

بررسی پدیده فرونشست دشت ابهر با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW و بر مبنای توسعه بسته عددی SUB

محمدرضا عسگری - دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، پردیس ارس، دانشگاه تهران.
کیومرث ابراهیمی * - استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۳ تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۰۵/۲۹

چکیده

در این مقاله مدل‌سازی فرونشست دشت ابهر با مدل شبیه‌ساز MODFLOW و استخراج نقشه رستری فرونشست آبخوان اشیاع در یک دوره ده ساله انجام شده است. مدل فرونشست با توسعه زیرمدل SUB در ساختار کد عددی تفاضل محدود MODFLOW انجام شد. دوره شبیه‌سازی به دو مرحله جهت واسنجی مدل کمی جریان در شرایط غیرماندگار از روش تحلیل حساسیت تلفیقی و با بکارگیری مدل PEST و جهت صحت‌سنجی تقسیم شد. نتایج نشان داد شبیه‌سازی آبخوان دارای ۸٪ خطای نسبی می‌باشد که مؤید مدل‌سازی ایده‌آل است. بررسی تغییرات عمودی ساختار لایه‌های زمین نشان داد در دوره ده ساله آبخوان ۳۴ سانتی‌متر فرونشست داشته است. در بررسی مدل فازی تکمیلی با استفاده از همپوشانی گاما بین لایه‌های مؤثر با رخداد بیشینه همبستگی رگرسیون خطی لایه نقاط فرونشست مشخص شد که تحلیل اثر کاربری اراضی با تفسیر تغییرات فرونشست مدل فازی مطابقت دارد. با وجود آنکه کاربری شهری تنها ۴ درصد از سطح آبخوان را شامل می‌شود ولی ۲۶ درصد از واقعه فرونشست و در مقابل کاربری کشاورزی که ۴۲ درصد از سطح می‌باشد ۵۶ درصد از فرونشست و زمین‌های بایر با ۵۴ درصد از سطح آبخوان اشیاع تنها ۱۹ درصد از فرونشست دشت را به خود اختصاص داده‌اند. با به‌کارگیری همپوشانی وزنی لایه‌های ایجاد شده با استفاده از عملگر گاما در مدل فازی جهت پهنه‌بندی بعنوان روشی نوین در محاسبات نرخ فرونشست زمین به تفکیک نوع کاربری اراضی، می‌توان مناطق مستعد فرونشست زمین را شناسایی کرد تا با مدیریت صحیح، از وقوع فرونشست و تأثیرات مخرب آن جلوگیری نمود.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی، مدل فازی، آبخوان ابهر، فرونشست.

مقدمه

مصارف بی رویه و کنترل نشده منابع آب سطحی و زیرزمینی، کاهش نزولات جوی، تمرکز مصرف در برخی نقاط (عدم تعادل بین تقاضا و پتانسیل تأمین آب)، الگوی کشت نامناسب و عدم آبیاری صحیح و حفر چاه‌های متعدد و بهره‌برداری بی‌رویه از آن‌ها در چند دهه اخیر باعث بحرانی شدن وضعیت منابع آب زیرزمینی در اکثر دشت‌های کشور شده است. به نحوی که سطح آب زیرزمینی در اغلب آبخوان‌های کشور به طور مداوم سیر کاهشی داشته و متوسط افت سالانه در طول ۱۵ سال گذشته در حد ۱۲ متر بوده است. کاهش سطح تراز آب زیرزمینی دشت‌ها باعث افزایش هزینه استحصال آب و افزایش مصرف انرژی، کاهش کیفیت آب و ظهور پدیده فرونشست زمین شده است. به عنوان اثرات ثانوی، با کاهش حجم آب قابل برداشت منابع زیرزمینی و افزایش هزینه استحصال آب، سطح زیرکشت محصولات کاهش و قیمت محصولات افزایش می‌یابد. یکی دیگر از عواملی که باعث بحرانی شدن وضعیت منابع آب زیرزمینی شده است، تغییر شرایط و رژیم تغذیه طبیعی سفره‌های آب زیرزمینی است. در برخی از دشت‌ها، ساخت و سازهای هیدرولیکی نامناسب بر روی رودخانه‌ها انجام شده و باعث کاهش تغذیه مناسب آبخوان پایین دست شده است (قدرتی، ۱۳۹۱: ۲۱۰).

فرونشست اگرچه پیامد فشردگی سطوح زیرین خاک است لیکن خود معرف حدوث و پیامد ناگوار زیست محیطی در افق آبی می‌باشد. فشردگی سطوح زیرین و افت تراز ایستابی کاهش حجم و فضای نگهداشت آب را به دنبال خواهد داشت. به بیان ساده‌تر کاهش مخزن آب زیرزمینی پیامد منطقی رخداد پدیده فرونشست است (شریفی‌کیا و همکاران، ۱۳۹۳: ۷۱).

فائق آمدن بر مشکلات منابع آب زیرزمینی، نیاز به بررسی‌های علمی و ابزارهای گوناگونی دارد که یکی از آن‌ها به کار بستن مدل‌های ریاضی است (گائورا^۱، ۲۰۱۱: ۱۲۷؛ هو^۲، ۲۰۱۰: ۲۱۹). مدل‌های ریاضی، بررسی تغییرات وضعیت موجود و آینده سفره‌های آب زیرزمینی را با لحاظ عوامل متعدد موثر در آن، امکان‌پذیر ساخته‌اند (یاوتیا^۳، ۲۰۰۸: ۱۹۲؛ ژانگ^۴، ۲۰۱۰: ۱۳۴). لذا با استفاده از آن‌ها می‌توان با صرف کمترین هزینه و زمان، تنها با جمع‌آوری اطلاعاتی نظیر ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم آب زیرزمینی وضعیت آبخوان را شبیه‌سازی کرد. این نوع مدل‌های شبیه‌ساز قادرند اثرات متقابل آب‌های سطحی و زیرزمینی را در دوره‌های کوتاه و بلند مدت ارائه دهند. به عنوان نمونه به یکی از مهم‌ترین این مدل‌ها می‌توان به MODFLOW اشاره کرد (لاچال^۵ و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۷۸).

رنجبر و احتشامی (۲۰۱۹) در پژوهشی بیان کردند در دشت تهران استخراج بیش از حد از منابع آب زیرزمینی در سال‌های اخیر باعث نشست زمین در سطح وسیع شده است. هدف از مطالعه آنها، استفاده از توانایی مدل عددی و الگوریتم‌های داده محور برای پیش‌بینی قوی و سریع فرونشست زمین بوده است. به این ترتیب از بسته فرونشست در چارچوب MODFLOW برای تعیین اثر نوسانات آب زیرزمینی بر میزان فرونشست دشت تهران استفاده شد. نتایج مطالعه ذکر شده بالا نشان داد که مدل مقدار بالای ضریب همبستگی (۰/۹۶۵) بین مقادیر فرونشست شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. صفاری و همکاران (۱۳۹۵، ۸۲:۹۳) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری و گریس و نیز داده‌های مربوط به چاه‌های بهره‌برداری، مشاهده‌ای و پیژومتریکی در بازه زمانی ۱۲ ساله (۱۳۸۱ تا ۱۳۹۳) به بررسی فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی در دشت کرج-شهریار پرداخته و با استفاده از پردازش داده‌های

1. Gaura

2. Hu

3. Yaoutia

4. Zhang

5. Lachaal

ماهواره‌ای نشان دادند علت اصلی فرونشست، می‌تواند استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی و افت سطح آب باشد. سیتاوی^۱ و همکاران (۲۰۱۹) در یک مطالعه اثر اضافه برداشت آب زیرزمینی را بر وقوع فرونشست مورد تحلیل و ارزیابی قرار داده و به بررسی پدیده فرونشست زمین در منطقه اسنا از کشور مصر پرداختند. این منطقه از زمان احداث سد جدید اسنا و آبیگری در سال ۱۹۹۵ و به دلیل سطح بالای آب برخی کانال‌های آبیاری مانند کانال رمادی، از افزایش سطح آب‌های زیرزمینی رنج می‌برد. مجتبی رشوند^۲ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای، یک مدل آب زیرزمینی وابسته به تنش، با استفاده از مدل MODFLOW-SD تهیه و همراه با مدل فرونشست غیرخطی، NDIS، برای پیش بینی تغییر شکل عمودی در حوضه‌های دارای رسوبات بسیار فشرده استفاده کردند. بسته NDIS بر اساس قانون داریسی-گرسوانوف و شار عمده به مدل فرونشست زمین ساخته شد. نتایج حاصل از شبیه سازی نمونه‌های انجام شده برای مدل مفهومی نشان داد که تنش اعمال شده به دلیل پمپاژ باعث تغییر لایه‌های همگن به صورت ناهمگن و فشردگی لایه‌های خاک می‌شود.

