DOI: 10.22059/ijswr.2021.314786.668824 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۲، شماره ۷، مهر ۱۴۰۰ (ص ۱۷۵۱-۱۷۳۵)
(علمی – پژوهشی)

Effectiveness of Groundwater Resources Balancing Strategies for Landslide Control (Case Study: Varamin Study Area)

MOJTABA ZANGENEH[1], MAHDI SARAI TABRIZI[1*], AMIR KHOSROJERDI[1], ALI SAREMI[1]
1. Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
(Received: Dec. 5, 2020- Revised June. 2, 2021- Accepted: June. 8, 2021)

ABSTRACT

The main purpose of this study is to develop a multi-criteria decision model based on stakeholders in the study area of Varamin plain with the approach of aquifer subsidence control. One of the important tools for developing a decision model for land subsidence control is to use numerical models and evaluate different scenarios in these models. Due to the relationship and sensitivity of groundwater abstraction with subsidence, use of MODFLOW model to quantitatively simulate the aquifer and then use of SUB software package to simulate the amount of subsidence can determine this relationship well. Quantitative analysis and simulation of the subsidence model showed that the condition of the aquifer is critical and the rate of aquifer drop in a period of 5 years is more than 6 meters and subsequently the subsidence in the central parts of the aquifer will reach 37 cm. Accordingly, the effectiveness of these strategies was studied by considering 8 scenario strategies that are a combination of reducing the withdrawal of groundwater resources and artificial feeding of the aquifer. The results of weighting the criteria showed that the environmental criterion, which is related to the land subsidence adjustment index, has the highest weight with value of 0.27 and was introduced as the most important criterion in decision making. After evaluating the results and priorities of the solutions by COPRAS method, it was found that the A8 scenario is introduced as the first priority of aquifer treatment. The results also showed that by applying this scenario, the amount of subsidence will be reduced and the maximum amount of subsidence will be 23.5 cm in the central part of the aquifer. Finally, the quantitative status of the aquifer also improved by 76% compared to the forecast period (2024).

Keywords: Groundwater Balancing, Multi-Criteria Decision Making, Subsidence, Varamin Plain.

* Corresponding Author Email: m.sarai@srbiau.ac.ir

اثربخشی راهکارهای تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی برای کنترل فرونشست (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی ورامین)

مجتبی زنگنه[۱]، مهدی سرائی تبریزی[۱*]، امیر خسروجردی[۱] و علی صارمی[۱]

۱. گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۱۵- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۱۲- تصویب: ۱۴۰۰/۳/۱۸)

چکیده

هدف اصلی این پژوهش، تدوین یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر ذی‌نفعان و ذی‌مدخلان[۱] محدوده مطالعاتی دشت ورامین با رویکرد کنترل فرونشست آبخوان است. یکی از ابزارهای مهم جهت تدوین مدل تصمیم‌گیری برای کنترل فرونشست زمین استفاده از مدل‌های عددی و ارزیابی سناریوهای مختلف در این مدل‌ها می‌باشد. با توجه به ارتباط و حساسیت میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی با میزان فرونشست، استفاده از مدل MODFLOW جهت شبیه‌سازی کمّی آبخوان و سپس استفاده از بسته نرم‌افزاری SUB به‌منظور شبیه‌سازی میزان نشست زمین می‌تواند این ارتباط را به‌خوبی مشخص کند. تحلیل و شبیه‌سازی مدل کمّی و فرونشست، نشان داد که وضعیت آبخوان بحرانی بوده و میزان افت آبخوان در یک دوره ۵ ساله، بیش از ۶ متر بوده و متعاقب آن نشست زمین نیز در بخش‌های مرکزی آبخوان به ۳۷ سانتی‌متر خواهد رسید. بر این اساس با در نظر گرفتن ۸ راهکار علاج‌بخشی که تلفیقی از کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی و تغذیه مصنوعی آبخوان است، مطالعه اثربخشی این راهکارها انجام گرفت. بررسی نتایج وزن‌دهی معیارهای این پژوهش نشان داد که معیار زیست‌محیطی که مربوط به شاخص تعدیل نشست زمین است، دارای بیش‌ترین وزن و مقدار ۰/۲۷ است و مهم‌ترین معیار در تصمیم‌گیری معرفی گردید. پس از ارزیابی نتایج و اولویت‌های راهکارها با روش COPRAS مشخص گردید که راهکار A_8 به‌عنوان اولویت اول علاج‌بخشی آبخوان معرفی می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که با اعمال این راهکار میزان نشست زمین کاسته و حداکثر میزان نشست ۲۳/۵ سانتی‌متر در بخش مرکزی آبخوان خواهد بود. در نهایت وضعیت کمّی آبخوان نیز با اعمال این راهکار نسبت به دوره پیش‌بینی (۲۰۲۴) نیز ۷۶ درصد بهبود نشان داد.

واژه های کلیدی: تصمیم‌گیری چندمعیاره، تعادل‌بخشی آب زیرزمینی، فرونشست، دشت ورامین.

مقدمه

رشد و توسعه‌های انجام گرفته در دو دهه اخیر، بهره‌برداری بیش از توان منابع آب زیرزمینی و عدم مدیریت مناسب در عرضه و تقاضای منابع آبی باعث شده تا علاوه بر مشکلات کمّی در بخش منابع آب، مشکلات زیست‌محیطی نیز به‌وجود آید. یکی از مشکلات زیست‌محیطی که به‌صورت یک فرآیند خطر زمین‌شناسی[۲] بروز می‌کند، فرونشست است (Zavadskas *et al.*, 2009; Zavadskas *et al.*, 2018). این فرآیند می‌تواند ناشی از اکسیداسیون خاک‌های آلی[۳] (Nieuwenhuis & Schokking, 1997)، فروافتادگی آبفروچاله‌ها (Strzalkowski & Tomiczek, 2015)، حفره‌های معدنی (Choi *et al.*, 2010; Al Heib *et al.*, 2015)، تراکم طبیعی زمین (Deverel & Rojstaczer, 1996) و تحکیم ساختار زمین‌شناسی در اثر افت آب زیرزمینی (Jaffari *et al.*, 2016) رخ دهد. بررسی اجمالی عوامل مؤثر در شکل‌گیری فرونشست نشان می‌دهد که اکثر این عوامل زمان‌بر و بر اثر فعالیت‌های طبیعی انجام می‌گیرد و تنها بهره‌برداری بیش از توان آبخوان به‌خصوص در مناطقی که ساختار آبرفت منطقه دارای لایه‌های رسی است، بشر در آن نقش دارد. لایه‌های رسی پس از خروج آب، قدرت بالایی جهت تراکم داشته و این موضوع باعث فرونشست در لایه‌های سطحی زمین می‌گردد. مطالعات گسترده‌ای در زمینه ارتباط بین میزان نشست زمین و افت آب زیرزمینی انجام گرفته است. Mahmoudpour *et al.* (2016)، فرونشست زمین را در دشت جنوب‌غربی تهران بر اساس داده‌های

* نویسنده مسئول: m.sarai@srbiau.ac.ir

1 Stakeholders
2 Geo Hazard
3 Oxidation of Organic Soils

۱۹۸۴ تا ۲۰۱۲، شبیه‌سازی و این روند را تا سال ۲۰۱۸ پیش-بینی کردند. بر اساس نتایج این پژوهش نشان داد که با فرض ثابت بودن نرخ پمپاژ در آینده تا سال ۲۰۱۸ فرونشست زمین در دشت جنوب غربی تهران به ۳۳ سانتی‌متر خواهد رسید و میزان فرونشست ناشی از پمپاژ آب‌های زیرزمینی ارتباط مستقیم با برداشت و به‌عنوان تهدیدی جدی برای دشت جنوب‌غربی تهران به‌شمار می‌آید.

Naderi *et al.* (2018) به روشی نوین در آبخوان دشت سلماس مناطق در معرض فرونشست را شناسایی و تعیین کردند. در این مطالعه، پس از تهیه لایه‌های رستری پارامترهای پمپاژ، کاربری اراضی، محیط آبخوان، ضخامت آبخوان و فاصله از گسل، رتبه‌بندی آن‌ها صورت گرفت. سپس مدل‌سازی آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت سلماس انجام شد و نقشه آسیب‌پذیری فرونشست به‌دست آمد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین امکان فرونشست مربوط به شمال شرقی دشت سلماس می‌باشد. بیش‌ترین تغییر در شاخص آسیب‌پذیری با حذف پارامتر پمپاژ و کاربری اراضی با میانگین تغییرات به‌ترتیب ۱/۶۲ و ۱/۵ درصد اتفاق افتاد. کم اثرترین پارامتر، فاصله از گسل با میانگین شاخص تغییرپذیری ۰/۴ درصد است.

Nadiri *et al.* (2018) نقشه آسیب‌پذیری آبخوان دشت شبستر در برابر فرونشست را به کمک هفت عامل هیدروژئولوژیکی مؤثر شامل افت سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه آبخوان، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان و فاصله از گسل را ترسیم کردند. در گام بعد تخمین‌های پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تصاویر ماهواره‌ای صحت‌سنجی شده انجام و ارزیابی پارامترهای مؤثر انجام شد. نتایج نشان داد که این روش با افزایش ضریب همبستگی بین شاخص فرونشست و فرونشست‌های به‌دست آمده در دشت، توانایی بیش‌تری در ارزیابی پتانسیل فرونشست دارد. همچنین، مشخص شد که قسمت‌های جنوبی و مرکزی دشت بیش‌ترین پتانسیل فرونشست را دارا هستند.

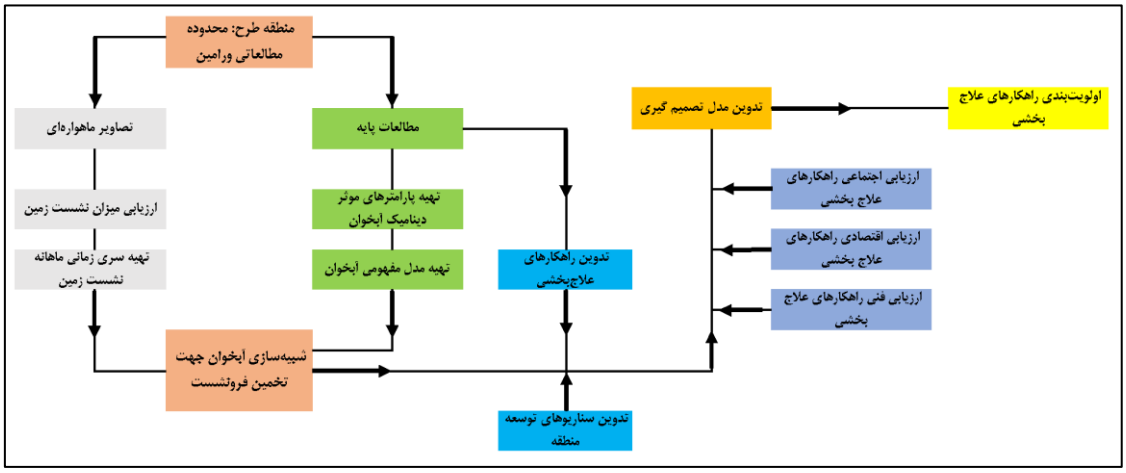
Khalifi *et al.* (2019) شاخص‌های پتانسیل فرونشست را در آبخوان دشت اردبیل با استفاده از مدل فازی، مدل سیستم شمارش نقطه‌ای و تصاویر راداری صحت سنجی شده INSAR ماهواره سینتل یک برآورد کردند. نتایج نشان داد که شاخص آسیب‌پذیری فرونشست دشت بین ۸۰ تا ۱۵۴ می‌باشد و قسمت‌های جنوب و جنوب شرقی دشت دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی هستند.

