی، تدوین و مدل مجدداً برای ۱۰ سال آینده اجرا شد. اجرای مدل در شرایط خشکسالی و ترسالی نشان داد سطح آب زیرزمینی در ۱۰ سال آینده به ترتیب ۷/۸ و ۵/۸۳ متر افت می‌کند که با کاهش ۲۰

حداکثر آن ۸۲۵۹ مترمربع در روز مربوط به اراضی میانی دشت می‌باشد (Consulting Engineers, Water and Sustainable Development, 2014). شکل ۱ محل و موقعیت آبخوان سلماس در حوضه آبریز درجه ۲ و زیرحوضه آن در کشور و همچنین رودخانه‌های موجود و چاه‌هایی که آزمون پمپاژ در آن‌ها انجام شده است را نشان می‌دهد.

## ۲-۲- مراحل تهیه مدل آب زیرزمینی

### ۲-۲-۱- تقسیم زمان به دوره‌های زمانی

در اولین قدم از شروع مدل‌سازی آب زیرزمینی در GMS لازم است برای انجام محاسبات در حالت ناپایدار، متغیر زمان در معادلات وارد شود.

حدود ۵۳۹ کیلومتر مربع را به خود اختصاص داده است. حداکثر ارتفاع محدوده مطالعاتی حدود ۳۰۰۰ متر از سطح آب‌های آزاد و حداقل آن حدود ۱۲۷۰ متر (در حواشی دریاچه ارومیه) است. رودخانه زولاچای به عنوان اصلی‌ترین رودخانه در این محدوده، از ارتفاعات مرزی ترکیه سرچشمه گرفته و از سمت غرب به شرق جریان دارد. هیچ جریان سطحی به این محدوده مطالعاتی وارد نمی‌شود و جریان سطحی خروجی از آن نیز به محدوده مطالعاتی جزایر دریاچه ارومیه تخلیه می‌گردد. آبخوان دشت سلماس به مساحت ۳۶۶ کیلومتر مربع، دارای ۹۲۵ حلقه چاه بهره‌برداری مجاز، ۲۶ حلقه چاه پیزومتریک، ۲ رشته چشمه و ۱۰ رشته قنات بوده و متوسط ضخامت آبخوان آبرفتی دشت سلماس ۹۰ متر می‌باشد. به طور کلی قابلیت انتقال طبقات آبدار در مسیر رودخانه زولاچای ارقام بالایی را نشان می‌دهد. حداقل قابلیت انتقال معادل ۲۱۱ متر مربع در روز در اراضی جنوب شرقی آبخوان و

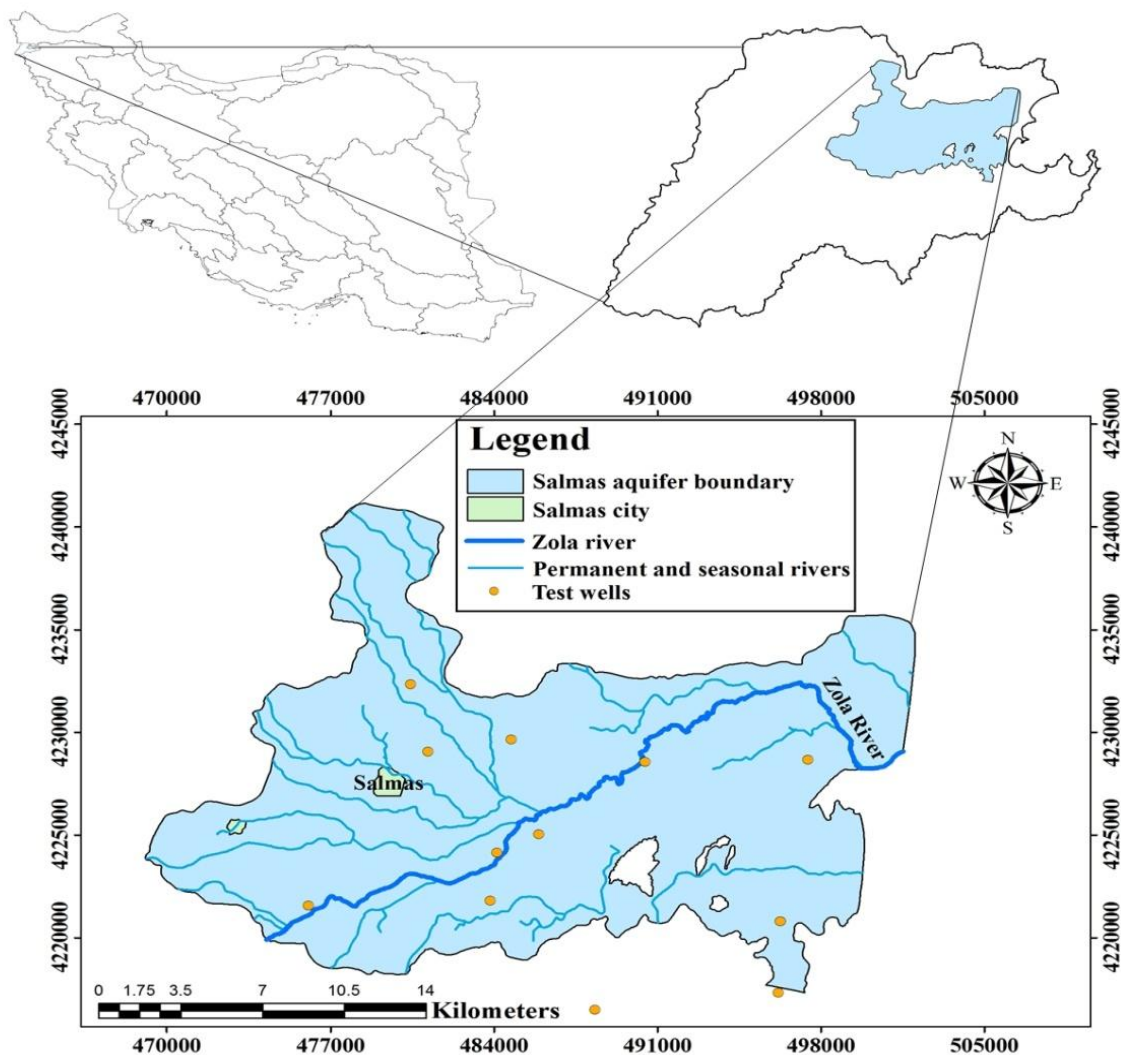


Fig. 1- Location of Salmas aquifer under the relevant basin and the rivers and the test wells

شکل ۱- موقعیت آبخوان سلماس در زیر حوضه مربوطه، رودخانه‌ها و چاه‌های مورد آزمون پمپاژ

زمان مورد مطالعه (t) به اجزای کوچکتر ( $\Delta t$ ) تقسیم شده بطوری که هر قدر این جزء زمانی کوچکتر باشد، دقت محاسبات بیشتر خواهد شد اما حجم محاسبات افزایش می‌یابد. در مدل‌سازی آب زیرزمینی به این جزء دوره تنش<sup>۳</sup> گفته می‌شود.

در این تحقیق، دوره تنش معادل یک سال در نظر گرفته شده (مهرماه سال ۱۳۸۹ تا شهریورماه سال ۱۳۹۰) و این دوره تنش دارای ۱۲ گام زمانی است. انتخاب بازه زمانی یک ساله برای مدل‌سازی آب زیرزمینی در تحقیقات دیگران نیز مورد عمل بوده است (Lalezari and Karachian, 2017; Manabi et al., 2018; Taheri and Kamali, 2019; Taheri et al., 2018). شایان ذکر است در مطالعه کنونی، هدف اصلی انتخاب سناریوی محل پخش سیلاب در منطقه‌ای مفروض می‌باشد. به بیان دیگر، مجموعه فعالیت‌هایی پیش از مدل‌سازی GMS صورت گرفته و نتیجه آن کلاسه‌بندی محدوده دشت سلماس به مناطق بسیار مناسب تا بسیار نامناسب از نقطه نظر اجرای حوضچه پخش سیلاب بوده است. در ادامه سعی شده است با استفاده از ابزارهای مطمئن مدل‌سازی و با صرف زمان منطقی، نتیجه احداث حوضچه در بازه زمانی کوتاه محاسبه گردیده (از نظر میزان تأثیرگذاری بر سطح آب زیرزمینی در آبخوان) و در مدل تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۲-۲-۲- مدل ریاضی

شبیه‌سازی شرایط طبیعی آبخوان با استفاده از یکسری روابط ریاضی با هدف ایجاد مدل ریاضی در سفره آب زیرزمینی انجام می‌شود. مدل ریاضی شامل نوشتن یک برنامه یا کد کامپیوتری می‌باشد که به کد MODFLOW داده شده است. معادله حاکم در این مدل‌سازی عبارت است از (رابطه ۱):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن  $K_{xx}$ ،  $K_{yy}$ ،  $K_{zz}$  ضرایب هیدرولیکی در راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  بر حسب واحد طول بر زمان ( $L/T$ )؛  $S_y$  آبدهی ویژه آبخوان که به ضریب ذخیره نیز مصطلح است بر حسب درصد؛  $W$  میزان تخلیه بر حسب حجم؛  $h$  سطح آب بر حسب واحد طول ( $L$ ) و  $t$  زمان؛ هستند.

#### ۲-۲-۳- اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی

کد MODFLOW به کار رفته در GMS به تعدادی پارامتر به عنوان ورودی مدل نیاز دارد که از بین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

نقشه‌های توپوگرافی محدوده مورد مطالعه از سازمان جغرافیایی کشور تهیه شده است. نقشه‌های موقعیت رودخانه‌ها و جریان‌ها و دریاچه‌ها، هیدروگراف آب زیرزمینی و تراز آب‌های سطحی و نرخ تخلیه، نقشه‌های توزیع ضریب انتقال آبخوان، نقشه‌های نشان‌دهنده خصوصیات ذخیره آبخوان، مقادیر هدایت هیدرولیکی در مرزهای ورودی و خروجی آبخوان و توزیع آن در بستر رودخانه‌ها، تخلیه آبخوان، تعامل آب‌های سطحی و زیرزمینی و مقادیر پمپاژ آب‌های زیرزمینی و زهکشی آبخوان، همگی از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی تهیه گردید.

