

مقدمه

در طی سال‌های اخیر، از مخاطراتی که بشر به ویژه در دشت‌های آبرفتی با آن مواجه بوده فرونشست زمین می‌باشد ندیری و همکاران [۱۷]. فرونشست زمین عبارتند از نشست روبه پایین سطح زمین که همراه با بردار با اندکی جابه‌جایی افقی همراه می‌باشد طاهری تیزرو [۲۸]. فرونشست‌ها انواع متعددی دارند که بیشتر بر اثر کاهش فشار هیدرواستاتیک به صورت موضعی رخ می‌دهد. نوع اول فرونشست ناشی از بارگذاری است این نوع نشست به صورت آنی می‌باشد و میزان آن به بار اعمال شده و جنس زمین بستگی دارد. نوع دوم فرونشست که در خاک‌های ریز دانه بر اثر خروج سیالات از لابه‌لای ذرات خاک صورت می‌گیرد و برخلاف نوع اول این نشست به صورت تدریجی است. نوع سوم فرونشست بر اثر نشست‌های محیطی و طبیعی که مربوط به فضاهای خالی و محیط‌های کارستی و معدنکاری می‌باشد بهنیافر و همکاران [۱]. از جمله دلایل وقوع فرونشست می‌تواند افت سطح آب زیرزمینی، پمپاژ و غیره باشد. ولی به نظر بسیاری از کارشناسان اکثر فرونشست‌های اتفاق افتاده در دشت‌های ایران در اثر تراکم سفره‌های آب زیرزمینی واعظی‌نژاد [۳۰] و به دلیل پمپاژ بی‌رویه آب‌های زیرزمینی می‌باشد پاچکو و همکاران [۱۸]. اگرچه فرونشست به تدریج گسترش می‌یابد و شاید همان تاثیر خطراتی مانند سیل و زلزله را نداشته باشد و شاید به صورت گسترده قابل مشاهده نباشد ولی صدمات ناشی از آن می‌تواند فاجعه بار، ترمیم‌ناپذیر و پرهزینه باشد رنجبر و جعفری [۲۴]. از جمله این صدمات که میزان خطر آن در مناطق شهری به دلیل تراکم جمعیت خطرناک‌تر است شامل: خسارات به ساختمان‌ها کلیتون و آمسباری [۳]، خطوط آبرسانی، فاضلاب و گاز، تونل‌های شهری و معادن و نیز بزرگراه‌ها، جاده‌ها، خیابان‌ها و باند فرودگاهی است گامبولاتی و همکاران [۷]. هم‌چنین فرونشست می‌تواند موجب آسیب به خاک‌های حاصلخیز، تداخل آب شور و شیرین چنی هونگ و همکاران [۲]، خسارات به چاه‌ها در مناطق شهری و روستایی و یا به اصطلاح موجب رشد چاه‌ها در این مناطق شود. با توجه به تحقیقات انجام شده، فرونشست در بیشتر از ۱۵۰ شهر جهان بررسی و گزارش گردیده است هو و همکاران [۹] از جمله شهر ونیز در ایتالیا که بر اساس مطالعات گالوی و همکاران [۶] پدیده فرونشست بین سال‌های ۱۳۰۹ تا ۱۳۵۲ اتفاق افتاده و زمین حدود ۱۵ سانتی‌متر فرونشست داشته است. در ایالت آریزونا، کالیفرنیا آمریکا، شهرهای اوزاکا و توکیو در ژاپن و مناطق دیگر نیز این پدیده اتفاق افتاده است لارسون و همکاران [۱۱]. بر اساس مطالعات فین

استفاده از روش PCSM و مدل فازی برای تخمین شاخص پتانسیل فرونشست در آبخوان دشت اردبیل