Sadeghfam *et al.* (2020) شاخص آسیب‌پذیری فرونشست را با شاخص ریسک از طریق نقشه ۷ لایه‌ای به یک نقشه جامع تبدیل کردند که امکان برآورد دقیق‌تر فرونشست فراهم شود. نتایج این پژوهش نشان داد که قسمت‌های شمالی، جنوبی و مرکزی دشت مرند بیش‌ترین پتانسیل فرونشست را دارند. لذا این مطالعه با هدف پیش‌بینی میزان فرونشست در آبخوان و تدوین یک برنامه مدیریتی جهت برون رفت از ادامه روند فرونشست در دشت ورامین مورد بررسی قرار گرفته است. این آبخوان با حجم بالای بهره‌برداری و بدون برنامه‌ریزی مناسب همراه بوده و سالیانه میزان کسری مخزن آبخوان افزایشی قابل-توجه دارد. در نتیجه برنامه‌ریزی جهت کنترل این مشکل زیست-محیطی، می‌تواند در پایداری بهره‌برداری از این آبخوان مؤثر باشد. یکی از ابزارهای مهم جهت ارزیابی این موضوع استفاده از مدل-های عددی و ارزیابی سناریوهای مختلف در این مدل‌ها می‌باشد. مطالعات انجام گرفته در سالیان اخیر نشان داده که استفاده از مدل‌های عددی مثل PLAXIS، PFC2D، GMS و غیره با روش حل تفاضل محدود (Finite Difference) و اجزای محدود (Finite Element) به‌خوبی وضعیت میزان نشست زمین را نشان داده است. لیکن با توجه به ارتباط و حساسیت میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی با میزان فرونشست، استفاده از مدل MODFLOW جهت شبیه‌سازی کمّی آبخوان و سپس استفاده از بسته نرم‌افزاری SUB به‌منظور شبیه‌سازی میزان نشست زمین می‌تواند این ارتباط را به‌خوبی مشخص کند. از طرفی با توجه به لزوم برنامه‌ریزی و تدوین یک مدل تصمیم‌گیری برای اعمال سناریوهای تعادل‌بخشی آبخوان، استفاده از مدل عددی جهت بررسی میزان نشست در سناریوهای مختلف برای تدوین شاخص‌های تصمیم‌گیری حائز اهمیت است. بنابراین نوآوری این پژوهش در تدوین یک مدل تصمیم‌گیری با در نظر داشتن معیارهای مختلف به‌منظور کنترل فرونشست است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور تدوین راهکارهای علاج‌بخشی فرونشست در آبخوان و اولویت‌بندی این راهکارها روش پژوهش مطابق شکل (۱) تدوین شده است. بر این اساس پس از بررسی منطقه مورد مطالعه، شبیه‌سازی وضعیت جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW صورت می‌گیرد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی این مدل، شبیه‌سازی میزان فرونشست با استفاده از بسته نرم‌افزاری SUB انجام و به‌منظور واسنجی نتایج و برآورد دقیق ضرایب الاستیسیته خاک در آبخوان از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و میزان نشست در طی دوره شبیه‌سازی استفاده گردید. از تصاویر ماهواره‌ای در طول دوره ۶ ساله مدل‌سازی، میزان نشست زمین برآورد و به‌عنوان مقادیر شاهد در مدل کمّی

و بسته نرم‌افزاری SUB جهت واسنجی استفاده شد. پس از نهایی شدن مدل جریان و مدل فرونشست آبخوان، راهکارهای علاج‌بخشی آبخوان با توجه به سیاست‌های بهره‌برداری منطقه با استفاده از مدل شبیه‌سازی می‌گردد. راهکارهای تدوین شده برمبنای سیاست‌های وزارت نیرو در طرح تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی و موضوعیت منطقه تدوین شد. در نهایت راهکارهای علاج‌بخشی با استفاده از مدل تصمیم‌گیری بر اساس معیارهای اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فنی ارزیابی و اولویت‌بندی این راهکارها به‌منظور کنترل فرونشست انجام می‌شود. در اولویت‌بندی راهکارها از دو روش وزن‌دهی و رتبه‌دهی SWARA- COPRAS استفاده شد.



شکل ۱- روندنمای گام‌های مختلف روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

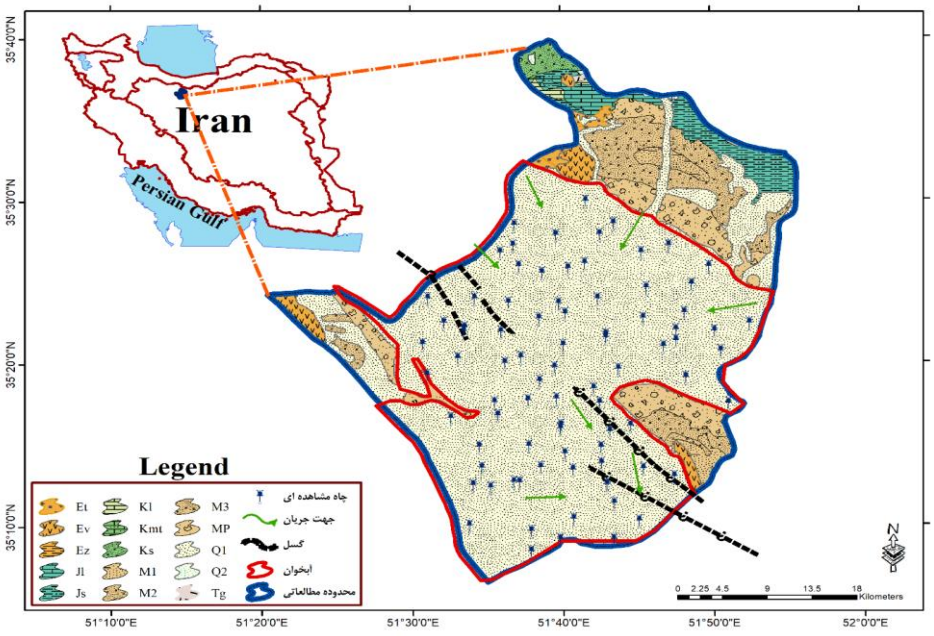
محدوده مطالعاتی ورامین از دو آبخوان عمودی که آبخوان نخست آزاد و آبخوان دوم تحت‌فشار است در محدوده‌ای بین ۲۹ ́ و ۵۵ ° تا ۰۸ ́ و ۵۶ ° طول شرقی و ۴۹ ́ و ۲۸ ° تا ۵۸ ́ و ۲۹ ° عرض شمالی واقع شده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۵). این منطقه با وسعت ۱۵۹۵ کیلومترمربع با جمعیتی حدود یک میلیون‌نفر در جنوب شرقی شهر تهران قرار دارد. وضعیت منابع آب این منطقه با توجه به شکل آبخوان، مرزهای فیزیکی دشت و الگوی جریان همیشه تحت تأثیر فعالیت‌های بالادست قرار داشته است. چالش‌های متعددی این محدوده مطالعاتی را تحت تأثیر قرار داده که مهم‌ترین این چالش‌ها شامل افت سطح آب زیرزمینی (متوسط افت ۱/۳ متر در سال)، کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی (تغییرات هدایت الکتریکی در بخش شمالی از ۴۵۰ به ۱۳۵۰ دسی زیمنس بر متر و در بخش جنوبی از ۵۵۰ به ۳۲۰۰ دسی زیمنس بر متر)، افت کیفیت آب شرب (حجم بالای چاه‌های جذبی بیش از ۵۰ میلیون مترمکعب)، افزایش منابع آلاینده (روند صعودی توسعه صنعتی منطقه)، بهره‌برداری از خروجی تصفیه‌خانه تهران جهت کشاورزی (بیش از ۲۵۰ میلیون‌مترمکعب در سال)، بهره‌برداری از منابع آب سطحی آلوده و فرونشست می‌باشد (وزارت نیرو، ۱۳۹۵). بررسی بیلان منابع آب زیرزمینی این منطقه نشان می‌دهد که با توجه به طرح‌های انتقال آب جهت کنترل افت آب زیرزمینی لیکن همچنان این آبخوان با بیلان منفی مواجه است و بیش از ۹۰ میلیون مترمکعب در سال کسری مخزن دارد. حجم بالای تخلیه از منابع آب زیرزمینی در این محدوده (بیش از ۴۴۰ میلیون مترمکعب که بیش‌تر در بخش کشاورزی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد) سبب افت آبخوان شده به‌طوری‌که افت بیش از ۳۰ متر در طی ۲۰ سال اخیر ثبت شده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۵). افت آبخوان در طی چند دهه اخیر سبب شده تا با توجه به لایه‌های رسی و دولایه‌ای بودن آبخوان ورامین، نشست زمین در بخش‌هایی از آبخوان به‌وجود آید. با توجه به وضعیت بیلان منطقه و وجود لایه‌های رسی، فرونشست در این منطقه باعث مشکلات زیست‌محیطی می‌شود که با توجه به برگشت‌ناپذیری این پدیده بسیار حساس و مهم است. در شکل (۲) نمای کلی از منطقه مورد مطالعه و ترکیبات سازندهای زمین‌شناسی ارائه شده است.

شبیه‌سازی

به‌منظور شبیه‌سازی فرونشست و تعیین عرصه‌های نشست زمین، می‌بایست شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی انجام گیرد. این شبیه‌سازی مبنای حرکات لایه‌های تشکیل‌دهنده آبخوان خواهد بود. بدین‌منظور از مدل عددی MODFLOW برای شبیه‌سازی جریان و تغییرات سطح آب زیرزمینی و از بسته نرم‌افزاری SUB جهت تعیین میزان نشست زمین استفاده می‌شود. بدین‌منظور از نرم‌افزار GMS v10 که هر دو مدل را توأمان دارا می‌باشد، استفاده می‌شود. به‌منظور تهیه مدل عددی جریان، نخستین گام تهیه مدل مفهومی آبخوان است که براساس آن شبیه‌سازی مدل MODFLOW انجام شود.

تهیه مدل کمّی آبخوان

مدل مفهومی آبخوان بیانگر کمّی پارامترهای بیلان منابع آب زیرزمینی یک آبخوان است. لذا می‌بایست این پارامترها به‌صورت مناسب برآورد شوند. این پارامترها در مدل MODFLOW وارد و بر اساس شبکه‌بندی مدل که با روش تفاضل‌های محدود محاسبه می‌شود، شبیه‌سازی را انجام می‌دهد. شبکه‌بندی آبخوان به‌صورت شبکه مربعی با ابعاد ۵۰۰ متری صورت گرفت. با توجه به بیلان منابع آب زیرزمینی میزان تغذیه از سطح آبخوان (آب برگشتی و نفوذیافته از بارش و رواناب)، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، تبخیر از آب زیرزمینی، جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان، رودخانه و زهکش منطقه در مدل وارد شد. مقادیر حجمی پارامترهای تغذیه و تخلیه آبخوان بر اساس نتایج بیلان منابع آب زیرزمینی منطقه استخراج شد. جدول (۱) بیلان منابع آب زیرزمینی آبخوان ورامین را نشان می‌دهد. بخش شمالی آبخوان جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی و بخش جنوب شرق آبخوان جبهه‌های زیرزمینی خروجی را تشکیل می‌دهد. با توجه به وجود دو آبخوان در منطقه شبکه چاه‌های مشاهده‌ای و پیزومتری منطقه به‌صورت مجزا در مدل وارد گردید. پس از تهیه مدل مفهومی آبخوان، ساختار آبخوان شامل توپوگرافی زمین، سطح اولیه آب زیرزمینی و سنگ بستر در دو آبخوان در مدل وارد شد. پارامترهای هیدرودینامکی آبخوان شامل هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و آبدهی ویژه آبخوان نیز بر اساس نتایج آزمایش‌های پمپاژ منطقه استخراج و به‌صورت مقادیر اولیه در مدل وارد گردید (Moghaddam *et al.*, 2019).