در این تحقیق بر اساس اندازه آبخوان دشت سلماس، ابعاد سلول‌ها  $500 \times 500$  متر در نظر گرفته شده است و بدین ترتیب کل محدوده شامل ۷۸ سطر و ۱۱۰ ستون می‌باشد. تراز سطح زمین در کل محدوده آبخوان به صورت نقاط ارتفاعی در قالب شیپ فایل و تراز کف آبخوان که از نتایج حفاری‌های اکتشافی بدست آمده است، ابتدا مرتب‌سازی شده و سپس در نرم‌افزار ArcGIS در قالب شیپ فایل رقومی گردید. سپس هر دوی نقشه‌های تراز سطح و کف آبخوان که در قالب شیپ فایل هستند، به صورت جداگانه با استفاده از ماژول (2D SCATTER POINT) وارد مدل آب زیرزمینی شده و با استفاده از درونیابی به روش کریجینگ، تراز سطح زمین، تراز کف آبخوان و تراز سطح آب زیرزمینی مشخص شد که در شکل‌های ۲ تا ۴ آورده شده است.

داده‌های عوارض مختلف در محدوده آبخوان نظیر رودخانه‌ها، چاه‌های بهره‌برداری، چاه‌های مشاهده‌ای نیز در قالب شیپ فایل به صورت رقومی از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی دریافت و وارد مدل شده است که در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب چاه‌های بهره‌برداری و پیزومتری مشاهده می‌شود.

#### ۲-۲-۴- طراحی مدل جریان

این بخش شامل طراحی مدل و تفسیر داده‌های مدل مفهومی و انتقال آن به کد MODFLOW می‌شود. کد MODFLOW پس از دریافت داده‌های ورودی بر اساس معادلات و شرایط حاکم بر مدل، آنالیزها و محاسبات لازم را انجام داده و خروجی حاصل را در قالب فایل‌های متناسب ارائه می‌دهند. نتایج این محاسبات می‌تواند سطح تراز آب هر سلول، بیلان آب و جهت و زمان حرکت در سلول یا مجموعه سلول‌ها باشد.