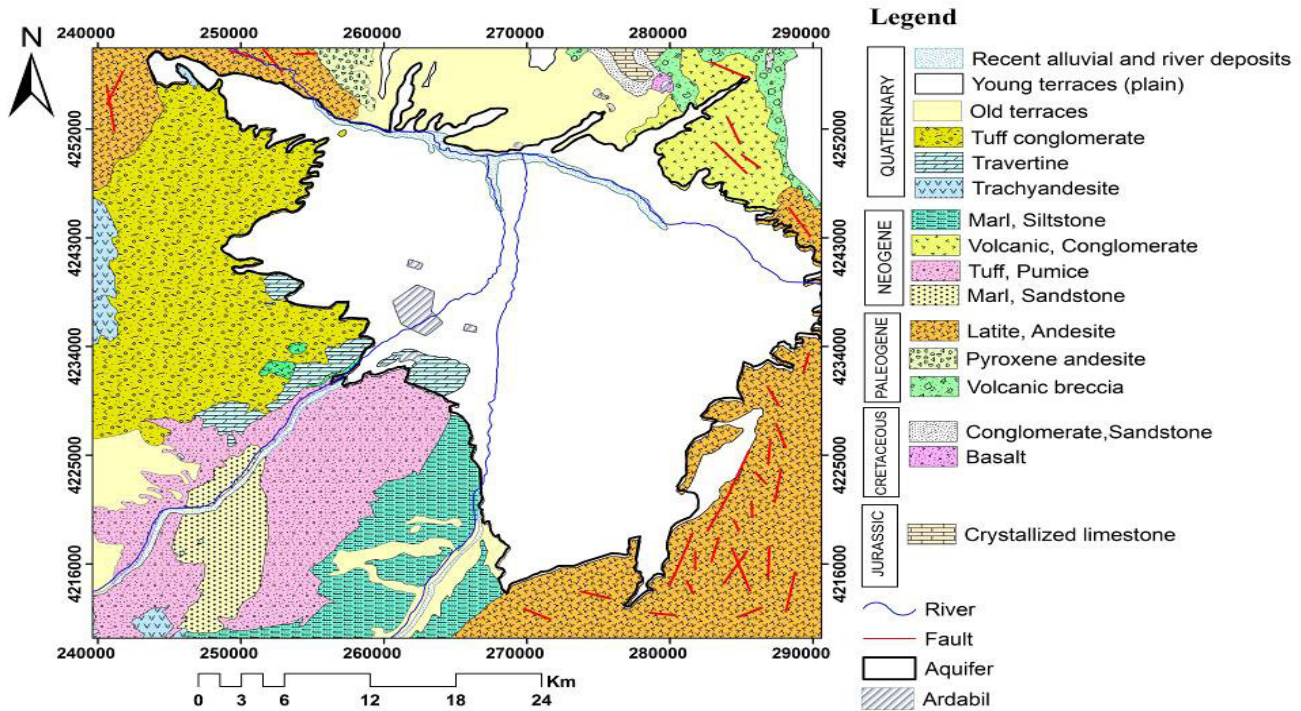
پری خلیفی^۱، عطاالله ندیری^۲، اسفندیار عباس نوین‌پور^۳ و مریم قره‌خانی^۴
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۳