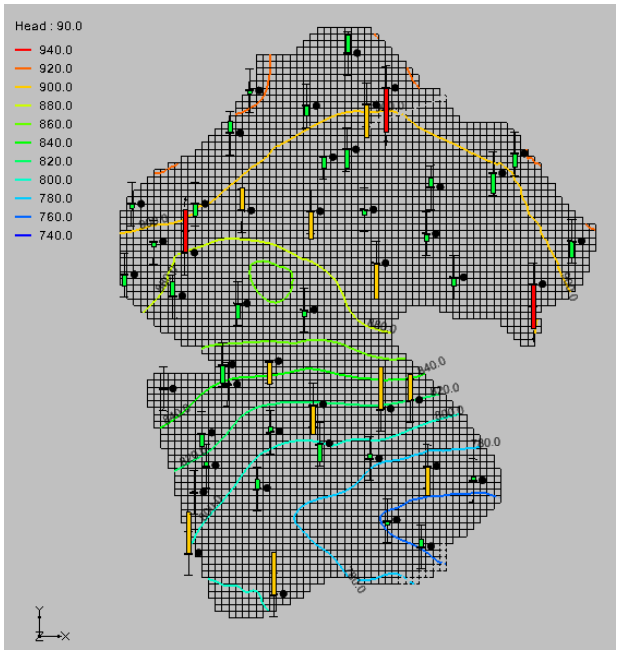
شکل ۲- نمای منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- بیلان منابع آب زیرزمینی آبخوان ورامین- میلیون مترمکعب (Ministry of Energy, 2017)

نام آبخوان	وسعت محدوده بیلان (کیلومترمربع)	تغذیه آبخوان					تخلیه از آبخوان					تغییرات حجم ذخیره
		جریان زیرزمینی ورودی به آبخوان	نفوذ از بارندگی سطح آبخوان	نفوذ از جریان‌های سطحی	نفوذ از آب زراعی	نفوذ از آب شرب و صنعت	جمع تغذیه	تخلیه از چاه، قنات و چشمه	زهکشی طبیعی و مصنوعی	تبخیر از آبخوان	جریان‌های زیرزمینی خروجی از آ. ا.	جمع تخلیه	
ورامین	۱۰۴۳۰	۳۰/۹۱	۱۰/۶۸	۲۳/۵۰	۲۵۹/۸۸	۵۴/۶۹	۳۷۹/۶۶	۴۴۷/۳۸	۳/۵۰	۴/۷۴	۱۵/۹۷	۴۷۱/۵۹	-۹۱/۹۳

پس از تهیه مدل مفهومی آبخوان شبیه‌سازی آبخوان برای یک دوره ۶ ساله (۲۰۱۹-۲۰۱۴) انجام گرفت. مهر ماه ۱۳۹۳ (Oct-2014) به‌عنوان نخستین گام برای شبیه‌سازی و در ادامه با در نظر گرفتن گام زمانی فصلی، ۲۴ دوره فصلی برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. پنج سال ابتدایی دوره شبیه‌سازی جهت واسنجی مدل و یکسال انتهایی برای صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شد. پس از شبیه‌سازی اولیه مدل عددی آبخوان، واسنجی مدل کمّی آبخوان انجام و ضرایب هدایت هیدرولیکی آبخوان در

حالت ماندگار و آبدهی ویژه در حالت غیرماندگار واسنجی شد. واسنجی مدل با روش سعی و خطا در محیط نرم‌افزار در جهت رسیدن به حداقل اختلاف بین سطح آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده انجام گرفت. پس از واسنجی مدل، صحت‌سنجی بر اساس تغییرات رفتار آبخوان در یکسال انتهایی دوره شبیه‌سازی انجام شد. در مرحله صحت‌سنجی مدل، رفتار آبخوان برای یک دوره یکساله مورد آنالیز و ارزیابی قرار گرفت و میزان خطای مدل در این شرایط تجزیه و تحلیل شد. در شکل (۳) نمای مدل نهایی کمّی آبخوان در انتهای دوره شبیه‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۳- نمای مدل نهایی غیرماندگار جریان آب زیرزمینی

شبیه‌سازی فرونشست

پس از شبیه‌سازی کمّی آبخوان از بسته SUB جهت شبیه‌سازی میزان نشست زمین در اثر برداشت آب استفاده گردید. بسته SUB در حقیقت مدل‌سازی فرونشست را برای آبخوان‌های دارای لایه‌های تراکم‌پذیری شبیه‌سازی می‌کند. این برنامه کامپیوتری به‌منظور شبیه‌سازی تراکم عمودی در یک سفره آب زیرزمینی طراحی شده و تغییرات ضریب ذخیره و همچنین تراکم در لایه‌های ناپیوسته[1] و یا پیوسته تحت‌فشار را که دارای قابلیت تراکم‌پذیری ناشی از تغییرات فشار در آبخوان را شبیه‌سازی می‌کند. در این مدل‌سازی، فشار ژئواستاتیک تابعی از سطح آب زیرزمینی و مقدار تراکم تابعی از تغییرات فشار مؤثر در کف آبخوان در نظر گرفته می‌شود (Ghenai *et al.*, 2020). چهار پارامتر هد یا تنش پیش‌تحکیمی، ذخیره الاستیک، ذخیره غیرالاستیک و تراکم اولیه به‌عنوان پارامترهای اصلی شبیه‌سازی فرونشست می‌بایست در مدل اعمال شود. پارامترهای مذکور با استفاده از مقادیر استاندارد و لوگ‌های حفاری در آبخوان ورامین به‌صورت مقادیر اولیه استخراج و در مدل اعمال شد. این پارامترها در مدل‌سازی مورد واسنجی قرار می‌گیرد.

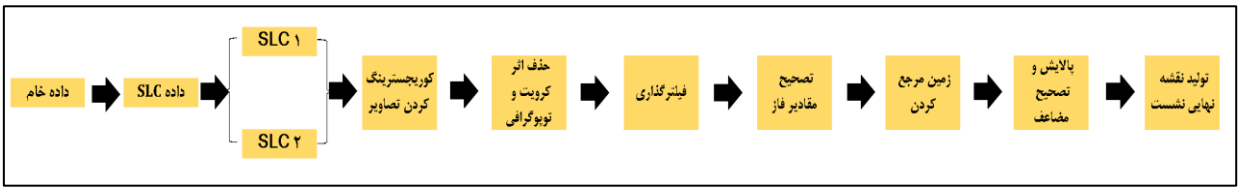
تصاویر ماهواره‌ای

مطابق ذات فرآیند نشست زمین برای ارزیابی آن، سه روش ترازیابی مستقیم، ترازیابی با GPS و روش تداخل سنجی راداری[2] جهت سنجش مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به قابلیت‌های بالا از نظر پراکنش مکانی، سادگی و سهولت پیاده‌سازی در عین پایین بودن هزینه روش تداخل سنجی راداری امروزه یکی از روش‌های پرکاربرد در سنجش فرآیند فرونشست است (Nadiri *et al.*, 2018; Noorbeh *et al.*, 2020).

ماهواره Sentinel-1 مجموعه مشاهدات راداری است که با همکاری اتحادیه اروپا و آژانس فضایی اروپا صورت می‌گیرد. این ماهواره هر ۱۲ روز یک بار از کل کره‌زمین تصویربرداری می‌کند. تصاویر استخراجی از این ماهواره از سال ۲۰۱۴ برای اندازه‌گیری و پایش فرونشست مورد استفاده قرار گرفته است. این ماهواره قابلیت استخراج مدل رقومی ارتفاع را جهت تحلیل فرونشست را دارد. اساس این روش بر اساس اختلاف اندازه‌گیری تصاویر رادار اخذ شده از یک منطقه است. بر این اساس، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت تصویربرداری و یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، به‌صورت پیکسلی مقایسه شده و از تفاضل‌گیری این مقادیر، تصویر اینترفروگرام به‌دست می‌آید. یکی از روش‌های به‌کار گرفته شده جهت تحلیل این فرآیند، روش تداخل‌سنجی با تکرار مسیر است که به‌وسیله آن اطلاعاتی دقیق به‌خصوص در تهیه مدل رقومی ارتفاع می‌توان به‌دست آورد. بر این اساس، مراحل انجام تداخل‌سنجی راداری به‌صورت شکل (۴) شرح داده می‌شود.

با توجه به تنوع حالات تصویربرداری سنجنده این ماهواره، از روش IW [3] به‌منظور تداخل‌سنجی راداری استفاده می‌شود. پهنای تصاویر ۲۵۰ کیلومتری با تفکیک مکانی ۵ متر در امتداد آزیموت و ۲۰ متر در امتداد رنج است. تصاویر ماهواره‌ای به‌صورت ماهانه دانلود شدند. پس از انجام مراحل تداخل سنجی راداری نقشه‌های مدل رقومی ارتفاعی برای بازه‌های زمانی ماهانه منطقه مطابق با دوره‌های زمانی مدل استخراج گردید و برای واسنجی مدل فرونشست و تعیین ضرایب لایه‌های تراکم‌پذیر و تراکم ناپذیر مورد استفاده قرار گرفت.

1 Interbed
2 Interferometric Synthetic Aperture RADAR
3 Interferometric Wide Swath



شکل ۴- مراحل انجام تداخل‌سنجی راداری

تدوین مدل علاج‌بخشی

با توجه به هدف این پژوهش که تدوین راهکارهای علاج‌بخشی در جهت رسیدن به وضعیت پایدار در آبخوان ورامین است لذا از یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره[1] استفاده می‌شود. براین اساس پس از ارزیابی مدل کمی و فرونشست آبخوان، راهکارهای مختلف علاج‌بخشی آبخوان ارزیابی شده و تحلیل بر مبنای چهار معیار اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی آنالیز می‌شود. تعیین معیارها و وزن‌دهی آن‌ها، تعیین اهداف و ارائه گزینه‌ها و سناریوهای مدیریتی با بهره‌گیری از نظرات متخصصان و تصمیم-گیرندگان و با سنجش تمام جوانب یک تصمیم صورت می‌گیرد، لذا خطای ناشی از اتخاذ یک سیاست به کم‌ترین مقدار ممکن می رسد. بر این اساس از روش SWARA جهت وزن‌دهی معیارها و از روش COPRAS جهت رتبه‌دهی سناریوها استفاده شد(Kaklauskas *et al.*, 2006).