ودام و همکاران (۲۰۲۰) در یک گزارش، راه حل عددی جدید مبتنی بر نظریه تلفیق در متلب برای پیش بینی فرونشست زمین حوضه بسته قونیه را تهیه کردند. به منظور تنظیم مدل با شرایط محلی، از داده‌های تاریخی منطقه مورد مطالعه برای سالهای ۲۰۱۱-۲۰۱۴ استفاده شد. راه حل ارائه شده امکان توسعه مدل فرونشست را فراهم می‌کند که می‌تواند از پیش بینی حرکت زمینی برای حوضه بسته شده قونیه در ترکیه پشتیبانی کند. گارفیاس و همکاران (۲۰۲۰) در یک مطالعه به منظور بهبود این وضعیت، سناریوهای مدیریت آب زیرزمینی برای دره تولوکا با یک مدل جریان آب زیرزمینی سه بعدی همراه با یک ماژول تراکم یک بعدی را بررسی کردند. پس از آن، تکامل فرونشست زمین با ادغام تداخل سنجی SAR و داده‌های زمین شناختی و هیدروژئولوژیکی برای ریشه بینش در مورد فرآیندهای اساسی حاکم بر فروین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که ادامه در نرخ‌های فعلی مصرف آب منجر به فرونشست بیش از ۱٫۶ متر طی یک دوره ۴۰ ساله (۲۰۱۰-۲۰۲۰) خواهد شد. متوقف کردن صادرات به مکزیکو سیتی مهمترین عامل در کنترل فرونشست نیست زیرا سیستم پمپاژ بیشتر در مناطقی با محتوای رس بسیار کم است، جایی که فرونشست کمتر است. کای و ارکنس (۲۰۲۰) در یک مطالعه جامع بیان کردند که خزش و ادغام ثانویه پدیده‌های مهمی در تغییرات بارهای سطحی هستند، اما معمولاً در فرونشست زمین که توسط استخراج آب‌های زیرزمینی اجرا می‌شود، مورد توجه نیست. برای کشف نقش خزش در چنین تنظیماتی، بسته جدید فرونشست زمین MODFLOW-2005 ساخته شد که شامل یک فرمول خزش از نرم افزار ژئوتکنیکی است. این فرمول که مبتنی بر مفهوم ایزوتراچه است، پسوندی است و مدل فشرده سازی الاستوپلاستیکی کلاسیک Terzaghi را به عنوان یک مورد محدود در نظر گرفته است. این خزش به مدت طولانی پس از پوسیدگی در سفره‌های پمپ شده به فرونشست کمک می‌کند، پدیده ای که به طور سنتی به "تأخیر هیدرودینامیکی" نسبت داده می‌شود.

بررسی منابع نشان داد که مطالعات انجام شده در باره پدیده فرونشست دشت‌های کشور منسجم و فراگیر نبوده است و فقط در بخشی از دشت‌ها، که شرایط حاد و بحرانی داشته‌اند، مطالعاتی انجام شده است. بیشتر مطالعات انجام شده به بررسی علل فرونشست و پیامدهای آن پس از وقوع پرداخته‌اند. با توجه به اینکه فرونشست تهدیدی جدی برای بسیاری از مناطق دنیا و بخصوص دشت‌های کشورمان محسوب می‌شود، نیاز به ارائه روشی جامع و قابل اعتماد برای شناسایی مناطق مستعد فرونشست احساس می‌شود. شناسایی عوامل مؤثر بر فرونشست زمین و ارائه یک چارچوب عملی برای بررسی و تعیین نقاط محتمل فرونشست، می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی آبخوان‌ها و جلوگیری از وقوع فرونشست و به حداقل رساندن اثرات آن کارکرد بسزایی داشته باشد.

¹. Al-Sittawy

². Rashvand

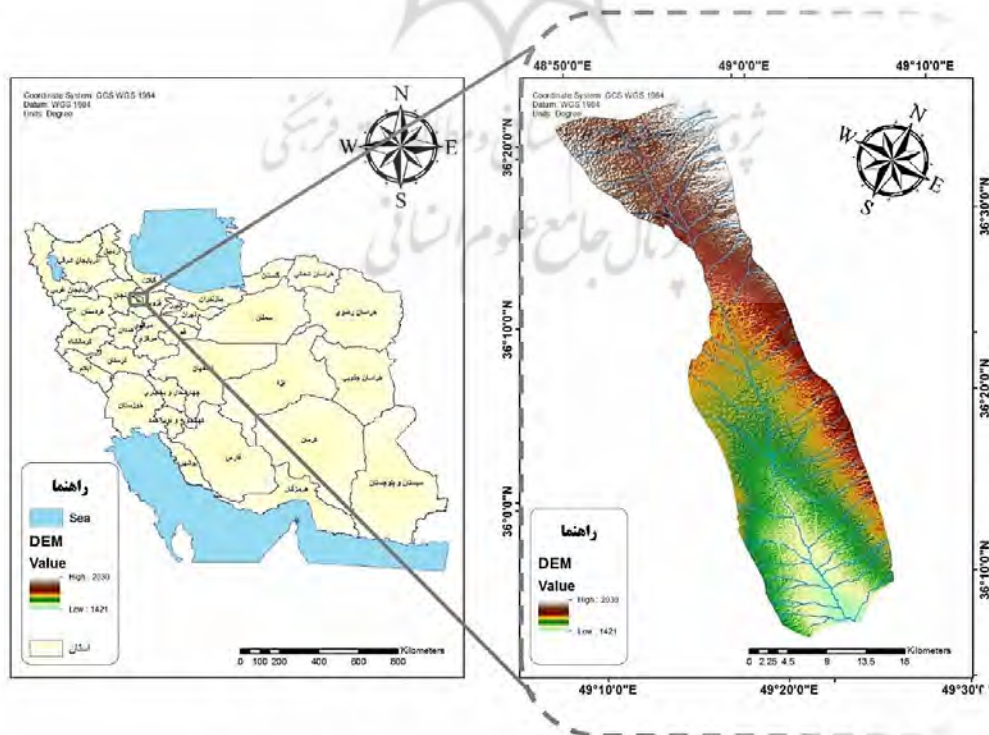
در مقاله حاضر روش جدیدی برای پیش‌بینی و مدل‌سازی مناطق فرونشست احتمالی معرفی شده است و برای ارزیابی بهتر نتایج، آبخوان دشت ابهر به عنوان مطالعه موردی انتخاب و بررسی شد. با توجه به دقت خروجی مطالعات پیشین در حیطه محاسبات عددی مدل‌های فرونشست، تغییرات سطح ایستابی دشت ابهر با سه کاربری شهری، کشاورزی و بایر بر اساس یک رویکرد جدید مدل مفهومی توسعه یافت و محاسبات تغییرات عمودی ساختار زمین طبق تغییرات سلولی شبکه تفاضل محدود به شکل غیر خطی تهیه شد. به منظور تعیین عامل اساسی تغییرات، از روش مدل فازی با عملگر گاما و تحلیل آماری-مکانی به این منظور استفاده شد.