چکیده

پدیده فرونشست زمین که ناشی از عوامل طبیعی و انسانی است، در طی سال‌های اخیر آثار تخریبی فاجعه‌باری در مناطق مسکونی، کشاورزی و صنعتی به دنبال داشته است. لذا در این پژوهش به منظور کنترل و مدیریت این پدیده در دشت اردبیل به شناسایی مناطق محتمل فرونشست در این دشت پرداخته شده است. بدین صورت که با استفاده از هفت پارامتر مؤثر بر فرونشست نقشه آسیب‌پذیری منطقه و بعد از رتبه‌دهی و وزن‌دهی با استفاده از روش PCSM شاخص آسیب‌پذیری فرونشست دشت محاسبه شد و این مقدار برای دشت اردبیل بین ۸۰ تا ۱۵۴ به دست آمد. سپس نتایج حاصل از این روش با مقدار فرونشست رخ داده که حاصل از بررسی تصاویر راداری INSAR ماهواره سیتل ۱ است صحت‌سنجی شد. در ادامه با توجه به اینکه رتبه‌ها و وزن‌های به کار برده شده در روش PCSM بر اساس نظر کارشناسی است لذا به منظور بهینه‌سازی این روش از مدل فازی سوگنو استفاده شد تا از این طریق به نتایج دقیق‌تری از آسیب‌پذیری دست یافت. بدین صورت که هفت پارامتر مؤثر بر فرونشست به عنوان ورودی مدل و مقدار شاخص آسیب‌پذیری تصحیح شده با فرونشست حاصل از تصاویر راداری به عنوان خروجی مدل تعریف شد. نتایج حاصل از این روش نشان داد که قسمت‌های جنوب و جنوب شرقی دشت دارای پتانسیل آسیب‌پذیری فرونشست بالایی است.

کلید واژه‌ها: فرونشست، آسیب‌پذیری، تصاویر راداری، فازی سوگنو

- ۱ - کارشناس ارشد آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه ارومیه.
- ۲ - نویسنده مسئول و دانشیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز. پست الکترونیک: nadiri@tabrizu.ac.ir
- ۳ - استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه ارومیه.
- ۴ - دانشجوی دکتری آب‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Geological map of the study area

منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، آبخوان دشت اردبیل است که در قسمت میانی استان اردبیل قرار گرفته و دارای وسعتی حدود ۹۹۰ کیلومترمربع است و از لحاظ توپوگرافی قسمت پیرامون منطقه کوهستانی است و قسمت مرکزی آن دشت آبرفتی است (شکل ۱). خروجی منابع آبی سطحی و زیرزمینی این دشت در شمال غربی دشت با ارتفاع ۱۱۰۸ متر از سطح دریاست. سه رودخانه اصلی این دشت رودخانه قره سو، بالخلوچای و قوری چای می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی ارتفاعات اطراف دشت اردبیل بخشی از رشته کوه البرز، رخساره‌های توف سبز با سن ائوسن در ارتباط با سنگ‌های آتشفشانی هستند قره خانی و همکاران [۸].

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از روش (PCSM) ندیری و همکاران [۱۳، ۱۴، ۱۵] برای ارزیابی نقاط دارای پتانسیل بالای آسیب‌پذیر نسبت به فرونشست در آبخوان دشت اردبیل استفاده شده است و سپس برای بهینه‌سازی وزن‌های اعمال شده از مدل فازی سوگنو استفاده شد. بدین منظور هفت لایه مؤثر برو فرونشست تعیین شد و برای تهیه لایه‌های مؤثر بر فرونشست از منابع اطلاعاتی گوناگونی همچون داده‌های سطح آب در پیزومترها، لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و لاگ پیزومترها، نتایج آزمایشات پمپاژ، تصاویر ماهواره‌ای و تصاویر راداری استفاده شد و با تجزیه و تحلیل این منابع اطلاعاتی در محیط برنامه ArcGIS نقشه پهنه‌بندی