روش SWARA[2]

روش تحلیل نسبت ارزیابی وزن‌دهی تدریجی (SWARA) در سال ۲۰۱۰ توسط کرسولین توسعه یافت. این روش که جهت تعیین وزن معیارها به‌کار می‌رود، نقشی مهم را در یک فرآیند تصمیم‌گیری ایفا می‌کند. مشخصه اصلی این روش، امکان ارزیابی نظرات متخصصان در تعیین اهمیت معیارها در فرآیند وزن‌دهی به آن‌ها است (Zavadskas and Kaklauskas, 1996; Keršuliene *et al.*, 2010). در روش SWARA معیارها با توجه به نظرات متخصصان رتبه‌بندی می‌شوند. مهم‌ترین معیار در رتبه یک و کم‌اهمیت‌ترین آن‌ها در رتبه آخر قرار خواهد گرفت. در نهایت، معیارها با توجه مقادیر متوسط اهمیت نسبی، وزن‌دهی و اولویت‌بندی می‌شوند. فرآیند وزن‌دهی به معیارها با روش SWARA به شرح زیر است (Kaklauskas *et al.*, 2006):

گام نخست: مرتب‌سازی معیارها به‌صورت نزولی براساس نظر متخصصان؛

گام دوم: تعیین اهمیت نسبی هر معیار نسبت به معیار بالاتر از خود (S_j)؛

گام سوم: محاسبه مقدار اهمیت نسبی هر معیار (K_j)؛

$$k_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ s_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

گام چهارم: تعیین وزن محاسبه شده مجدد (q_i)؛

در این گام وزن مهم‌ترین معیار (معیار با رتبه نخست) یک در نظر گرفته می‌شود که به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$q_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \dfrac{q_{j-1}}{k_j} & j > 1 \end{cases} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

گام پنجم: تعیین وزن نهایی معیارها (w_j)؛

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^{n} q'_k} \quad (۳)$$

که در آن، w_j وزن معیار j ام و n تعداد معیارها است.

روش COPRAS[3]

COPRAS یک روش جدید تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) جدید است که توسط کاکلاسکاس و همکاران ارائه شده است. این روش وابستگی مستقیم و متناسب با سطح بزرگی و سودمندی گزینه‌ها را در صورت وجود معیارهای متناقض فرض می‌کند. این روش به مقایسه گزینه‌ها و اولویت‌بندی آن‌ها تحت معیارهای متضاد با در نظر گرفتن وزن معیارها می‌پردازد. کوپراس قادر است هم‌زمان از معیارهای مثبت و منفی برای ارزیابی گزینه‌ها استفاده کند و تأثیر معیارهای مثبت و منفی بر روی ارزیابی نتایج، به صورت جداگانه در نظر گرفته می‌شود. مراحل رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش COPRAS به شرح زیر است(Kaklauskas *et al.*, 2006; Keršuliene *et al.*, 2010):

۱. تعیین وزن معیارها با یکی از روش‌های معمول نظیر آنتروپی شانون، فرآیند سلسله مراتبی و غیره

۲. ساخت ماتریس تصمیم‌گیری

۳. نرمال‌سازی و وزن‌دار کردن ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از فرمول زیر:

1 Multi Criteria Decision Making (MCDM)
2 Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) Methods
3 COmplex PRoportional ASsessment Method (COPRAS)

$$d_{ij} = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^{n} x_{ij}} x_{ij} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

که در آن، w_j وزن هر معیار و x_{ij} مقدار هر گزینه به ازای هر معیار است. وزن هر معیار با روش SWARA محاسبه شده است.

سپس معیارهای مثبت و منفی، مشخص و تفکیک می شوند. منظور از معیار مثبت یا سازگار، معیاری است که با افزایش مقدار آن، میزان مطلوبیت آن نیز افزایش می‌یابد.

پس از مشخص کردن معیارهای مثبت و منفی، باید ارزش نهایی معیارهای مثبت و منفی را مشخص کرد. این محاسبه از طریق رابطه (۵) انجام می‌گیرد:

$$S_j^- = \sum_{z_i=-} d_{ij} \qquad S_j^+ = \sum_{z_i=+} d_{ij} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

براساس رابطه (۵) ،جمع جبری ارزش‌های مثبت و منفی به تفکیک محاسبه می‌شود. در مرحله پایانی، برای محاسبه ارزش نهایی هر گزینه Q ،از رابطه (۶) استفاده می‌شود.

$$Q_i = S_j^+ + \frac{S_{min}^- \sum_{j=1}^{n} S_j^-}{S_j^- \sum_{j=1}^{n} \frac{S_{min}^-}{S_j^-}} = S_j^+ + \frac{\sum_{j=1}^{n} S_j^-}{S_j^- \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{S_j^-}} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

که در آن، S_j^+ برابر با مقدار جمع جبری معیارهای مثبت برای هر گزینه و S_j^- مقدار جمع جبری معیارهای منفی برای هر گزینه می‌باشد. در این بخش نخست ۱ بر S_j^- شود و سپس براساس رابطه (۷) ،مقدار Q_i به‌دست می‌آید. مقدار Q_i نشان‌دهنده میزان ارزش و اهمیت هر یک از گزینه‌ها برحسب معیارها است و مقدار بالای ارزش، نشانگر اهمیت و مطلوبیت بیش‌تر گزینه‌ها خواهد بود. درصد امتیاز هر یک از گزینه‌ها از فرمول زیر محاسبه می‌شود(Kaklauskas *et al*., 2006):

$$N_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} 100\% \quad \text{(رابطه ۷)}$$

نتایج و بحث

واسنجی، صحت‌سنجی و پیش‌بینی وضعیت کمّی آبخوان

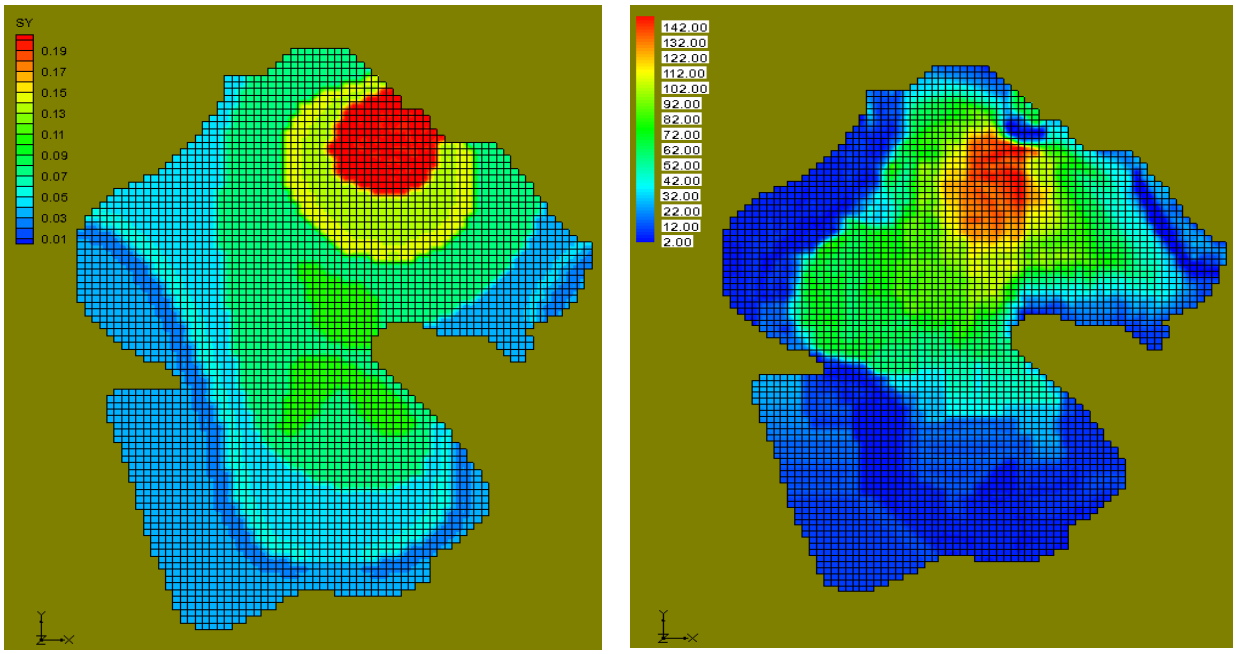
پس از تهیه مدل عددی آبخوان، واسنجی و صحت‌سنجی مدل صورت گرفت. هدایت هیدرولیکی آبخوان در حالت ماندگار و آبدهی ویژه در حالت غیرماندگار واسنجی شد. پس از واسنجی و ارزیابی دقت نتایج یک سال انتهایی برای صحت‌سنجی مدل انتخاب و خطای سطح آب زیرزمینی مورد سنجش قرار گرفت. در دوره واسنجی مدل، مبنای توقف واسنجی رسیدن به میانگین مجذور خطای (RMSE) کم‌تر از ۱/۵ متر و در دوره صحت‌سنجی کم‌تر از ۲ متر تعیین شد. پس از تهیه مدل عددی آبخوان، واسنجی مدل با استفاده از الگوریتم PEST و روش سعی و خطا انجام گرفت و در ادامه صحت‌سنجی مدل برای دوره آتی انجام شد. نتایج واسنجی نشان داد که بیش‌ترین مقدار هدایت هیدرولیکی در بخش ورودی آبخوان (بخش شمالی) به میزان ۳۰ متر در روز و کمترین مقدار هدایت هیدرولیکی در بخش خروجی آبخوان (بخش جنوبی) به میزان هفت متر در روز به دست آمد. به طور متوسط هدایت هیدرولیکی در کل آبخوان ۱۵ متر در روز برآورد شد. واسنجی مدل در حالت غیرماندگار برای پارامتر آبدهی ویژه نشان داد که میانگین ضریب آبدهی ویژه در کل آبخوان ورامین هشت درصد می‌باشد. تحلیل آنالیز خطای مدل کمّی در سه حالت ماندگار، غیرماندگار و صحت‌سنجی در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- آنالیز خطای شبیه‌سازی کمّی آبخوان

پارامتر خطا	مدل کمّی (متر)		
	مدل در شرایط ماندگار	مدل در شرایط غیرماندگار	صحت‌سنجی
میانگین خطا	-۰/۵۳	-۰/۳۷	۰/۲۴
میانگین مطلق خطا	۰/۷۷	۰/۸۵	۰/۳۷
میانگین مجذور خطا	۰/۸۱	۱/۱۱	۰/۶۵