در این پژوهش بیشترین اثر در ایجاد فرونشست در محیط صفحات گسترده، با معادله رگرسیونی نقاط متناظر توسط مدل همپوشانی فازی با عملگر گاما مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به منظور توسعه مدل فرونشست و بررسی اثرات تنوع کاربری اراضی، بر تغییرات مکانی رخداد فرونشست از کد عددی مادفلو در یک شبیه‌سازی بلند مدت استفاده خواهد شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت عمومی و جغرافیایی

دشت ابهر در حاشیه شمال غرب زیرحوضه دریاچه نمک واقع شده است. این محدوده مطالعاتی ۱۹۲۶/۵ کیلومترمربع وسعت دارد که ۱۰۴۰/۹۲ کیلومترمربع آن دشت و مابقی ناحیه کوهستانی است. حداکثر و حداقل ارتفاع این محدوده مطالعاتی نسبت به سطح آبهای آزاد به ترتیب ۲۱۶۶ و ۷۴۹ متر می‌باشد. ناحیه اشباع دشت مساحتی بالغ بر ۶۵۷/۴ کیلومترمربع را دارا است. شهرهای خرمدره و ابهر از سکونت‌گاه‌های مهم این محدوده مطالعاتی می‌باشند (شکل ۱). در این محدوده مطالعاتی رودخانه اصلی ابهر رود جاری است و شاخه‌های سرابند، دردهین و ازنا ب نیز در آن جریان دارد که همگی به رودخانه ابهر رود تخلیه می‌شوند. به طور کلی جهت جریان آبهای سطحی در محدوده مطالعاتی از شمال غرب به سمت جنوب غرب است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه - دشت ابهر

منابع بهره برداری از آبهای زیرزمینی در این محدوده مطالعاتی شامل ۱۳۵۹ حلقه چاه با تخلیه سالانه ۲۳۳/۳۶ میلیون مترمکعب، ۱۶۹ دهنه چشمه با تخلیه سالانه ۴/۸۸ میلیون مترمکعب و ۱۰۱ رشته قنات با تخلیه سالانه ۱/۳ میلیون مترمکعب است (شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۹۵).

مبانی تئوری مدل MODFLOW

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی توسط مدل ریاضی به عنوان پیش‌نیاز تحلیل پدیده نشست زمین است. در مقاله حاضر با استفاده از مجموعه گسترده‌ای از داده‌های خام به جهت استفاده در مدل MODFLOW، فرآیند توسعه مدل کمی و استخراج نتایج حاصله با استدلال بررسی صحت و دقت مدل تشریح شده است. در یک برنامه رایانه‌ای مدل آب زیرزمینی، سیستمی از معادلات جبری (ماتریس) حل می‌شود. این ماتریس، تقریبی از مدل ریاضی است که توسط معادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی تدوین شده است (بیر^۱، ۱۹۹۰: ۸۰۱-۸۱۷). معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های آزاد در حالت کلی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = Sy \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن h ارتفاع سطح آب زیرزمینی، Sy آبدهی ویژه، K هدایت هیدرولیکی در جهت‌های x ، y و z سفره آب زیرزمینی است.

فرونشست

به منظور مدل سازی فرونشست زمین، از معادله زیر استفاده می‌شود (یانگ و همکاران، ۲۰۰۹: ۵۸-۳۹؛ چو و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۱-۱):

$$v_a = \frac{\sum_{k=1}^n V_k}{\sum_{k=1}^n S_k} = \frac{\sum_{k=1}^n \bar{V}_{ak} S_k}{\sum_{k=1}^n S_k} \quad \text{رابطه (۲)}$$

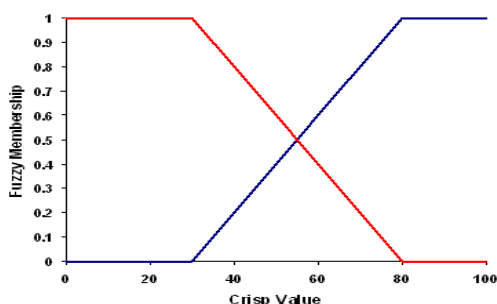
که در آن v_a نرخ کل فرونشست سالانه (میلی متر در سال)، V_k حجم ناحیه فرونشینی، K مرتبه (میلی متر مکعب)، \bar{V}_{ak} نرخ فرونشست سالانه در یک منطقه (گره) (میلی متر در سال)، S_y مساحت منطقه فرونشست و n تعداد نقاط فرونشست در منطقه مورد مطالعه است.

توابع عضویت

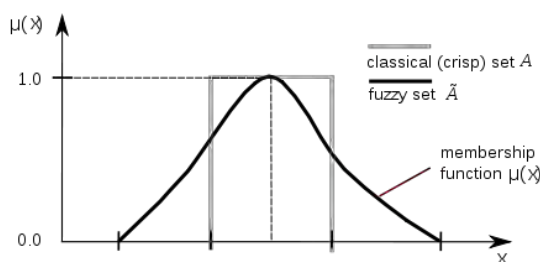
مطابق با شکل (۲) درجه عضویت $\mu_A(x)$ بیانگر میزان عضویت عنصر x به مجموعه فازی A است. اگر درجه عضویت یک عنصر از مجموعه برابر با صفر باشد، آن عضو کاملاً از مجموعه خارج است و اگر درجه عضویت یک عضو برابر با یک باشد، آن عضو کاملاً در مجموعه قرار دارد. حال اگر درجه عضویت یک عضو ما بین صفر و یک باشد، این عدد بیانگر درجه عضویت تدریجی می‌باشد. از لحاظ مفهومی در ضمن می‌تواند هر مجموعه بصورت تداخلی با درجه‌ای در مجموعه دیگر قرار گیرد. در حالتی که در یک متغیر زبانی کیفیت صفت مطلوب را مد نظر بگیریم، حال با توجه به انتخاب تابع عضویت مانند گاوسی، نسبتاً مطلوب با درجه عضویت کم می‌تواند در مجموعه صفت مطلوب قرار گیرد و صفت غیر مطلوب نیز با درجه عضویت کمتری در مجموعه صفت مطلوب ظاهر شد. تابع عضویت یک مجموعه فازی، تعمیم

¹Bear

یافته تابع مشخصه در مجموعه‌های کلاسیک است. در منطق فازی این تابع نشان دهنده درجه حقیقت به عنوان بسطی از ارزیابی است. درجه حقیقت معمولاً با احتمالات اشتباه گرفته می‌شود گرچه این‌ها دو مفهوم جداگانه هستند زیرا حقیقت فازی نشان دهنده عضویت در مجموعه‌هایی است که به طور مبهم تعریف شده اند و نه احتمال رخداد یا شرایطی خاص (مالچوسکی^۱، ۱۹۹۹: ۳۲۰۹-۳۲۳۰).



شکل ۳: تبدیل خطی با دو شیب مثبت و منفی (مالچوسکی، ۱۹۹۹: ۳۲۳۰-۳۲۰۹)



شکل ۴: تابع عضویت یک مجموعه فازی (مالچوسکی، ۱۹۹۹: ۳۲۳۰-۳۲۰۹)

در روش فازی به منظور استخراج لایه نهایی تصمیم‌گیری، ابتدا با استاندارد سازی پارامترهای ورودی و سپس با استفاده از عملگر همپوشانی گاما در محیط GIS شکل گرفت. از میان توابع مختلف استاندارد سازی، می‌توان گوسین، سیگموند، J شکل و خطی را نام برد (لی پیج^۲ و همکاران، ۲۰۱۲: ۳۲۰۹). همچنین از میان عملگرهای مختلف همپوشانی می‌توان به موارد ذیل اشاره داشت.