و همکاران [۱۹] فرونشست در تایلند در اثر پمپاژ و برداشت از آب زیرزمینی اتفاق افتاده و طی ۳۵ سال گذشته باعث نشست سالانه ۱۲۰ میلی‌متر از اوایل سال ۱۹۸۰ شده است. در سال‌های اخیر نیز پدیده فرونشست در بسیاری از شهرهای ایران نیز به دلایل مختلفی رخ داده است که شامل: نشست در منطقه رستاق زارع مهر جردی [۳۲]، دشت‌های استان فارس رهنما و میراثی [۲۱، ۲۰]، جاده‌های دشت یزدکان کمک پناه [۱۰]، دشت کبودرآهنگ مسعودی و مهدوی [۱۲] و دشت مهیار صالحی و همکاران [۲۶] می‌باشد. فرونشست یک مسئله جهانی است به همین دلیل بررسی و پیش‌بینی این پدیده و پیامدهای ژئومورفولوژیکی آن حائز اهمیت است. در این پژوهش با استفاده از مطالعه کتب و مقالات و گزارشاتی که در مورد عوامل مؤثر بر فرونشست زمین از نقاط مختلف دنیا ارائه شده است چارچوبی جدید و کارآمد برای ارزیابی نقاط دارای پتانسیل فرونشست ارائه شده است تا بتوان با بهره‌گیری از این چارچوب و مدیریت صحیح این مناطق از ایجاد فرونشست جلوگیری کرد. به منظور نشان دادن کارکرد این چارچوب، دشت اردبیل به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است. از مزایای این چارچوب عملی می‌توان به هزینه اندک و تعداد داده‌های کم اشاره کرد و ضعف عمده آن، اعمال نظرهای کارشناسی برای تعیین وزن‌ها و رتبه‌های پارامترهای به کار رفته در این چارچوب است. در همین راستا، از مدل سوگنو برای بهینه‌سازی وزن‌ها و رتبه‌های این چارچوب استفاده شد. از مزیت‌های دیگر این روش این است که می‌تواند تخمینی از آسیب‌پذیری ویژه در منطقه را ارائه دهد که می‌تواند قابل استفاده برای مناطق مطالعاتی دیگر باشد.

1. Point Count System Models

آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت اردبیل تهیه شد. هم‌چنین به منظور صحت‌سنجی این روش از تصاویر راداری INSAR مربوط به فرونشست که به مدت یکسال از این منطقه گرفته شده استفاده گردید.

روش (PCSM)

این روش به منظور تعیین مناطق دارای پتانسیل فرونشست معرفی شده است و این کار با جمع کردن هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی مؤثر بر فرونشست انجام شده است. این پارامترها به صورت هفت لایه رستری در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد که تأثیر هر پارامتر و تهیه لایه‌های مؤثر در زیر به طور مختصر شرح داده شده است.

پارامترهای مؤثر بر فرونشست

افت سطح آب زیرزمینی: افت سطح آب زیرزمینی می‌تواند بر اثر عوامل مختلفی صورت بگیرد. یکی از مؤثرترین عامل افت سطح آب زیرزمینی، برداشت بیش از حد از آب زیرزمینی است که باعث کاهش فشار در لایه‌های زیرین می‌شود و از طرفی فشار سربار ناشی از وزن لایه‌های بالایی موجب کاهش حجم در لایه‌های پایینی می‌شود و در نتیجه نشست وسیع در سطح زمین صورت می‌گیرد رهنما و میراثی [۲۲].

محیط آبخوان: کاهش بلند مدت سطح آب زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه در آبخوان‌های دارای لایه‌های سیلت و رس باعث تحکیم لایه‌ها می‌شود که این پدیده به صورت فرونشست ظاهر می‌شود. بنابراین هرچقدر رسوبات دانه ریزتر و از جنس رس و سیلت باشد خطر فرونشست بیشتر می‌شود.

تغذیه: تغذیه مقدار آبی است که توسط ریزش‌های جوی یا رودخانه‌ها از سطح زمین نفوذ می‌کند و به سطح ایستابی می‌رسد و مانع از افت سطح ایستابی می‌شود بنابراین فرونشست نیز کم‌تر اتفاق می‌افتد.

پمپاژ: پمپاژ از چاه‌ها برای موارد مختلف از جمله کشاورزی، صنعت و غیره صورت می‌گیرد. اگر پمپاژ بیشتر از حد مجاز باشد می‌تواند باعث فرونشست شود. چنانچه میزان تغذیه آبخوان کم‌تر از میزان پمپاژ آبخوان باشد و آبخوان نتواند میزان آب پمپاژ شده را جبران کند سطح آب زیرزمینی افت می‌کند و در نتیجه باعث فرونشست می‌شود.