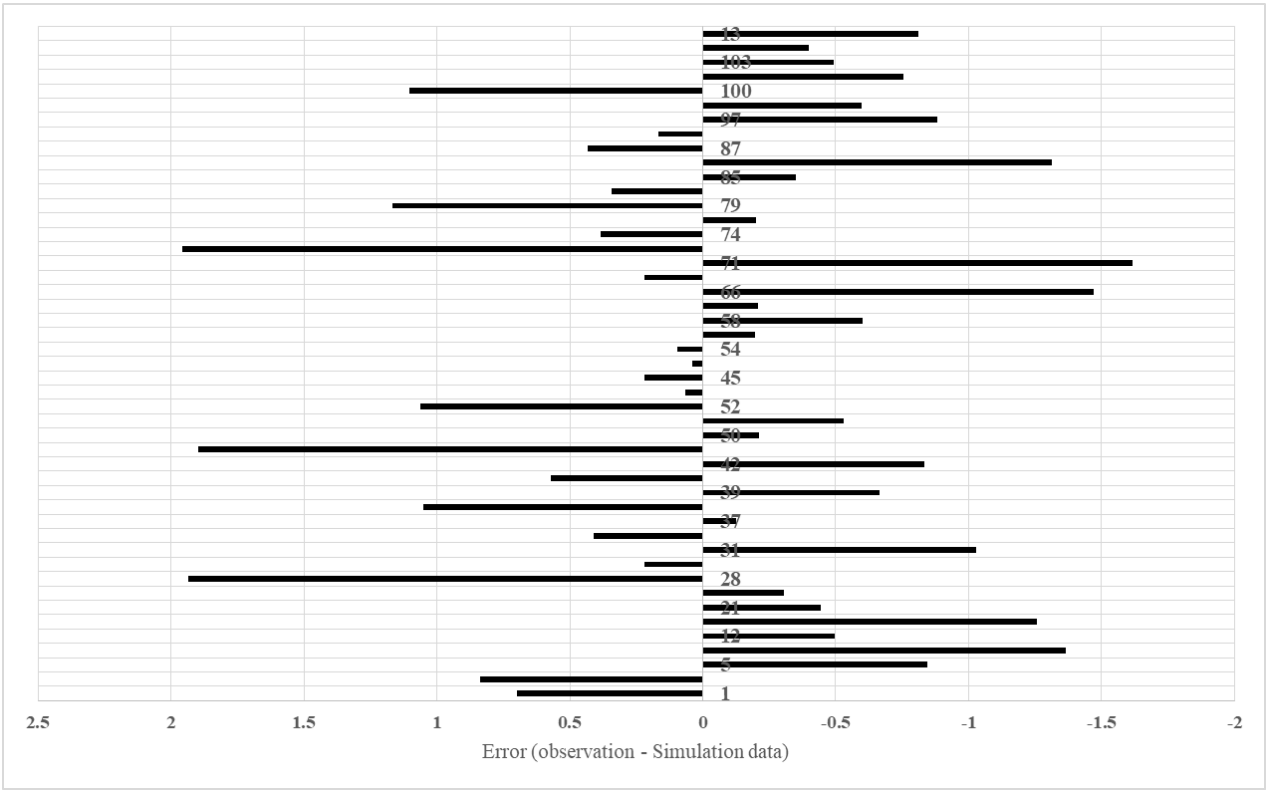
به‌منظور واسنجی مدل از تطبیق نتایج حاصل از نوع سازندهای زمین‌شناسی منطقه و نتایج آزمایشات پمپاژ نیز استفاده شد. بر این اساس بخش‌های ابتدایی آبخوان که دانه درشت‌تر بوده و دارای مقادیر بالاتر هدایت هیدرولیکی و بخش‌های میانی و انتهایی آبخوان ریزدانه‌تر و دارای هدایت هیدرولیکی کم‌تر می‌باشد. همچنین مطابقت میزان آبدهی ویژه در این آبخوان با هدایت هیدرولیکی زیاد بوده و به‌صورت یک روند کلی از ورودی‌ها به طرف خروجی آبخوان، میزان آبدهی ویژه کاهش یافته است. در شکل (۵) پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان پس از واسنجی ارائه شده است.

بر این اساس مطابق شکل (۶) اختلاف بین سطح آب زیرزمینی مشاهده شده و شبیه‌سازی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ۵ چاه مشاهده‌ای دارای بیش‌ترین میزان خطا بین سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است. سه چاه شماره ۲۸، ۴۹ و ۷۳ بیش‌ترین بالاآمدگی آب و دو چاه ۶۶ و ۷۱ بیش‌ترین پائین‌آمدگی آب زیرزمینی را نشان دادند. از نظر موقعیت مکانی این چاه‌ها در بخش مرکزی آبخوان که بیش‌ترین تأثیر را از نظر بهره‌برداری دارند، قرار ندارند. بررسی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان ورامین نشان می‌دهد، میزان خطای شبیه‌سازی شده در اکثر چاه‌ها مناسب بوده و دقت شبیه‌سازی مناسب است.



ب- آبدهی ویژه الف- هدایت هیدرولیکی

شکل ۵-پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان ورامین

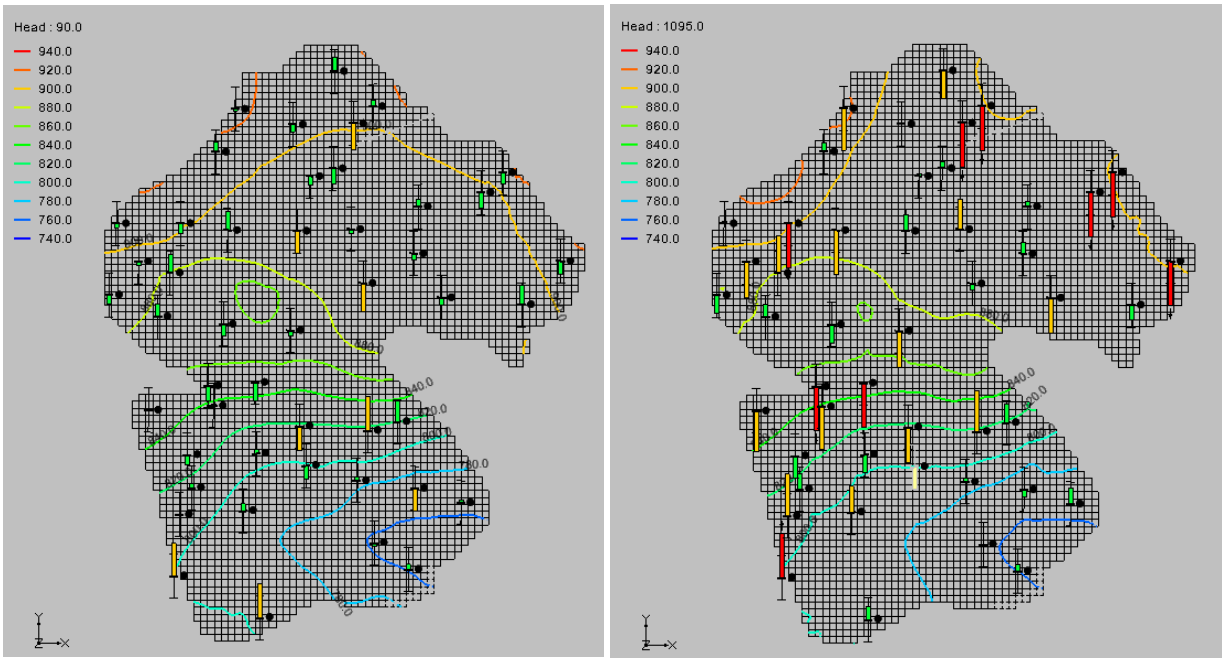


شکل ۶- اختلاف بین سطح آب زیرزمینی مشاهده شده و شبیه‌سازی در چاه‌های مشاهده‌ای

بر این اساس، تحلیل نهایی مدل ماندگار و غیرماندگار جریان آب زیرزمینی در آبخوان پس از واسنجی به‌صورت شکل (۷) ارائه شده است.

پس از صحت‌سنجی مدل کمّی آبخوان و ارزیابی همبستگی مناسب بین سطح آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، پیش‌بینی وضعیت آتی آبخوان با در نظر گرفتن ادامه وضعیت موجود به مدت ۵ سال صورت گرفت. به‌منظور پیش‌بینی وضعیت آتی آبخوان شرایط اقلیمی نرمال و ادامه شرایط موجود از نظر

بهره‌برداری در نظر گرفته شد.



الف- مدل در شرایط غیرماندار ب- مدل در شرایط ماندار

شکل ۷- مدل نهایی حالت کمّی در آبخوان ورامین

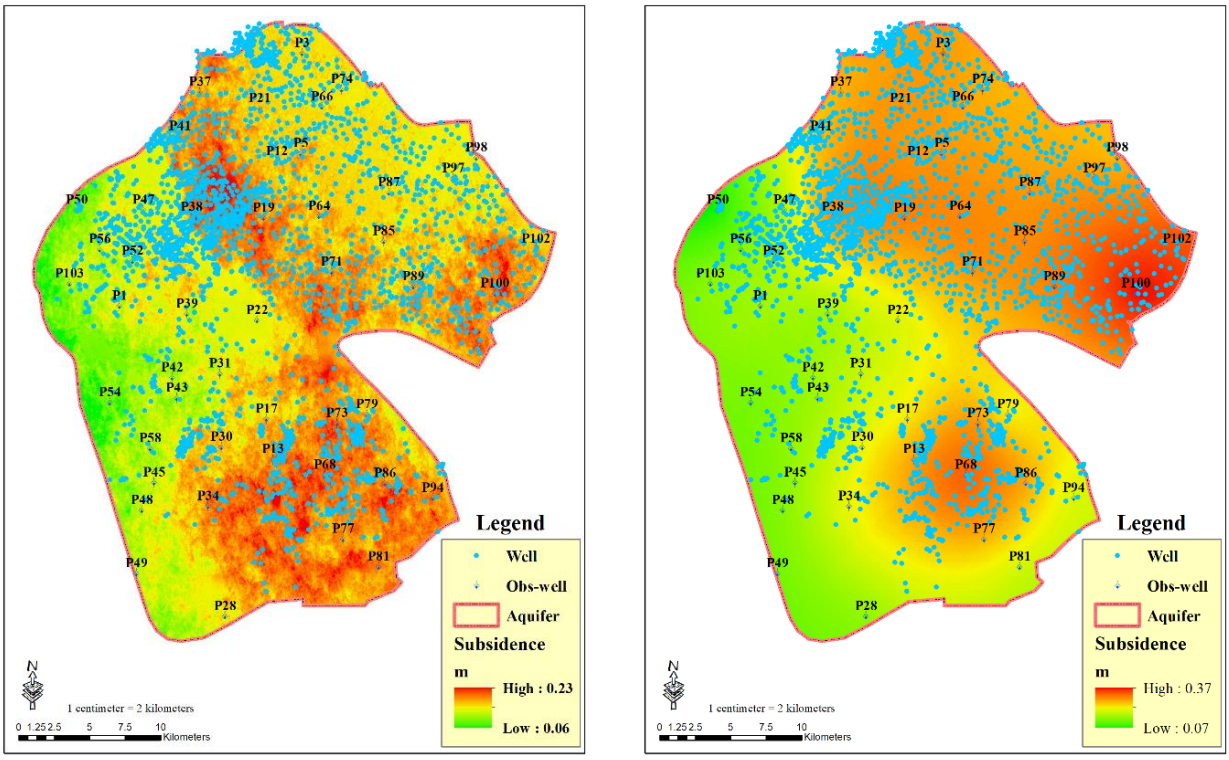
واسنجی و پیش‌بینی میزان نشست زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

به‌منظور واسنجی مدل از تصاویر ماهواره Sentinel-1 در بازه زمانی ۶ ساله ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ استفاده شد. بر این اساس، میزان اختلاف بین ارتفاع زمین در بازه زمانی شبیه‌سازی محاسبه و به‌عنوان میزان نشست تعیین شد. به منظور محاسبه این اختلاف، برای هر گام مدل‌سازی (فصلی)، مدل رقومی ارتفاع با تصاویر ماهواره‌ای استخراج و از مدل رقومی ارتفاعی گام قبل کسر گردید و به‌عنوان مقدار نشست زمین در نظر گرفته شد. این میزان نشست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان مبنای مشاهداتی جهت واسنجی مدل عددی MODFLOW با استفاده از بسته نرم‌افزاری Sub در نظر گرفته شد. در شکل (۸-الف) میزان نشست زمین در بازه ۶ ساله با استفاده از نتایج تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان نشست زمین در آبخوان ورامین ۲۳ سانتی‌متر در طی ۶ سال است که در بخش شرقی، جنوب شرقی و مرکزی آبخوان وجود دارد. این بخش از آبخوان بیش‌ترین تأثیر را از بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی دارد و بیش‌ترین تعداد چاه و عمق چاه در این بخش از آبخوان قرار دارد (در شکل ۸ موقعیت چاه‌های بهره‌برداری نمایش داده شده است).