عملگر گاما (Gamma): مطابق با رابطه (۳) این عملگر حالت کلی عملگر ضربی و جمعی فازی می‌باشد و زمانی به کار می‌رود که اثرات کاهشی و افزایشی در تعامل معیارها وجود داشته باشد.

$$\mu_{\text{combination}} = (\text{FuzzySum})^\gamma \times (\text{FuzzyProduct})^{1-\gamma} \quad \text{رابطه (۳)}$$

معادله (۳) را می‌توان برابر به رابطه (۴) در نظر گرفت.

$$\text{fuzzyGammaValue} = \text{pow}(1 - ((1 - \text{arg1}) \times (1 - \text{arg2}) \times \dots), \text{Gamma}) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\times \text{pow}(\text{arg1} \times \text{arg2} \times \dots, 1 - \text{Gamma})$$

در پژوهش حاضر، با توجه به آنکه پارامترهای دخیل در محاسبه لایه نهایی فرونشست، بر روی یکدیگر دارای اثر افزایشی و کاهشی می‌باشند، و با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد توابع همپوشانی، از عملگر گاما استفاده شد. هرگاه مقدار گاما در معادله بالا برابر با عدد ۱ در نظر گرفته شود، آنگاه ارزش خروجی این روش معادل با روش جمع خواهد بود. همچنین در صورت معادل قرار دادن گاما با عدد صفر، آنگاه خروجی این روش معادل روش عملگر ضرب

^۱ Malczewski

^۲ Le Page

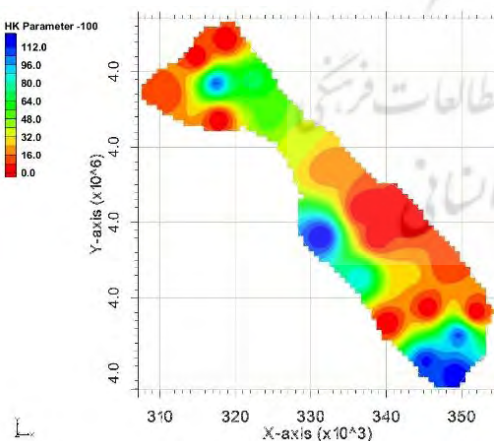
می‌باشد. به همین شکل هر عدد در بین این دو مقدار امکان تولید خروجی با ترکیبی از این دو روش را بدست خواهد داد (مالچوسکی^۱، ۱۹۹۹: ۳۲۰۹-۳۲۳۰).

اجرا و توسعه مدل عددی

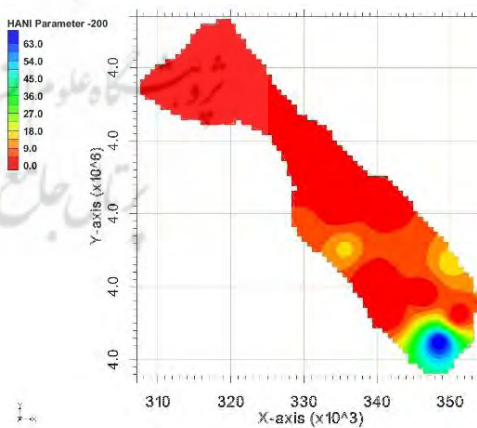
محاسبات لازم این پژوهش در نرم افزار GMS و کد MODFLOW-2005 انجام شد. طول دوره مطالعات ۱۱۹ ماه و بر پایه حداکثر داده‌های موجود قابل تدقیق و بازسازی در نظر گرفته شد. موتور محاسباتی PCG2 با ۱۰۰ تکرار Inner و Outer و با حد بحرانی تغییرات همگرایی ۰/۰۱ متر و همچنین حد بحرانی خطای همگرایی ۰/۰۱ متر مکعب در روز انتخاب شد. جهت عملیات واسنجی در شرایط غیر ماندگار از ۷۰٪ و واسنجی ۳۰٪ داده‌های پیرومتری در طول بازه زمانی ده ساله استفاده شد. پس از هفت بار اجرای مدل واسنجی با تعداد معین تکرار داخلی، مقادیر بهینه نهایی پارامتر تغذیه از سطح، هدایت هیدرولیکی افقی و ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی افقی، آبدهی ویژه در قالب نقاط پایلوت استخراج و پارامترهای قابلیت انتقال در مرزها و شبکه آبراهه‌ای به صورت دسته خطوط حاصل شد. از لایه‌های اخیر به منظور توسعه مدل فازی فرونشست نیز استفاده شد.

نتایج و بحث

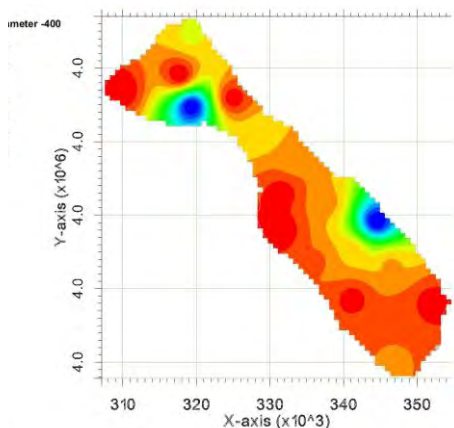
در شکل‌های (۴) تا (۹) می‌توان مشاهده کرد مقدار هر یک از پارامترهای مذکور، بعد از آخرین اجرای واسنجی، به بهینه‌ترین حالت ممکن استخراج گردید. پارامتر ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی، دارای بیشترین مقدار در نواحی جنوبی آبخوان بود. در حالی که هدایت هیدرولیکی افقی، در سه پایلوت با توزیع‌های جنوب، مرکز و شمال به ترتیب بیشینه مقادیرا بعد از واسنجی مشخص می‌کرد. در نهایت دو پارامتر تغذیه از سطح و آبدهی ویژه در نواحی میانی دارای ارزش بالاتری بودند. نکته قابل توجه از منظر توزیع بیشینه مقادیر این پارامترها مشخص کننده این مطلب می‌باشد، آبخوان در اجرای اولیه بیشترین سلول‌ها را به صورت خشک در نظر گرفته است. بنابراین تمایل به تأمین آب از دست رفته در ازای افت صورت گرفته با این پارامترهای نهایی قابل انتظار بود.



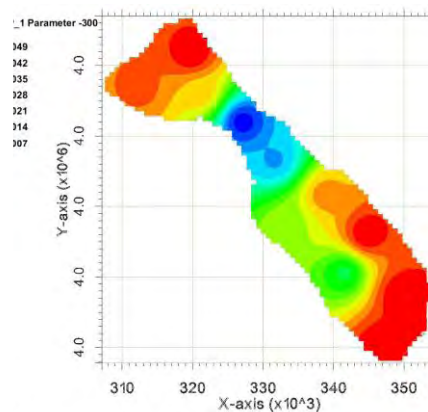
شکل ۵: میان‌یابی پارامتر هدایت هیدرولیکی افقی