کاربری اراضی: استفاده از زمین برای هدف‌های مختلف از جمله استخراج نفت، گاز و آب و هم‌چنین کشاورزی و غیره صورت می‌گیرد و تأثیر هر یک از این عوامل بر روی فرونشست می‌تواند متنوع باشد. ضخامت آبرفت: این ضخامت شامل فاصله بین سطح زمین تا سنگ کف است. در حالت کلی مشاهده می‌شود که نشست بیشتر در لایه‌هایی اتفاق می‌افتد که ضخامت آبرفت بیشتر باشد زیرا اگر ضخامت آبرفت منطقه بیشتر شود آب زیادی می‌توان استخراج کرد. فاصله از گسل: لرزش ناشی از ایجاد گسل می‌تواند باعث ایجاد یک تراکم غیر الاستیک به دلیل افزایش تنش مؤثر در خاک شود و این عامل باعث تغییر آرایش ذرات خاک شده و آرایش جدیدی را همراه با کاهش حجم به وجود می‌آورد و باعث فرونشست می‌شود.

چگونگی تهیه لایه‌های مؤثر بر فرونشست

افت آب زیرزمینی: برای تهیه لایه افت سطح آب زیرزمینی، ابتدا میزان افت سطح آب زیرزمینی در سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ بر اساس آمار اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل محاسبه گردید و سپس در محیط نرم‌افزار ArcGIS درون‌یابی با روش IDW انجام گرفت و به منظور تلفیق با لایه‌های دیگر به فایل رستری تبدیل شد. سپس براساس مقدار بازه‌های به دست آمده که این بازه‌ها با توجه به مقدار آن در جهان تعیین شده است، رتبه‌دهی طبق جدول ۱ انجام گرفت و لایه افت سطح آب زیرزمینی تهیه شد (شکل ۲-الف).

محیط آبخوان: برای تهیه نقشه محیط آبخوان، با استفاده از لاگ چاه‌های منطقه جنس مواد تشکیل‌دهنده‌ی آبخوان با توجه به ضخامت هر لایه مشخص شد و سپس با اعمال رتبه‌دهی با توجه به جدول ۱ و پس از محاسبه میانگین رتبه‌ها، نوع خاک در هر پیزومتر به دست آمد و سپس درون‌یابی به روش IDW انجام گرفت و لایه‌ی محیط آبخوان به دست آمد (شکل ۲-ب).