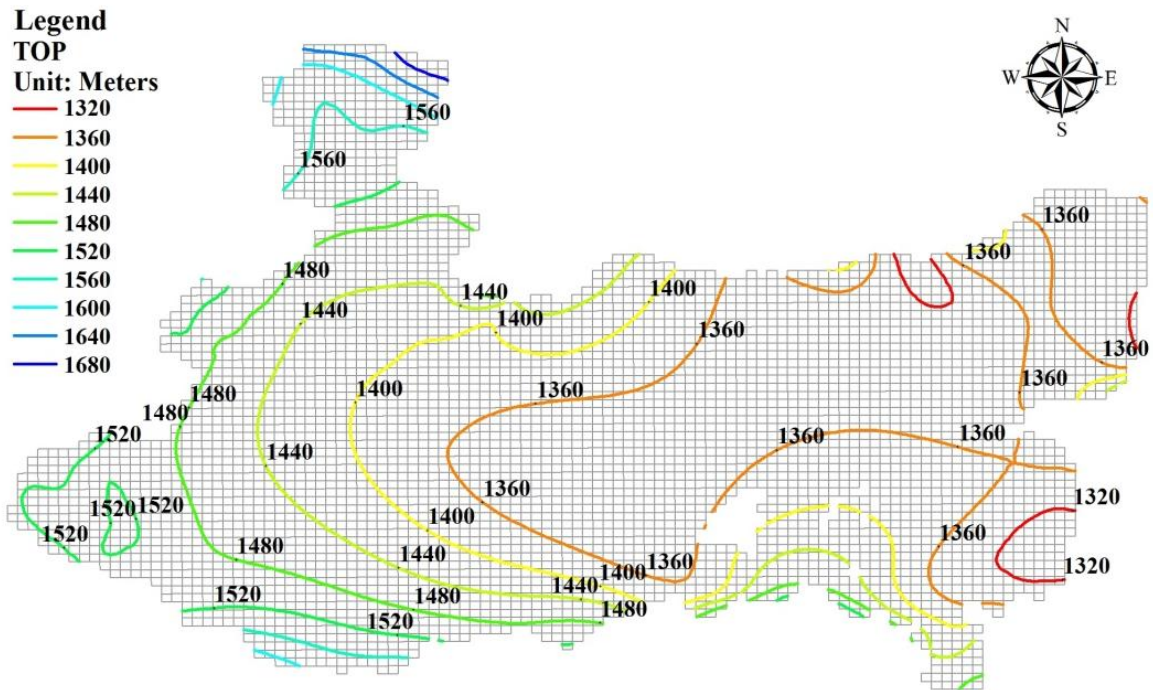


Fig. 2- Ground level map  
 شکل ۲- نقشه تراز سطح زمین

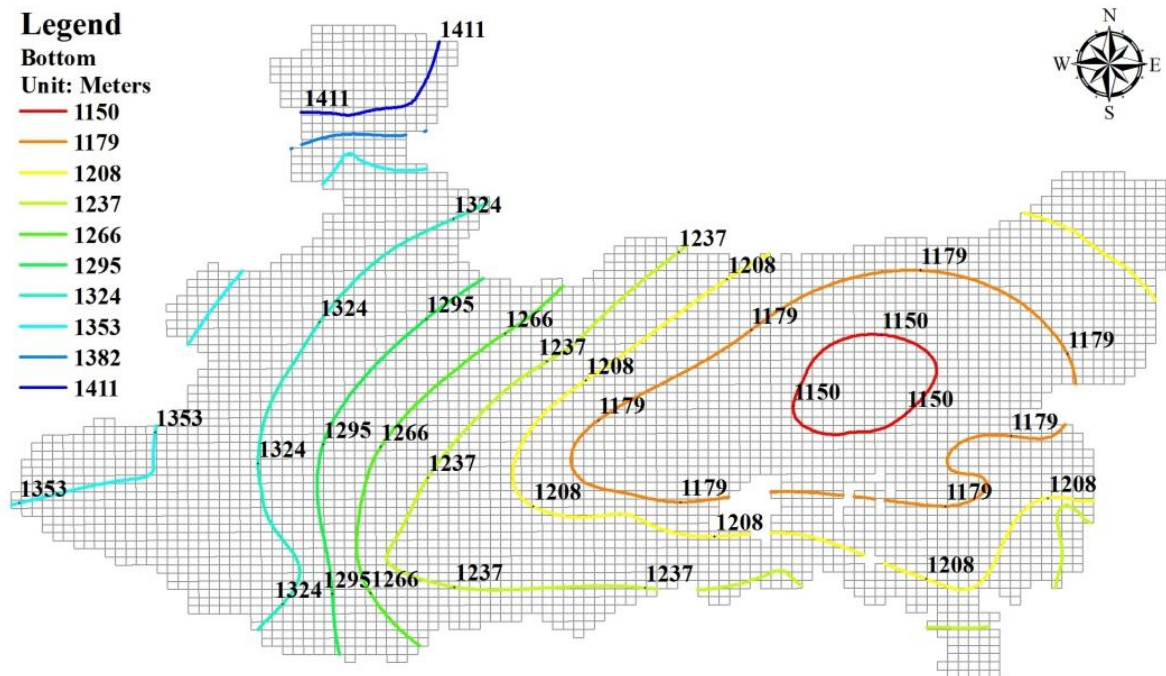


Fig. 3- Aquifer bed level  
 شکل ۳- نقشه تراز کف آبخوان

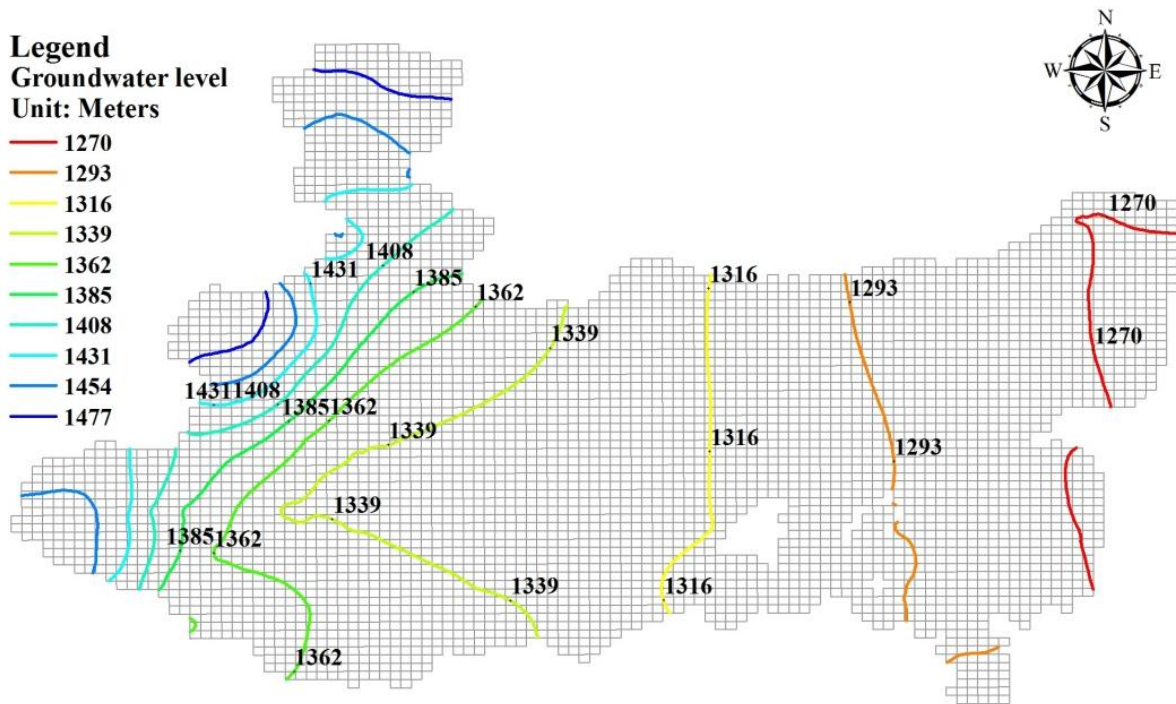


Fig. 4- Groundwater level  
 شکل ۴- نقشه تراز سطح آب زیرزمینی

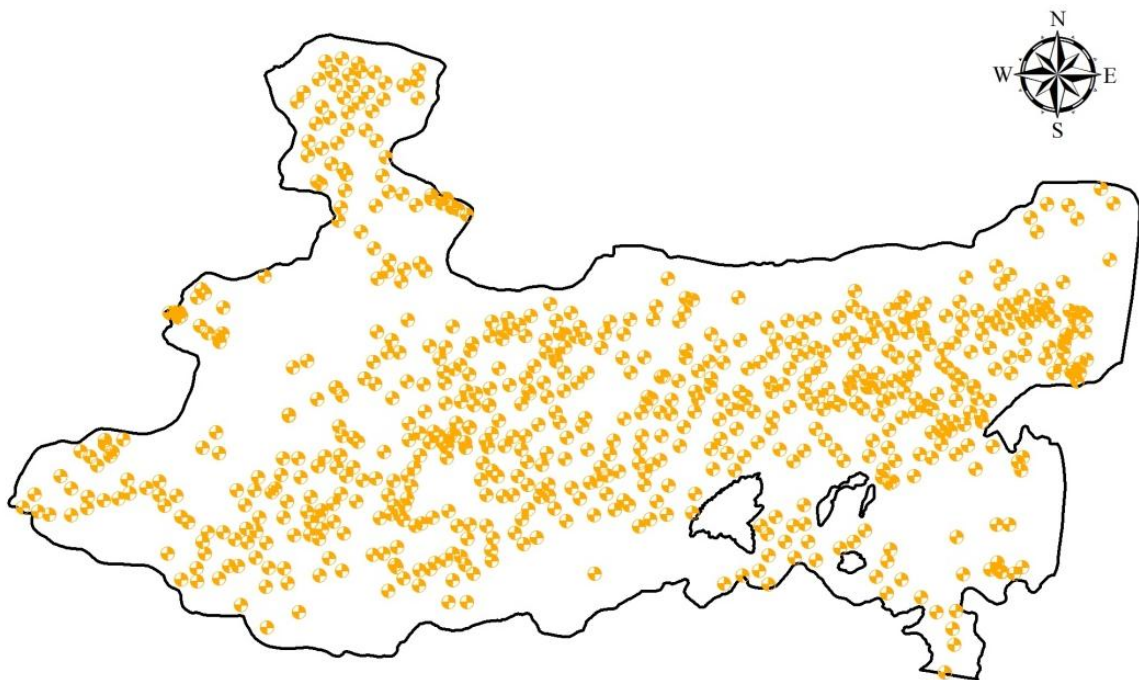
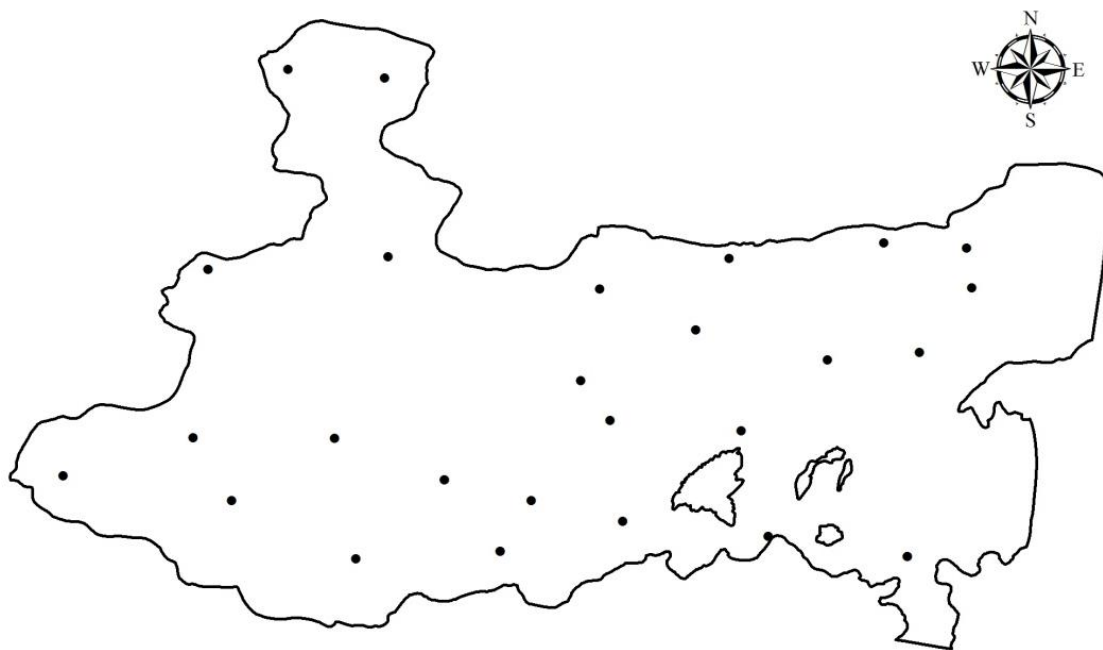


Fig. 5- Operating wells in the aquifer area  
 شکل ۵- چاه‌های بهره‌برداری موجود در محدوده آبخوان



**Fig. 6- Piezometric wells in the aquifer area**  
**شکل ۶- چاه‌های پیزومتري موجود در محدوده آبخوان**

مدل، مدل آماده اجرا می‌باشد. برای این منظور نسبت به بررسی خطاهای احتمالی اقدام و پس از حذف خطاها مدل اجرا شد.

#### ۲-۲-۷- واسنجی مدل

واسنجی عبارت است از فرآیند پیدا کردن مجموعه‌ای از شرایط مرزی، تنش‌ها و پارامترهای هیدروژئولوژیک که نتایج به دست آمده از آن به صورت بسیار نزدیکی بر اندازه‌گیری‌های بار هیدرولیکی و جریان‌های صحرائی برازش دارد. در این مدل پارامترهای مختلفی مورد واسنجی قرار می‌گیرد از جمله: میزان آب ورودی به آبخوان از طریق مرزهای آبخوان، هدایت هیدرولیکی، ذخیره ویژه و سنگ کف. در این مرحله ابتدا میزان هدایت هیدرولیکی منطقه در یک دوره برای شرایط پایدار واسنجی شد (دوره مورد نظر مهر ماه ۱۳۸۹ است). میزان هدایت هیدرولیکی توسط مدل با استفاده از نرم‌افزار PEST که در درون GMS قرار دارد، براساس اطلاعات موجود برای هر سلول، محاسبه شده است.

جهت واسنجی جریان‌های زیرزمینی ورودی و خروجی آبخوان از نقشه منحنی تراز آب زیرزمینی و نقشه محل و موقعیت رودخانه‌های دائمی و فصلی دشت سلماس، همچنین از اطلاعات موجود در گزارش بیان محدود مطالعه‌ای سلماس (Consulting Engineers, Water and )

#### ۲-۲-۵- تغذیه، تخلیه و بیان آبخوان

آبخوان دشت سلماس از منابع مختلفی تغذیه و تخلیه می‌گردد که عبارتند از: ۱- جریان زیرزمینی ورودی به آبخوان، ۲- تغذیه مستقیم از ریزش‌های جوی در سطح دشت، ۳- تغذیه از نفوذ آب‌های جاری در سطح دشت، ۴- تغذیه از آب برگشتی از مصارف شرب، صنعت و کشاورزی، ۵- تخلیه آب توسط پمپاژ از چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌ها، ۶- جریان زیرزمینی خروجی از آبخوان، ۷- تخلیه به روش زهکشی از آبخوان و ۸- تبخیر از آبخوان.

#### ۲-۲-۶- شرایط مرزی و اولیه مدل

پس از مشخص کردن پارامترهای زمانی و پارامترهای هیدرولوژیک و هیدروژئولوژیک برای هر سلول و تعیین شرایط مرزی، به منظور شناسایی مناطق تغذیه و تخلیه زیرزمینی و محاسبات میزان تغذیه و تخلیه از نقشه خطوط هم تراز سطح آب زیرزمینی دشت و ترسیم شبکه جریان و همچنین مدل مفهومی استفاده شد. برای انتخاب شرایط اولیه نیز بایستی یک ماه را که کمترین میزان نوسانات اقلیمی را دارد به عنوان مبنا جهت حل معادله دیفرانسیل حاکم بر جریان در نظر گرفت. این ماه، مهر ۱۳۸۹ در نظر گرفته شد. پس از ورود کلیه لایه‌ها و ساخت



## ۲-۲-۸- اجرای مدل در حالت پایدار

در مرحله سوم بعد از واسنجی و اطمینان از مدل ساخته شده، اقدام به اجرای مدل آب زیرزمینی گردید که نتایج حاصل در بخش نتایج و بحث، بررسی خواهند شد.

## ۲-۲-۹- اجرای مدل آب زیرزمینی و شبیه‌سازی در حالت ناپایدار

در ادامه و در حالت ناپایدار، مدل برای سال ۸۹-۹۰ ساخته شده و همچنین مدل از نظر زمانی نیز تقسیم‌بندی می‌شود. عملیات واسنجی بر اساس خطای کاسته شده در مرحله پایدار، علاوه بر پارامترهای تغذیه از سطح، تغذیه و یا زهکشی شبکه آبراهه‌ای، جریان‌های ورودی و خروجی مرزهای تراوا، بر روی پارامتر ضریب ذخیره (آبدهی ویژه) نیز انجام می‌شود.