شکل ۴: توزیع ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی افقی



شکل ۷: میان یابی نهایی پارامتر آبدهی ویژه



شکل ۸: میان یابی نهایی پارامتر تغذیه از سطح

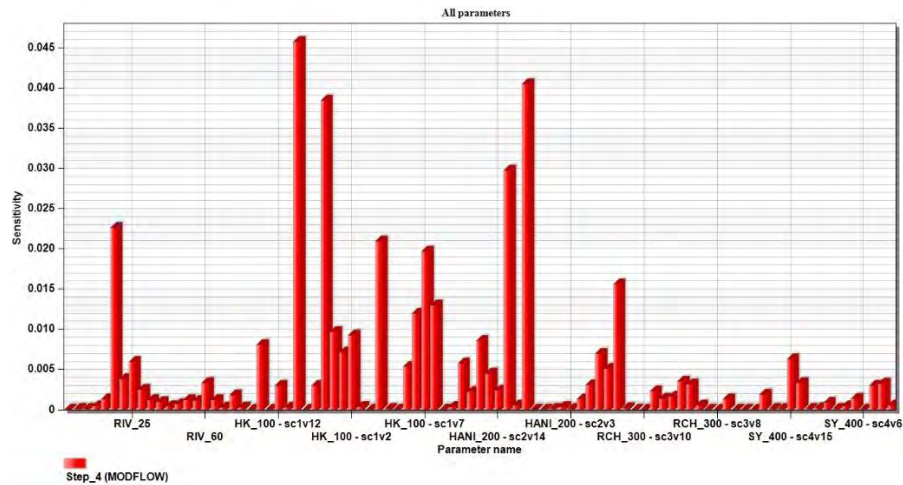


شکل ۹: میان یابی نهایی پارامتر مرزهای تراوا

شکل ۸: میان یابی نهایی پارامتر آبراهه

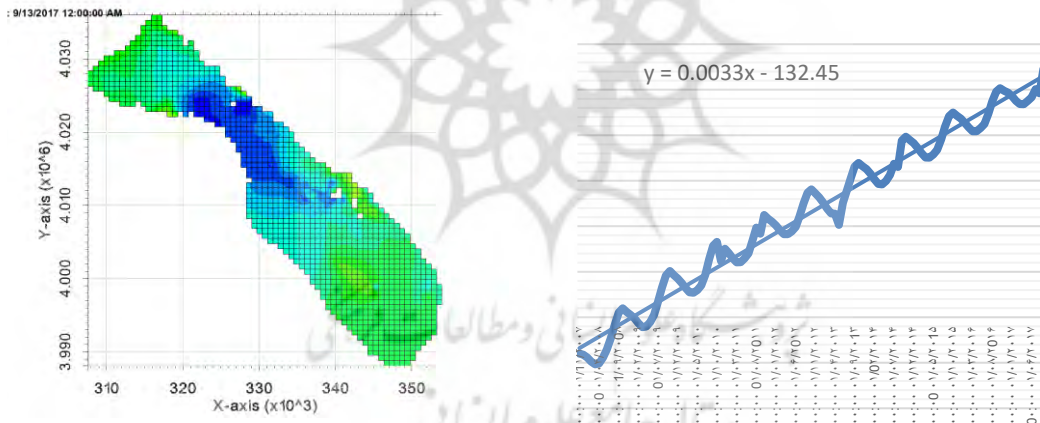
تحلیل حساسیت

در این پژوهش، از روش تحلیل حساسیت تلفیق شده با مرحله واسنجی استفاده شده است. نتایج خروجی از تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر در واسنجی آبخوان ابهر، نشان دهنده تأثیر حداکثری پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی افقی و یک مجموعه گروه خطی شبکه آبراهه‌ای است. بر همین اساس، ویرایش‌های صورت گرفته بر مرزهای بار هیدرولیکی پویا (مدل مفهومی) در حدود پارامترهای با حساسیت زیاد، خطای کل واسنجی را در آخرین مرحله از مراحل چهارگانه واسنجی به حداقل مطلوب کاهش داد.



شکل ۱۰: تحلیل حساسیت پارامترهای واسنجی

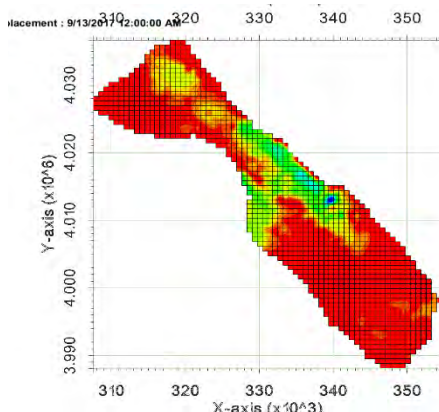
آخرین بازه لایه افت سطح آب در آبخوان در شکل (۱۲) به صورت رستری در شبکه تفاضل محدود و در نمودار زیر به صورت متوسط سری زمانی نمایش داده شده است. اثر اساسی فرونشست منشعب از افت تراز آب زیرزمینی است. بنابراین انتظار می‌رود در محدوده‌هایی که بیشترین کاهش سطح آب به وقوع پیوسته است، بیشترین تغییر ساختار عمودی وجود داشته باشد.



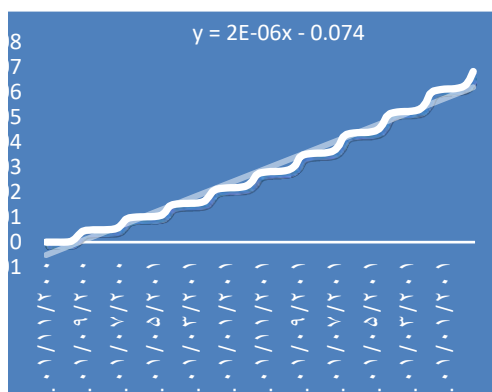
شکل ۱۲: تصویر رستری افت نهایی سطح آب در آبخوان

شکل ۱۱: سری زمانی افت سطح آب در آبخوان

در اشکال ۱۳ و ۱۴ به ترتیب مقدار لایه رستری بر روی شبکه تفاضل محدود فرونشست زمین در آخرین بازه زمانی و نمودار سری زمانی فرونشست متوسط در سطح آبخوان نمایش داده شده است. جدول شماره ۱ مشخص می‌کند که در آبخوان ابهر و در محدوده اشباع، به صورت متوسط نزدیک به ۳۴ سانتی متر با حجم ۲۲۲ کیلومتر مکعب فرونشست در طی بازه ده ساله مدل سازی به وقوع پیوسته است.



شکل ۱۴- تصویر رستری فرونشست نهایی در آبخوان



شکل ۱۳: سری زمانی فرونشست در آبخوان

جدول ۱: خلاصه آماری نتایج مدل سازی فرونشست

مقدار فرونشست کل (متر)	حجم کلی فرونشست (کیلومتر مکعب)	مساحت آبخوان (کیلومتر مربع)	بیشینه فرونشست محلی (متر)
۳۳۷/۰	۰۳۰/۲۲۲	۹۳۷/۶۵۷	۲۷۸/۰

با توجه به تئوری فازی تشریح شده در این پژوهش، ابتدا بر اساس معادله خطی، هر یک از ۸ پارامتر اساسی اثر گذار و یا بیان کننده وقوع فرونشست به یک نقشه رستری استاندارد در بازه ۰ تا ۱ تبدیل شد. لایه‌های فازی شده عبارتند از افت سطح آب، تفاضل در سطوح اولیه و نهایی آب، ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی افقی، هدایت هیدرولیکی افقی، عمق آبخوان اشباع، تغذیه از سطح، دبی بهره برداری و لایه آبدی ویژه. در تمامی پارامترها شکل فازی سازی به صورت مستقیم بوده است. تنها در پارامتر تغذیه فرآیند فازی به شکل معکوس انجام شد.

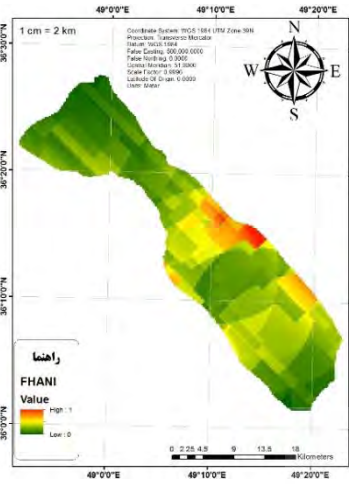
از پارامترهای جدول (۲) با استفاده از بهترین پهنه بندی، به منظور توسعه مدل فازی استفاده شد. ضرایب مرتبط با آبخوان منحصراً از آخرین دوره واسنجی مدل جریان آب زیرزمینی استخراج شد.