معمولاً محدوده‌های خروجی آبخوان و محدوده‌هایی که بیش‌ترین چاه‌های بهره‌برداری را دارد با توجه به ضخامت آبرفت و حجم بهره‌برداری، بیش‌ترین میزان فرونشست را در اثر برداشت آب خواهد داشت. لایه‌های تراکم‌پذیر معمولاً از جنس رس بوده و با جذب آب، وزن مخصوص بالاتری پیدا کرده و سبب افت آبخوان و کاهش سطح آب زیرزمینی می‌شود. در این مدل‌سازی دو بخش لایه‌های تراکم‌پذیر به نام‌های No Delay Interbeds و Delay Interbeds را در مدل تعریف شد. بخش No Delay Interbeds به مفهوم سرعت زهکشی بوده و تأخیر در انتقال آب ندارد. سرعت جریان در این حالت با استفاده از مدل مفهومی حالت غیرماندگار مدل محاسبه می‌شود. تعریف هد پیش‌تحکیمی نیز در محدوده آبخوان بسیار مهم و حائز اهمیت است که دراین مطالعه با روش درون‌یابی و اطلاعات خام و برآورد ضرایب هد پیش‌تحکیمی تقسیم‌بندی آبخوان وارد مدل فرونشست گردید. پس از ورود اطلاعات و داده‌های هدایت هیدرولیکی و سطح اولیه آب زیرزمینی، مدل‌سازی در طی دوره زمانی مدل غیرماندگار و شبیه‌سازی فرونشست زمین انجام می‌شود. بر این اساس نتایج مدل و ضرایب هد یا تنش پیش‌تحکیمی، ضریب الاستیک، ضریب غیرالاستیک و تراکم اولیه با روش سعی و خطا مورد واسنجی قرار گرفت. برای تعیین لایه‌های تراکم‌پذیر در محدوده آبخوان با استفاده از لوگ‌های حفاری مقادیر ضرایب تراکم تعیین و مورد واسنجی قرار گرفت. بر این اساس مقدار ضریب پیش‌تحکیمی بین ۸۶۰ تا ۹۷۰ متر تعیین شد. هد پیش‌تحکیمی را معادل سطح

آب زیرزمینی اولیه که توسط مدل در نظر می‌گیرند، تعیین می‌شود. از طرفی دیگر، مقدار ضریب غیرالاستیک مطابق با رنج ارائه شده توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS 2010, 6-A23) بین ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۵ و ضریب الاستیک نیز بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ در سطح محدوده آبخوان در نظر گرفته شد.

پس از واسنجی و ارزیابی دقت مدل عددی نشست زمین در آبخوان ورامین، پیش‌بینی میزان فرونشست در آبخوان به مدت ۵ سال تا سال ۲۰۲۴ صورت گرفت. بر این اساس نتایج نشان داد که در سال ۲۰۲۴ بخش‌های مرکزی آبخوان که در حال حاضر دارای نشست زیادی هستند، این نشست ادامه داشته و به حداکثر مقدار ۳۷ سانتی‌متر خواهد رسید. همچنین بخش‌های ورودی آبخوان نیز با توجه به افت بالای سطح آب زیرزمینی میزان نشست قابل‌توجهی را خواهند داشت. در شکل (b-۷) پهنه‌بندی میزان نشست آبخوان را در سال ۲۰۲۴ نشان داده شده است.



ب- پیش‌بینی میزان نشست با استفاده از مدل عددی

الف – میزان نشست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

شکل ۸- میزان نشست زمین در محدوده مطالعاتی دشت ورامین

متوسط نشست زمین در سال ۲۰۲۴، در آبخوان ۲۰/۵ سانتی‌متر برآورد شده که حداقل میزان نشست ۷ سانتی‌متر (بخش خروجی آبخوان) و حداکثر میزان نشست ۳۷ سانتی‌متر (بخش مرکزی آبخوان) ثبت شده است. همچنین متوسط نشست زمین در سال ۲۰۱۹، در آبخوان ۱۴ سانتی‌متر برآورد شده که حداقل میزان نشست ۶ سانتی‌متر (بخش خروجی آبخوان) و حداکثر میزان نشست ۲۳ سانتی‌متر (بخش مرکزی آبخوان) ثبت شده است. بررسی چاه‌های بهره‌برداری موجود در آبخوان ورامین و تراکم آنها نشان می‌دهد که همبستگی بالایی بین تراکم چاه‌ها و میزان نشست زمین وجود دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد با افزایش طول دوره پیش‌بینی میزان نشست زمین افزایش داشته که با توجه به کسری مخزن آبخوان ورامین و حجم بالای بهره‌برداری این منطقه است. نتایج به‌دست آمده از میزان نشست زمین در آبخوان ورامین با نتایج به‌دست آمده از مطالعات Tafreshi *et al* (2019) نیز همخوانی خوبی دارد.

ارزیابی راهکارهای علاج‌بخشی

با توجه به ارتباط بین افت آب زیرزمینی و میزان نشست زمین در آبخوان ورامین، دو راهکار کاهش برداشت آب از آبخوان و افزایش تغذیه آبخوان به‌منظور علاج‌بخشی و کنترل آن در نظر گرفته شد. بر این اساس با توجه به حجم کسری آبخوان و میزان تخلیه از منابع آب زیرزمینی چهار سناریو کاهش سطوح برداشت از منابع آب زیرزمینی و تغذیه مصنوعی تعریف گردید. تعریف سناریوهایی در قالب استفاده از پساب و آب برگشتی با توجه به

وضعیت بحرانی این آبخوان از نظر کیفیت منابع آب زیرزمینی، مورد ارزیابی قرار نگرفت. در نهایت راهکارهای زیر برای علاج‌بخشی آبخوان ورامین تعریف شد. این راهکارها در راستای طرح تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی که توسط وزارت نیرو در حال انجام است و بر اساس وضعیت فعلی بهره‌برداری از آبخوان ورامین در نظر گرفته شده است.

A_1: کاهش ۵ درصدی برداشت از آب زیرزمینی، A_2: کاهش ۱۰ درصدی برداشت از آب زیرزمینی، A_3: کاهش ۲۰ درصدی برداشت از آب زیرزمینی، A_4: کاهش ۳۰ درصدی برداشت از آب زیرزمینی، A_5: کاهش ۵ درصدی برداشت از آب زیرزمینی با تغذیه مصنوعی، A_6: کاهش ۱۰ درصدی برداشت از آب زیرزمینی با تغذیه مصنوعی، A_7: کاهش ۲۰ درصدی برداشت از آب زیرزمینی با تغذیه مصنوعی و A_8: کاهش ۳۰ درصدی برداشت از آب زیرزمینی با تغذیه مصنوعی.

پس از تعیین راهکارهای علاج‌بخشی، تدوین یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره جهت بررسی ابعاد مختلف این مشکل حائزاهمیت است. یکی از مهم‌ترین بخش‌های تصمیم‌گیری، ارزیابی نقش عوامل مختلف بر انتخاب یک یا چند راهکار برای علاج‌بخشی فرونشست در آبخوان است. بر این اساس سه معیار فنی (C_1)، اقتصادی (C_2)، اجتماعی (C_3) و زیست‌محیطی (C_4) جهت ارزیابی راهکارهای علاج‌بخشی معرفی شد. به‌منظور تدوین مدل تصمیم‌گیری برای ۴ معیار تعریف شده، چهار شاخص در نظر گرفته شد.

شاخص بهبود وضعیت کمّی آبخوان (C_1) به‌عنوان شاخص فنی که بیانگر تغییرات نسبی سطح آب زیرزمینی در هر راهکار است معرفی می‌شود. در این شاخص، نسبت افزایش یا کاهش سطح آب زیرزمینی در طول دوره پیش‌بینی نسبت به ابتدای دوره پیش‌بینی بررسی می‌گردد که این شاخص به‌صورت نسبی بوده و توسط نویسندگان تدوین شده است. رابطه (۸) این شاخص را نشان می‌دهد:

$$\alpha_{Gl} = 100 * (\frac{G.l_{sc} - G.l_{2024}}{G.l_{2019} - G.l_{2024}}) \qquad \text{(رابطه ۸)}$$

که در آن، α_{Gl} شاخص فنی بهبود سطح آب زیرزمینی (درصد)، Gl_{2024} سطح آب زیرزمینی بدون اعمال سناریو در سال ۲۰۲۴ (متر)، Gl_{2019} سطح آب زیرزمینی در ابتدای دوره پیش‌بینی سال ۲۰۱۹ (متر) و Gl_{sc} سطح آب زیرزمینی تحت شرایط اعمال راهکار علاج‌بخشی می‌باشد. این شاخص بین ۱+ تا ∞- در تغییر است. بهبود وضعیت کمّی آبخوان از نظر سطح آب زیرزمینی باعث می‌شود تا این شاخص به ۱+ نزدیک گردد و افت بیش‌تر از میزان پیش‌بینی در سال ۲۰۲۴ منجر به کاهش این شاخص می‌شود. بر این اساس شاخص فنی بهبود سطح آب زیرزمینی تحت اعمال ۸ راهکار علاج‌بخشی در جدول (۳) محاسبه شده است. سطح آب زیرزمینی در سال ۲۰۲۴ بدون اعمال راهکار علاج‌بخشی و در شرایطی که هیچ تغییری در توسعه و بهره‌برداری منطقه انجام نشود (ادامه شرایط موجود) میزان ۸۵۵/۵ متر است.

جدول ۳- شاخص بهبود وضعیت سطح آب زیرزمینی آبخوان

عنوان راهکار تعادل‌بخشی	راهکار	میزان کاهش برداشت (درصد)	سطح آب زیرزمینی در سال ۲۰۱۹ (متر)	سطح آب زیرزمینی در سال ۲۰۲۴ (متر)	شاخص (درصد)
کاهش برداشت	A_1	۵	۸۷۴/۷	۸۷۳/۴	۱۰/۴
	A_2	۱۰		۸۷۲/۳	۲۱/۹
	A_3	۲۰		۸۷۰/۵	۴۱/۱
	A_4	۳۰		۸۶۷/۸	۶۹/۳
کاهش برداشت + تغذیه مصنوعی	A_5	۵		۸۷۳/۲	۱۳
	A_6	۱۰		۸۷۲	۲۴
	A_7	۲۰		۸۷۰/۱	۴۵/۳
	A_8	۳۰		۸۶۶/۹	۷۶

نتایج نشان می‌دهدکه راهکار A_8 بیش‌ترین میزان بهبود وضعیت کمّی آبخوان را داشته که این موضوع ناشی از کاهش ۳۰ درصد بهره‌برداری از سطح آبخوان است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین تأثیر را در شاخص بهبود وضعیت کمّی آبخوان ناشی از کاهش بهره‌برداری است و پیاده‌سازی تغذیه مصنوعی دارای عملکرد بالایی در مقایسه با کاهش برداشت آب از آبخوان نیست.