## ۲-۲-۹-۱- گسسته‌سازی زمانی برای حالت ناپایدار

در این مرحله پارامترهایی که در طول زمان تغییر می‌کنند مانند میزان

در شکل (Sustainable Development, 2014) استفاده شده است. در شکل (۷) موقعیت و محل قرارگیری مرزهای ورودی و خروجی (اعداد بالایی) و ضریب توانایی مرز عمومی برای عبور جریان آب (اعداد پایینی) مشاهده می‌شود. موقعیت مرزهای ورودی و خروجی آبخوان با توجه به اطلاعات ارائه شده در گزارش بیلان (Consulting Engineers, Water and Sustainable Development, 2014) تعیین گردید. به منظور تدقیق مرزها، با روی هم قراردادن نقشه موقعیت رودخانه‌ها و جریان‌های سطحی دائمی و فصلی در محدوده آبخوان و نقشه موقعیت مرزها که در گزارش بیلان ارائه شده، طول و موقعیت اولیه مرزها تعیین گردید. در ادامه پس از ساخت مدل، خطای موجود در مدل اصلاح و مدل اجرا شد. در مرحله واسنجی نیز طول مرزها، توانایی عبور دهی آب از طریق مرزها و تراز هیدرولیکی مربوطه، واسنجی گردید. در نهایت موقعیت و طول اصلی مرزها مطابق شکل ۷ مشخص شده است. در رابطه با مشخصات مقاطع و حجم جریانات زیرزمینی ورودی و خروجی آبخوان هم از اطلاعات موجود در گزارش بیلان استفاده شد تا بیشترین نزدیکی را با سطح آب اندازه‌گیری شده در محل پیژومترها داشته باشد.

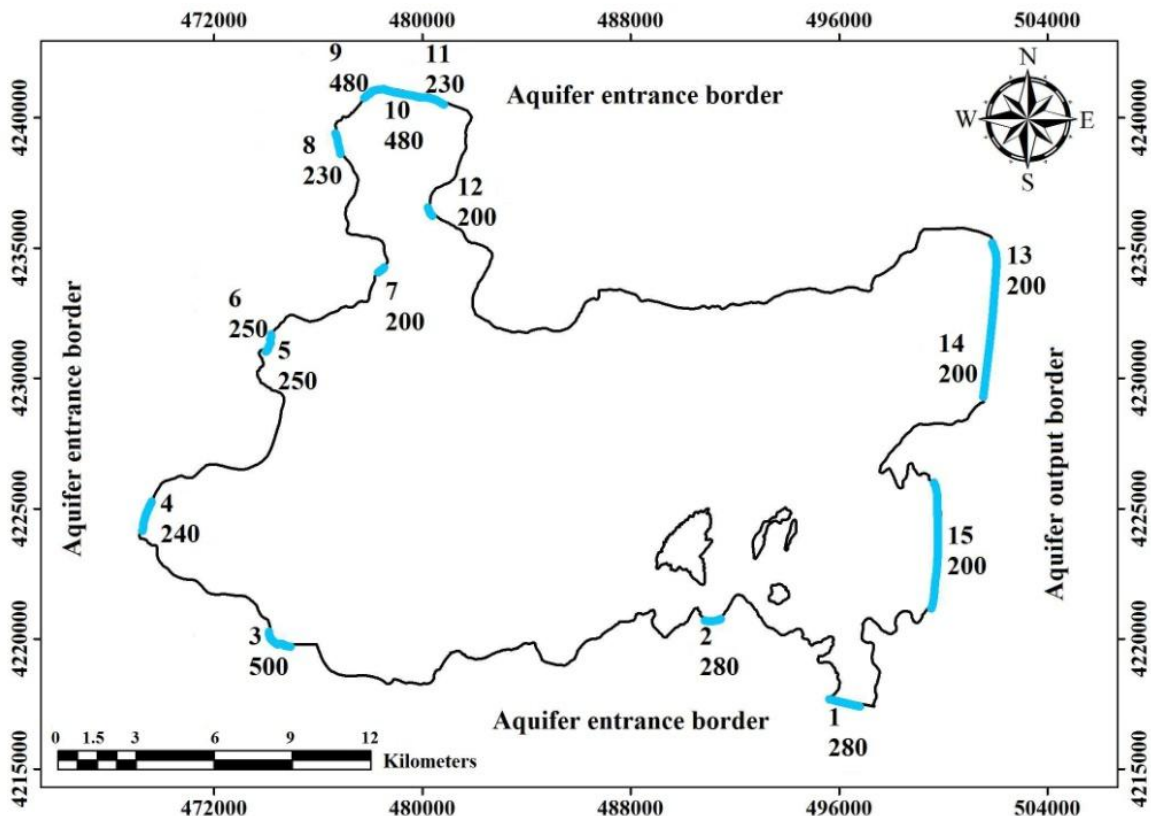


Fig. 7- Location of entrance and output borders

شکل ۷- موقعیت و محل قرارگیری مرزهای ورودی و خروجی

تغذیه از سطح آبخوان، میزان تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری و حجم جریان‌های زیرزمینی ورودی و خروجی، در نظر گرفته شده و بر اساس تنش‌های موجود در این پارامترها، تقسیم‌بندی زمانی صورت می‌گیرد. بر این اساس یک واحد زمانی سالیانه برای سال ۹۰-۸۹ با ۱۲ گام زمانی ماهانه در نظر گرفته شد و طول هر یک از دوره‌ها برابر با تعداد روزهای ماه می‌باشد.

### ۲-۹-۲-۲- واسنجی مدل در حالت ناپایدار

پس از واسنجی مدل در حالت پایدار، سطح آب به دست آمده به عنوان شرایط اولیه به مدل داده شد و مدل برای ۱۲ گام زمانی ماهانه واسنجی شد. پارامترهای مختلفی مانند آبدهی ویژه، میزان تغذیه از سطح، ضریب توانایی مرزهای ورودی و خروجی برای عبور جریان آب و سایر پارامترهای دخیل در طی فرایند واسنجی در حالت ناپایدار تغییر داده می‌شود و هدایت هیدرولیکی در این گام ثابت باقی می‌ماند چون در حالت پایدار واسنجی شده است. این پارامترها تا زمانی واسنجی می‌شود که روند هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی در بازه قابل قبول واقع شود و RMSE حداقل شده باشد (Milan et al., 2018).

### ۲-۹-۲-۳- تصحیح ضریب ذخیره

با توجه به واسنجی شدن پارامتر هدایت هیدرولیکی در مرحله قبل (حالت پایدار)، در این مرحله تمرکز اصلی بر واسنجی نمودن ضریب ذخیره می‌باشد. با توجه به دامنه تغییرات ضریب ذخیره در دشت سلماس (حداکثر ۰/۳۳ و حداقل ۰/۰۷۵)، مقادیر مناسب ضریب ذخیره در مدل برای هر منطقه به صورت پلیگونی مشخص شد. در این قسمت با انتخاب پلیگون‌های مختلف و سعی و خطا، مقدار ضریب ذخیره بدست آمد.

### ۲-۹-۲-۴- تحلیل حساسیت

حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترهای هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و تغذیه از سطح زمین، انجام شد. در مرحله حساسیت‌سنجی، هر یک از پارامترهای مذکور به اندازه  $\pm 10\%$ ،  $\pm 20\%$  و  $\pm 30\%$  درصد تغییر داده شدند و مدل در هر مرحله اجرا گردید. تغییرات شاخص RMSE جهت تحلیل حساسیت مورد بررسی قرار گرفت.

### ۳-۲- اعمال سناریوی پخش سیلاب در مدل

پس از ساخت مدل و ورود کامل اطلاعات به GMS و واسنجی کردن مدل در دو بخش پایدار و ناپایدار، نهایتاً با اعمال سناریوی پخش

سیلاب که در بخش اول مطالعه حاضر در محدوده آبخوان دشت سلماس از روش تصمیم‌گیری سلسله مراتبی (AHP) بدست آمده است، حوضچه‌ای با مساحت ۲۰۰،۰۰۰ متر مربع در نظر گرفته شد که توانایی تغذیه آبخوان معادل ۰/۱۶۱۲۹ متر در روز را دارد. این مقدار در طی ۳ ماه در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد به مدل آب زیرزمینی اعمال شد. شکل ۸ محل تغذیه مصنوعی در دشت سلماس را نشان می‌دهد. لازم بذکر است در مقاله حاضر صرفاً نتایج مطالعات مکانیابی مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۳- نتایج و بحث

همان‌طور در بخش قبل بیان شد، پس از ساخت مدل و قبل از اجرای آن در شرایط پایدار نیاز است که مدل واسنجی شود. در این بخش دو مورد از نتایج حاصل، مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. برای نمونه شکل‌های ۹ و ۱۰ مقادیر میان‌یابی نقاط پایلوت ضریب هدایت هیدرولیکی افقی در مرحله واسنجی پایدار و نقشه واسنجی شده مقادیر تغذیه از سطح آبخوان را نشان می‌دهند. مطابق با شکل ۹، مناطقی که دارای رنگ آبی هستند هدایت هیدرولیکی بالاتری داشته (حداکثر ۲۸/۹۳ متر در روز) به طوری که در سطح زمین در این مناطق، رودخانه‌های فصلی و دائمی عبور می‌کنند. همچنین، مطابق با گزارش بیان منطقه، ضرایب هیدرودینامیکی مخازن آب زیرزمینی از قبیل قابلیت انتقال، قابلیت نفوذ و ضریب ذخیره بر اساس آزمایشات پمپاژ محاسبه گردیده و حداکثر رقم قابلیت انتقال در جنوب و جنوب غربی به سمت نواحی مرکزی دشت سلماس مشاهده شده است. این امر مؤید وجود رسوبات دانه درشت با جور شدگی مناسب در این منطقه است (Consulting Engineers, Water And Sustainable Development, 2014). یافته اخیر خود دلیلی برای بالا بودن هدایت هیدرولیکی در این محدوده می‌باشد. در شکل ۱۰ نقشه واسنجی شده مقادیر تغذیه از سطح آبخوان مشاهده می‌شود که میزان بارندگی در قسمت شمال شرقی دشت بیشتر از سایر مناطق و به اندازه ۰/۰۰۰۸ (متر در روز) می‌باشد.