جدول ۲: خطای پهنه بندی لایه‌های منتخب

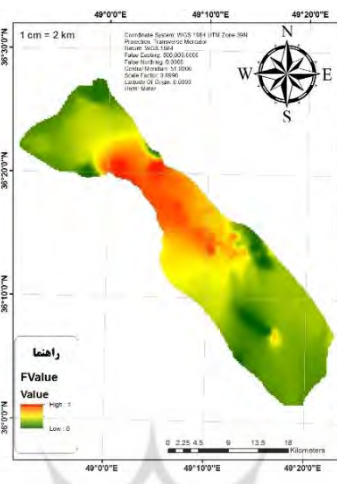
عنوان	فرونشست	سطح اولیه آب	سطح نهایی آب	افت سطح آب	دبی بهره برداری	عمق آبخوان	هدایت هیدرولیکی	ناهمسانگردی	تغذیه از سطح	لایه آبدی ویژه
Mean	۰۷۷.۰	۰۱۰.۰	۰۰۴.۰	۰۰۱.۰	۶۶۲.۲۳	۰۴۲.۰	۱۰۳.۱۱۲۷	۷۸۱.۸۴	۰۰۱.۰	۰۰۶.۰
RMS	۲۷۴.۰	۹۶۱.۰	۵۳۱.۱	۹۸۱.۰	۹۷۸.۱۹۲۶	۰۶۲.۴	۴۶۴.۲۰۶۷	۳۴۶.۲۹۸	۰۰۳.۰	۱۶۳.۰
MS	۲۱۷.۰	۰۰۲.۰	۰۰۰.۰	۰۰۲.۰	۷۷۹.۰	۰۰۷.۰	۰۰۰.۰	۰۶۱.۰	۱۱۱.۱۲۲۲	۳۵۴.۱
RMSS	۳۸۶.۲	۰۱۹.۱	۸۴۰.۰	۳۷۹.۱	۹۶۷.۳	۸۹۸.۰	۰۰۰.۰	۲۵۷.۰	۲۶۲.۴۰۳۳	۸۵۳.۵
ASE	۷۰۳.۰	۸۸۲.۰	۷۲۱.۱	۶۹۳.۰	۰۹۶.۲۳۲۲	۷۸۹.۴	۷۴۴.۱۲۰۴۹۸۱۲	۳۰۷.۴۹۶۸۲	۰۰۴.۰	۲۵۵.۰

در شکل‌های (۱۵) تا (۲۸) مقدار فازی شده هر یک از پارامترهای مؤثر بر پدیده فرونشست آورده شده است. با مقایسه نوع کلاسه‌بندی حاضر در این اشکال می‌توان مشاهده کرد بیشترین ارزش عددی بر خلاف پارامتر تغذیه از سطح، در پارامترهای افت سطح آب و مترادف با آن تفاضل رقوم اولیه و نهایی تراز آب سفره، ناهمسانگردی افقی هدایت هیدرولیکی و هدایت هیدرولیکی در بخش‌هایی از مرکز آبخوان بوده است. درحالی که برای پارامتر عمق ساختاری آبرفت، نواری از حاشیه شمال

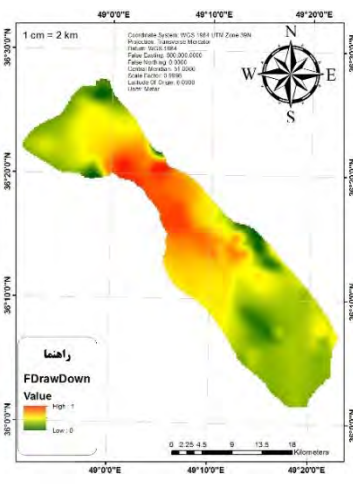
تا جنوب دشت ارزش عددی بیشتری را دارا است. در عین حال دبی بهره برداری با توجه به پراکنش چاه ها، علاوه بر بخش مرکزی، در قسمتی از شمال آبخوان هم دارای مقدار زیادی است. با این توضیحات می توان انتظار داشت که فرونشست آبخوان بدون توجه به ساختار آبرفتی باید در نواحی میانی بیشتر بوده باشد.



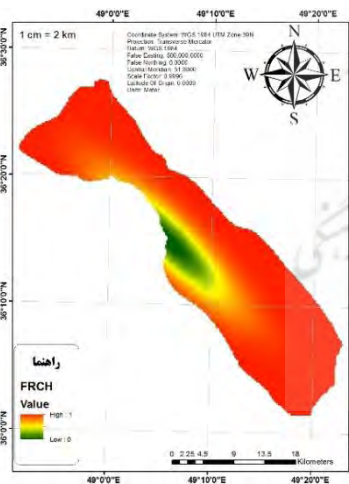
شکل ۱۷: ناهمسانگردی



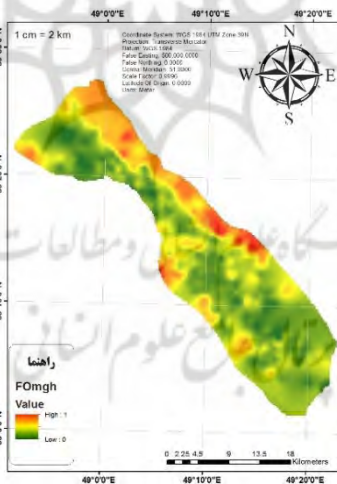
شکل ۱۶: تفاضل سطوح



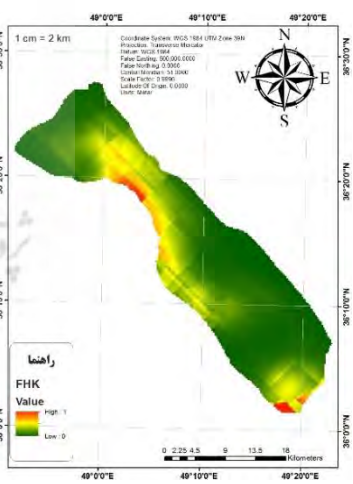
شکل ۱۵: افت سطح آب



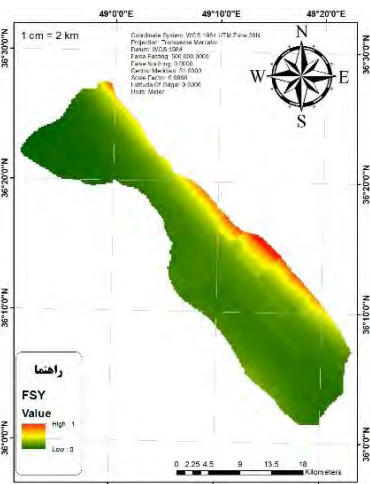
شکل ۲۰: تغذیه از سطح



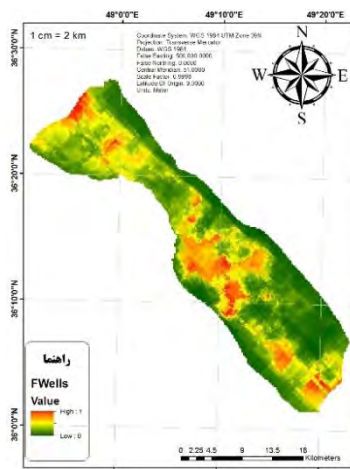
شکل ۱۹: عمق آبخوان



شکل ۱۸: هدایت هیدرولیکی

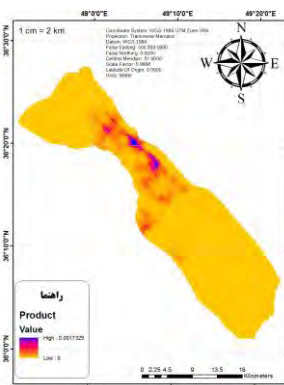


شکل ۲۲: روند در پارامتر آبدهی ویژه



شکل ۲۱: روند در پارامتر دبی بهره برداری

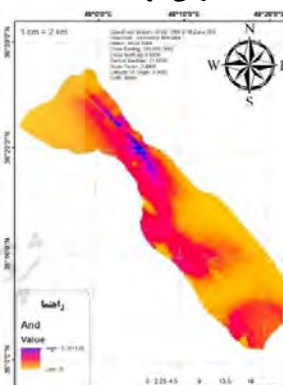
به منظور همپوشانی لایه‌های فازی شده در این روش، مطابق با آنچه در اشکال زیر آمده است، به روش‌های مختلف و با دستور Overlay در محیط نرم افزاری سیستم اطلاعات جغرافیایی این تحلیل انجام شد؛ که خروجی در روش همپوشانی گاما با توجه به اثر افزایشی و کاهش پارامترها بر یکدیگر بیشتر از دیگر موارد مورد توجه است. منظور از روش افزایشی و کاهش، تأثیر معکوس برخی از پارامترها بر روی یکدیگر در استخراج جواب نهایی به عنوان شاخص آسیب است. مثلاً پارامتر تغذیه با کاهش و پارامتر دبی بهره برداری با افزایش خود به فرونشست کمک خواهد کرد که این مهم در روش گاما قابل لحاظ کردن بود.