به‌منظور ارزیابی اقتصادی، هزینه پیاده‌سازی راهکارهای علاج‌بخشی محاسبه می‌شود. این هزینه شامل دو بخش است. بخش نخست میزان هزینه‌ای است که دولت می‌بایست برای

پیاده‌سازی هر راهکار هزینه کند و بخش دوم میزان هزینه‌ای است که از درآمد بهره‌برداران کاسته می‌شود. به‌عنوان مثال در راهکارهای کاهش برداشت از آبخوان، هزینه‌ای ناچیز به دولت تحمیل می‌شود و مقدار زیاد هزینه ناشی از کاهش درآمد کشاورزان خواهد بود. این هزینه‌ها به‌صورت کارشناسی (نفر/ماه) با همکاری کارشناسان آب‌منطقه‌ای و جهادکشاورزی در منطقه محاسبه و به‌صورت جدول(۳) ارائه شده است. به‌منظور استفاده از یک شاخص نرمال شده برای محاسبات اقتصادی کلیه هزینه‌ها با استفاده از رابطه (۹) به‌صورت نرمال شده برآورد شد:

$$C = 1 - \frac{C_{max} - C_i}{C_{max}} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

که در آن، C_{max} حداکثر هزینه راهکارهای علاج‌بخشی و C_i هزینه هر راهکار علاج‌بخشی می‌باشد.

هزینه اجرای راهکار کاهش برداشت آب در کلیه سطوح برای پیاده‌سازی توسط دولت ۸۸۰ میلیون تومان برآورد می‌شود که این راهکار در هر سطح کاهش برداشت برای بهره‌برداران براساس قیمت آب و میزان عملکرد محصولات محاسبه شده است. اعم هزینه بخش دولت مربوط به تجهیز تیم گشت و بازرسی شرکت آب‌منطقه‌ای به همراه راه‌اندازی کنتور روی چاه‌های بهره‌برداری در منطقه است.

جدول ۴- هزینه‌های راهکارهای تعادل‌بخشی آبخوان برای دولت

عنوان راهکار تعادل‌بخشی	راهکار	میزان کاهش برداشت (درصد)	هزینه دولت (میلیون تومان)	هزینه بهره‌برداران (میلیون تومان)	کل هزینه (میلیون تومان)	نسبت هزینه نرمال شده
کاهش برداشت	A_1	۵	۸۸۰	۵۴۶/۴	۱۴۲۶/۴	۰/۳۱
	A_2	۱۰		۱۰۹۲/۸۰	۱۹۷۲/۸	۰/۴۳
	A_3	۲۰		۲۱۸۵/۶۰	۳۰۶۵/۶	۰/۶۶
	A_4	۳۰		۳۲۷۸/۳۹	۴۱۵۸/۳۹	۰/۹
کاهش برداشت + تغذیه مصنوعی	A_5	۵	۱۳۵۰	۵۴۶/۴	۱۸۹۶/۴	۰/۴۱
	A_6	۱۰		۱۰۹۲/۸۰	۲۴۴۲/۸	۰/۵۳
	A_7	۲۰		۲۱۸۵/۶۰	۳۵۳۵/۶	۰/۷۶
	A_8	۳۰		۳۲۷۸/۳۹	۴۶۲۸/۳۹	۱

به‌منظور ارزیابی شاخص رضایتمندی اجتماعی با استفاده از بررسی میدانی در بین بهره‌برداران منطقه و تکمیل پرسشنامه این کار صورت گرفت. جهت تحلیل این موضوع با توجه به کاهش میزان آبدهی در چاه‌های بهره‌برداری در طی سالیان اخیر، همکاری مناسبی از طرف بهره‌برداران وجود داشت. بدین‌منظور ۶۰ پرسشنامه در سطح منطقه جهت ارزیابی ۸ راهکار علاج‌بخشی مورد ارزیابی قرار گرفت. پرسشنامه‌ها با محوریت عدالت تخصیص آب و برابری در کاهش بهره‌برداری تنظیم و تکمیل شد. یکی از مهم‌ترین موضوعات در خصوص راهکارهای علاج‌بخشی وابستگی شدید امرومعاش مردم منطقه با تولید کشاورزی بوده و آن‌ها دولت را جهت این مشکلات مقصر دانسته و انتظار حمایت زیادی از بخش دولتی دارند. سطح پایین رفاهی در بخش کشاورزی و عدم سود مناسب ناشی از بهره‌وری پایین آب سبب شده تا با کم‌ترین کاهش سود سطح رفاهی به شدت سقوط کند. ارزیابی رضایتمندی اجتماعی در منطقه بر مبنای صفر تا صد که مبنای حداقل و حداکثر رضایتمندی اجتماعی است، صورت گرفت. بیش‌ترین میزان رضایتمندی مربوط به راهکار کاهش ۵ درصد بهره‌برداری و تغذیه مصنوعی (A_5) و میزان ۶۸ درصد و کم‌ترین میزان رضایتمندی مربوط به راهکار A_4 و میزان ۶ درصد است.

شاخص تعدیل میزان نشست زمین به‌عنوان معیار فنی، شاخص میزان هزینه راهکار علاج‌بخشی به‌عنوان معیار اقتصادی و شاخص رضایتمندی اجتماعی به‌عنوان معیار اجتماعی تعریف شد. با توجه به تعریف ۸ راهکار برای علاج‌بخشی شرایط موجود، شاخص تعدیل میزان نشست زمین به‌صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود. این شاخص به‌صورت درصد بیان می‌شود و میزان بهبود نشست زمین را در اثر اجرای راهکارهای علاج‌بخشی نسبت به سال ۲۰۱۹ ارزیابی می‌کند.

$$\gamma = 100 * (\frac{\alpha_{2024} - \alpha_{Sc}}{\alpha_{2024} - \alpha_{2019}}) \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

که در آن، γ شاخص تعدیل میزان نشست زمین (درصد)، α_{Sc} میزان نشست تحت شرایط اعمال راهکار علاج‌بخشی (متر)، α_{2019} میزان نشست زمین در ابتدای دوره پیش‌بینی (متر) و α_{2024} میزان نشست زمین در انتهای دوره پیش‌بینی (متر) می‌باشد. با توجه به ماهیت فرونشست که فرآیند غیرقابل‌برگشت است لذا مقدار α_{Sc} همواره کم‌تر از α_{2019} خواهد بود. شاخص تعدیل میزان نشست زمین براساس شبیه‌سازی انجام شده در مدل عددی در جدول (۴) محاسبه شد. بر این اساس بیش‌ترین بهبود وضعیت کمّی آبخوان در اعمال راهکار A_8 است که در این حالت میزان نشست زمین در کل آبخوان کاهش بیش‌تری نسبت به سایر راهکارها داشته است. میزان نشست آبخوان براساس

متوسط وزنی محاسبه شده از مدل به‌دست آمده است.

جدول ۵- میزان شاخص تعدیل نشست آبخوان (درصد)

عنوان راهکار تعادل‌بخشی	راهکار	میزان کاهش برداشت (درصد)	میزان نشست در سال ۲۰۲۴ (متر)			شاخص تعدیل نشست زمین (درصد)
			حداکثر نشست (متر)	حداقل نشست (متر)	متوسط نشست (متر)	
کاهش برداشت	A_1	۵	۳۵	۷	۲۰/۱	۶/۲
	A_2	۱۰	۳۲	۷	۱۹/۵	۱۵/۴
	A_3	۲۰	۲۷	۷	۱۷/۹	۴۰
	A_4	۳۰	۲۵	۶/۵	۱۷/۲	۵۰/۸
کاهش برداشت + تغذیه مصنوعی	A_5	۵	۳۴	۷	۱۹/۷	۱۲/۳
	A_6	۱۰	۳۱	۷	۱۹/۱	۲۱/۵
	A_7	۲۰	۲۶	۷	۱۷/۴	۴۷/۷
	A_8	۳۰	۲۳/۵	۶/۲	۱۶/۸	۵۶/۹

ارزیابی سناریوهای تعادل‌بخشی با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره

به‌منظور انتخاب راهکار علاج‌بخشی منتخب در منطقه نخست معیارهای تعریف شده با استفاده از روش SWARA رتبه‌بندی شده و در مرحله بعد با روش COPRAS وزن‌دهی آن‌ها انجام می‌گیرد. در گام نخست رتبه‌بندی معیارها با توجه به اهمیت آن‌ها با در نظر گرفتن هدف پژوهش با اعمال نظر ۱۵ کارشناس انجام گرفت. پس از رتبه‌بندی انجام شده، در گام دوم متخصصان باید اهمیت معیار C_j را نسبت به معیار C_j+1 تعیین کنند. در جدول (۶) سطر نخست در ستون دوم، معیار C_4 مقدار یک را به خود اختصاص داده است، در حالی‌که سایر معیارها در ستون دوم مقادیر متفاوتی دارند. به‌عنوان مثال، معیار C_4 به میزان ۰/۰۹۷ بااهمیت تر از معیار C_2 و معیار C_2 در مقایسه با C_3 به میزان ۰/۰۸۸ از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. در گام‌های بعدی به ترتیب ضرایب K_j و q_j و وزن معیارها محاسبه می‌شوند. بر این اساس نتایج وزن‌دهی معیارها در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- نتایج وزن‌دهی معیارها با روش SWARA

	معیار	اهمیت مقایسه‌ای ارزش متوسط (S_j)	ضریب $k_j = s_j + 1$	وزن دوباره محاسبه شده $q_j = \frac{q_{j-1}}{k_j}$	وزن $w_j = \frac{q_j}{\sum q_j}$
C_4	معیار زیست‌محیطی	-	۱	۱	۰/۲۷
C_2	اقتصادی	۰/۰۹۷	۱/۰۹۷	۰/۹۱	۰/۲۴۲
C_3	اجتماعی	۰/۰۸۸	۱/۰۸۸	۰/۹۲	۰/۲۴۴
C_1	فنی	۰/۰۷۵	۱/۰۷۵	۰/۹۳	۰/۲۵
	مجموع			۳/۸	۱

نتایج روش SWARA در جدول (۶) نشان می‌دهد که با توجه به نظر متخصصان، معیار زیست‌محیطی با وزن ۰/۲۷ باارزش ترین معیار در بین سایر معیارها است. وزن هر معیار میزان اهمیت آن معیار را نشان می‌دهد. همچنین معیارهای فنی و اجتماعی به ترتیب با وزن ۰/۲۵ و ۰/۲۴۴ در رتبه‌های بعدی قرار دارند. معیار اقتصادی با وزن ۰/۲۴۲ کم‌اهمیت‌ترین معیار شناخته شده است.

پس از تعیین وزن معیارها، با استفاده از روش COPRAS گزینه‌های علاج‌بخشی جهت تعدیل میزان فرونشست آبخوان اولویت‌بندی شدند. بدین‌منظور پس از تهیه ماتریس اولیه که با روش شانون آنتروپی وزن معیارها محاسبه شده است، براساس روابط (۹) و (۱۰) ماتریس تصمیم‌گیری نرمال و وزن‌دار می‌شود. با توجه به بحث هزینه، معیار اقتصادی به عنوان معیار منفی و سه معیار فنی، محیط‌زیست و اجتماعی به‌عنوان معیار مثبت در نظر گرفته شد.