پس از اجرای مدل در حالت پایدار همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، مقایسه بین داده‌های محاسباتی و مشاهده‌ای سطح آب در پیژومترها حاکی از آن است که انطباق مناسبی بین داده‌های محاسباتی و مشاهده‌ای سطح تراز آب زیرزمینی وجود دارد.

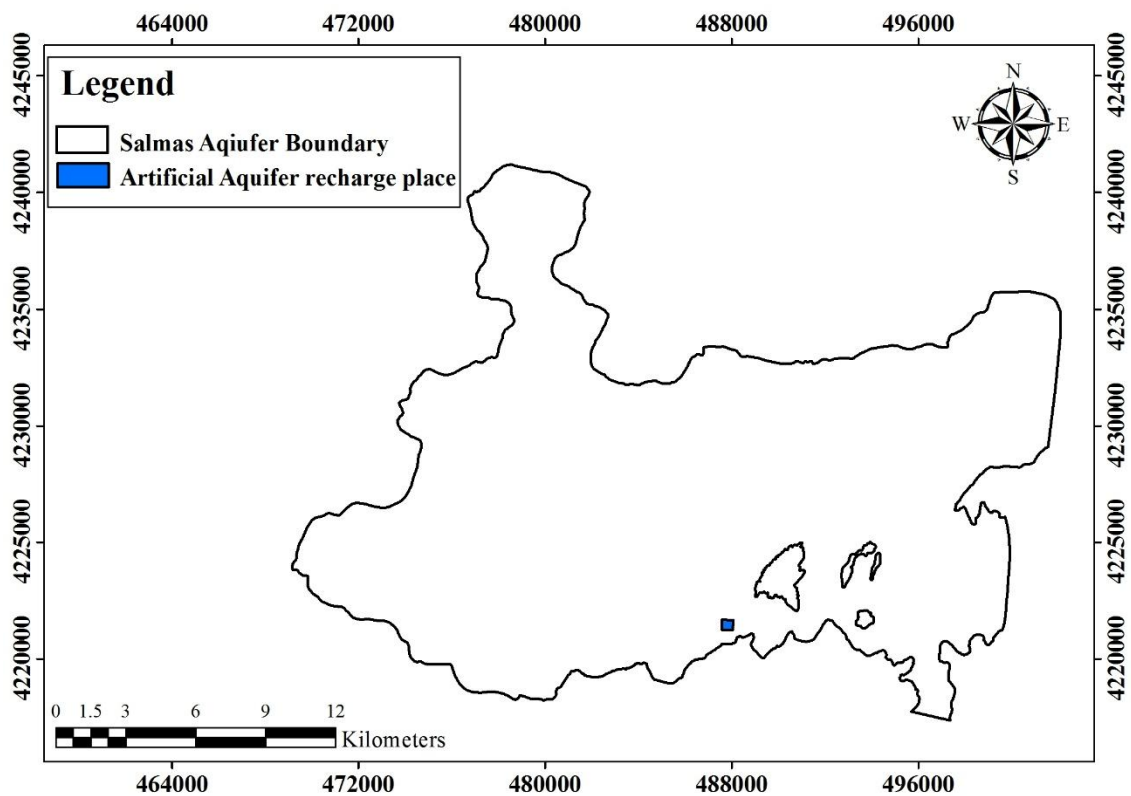


Fig. 8- Location of aquifer artificial recharge basin

شکل ۸- موقعیت حوضچه تغذیه مصنوعی آبخوان

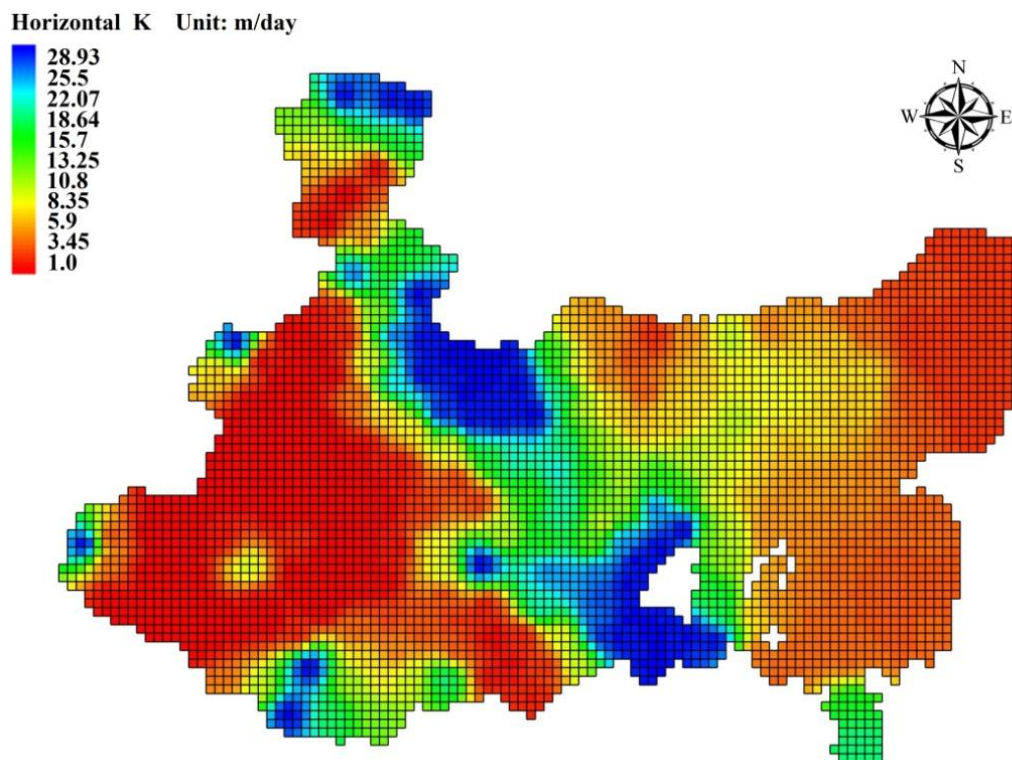


Fig. 9- Interpolation values of horizontal hydraulic conductivity in steady state calibration stage

شکل ۹- مقادیر میان یابی ضریب هدایت هیدرولیکی افقی در مرحله واسنجی پایدار

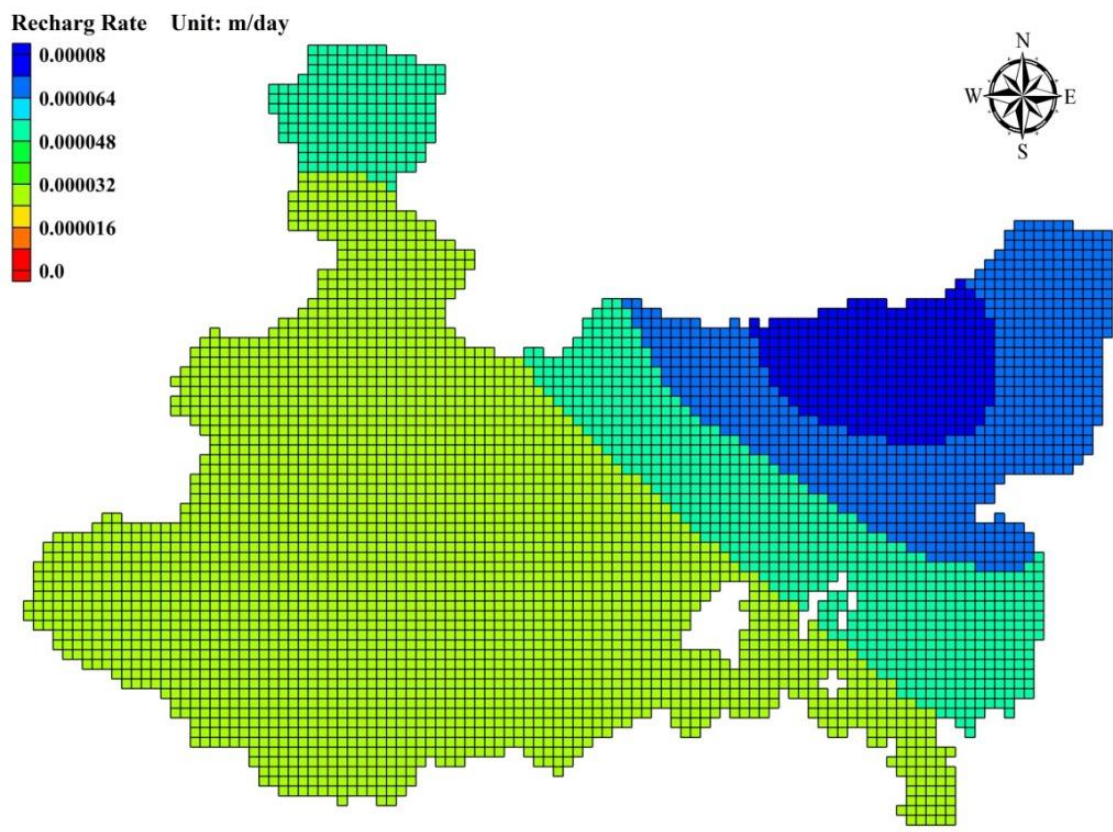


Fig. 10- Calibrated map of aquifer recharge values from the surface  
 شکل ۱۰- نقشه واسنجی شده مقادیر تغذیه آبخوان از سطح زمین