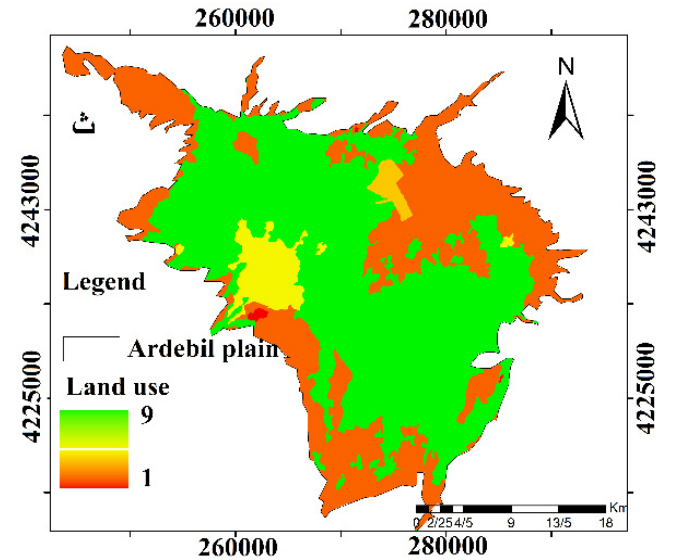
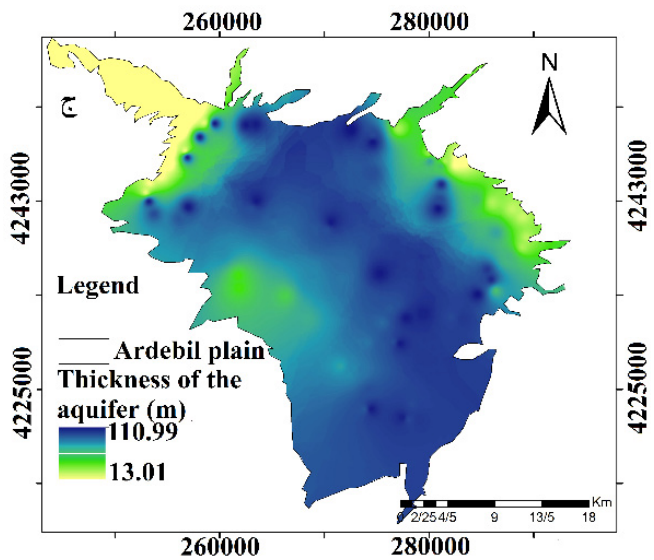
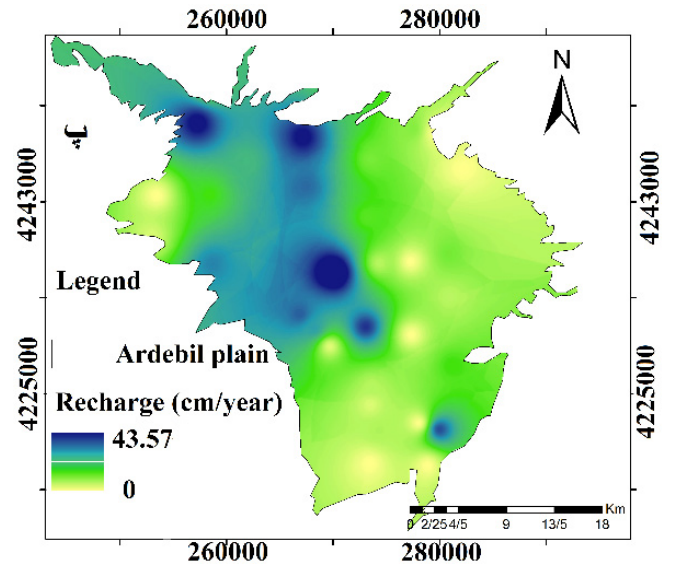
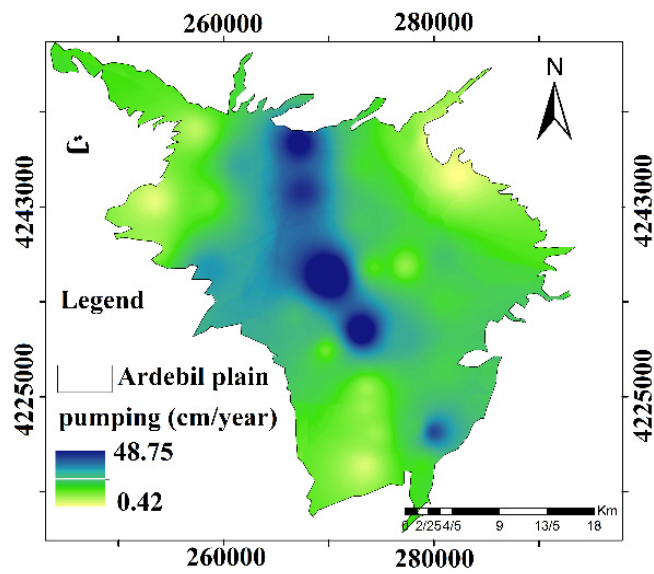
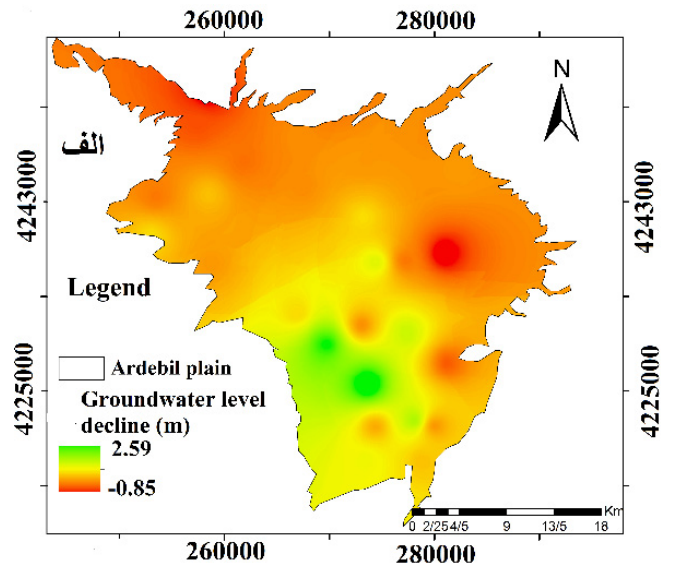
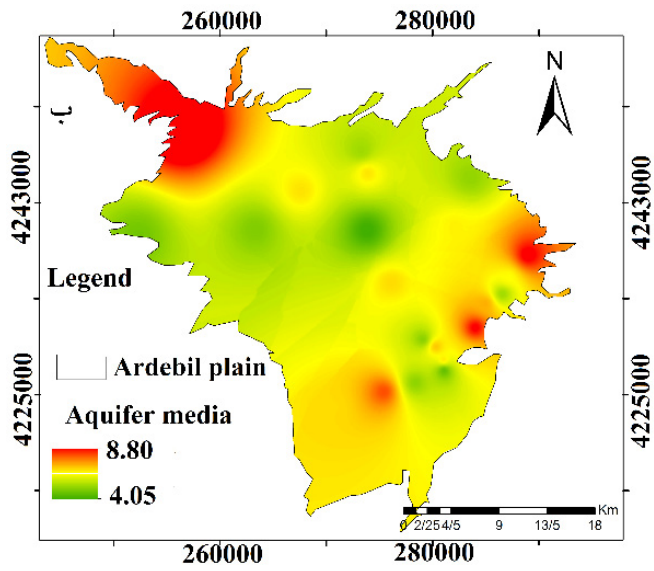
تغذیه: برای تهیه لایه تغذیه از روش ندیری و همکاران [۱۲] استفاده شد. در این روش ابتدا با استفاده از پیزومترهای موجود در منطقه روش تیسن به کار گرفته شد و سپس مجموع آب پمپاژ شده از هر پلی گون تیسن به دست آمد و با استفاده از تغییرات حجم آب زیرزمینی و مقدار ضریب ذخیره آبخوان و مقدار پمپاژ، تغذیه محاسبه گردید و درون‌یابی به روش IDW انجام گرفت (شکل ۲-پ). با توجه به مقدار تغذیه سطح زمین، شش بازه انتخاب و برای هر بازه رتبه‌ای با توجه به جدول ۱ تعیین شد.