مقادیر معیارهای مثبت (S_i^+) و منفی (S_i^-) برای هر راهکار علاج‌بخشی، مقدار اهمیت نسبی (Q_i) و شاخص عملکرد[1] (N_i) هر هر گزینه به‌دست آمد. رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس مقادیر Q_i و N_i صورت می‌گیرد. شاخص عملکرد هر گزینه با توجه به رتبه آن

1 The Performance Index

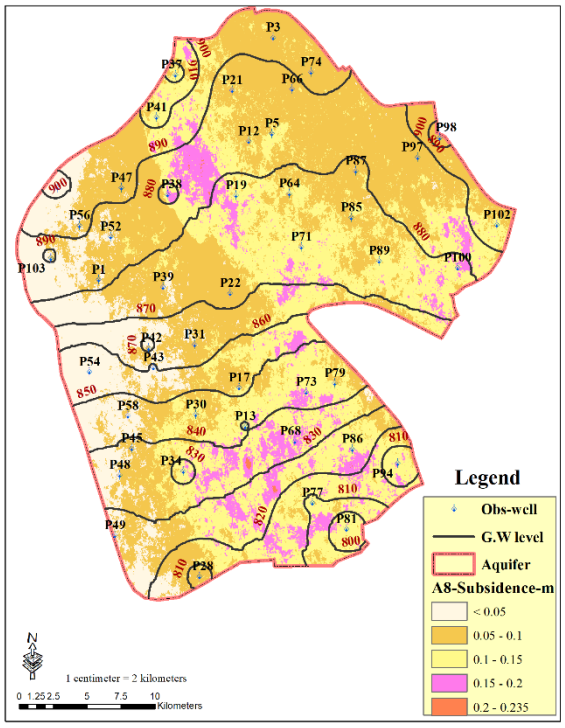
گزینه متغیر است. هر چقدر مقدار Q_i و N_i برای یک گزینه بیش‌تر باشد، آن گزینه در رتبه‌های بالاتری قرار خواهد گرفت. نتایج نهایی محاسبه شده در جدول (۷) حاکی از این موضوع است که راهکار A_8 دارای بیش‌ترین مقدار اهمیت نسبی را نسبت به سایر گزینه‌ها دارد، بنابراین در رتبه نخست قرار می‌گیرد. این گزینه که شامل کاهش ۳۰ درصدی پمپاژ از آبخوان به همراه تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی این آبخوان است.

جدول ۷- نتایج نهایی رتبه‌بندی راهکارها

جایگزین	S_{i+}	S_{i-}	Q	N (%)	رتبه‌بندی
A_1	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۱۲۵	۷۶/۵	۴
A_2	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۱۰۸	۶۶/۲	۷
A_3	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۱۱۷	۷۱/۷	۶
A_4	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۱۴۱	۸۶/۲	۲
A_5	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۱۳۱	۸۰/۴	۳
A_6	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۱۲۰	۷۳/۹	۵
A_7	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۱۳۱	۸۰/۴	۳
A_8	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۱۵۳	۹۴/۱	۱

بررسی اولویت‌های انجام شده نشان می‌دهد که اگرچه میزان رضایتمندی اجتماعی در راهکار A_8 پائین است لیکن با توجه به وزن بیش‌تر معیار زیست‌محیطی که مربوط به میزان نشست زمین است و همچنین بهبود بهتر وضعیت کمّی آبخوان این راهکار به‌عنوان راهکار اولویت نخست انتخاب شده است. بر این اساس در شکل (۸) میزان بهبود وضعیت کمّی آبخوان براساس منحنی‌های سطح آب زیرزمینی و میزان کاهش نشست زمین نیز با پهنه‌بندی نتایج در راهکار علاجبخشی A_8 ارائه شده است.

بررسی میزان نشست زمین در آبخوان ورامین پس از اعمال راهکار A8 نشان داد که میزان پیوستگی (توزیعی) محدوده‌هایی که دارای نشست هستند نسبت به سایر راهکارها کاهش بیشتری داشته و میزان نشست زمین در آبخوان در بخش وسیعی از آبخوان با کاهش همراه بوده است. نتایج بدست آمده از پیش‌بینی فرونشست تحت اعمال ادامه شرایط موجود، حاکی از حداکثر نشست ۳۷ سانتیمتری در آبخوان بوده است که با اعمال راهکار کاهش برداشت به میزان ۳۰٪ و تغذیه مصنوعی آبخوان حداکثر میزان نشست زمین در این آبخوان به ۲۳/۵ سانتیمتر در انتهای سال ۲۰۲۴ رسیده است.



شکل ۹- میزان نشست و بهبود سطح آب زیرزمینی پس از اعمال راهکار A_8

نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین ابعاد مدیریت منابع آب زیرزمینی، توجه به مسائل زیست‌محیطی به‌خصوص در بحث کیفیت و تغییرات فیزیکی آبخوان‌ها است. فرونشست یکی از مشکلات غیرقابل-برگشت در آبخوان است که اگرچه دارای یک فرآیند طبیعی در محیط اشباع آبخوان است لیکن عدم مدیریت بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی در تشدید آن نقشی مهم دارد. این مطالعه به ارزیابی راهکارهای علاجبخشی آبخوان ورامین با استفاده از مدل تصمیم گیری SWARA-COPRAS پرداخت. بر این اساس چهار معیار فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی برای تحلیل وضعیت سطح آب زیرزمینی، هزینه‌های پیاده‌سازی راه‌کارهای علاجبخشی، رضایتمندی اجتماعی و میزان تعدیل نشست زمین تعریف شد. بررسی و شبیه‌سازی مدل کمّی و فرونشست نشان داد که وضعیت آبخوان بحرانی بوده و میزان افت آبخوان در یک دوره ۵ ساله، بیش از ۶ متر بوده و متعاقب آن نشست زمین نیز در بخش‌های مرکزی آبخوان به ۳۷ سانتی‌متر خواهد رسید. بر این اساس با در نظر گرفتن ۸ راهکار علاجبخشی که تلفیقی از کاهش سطوح برداشت از منابع آب زیرزمینی و تغذیه مصنوعی است آبخوان مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی نتایج وزن‌دهی معیارهای این پژوهش نشان داد که معیار زیست‌محیطی که مربوط به شاخص تعدیل نشست زمین است دارای بیش‌ترین وزن

و مقدار ۰/۲۷ است و مهم‌ترین معیار در تصمیم‌گیری معرفی گردید. پس از ارزیابی نتایج و اولویت‌های راهکارها با روش COPRAS مشخص گردید که راهکار A_8 به‌عنوان اولویت نخست علاج‌بخشی آبخوان معرفی می‌شود. نتایج نشان داد که با اعمال این راهکار میزان نشست زمین کاسته و حداکثر میزان نشست ۲۳/۵ سانتی‌متر در بخش مرکزی آبخوان خواهد بود. همچنین وضعیت کمّی آبخوان نیز با اعمال این راهکار نسبت به دوره پیش‌بینی (۲۰۲۴) نیز ۷۶ درصد بهبود نشان داد. بررسی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ارتباط بین نشست زمین به‌عنوان یک پدیده طبیعی با کاهش سطح آب زیرزمینی بسیار بالا بوده و هرچه میزان سطح آبخوان کاسته شود، میزان نشست زمین افزایش بیش‌تری خواهد داشت. از طرفی بررسی‌ها نشان می‌دهد که اعمال راهکارهای سخت‌گیرانه برای بهره‌برداران اگرچه موجب نارضایتی است لیکن با توجه به عدم برگشت‌پذیری فرآیند فرونشست در آبخوان، می‌بایست راهکارهای علاج‌بخشی مورد استفاده قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Al Heib, M., Duval, C., Theoleyre, F., Watelet, J.-M., Gombert, P., 2015. Analysis of the historical collapse of an abandoned underground chalk mine in 1961 in Clamart (Paris, France). Bull. Eng. Geol. Environ. 74 (3), 1001–1018.

Nieuwenhuis, H., Schokking, F., 1997. Land subsidence in drained peat areas of the Province of Friesland, The Netherlands. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 30 (1), 37–48.

Strzalkowski, P., Tomiczek, K., 2015. Analytical and numerical method assessing the risk of sinkholes formation in mining areas. Int. J. Min. Sci. Technol. 25 (1), 85–89.

Choi, J.-K., Kim, K.-D., Lee, S., Won, J.-S., 2010. Application of a fuzzy operator to susceptibility estimations of coal mine subsidence in Taebaek City, Korea. Environ. Earth Sci. 59 (5), 1009–1022.

Deverel, S.J., Rojstaczer, S., 1996. Subsidence of agricultural lands in the Sacramento-San Joaquin Delta, California: role of aqueous and gaseous carbon fluxes. Water Resource. Res. 32 (8), 2359–2367.

Ghenai, C., Albawab, M., & Bettayeb, M. (2020). Sustainability indicators for renewable energy systems using multi-criteria decision-making model and extended SWARA/ARAS hybrid method. Renewable Energy, 146, 580-597.

Kaklauskas, A., Zavadskas, E., & Ditkevicius, R. (2006). An intelligent tutoring system for construction and real estate management master degree studies. Cooperative Design, Visualization, and Engineering, 12, 174–181.

Keršuliene, V., Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2010). Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). Journal of business economics and management, 11(2), 243-258.

Khalifi, P., Nadiri, A. A., Novinpour, E. A., & Gharekhani, M. (2019). Estimation of Subsidence Potential Index Using the PCSM Method and Fuzzy Model in Ardabil Plain Aquifer. Iran-Watershed Management Science & Engineering, 13(45), 44-53.

Ministry of Energy. (2017). Water resources balance update studies in the study area of the Namak Lake basin. Department of basic studies of water resources management company, balance report no. 4134, 69 pp.

Moghaddam, H.K., Moghaddam, H.K., Kivi, Z.R., Bahreinimotlagh, M. and Alizadeh, M.J., 2019. Developing comparative mathematic models, BN and ANN for forecasting of groundwater levels. Groundwater for Sustainable Development, 9, 100-113.

Naderi, K., Nadiri, A. A., Asghari Moghaddam, A., & Kord, M. (2018). A new approach to determine probable land subsidence areas (Case study: The Salmas plain aquifer). Iranian Journal of ecohydrology, 5(1), 85-97.

Nadiri, A. A., Taheri, Z., Barzegari, Gh., & Dideban, Kh. (2018). A framework to estimation of aquifer subsidence potential using genetic algorithm. Iran-Water Resources Research, 14(2), 174-185.

Noorbeh, P., Roozbahani, A. and Moghaddam, H.K. (2020). Annual and Monthly Dam Inflow Prediction Using Bayesian Networks. Water Resources Management, pp.1-19.

Sadeghfam, S., Khatibi, R., Dadashi, S., & Nadiri, A. A. (2020). Transforming subsidence vulnerability indexing based on ALPRIFT into risk indexing using a new fuzzy-catastrophe scheme. Environmental Impact Assessment Review, 82, 106-122.

Tafreshi, G.M., Nakhaei, M. and Lak, R., 2019. Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. Geo Journal, 11, 1-21.

Zavadskas, E. K., & Kaklauskas, A. (1996). Determination of an efficient contractor by using the new method of multicriteria assessment. In International Symposium for The Organization and Management of Construction. Shaping Theory and Practice 2, 94-104.

Zavadskas, E. K., Kaklauskas, A., & Vilutiene, T. (2009). Multicriteria evaluation of apartment blocks maintenance contractors: Lithuanian case study. International Journal of Strategic Property Management, 13(4), 319-338.

Zavadskas, E. K., Stević, Ž., Tanackov, I., &

in logistics. Studies in Informatics and Control, 27(1), 97-106.

Prentkovskis, O. (2018). A novel multicriteria approach–rough step-wise weight assessment ratio analysis method (R-SWARA) and its application