Computed vs. Observed Values  
 Head

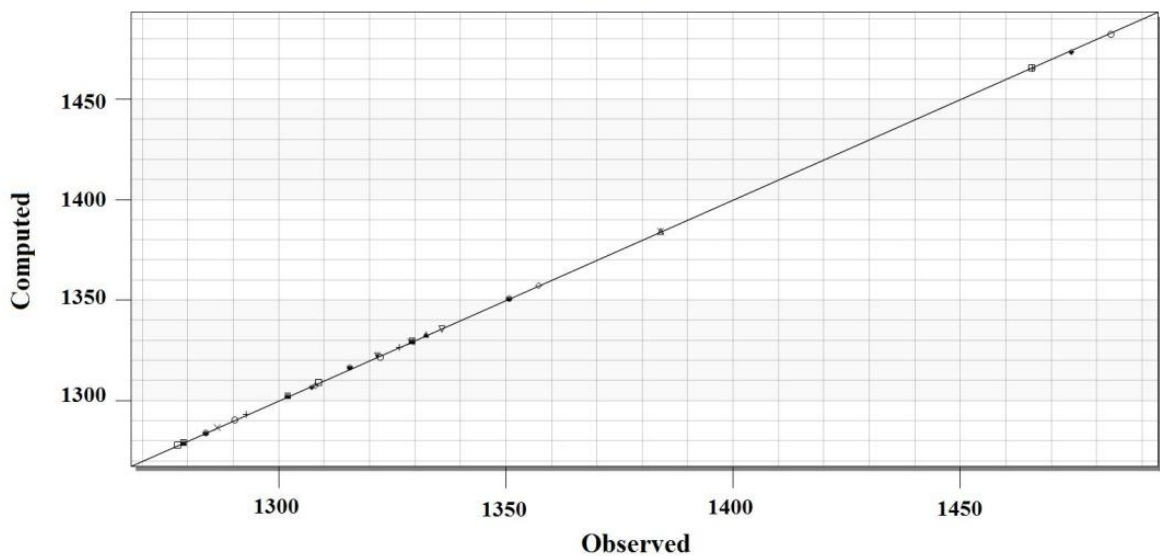


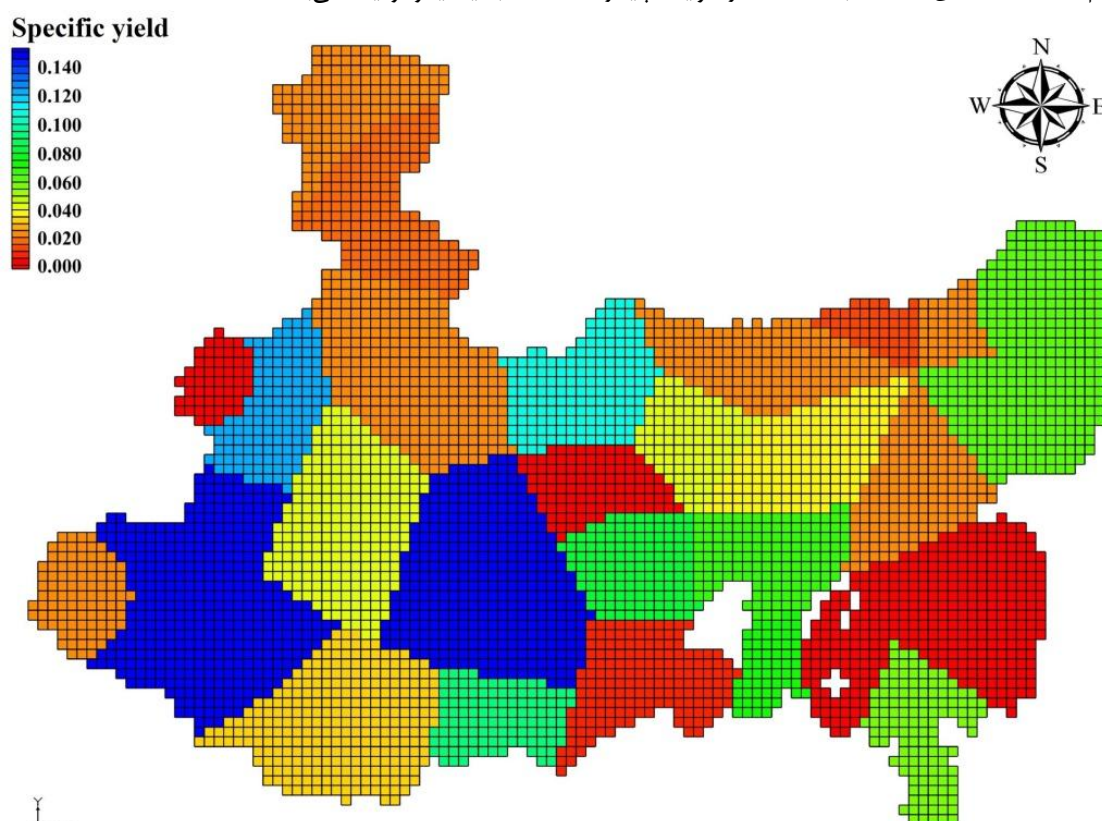
Fig. 11- Fitting of the computational and observed hydraulic load in steady state condition  
 شکل ۱۱- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای در حالت پایدار

خطای قابل قبول و مجاز بسته به هدف مدل‌سازی متفاوت است. در طول واسنجی کردن مدل میزان خطای RMSE مدنظر است هرچه این خطا به صفر نزدیکتر باشد، مدل از دقت و صحت بالایی برخوردار خواهد بود (Milan et al., 2018). در حالت پایدار میزان خطای موجود معادل ۰/۴۲ متر محاسبه شد که دقت محاسبات را نشان می‌دهد.

پس از اتمام ساخت و اطمینان از صحت مدل ساخته شده در حالت پایدار، به بررسی نتایج مدل در حالت ناپایدار پرداخته می‌شود. در شکل ۱۲ زون‌بندی آبدهی ویژه بعد از واسنجی در حالت ناپایدار مشاهده می‌شود. این نقشه با توجه به دامنه تغییرات ضریب ذخیره در دشت سلماس (حداکثر ۰/۳۳ و حداقل ۰/۰۷۵) به روش سعی و خطا به دست آمد.

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در حالت ناپایدار به علت درنظر گرفتن پارامترها به صورت متغیر، نتایج حاصل به شرایط واقعی نزدیک است. علت متفاوت بودن مجموع جریان‌ها (ورودی و خروجی) با اعداد اعلامی در گزارش بیلان، نبود اطلاعات دقیق و کافی در خصوص چاه‌های بهره‌برداری و دقت پایین اطلاعات در طی مراحل آماربرداری و به طور خلاصه خطای انسانی می‌باشد. با توجه به بیلان ارائه شده از مدل‌سازی و بیلان ارائه شده در گزارش می‌توان مشاهده کرد که نتیجه نهایی بیلان دشت در هر دو حالت منفی بوده و این اعداد به یکدیگر نزدیک می‌باشند.

صحت مدل را می‌توان با تحلیل نتایج بیلان محاسباتی، مقایسه کسری مخزن و افت ناشی از آن با هیدروگراف معرف منطقه مدل و همچنین با اعمال دوره تنش متفاوت از دوره تنش مرحله واسنجی، مورد بررسی قرار داد (Godrati and Barzegari, 2016). در تحقیق حاضر، مدل‌سازی آبخوان برای یک دوره یک ساله (مهر ۸۹ تا شهریور ۱۳۹۰) انجام شده است. خطای RMSE بدست آمده در شرایط ناپایدار،



**Fig. 12- Specific yield zoning**  
**شکل ۱۲- زون‌بندی آبدهی ویژه**

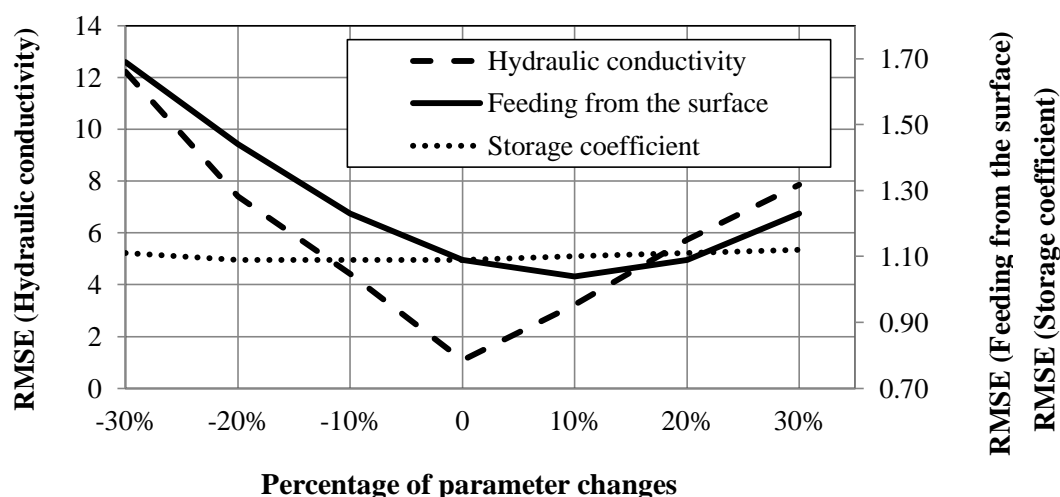
توجه به شکل ۱۳ مدل نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی بسیار حساس بوده و همان طور که مشاهده می‌شود با تغییر (افزایش یا کاهش) مقادیر هدایت هیدرولیکی به اندازه ۱۰ درصد، مقدار خطا با شیب تندی افزایش یافته که در نهایت با تغییر افزایشی به اندازه ۳۰ درصد، خطای مدل به ۷/۸۵ متر رسیده و با کاهش آن به اندازه ۳۰ درصد، به ۱۲/۲۲ متر می‌رسد.

همچنین، مشاهده می‌شود بیلان مدل‌سازی شده دارای خطای کمتر از ۵ درصد در مجموع جریان‌های ورودی و خروجی نسبت به بیلان شرایط واقعی می‌باشد که می‌توان صحت مدل ساخته شده را تأیید کرد.