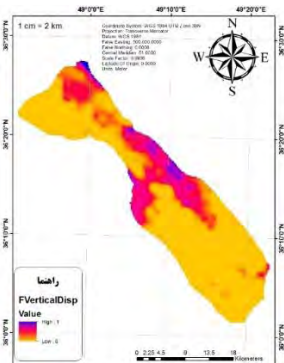
شکل ۲۵- همپوشانی Product



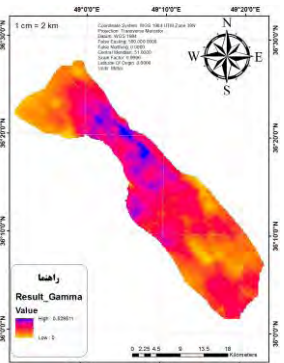
شکل ۲۴- همپوشانی Or



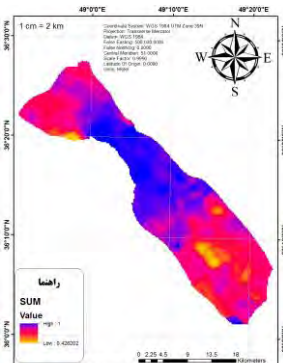
شکل ۲۳: همپوشانی And



شکل ۲۸: لایه فازی شده فرونشست



شکل ۲۷: همپوشانی Gamma



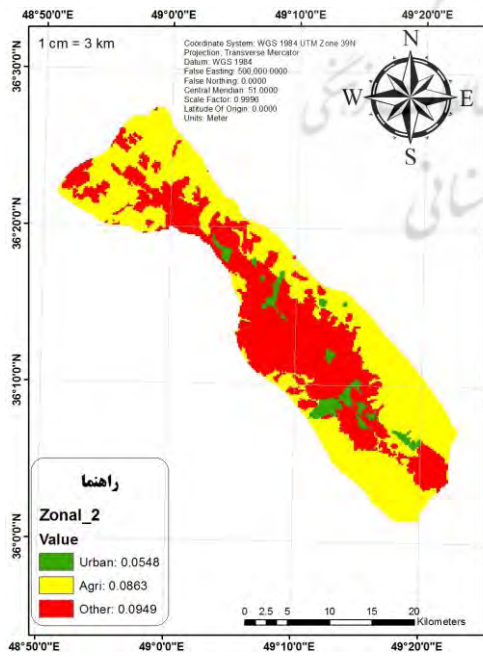
شکل ۲۶: همپوشانی SUM

در جدول ۳ می‌توان مشاهده کرد که درصد همبستگی لایه نقطه ای شده فرونشست بر پایه ضریب تشخیص در پارامترهای فازی شده پس از ایجاد معادله رگرسیون در بیشترین حالت مرتبط با لایه عمق آبخوان می‌باشد. لایه همپوشانی به روش معادله گاما نهایتاً منجر به افزایش همبستگی نشده است. رقم $30/485$ درصدی همبستگی لایه عمق در مقابل عدد $17/115$ درصدی همبستگی گاما نشان می‌دهد که برخی از لایه‌ها در تهیه مدل همپوشانی منجر به کشف ارتباط قوی تر نمی‌شوند. پس از لایه عمق ساختار آبخوان اشباع، دو لایه رستری ضریب آبدی ویژه و تفاضل سطح که همتراز با افت سطح آب در آبخوان بررسی می‌شود، منجر به ایجاد همبستگی‌های نسبی بوده اند.

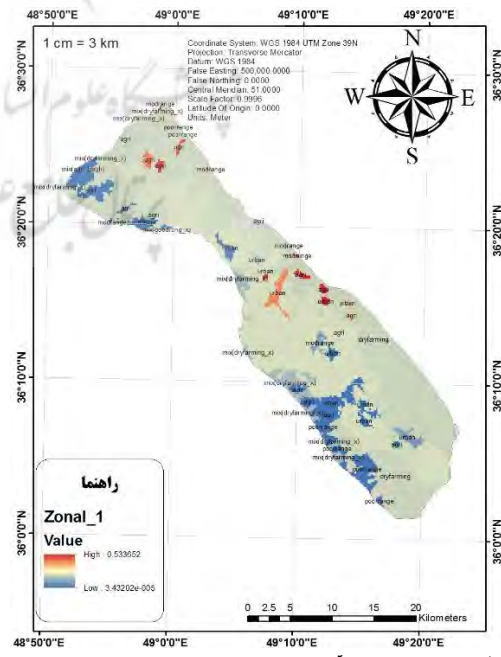
جدول ۳: همبستگی بین لایه‌های موثر با لایه فرونشست (درصد)

Gamma	آبدی ویژه	تغذیه	ناهمسانگرمی	هدایت هیدرولیکی	دبی بهره برداری	افت سطح آب	تفاضل سطح	سطح نهایی آب	سطح اولیه آب	عمق آبخوان
۱۷.۱۱۵	۱۷.۶۲۹	۱.۵۵۳	۷.۳۵۲	۰.۰۲۵	۰.۰۲۲	۱۰.۷۰۷	۱۷.۰۹۶	۱.۷۶۵	۲.۴۶۰	۳۰.۴۸۵

در گام بعدی به منظور بررسی تغییرات مکانی رخداد فرونشست، از لایه کاربری اراضی به عنوان بستر تحلیل آماری خروجی رستری فرونشست بهره گرفته شد. شکل‌های (۲۹) و (۳۰) بر اساس دو لایه برداری کاربری اراضی اولیه و تغییر کلاس یافته ایجاد شده است. در اشکال بالا با استفاده از دستور تحلیل آماری در GIS در دو حالت کد کاربری اراضی و سه دسته کاربری شهری، کشاورزی و غیر اقدام به تحلیل آماری لایه وقوع فرونشست شد. در شکل (۲۹) می‌توان مشاهده کرد که بیشترین فرونشست نسبی لزوماً در یک کاربری مشخص اتفاق نیافتاده است. در مواردی کلاس قرمز به نواحی شهری و در عین حال در مواردی به کلاس کشاورزی اختصاص یافته است.