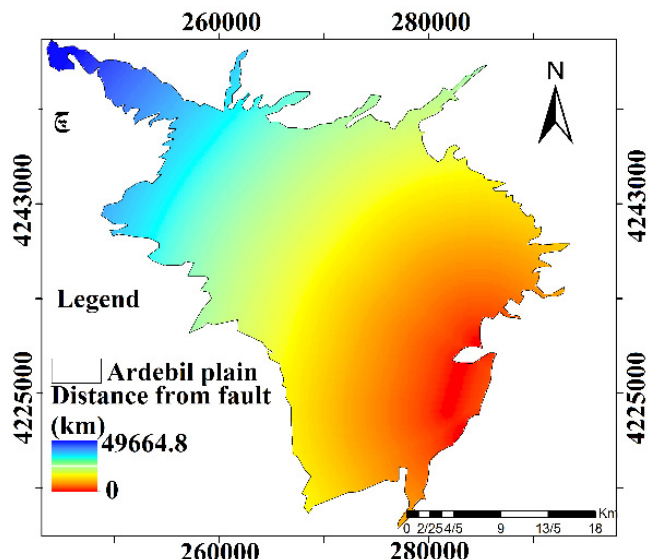
پمپاژ: برای تهیه لایه پمپاژ، میزان پمپاژ دشت در منطقه برای مدت یک سال در نظر گرفته شد و با استفاده از موقعیت پیزومترهای منطقه در محیط نرم‌افزار ArcGIS تیسن‌بندی انجام گرفت و مقدار پمپاژ از هر پلی گون تیسن محاسبه و تقسیم بر مساحت همان پلی گون شد و بعد از انجام درون‌یابی به روش IDW به نقشه رستری تبدیل شد و در نهایت رتبه‌دهی با توجه به بازه‌های انتخاب شده انجام گرفت و به هر بازه با توجه به جدول ۱ رتبه‌ای اختصاص یافت (شکل ۲-ت).