برای تحلیل حساسیت مدل در حالت ناپایدار مطابق آن چه که در روش تحقیق بیان شد عمل کرده و نتایج مطابق شکل ۱۳ بدست آمد. با

**Table 1- Transient model and validation balance**  
جدول ۱- بیلان مدل‌سازی شده در حالت ناپایدار و بیلان اعتبار سنجی

	Flow in ( $10^6 \text{ m}^3$ )		Flow out ( $10^6 \text{ m}^3$ )		Flow in - out ( $10^6 \text{ m}^3$ )	
	Components	Value	Components	Value		
Model outputs, transient state (Oct 2010-Sep 2011)	Subsurface flow	50.00	Withdrawals from wells, springs and aqueducts	162.00	<b>-2.05</b>	
	Influence of rainfall	6.42				
	Infiltration of surface runoffs	44.23				
	Infiltration of agricultural effluents	57.50	Underground output flow	5.40		
	Infiltration of drinking water and industry effluents	8.20	Drainage from the aquifer	1.00		
	<b>SUM</b>	<b>166.35</b>	<b>SUM</b>	<b>168.53</b>		
Balance of water resources (year 2010-2011)	Subsurface flow	53.85	Withdrawals from wells, springs and aqueducts	168.22	<b>-4.80</b>	
	Influence of rainfall	7.62	Underground output flow	4.34		
	Infiltration of surface runoffs	43.33		Drainage from the aquifer		2.74
	Infiltration of agricultural effluents	57.50				
	Infiltration of drinking water and industry effluents	8.20	<b>SUM</b>	<b>175.30</b>		
	<b>SUM</b>	<b>170.50</b>	<b>SUM</b>	<b>175.30</b>		



**Fig. 13- Sensitivity of the model to uniform change of parameters**  
شکل ۱۳- حساسیت مدل نسبت به تغییر یکنواخت پارامترها

زمان مدل‌سازی (از مهر ۹۰ تا مهر ۹۱) در شکل ۱۴ و ۱۵ میزان تغییرات سطح آبخوان بعد از اعمال سناریوی پخش سیلاب در ماه شهریور سال‌های ۹۰ و ۹۱ آورده شده است. شکل ۱۶ نیز میزان تغییرات سطح ایستابی در طول دوره مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

کمترین حساسیت نسبت به آبدهی ویژه می‌باشد که با افزایش و کاهش در مقادیر آن میزان خطای مدل کمترین میزان تغییر را از خود نشان می‌دهد. پس از ساخت و تکمیل مدل و اجرای آن می‌توان تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول یک سال (مهر ۸۹ تا شهریور ۹۰) را مشاهده نمود. همچنین، با اعمال داده‌های یک سال بعد از مدت

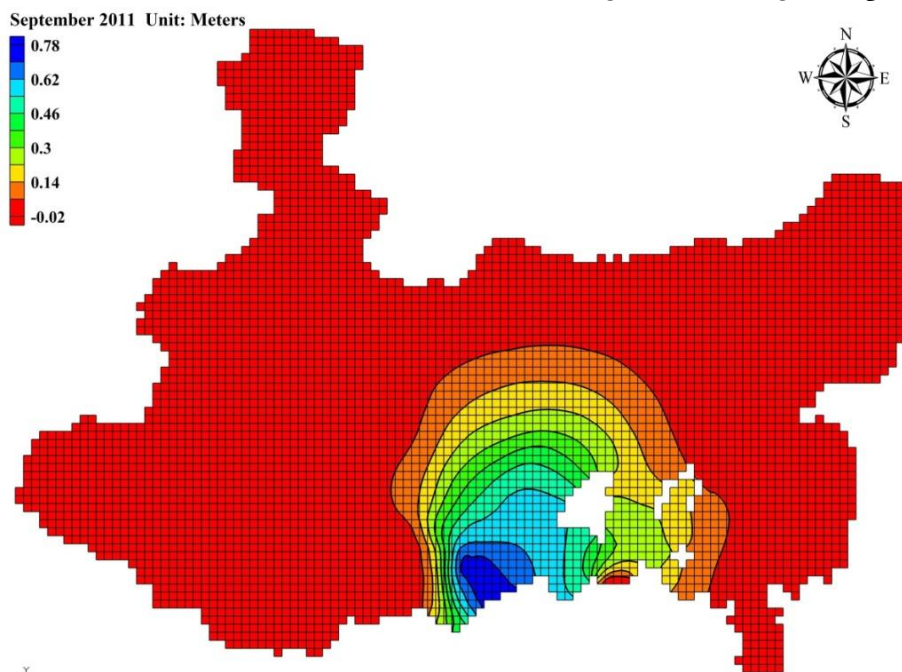


Fig. 14- Aquifer level changes when applying the scenario for September 2011

شکل ۱۴- تغییرات سطح آبخوان بعد از اعمال سناریو در ماه شهریور ۹۰

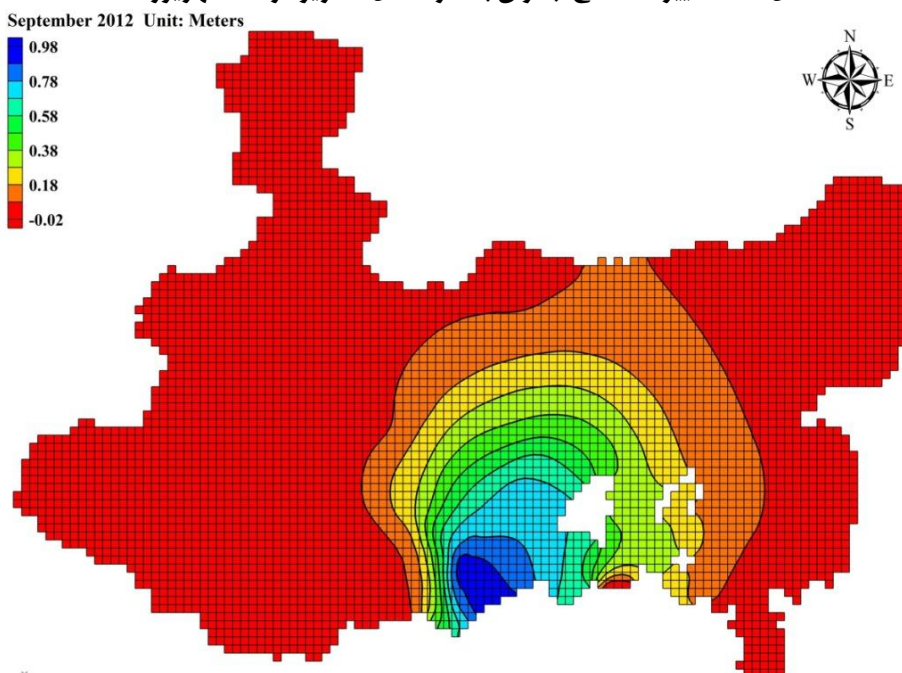


Fig. 15- Aquifer level changes when applying the scenario for September 2012

شکل ۱۵- تغییرات سطح آبخوان بعد از اعمال سناریو در ماه شهریور ۹۱

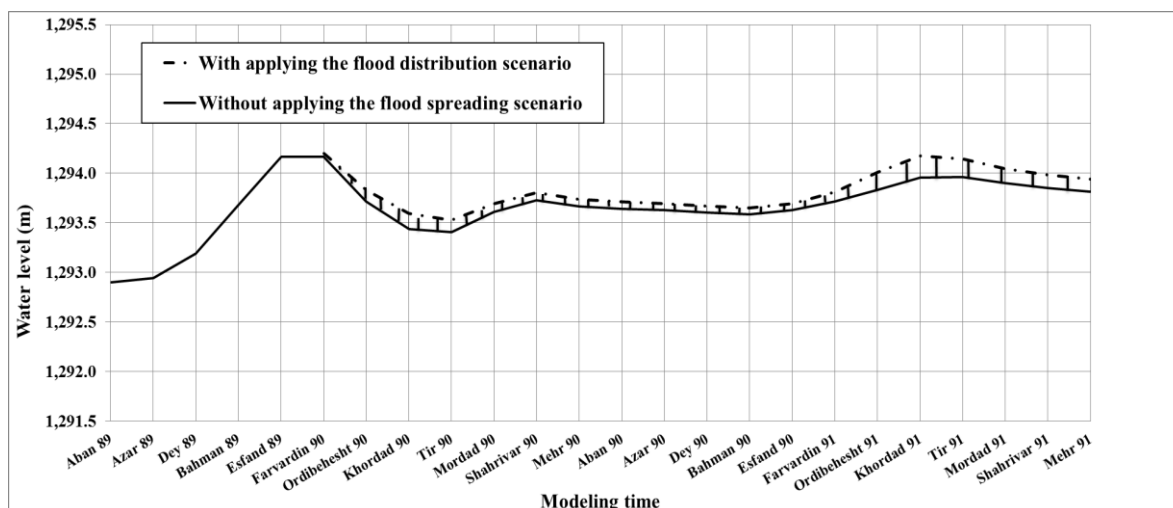


Fig. 16- The rate of water table changes during the modeling period

### شکل ۱۶- میزان تغییرات سطح ایستابی در طول دوره مدل سازی

سلماس تهیه شد در ادامه مدل در حالت پایدار و ناپایدار ساخته و واسنجی شد و مورد واسنجی و تحلیل حساسیت قرار گرفت. پس از اطمینان از صحت مدل با توجه به نتایج حاصل از اجرای آن، با اعمال سناریوی پخش سیلاب که با توجه به مطالعات انجام شده در محدوده آبخوان دشت سلماس از روش تصمیم‌گیری سلسله مراتبی بدست آمده است، تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول یک سال (مهر ۸۹ تا مهر ۹۱) محاسبه شد. این تغییرات سطح آبخوان از زمان شروع پخش سیلاب (فروردین ماه ۹۰) آغاز شده و تا پایان دوره مدل‌سازی (مهر ۹۱) هم ادامه دارد. در طول دوره مدل‌سازی حجم آبی معادل ۲/۶ میلیون مترمکعب در داخل آبخوان ذخیره می‌شود که معادل ۴۴/۷ درصد کل آب وارد به آبخوان از طریق تغذیه مصنوعی است. نتیجه گرفت که مکان‌یابی محل پخش سیلاب مناسب بوده و می‌تواند در بازیابی منابع آب زیرزمینی در این منطقه تأثیر مثبتی داشته باشد.