شکل ۳۰: تحلیل آماری سه نوع کاربری اراضی



شکل ۲۹: تحلیل آماری پراکندگی جغرافیایی کاربری اراضی

همچنین در شکل (۳۰) با کاهش دسته‌های آماری مشخص می‌گردد که لایه فازی بایر، کشاورزی و در نهایت با فاصله زیاد ناحیه شهری بیشترین رخداد فرونشست را در خود دارند. عمده مطالعات صورت گرفته در حیطه بررسی رخداد فرونشست در دشت‌های کشور، تنها به تغییرات کمی ساختار زمین پرداخته است؛ برای نمونه می‌توان به مطالعات رنجبر و احتشامی (۲۰۱۹) اشاره کرد. با این حال ایجاد یک مدل تصمیم ساز نیز برای نمونه در مقاله صفاری و همکاران (۱۳۹۵)، (۸۲:۹۳) با ترکیب روش‌های محاسباتی سنجش از دور بدون اعتباریابی احتمالاتی بوده است. همچنین مجتبی رشوند و همکاران (۲۰۱۹) از یک روش معادلاتی به منظور ایجاد یک امکان پیش بینی فرونشست استفاده کردند، یا این حال در نهایت آنچه برای مدیران اجرایی کارآمد می‌باشد، ترکیب پارامترهای موثر بر ایجاد فرونشست با شرایط پیش بینی احتمالاتی شاخص محور می‌باشد. در این مطالعه و با بررسی پژوهش‌های اخیر در محدوده دشت ابهر، اقدام به تهیه یک شبیه ساز تصمیم گیری بر پایه روش‌های خطی فازی بر روی مدل رخداد فرونشست انجام شده است. شاخص محاسباتی نشان می‌دهد که افزایش تخریب ساختار عمودی زمین درست در مناطقی رخ داده است که در سناریوهای پیش‌بینی به عنوان زون‌های پر خطر و با ممنوعیت بهره برداری در بسیاری از مطالعات دسته بندی شده بود. این نواحی که عمدتاً در بخش‌های مرکزی با اعمال طرح‌های احیا و مدیریت آبخوان از سوی شرکت‌های تابعه کنترل شده است، همچنان در صورت وقوع تغییرات منفی اقلیمی، با گذر از مرز بحرانی وارد فضای شکست و نقطه غیر قابل بازگشت خواهد شد. نقطه شکست در هر منطقه شرایطی است که بافت آبرفتی تا حد زیادی پتانسیل بازیابی خود را در گردش فصلی برای افزایش تراز آب زیرزمینی با تخریب خلل و فرج از دست بدهد. این مناطق در این پژوهش در شدیدترین کلاس فازی به صورت مکانی قابل شناسایی است.

نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده در این پژوهش حاکی از آن است که مدل سازی فرونشست توسط تحلیل رگرسیون خطی با حداقل ۷۰ درصد پیوستگی انجام شد. از بین پارامترهای مؤثر تنها لایه نقطه‌ای شده عمق آبخوان دارای همبستگی ۳۰ درصد می‌باشد. صورت فازی شده این لایه‌ها با ترکیب افزایشی-کاهشی گاما بیشترین همبستگی را با لایه نقطه‌ای شده فرونشست از خروجی مدل MODFLOW داشت. با این حال مقدار همبستگی بسیار کمتر از رقم قابل انتظار پیش‌بینی بود. در کاربری شهری با وجود آنکه تنها ۴ درصد از سطح آبخوان را شامل می‌شود اما ۲۶ درصد از واقعه فرونشست در همین حدود صورت پذیرفته است. در کاربری کشاورزی و زمین‌های باغی که ۴۲ درصد از سطح آبخوان را معادل می‌شود ۵۶ درصد از واقعه فرونشست اتفاق افتاده است. اما در نهایت کاربری زمین‌های بایر با داشتن ۵۴ درصد از مساحت سطح آبخوان اشیاع تنها ۱۹ درصد از تغییرات عمودی ساختار آبخوان را به خود اختصاص داده است. نکته قابل توجه در این مورد، بالا بودن فرونشست در نواحی شهری است. در آبخوان ابهر با توجه به آبرفتی بودن سفره زیرزمینی اثر افت سطح آب را می‌توان با فاصله مکانی کم مشاهده کرد. به منظور بررسی دقیق تر احتمال رخداد فرونشست زمین، می‌توان از مدل‌های شبیه ساز تغییرات ساختار شهری با لحاظ تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه تهران و شرکت مدیریت منابع آب ایران برای فراهم کردن امکانات و داده‌های لازم به‌منظور انجام این تحقیق تشکر می‌شود.

منابع

- شریفی کیا، م.، افضلی، ع و شایان، س.، ۱۳۹۴. استخراج و ارزیابی اثرات پدیده‌های ژئومورفولوژیک ناشی از فرونشست در دشت دامغان، فصلنامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۲، پاییز ۱۳۹۴، صص. ۶۰-۷۴
- صفاری، ا.، جعفری، ف و توکلی صبور، س.، م.، ۱۳۹۵. پایش فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: دشت کرج-شهریار، فصلنامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۲، پاییز ۱۳۹۵، صص. ۸۲-۹۳
- قدرتی، م و ثعبانی، ع.، ۱۳۹۱. مدل‌های ریاضی آبهای زیرزمینی، آموزش کاربردی مدل GMS، چاپ اول، انتشارات سیمای دانش، ۲۱۰ص.
- Ahmed, W, A., Kalkan, E. Guzy, A. Alacali, M. Malinowska, A., 2020, Modeling of land subsidence caused by groundwater withdrawal in Konya Closed Basin, Turkey, Tenth International Symposium on Land Subsidence (TISOLS), 382, 397–401.
- Al-Sittaw., M. Gad, S. Fouad, R. Nofal, E.; 2019, Assessment of soil subsidence due to long-term dewatering, Esna city, Egypt. Journal Water Science Pages 40-53 | Received 05 Mar 2019, Accepted 30 May 2019, Published online: 25 Jul 2019.
- Bear, J., 1979. Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill, New York, 569p.
- Chenini, I. Mammou, A. B., 2010, Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling, Computers & Geosciences, Pages 801–817.
- Cho, J. Barone, V. A. Mostaghimi, S., 2009, Simulation of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a Virginia watershed., agricultural water management, Volume 96, pages 1–11.
- Garfias, J. Richard, M. Angus, C., 2020, Assessment of groundwater exploitation and land subsidence development in the Toluca aquifer system, Mexico, Repositorio Instrucional, 290-302.
- Gaura, S. 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, Volume 13, Pages 127–139.
- Hu, Y. Moiwu, J. P. Yang, Y. Han, S. Yang, Y., 2010, Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain, Journal of Hydrology, Volume 393, Pages 219–232.
- Kooi, H. Erkens, G., 2020, Creep consolidation in land subsidence modelling; integrating geotechnical and hydrological approaches in a new MODFLOW package (SUB-CR), Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, Proc. IAHS, 382, 499–503.
- Lachaal, F. Mlayah, A. Bédir, M. Tarhouni, J. Leduc, C., 2012, Implementation of a 3-D groundwater flow model in a sem.-arid region using MODFLOW and GIS tools: The Zéramdine-Béni Hassen Miocene aquifer system (east-central Tunisia), Computers & Geosciences, Volume 48, Pages 187–198.
- Le Page, M, L. Berjamy, B. Fakir, Y. Bourgin, F. Jarlan, L. Abourida, A. Benrhanem, M. Jacob, G. Huber, M. Sghrer, F. Simonneaux, V. Chehbouni, G., 2012, An Integrated DSS for Groundwater Management Based on Remote Sensing. The Case of a Semi-Arid Aquifer in Morocco, Water Resour Manage, Volume 26, Pages 3209–3230.
- Malczewski, J., 1999. GIS and Multicriteria Decision Analysis. United States, 408 p.
- Ranjbar, A. Ehteshami; M., 2019, Development of an Uncertainty Based Model to Predict Land Subsidence Caused by Groundwater Extraction (Case Study: Tehran Basin). Geotechnical and Geological Engineering, Volume 37, Issue 4, pp 3205–3219

- Rashvand M, Li, J. Liu, Y., 2019, *Coupled Stress-Dependent Groundwater Flow-Deformation Model to Predict Land Subsidence in Basins with Highly Compressible Deposits*. *Journal of Hydrology* 2019, 6(3), 78.
- Yang, F, R. Lee, C, H. Kung, W, J. Yeh, H, F., 2009, *The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of "Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project" in Taiwan*, *Engineering Geology*, Volume 103, Issues 1–2, Pages 39–58.
- Yaoutia, F, E. Mandourb, A, E. Khattacha, D. Kaufmann, O., 2008, *Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco)*, *Journal of Hydro-environment Research*, Volume 2, Issue 3, 12 December 2008, Pages 192–209.
- Zhang, H. Hiscock, K, M., 2010, *Modelling the impact of forest cover on groundwater resources: A case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands, UK*, *Journal of Hydrology*, Volume 392, Issues 3–4, Pages 136–149.