کشاورزی با توجه به مطالعات آمایش سرزمینی و از منابع آب سطحی و یا زیرزمینی انجام می‌گیرد. نظر به این که در سالیان اخیر آمار بارندگی در محدوده مطالعاتی سلماس روند نزولی نشان می‌دهد، لذا همراه با کاهش رواناب سطحی در منطقه تأمین آب مورد نیاز در بخش‌های مختلف این محدوده فشار مضاعفی را به آبخوان دشت سلماس وارد کرده است. تغذیه مصنوعی با استفاده از رواناب‌های سطحی به عنوان یک پیشنهاد کاربردی می‌تواند در شرایط بحرانی ضمن جلوگیری از فرونشست دشت کمک شایانی به مدیریت آب در محدوده مطالعاتی بنماید.

همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، در طول دوره مدل‌سازی (مهر ۸۹ تا مهر ۹۱) با اعمال سناریوی پخش سیلاب، تغییرات تراز آب زیرزمینی از (فروردین ماه ۹۰) آغاز شده و تا پایان دوره مدل‌سازی (مهر ۹۱) ادامه داشته است. در پایان دوره مدل‌سازی (مهر ۹۱)، سطح آب زیرزمینی نسبت به قبل از اعمال سناریو در حدود ۱۳ سانتی‌متر افزایش داشته است که تغییرات در قسمت جنوبی و میانی آبخوان می‌باشد. در طول دوره مدل‌سازی بعد از اعمال سناریو، حجم آبی معادل ۲/۶ میلیون مترمکعب در داخل آبخوان ذخیره می‌شود که معادل ۴۴/۷ درصد کل آب وارد به آبخوان از طریق تغذیه مصنوعی است. به طور کلی با توجه به حجم آب ذخیره شده در آبخوان می‌توان نتیجه گرفت که مکان‌یابی محل پخش سیلاب مناسب بوده و می‌تواند در بازیابی منابع آب زیرزمینی در این منطقه تأثیر مثبتی داشته باشد.

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

دشت سلماس یکی از دشت‌های ممنوعه شمال غرب کشور می‌باشد که در سالیان اخیر به دلیل برداشت‌های بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و کاهش نزولات جوی دچار کم‌آبی و بحران آب زیرزمینی شده و باید با استفاده از سناریوهای مدیریتی در حفاظت و نگهداری از منابع آبی این دشت تلاش نمود. بدین منظور در تحقیق حاضر بمنظور جبران افت سطح آب‌های زیرزمینی با توجه به برداشت‌های کنونی از آن و همچنین سیلاب‌هایی که در طول ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد ماه به دریاچه ارومیه تخلیه می‌شود، روش تغذیه مصنوعی در این دشت مورد مطالعه قرار گرفت. در صورت عملیاتی شدن نتایج این تحقیق، می‌توان حفاظت منابع آب‌های زیرزمینی در این دشت را انتظار داشت. در ابتدا اطلاعات مورد نیاز برای ساخت مدل آبخوان دشت



## پی‌نوشت‌ها

- 1- Conceptual Model
- 2- Mathematical Model
- 3- Stress Period
- 4- Analytical Hierarchy Process

## ۵- مراجع

- Ab-Niru (2009) Report of agricultural development and improvement plan-irrigation and specifications of irrigation and drainage network Zola irrigation network plan. Technical Report (In Persian)
- Amineh Z B A, Hashemian S J A D, & Magholi A (2017) Integrating Spatial Multi Criteria Decision Making (SMCDM) with Geographic Information Systems (GIS) for delineation of the most suitable areas for Aquifer Storage and Recovery (ASR). *Journal of Hydrology* 551:577-595
- Bayat M, Eslamian S, Shams G, Hajiannia A (2020) Groundwater level prediction through GMS software– Case study of Karvan area Iran. *Quaestiones Geographicae* 39(3):139-145
- Chen T F, Wang X S, Li H, Jiao J J, Wan L (2013) Redistribution of groundwater evapotranspiration and water table around a well field in an unconfined aquifer: A simplified analytical model. *Journal of Hydrology* 495:162-174
- Consulting Engineers Water and Sustainable Development (Ab va Toseye Paydar) (2014) Studies on updating the balance of water resources-study areas lake Urmia catchment leading to the water year 89-90. Technical Report (In Persian)
- Douglas M P and Peggy B (2002) Simulation of groundwater flow in the middle Rio grande basin between Cochiti and San Acacia New Mexico U.S. dept of the interior. U.S. Geological Survey 2002 Vol.2 I.4200
- Gaura Sh, Chahar B R, Graillota D (2011) Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13:127-139
- Godrati M, Barzegari F (2016) Mathematical models of groundwater applied learning of GMS 7.1. 2nd Edition. Simayedanesh 273p (In Persian)
- Hashemi H, Berndtsson R, & Persson M (2013) Floodwater harvesting for artificial recharge and spate irrigation in arid area. *Journal of Water Management and Research* 69(2):93-100
- Javadi S, Saatsaz M, Hashemy Shahdany SHM, Neshat A, Milan S G, Akbari S (2021) A new hybrid framework of site selection for groundwater recharge. *Geoscience Frontiers* 12(4):101144
- Jusseret S, Thanh Tam V, Dassargues A (2009) Groundwater flow in the central zone of Hanoi (Vietnam). *Hydrogeology Journal* 17:915-934
- Lalehzari R, Kerachian R (2017) Quantity and quality modeling of groundwater flow in Shahrekord aquifer. *Journal of Auifer and Qanat* 1(1):26-37 (In Persian)
- Manabi M, Egdernazhad A, Daneshian H (2018) Evaluation of Maroon irrigation and drainage network effect on groundwater resources in north Behbahan plain using modflow model (GMS Software Code). *Journal of Water Sciences and Engineering* 8(19):41-54 (In Persian)
- Medhad A, El Biheri (2009) Groundwater flow modeling of quaternary aquifer Ras Sudr Egypt. *Journal of Environmental Geology* 58:1090-1105
- Milan S G, Roozbahani A, Banihabib M E (2018) Fuzzy optimization model and fuzzy inference system for conjunctive use of surface and groundwater resources. *Journal of Hydrology* 566:421-434
- Naseri H, Zare S, Hasan P J, Morsali M (2012) Investigation of hydraulic characteristics of the aquifer located in the east-west section of the seven lines of Tehran metro tunnel during mechanized drilling with a view to the amount of water entering the tunnel. *Journal of Iranian Association of Engineering Geology* 4:63-74 (In Persian)
- Navari M (2001) Investigation of sea level changes and shore geometry on saline water in the coastal aquifer. M.Sc. Thesis, school of civil engineering, Sharif University of Technology (In Persian)
- Pourhaghi A, Radmanesh F, Maleki A (2016) Simulation of Delfan-Lorestan aquifer and investigation of management scenarios by using MODFLOW model. *Journal of Water and Soil* 29(4):886-897 (In Persian)
- Seiler K P, Gat J R (2007) Groundwater recharge from run-off, infiltration and percolation. *Springer Science & Business Media*, Vol. 55, 248pp.
- Senthilkumar M (2011) Modelling the impact of a subsurface barrier an groundwater flow in the lower Palar river basin southern India. *Journal of Hydrology* 19(4):917-928
- Shafiei M and Ghanbarzadeh Lak M (2019-a) Modeling of site selection process for artificial groundwater recharge (through flood spreading) based on GIS technique and AHP method (Case study: Khoy plain aquifer). *Iran-Water Resources Research* 14(5):219-236 (In Persian)

- Shafiei M and Ghanbarzadeh Lak M (2019-b) Prioritizing artificial groundwater nourishing-flood spreading scenarios, based on Analytical Network Process (ANP) (Case study: Khoy plain aquifer). *Iran-Water Resources Research* 14(4):147-163 (In Persian)
- Sobeih M, El-Arabi N, Helal E, Awad B (2017) Management of water resources to control groundwater levels in the southern area of the western Nile delta, Egypt. *Journal of Water Science* 31(2):137-150
- Taheri T A, Kamali M (2019) Groundwater modeling by MODFLOW model in Toyerkan aquifer and evaluation of hydrogeological state under present and future conditions. *Journal of Water Engineering* 12(40):89-104 (In Persian)
- Taheri Tizro A, Hosseini S A, & Kamali M (2018) Modeling alluvial aquifer using PMWIN software and evaluation of subsidence phenomenon in Asadabad plain, Hamedan Province, Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards* 7(17):121-136 (In Persian)
- Thorley M, Callander P (2005) Christchurch city groundwater model. Environment Canterbury Report U05/53:10p
- Wang H, Gao J E, Zhang M J, Li X H, Zhang S L, Jia L Z (2015) Effects of rainfall intensity on groundwater recharge based on simulated rainfall experiments and a groundwater flow model. *Catena* 127:80-91
- Yaouti F EI, Mandour A EI, Khattach D, Kaufmann O (2008) Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-Environment Research* 2(3):192-209
- Yousefi H, Younesi H, Shahnejad B, Arshia A, Mirzapour H, & Yarahmadi Y (2020) Flood spatial location detection by combining AHP and Fuzzy models using WLC method in GIS (Case Study: Khorramabad Watershed). *Iranian journal of Ecohydrology* 7(1):251-261 (In Persian)
- Zheng C, Bennett G D (2002) Applied contaminant transport modeling. Second Edition, John Wiley and Sons, New York, 621p