کاربری اراضی: برای تهیه لایه کاربری اراضی از شیب فایل اخذ شده از سازمان نقشه‌برداری استفاده گردید و سپس با توجه به تأثیر هر کدام از عوامل، رتبه‌دهی طبق جدول ۱ انجام گرفت (شکل ۲-ث).

ضخامت آبرفت: از داده‌های ژئوفیزیک سطحی و چاه پیمایی که از سازمان آب اخذ شده بود میزان ضخامت آبرفت در هر چاه منطقه محاسبه گردید و سپس این نقاط درون‌یابی شد و به فایل رستری تبدیل گردید و به هر یک از این بازه‌ها رتبه‌ای طبق جدول ۱ اختصاص یافت و بدین ترتیب لایه ضخامت آبخوان به دست آمد (شکل ۲-ج).

فاصله از گسل: برای تهیه لایه گسل، از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه زمین‌شناسی منطقه برای تعیین فاصله از گسل برای اطراف دشت استفاده شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS فاصله از گسل برای هر بخش از منطقه به دست آمد و سپس به فایل رستری تبدیل شد و در نهایت رتبه‌بندی طبق جدول ۱ انجام گرفت و لایه گسل





شکل ۲- نقشه پهنه‌بندی پارامترهای چارچوب؛ الف) افت سطح آب زیرزمینی؛ ب) محیط آبخوان؛ پ) تغذیه؛ ت) پمپاژ؛ ث) کاربری اراضی؛ ج) ضخامت آبرفت؛ چ) فاصله از گسل

Fig 2. Mapping of the framework parameters; a) Groundwater level decline; b) Aquifer media; c) Recharge; d) Pumping; e) Land use; e) Thickness of the aquifer; c) Distance from fault

فازی به ارتفاع و جابه‌جایی و تعریف سیستم مختصات انجام شد و سرانجام تصویر فرونشست را داری منطقه حاصل شد مسعودی و مهدوی [۱۲].

تصحیح شاخص آسیب پذیری برای اجرای مدل فازی سوگنو
به منظور ساخت مدل‌ها، ابتدا بر روی داده‌های مورد نظر تصحیحات لازم به صورت زیر انجام شد، به این صورت که شاخص آسیب‌پذیری فرونشست به دست آمده با استفاده از چارچوب عملی، با مقدار فرونشست رخ داده و اندازه‌گیری شده توسط تصاویر راداری با توجه به رابطه ۲ تصحیح شد ندیری و همکاران [۱۵].

$$\text{شاخص آسیب‌پذیری تصحیح شده} = \frac{(VUL)_{\max}}{(SSI)_{\max}} \times (SSI)_i \quad (2)$$

در رابطه ۲، VUL_{\max} بیشترین مقدار شاخص آسیب‌پذیری PSCM، هم‌چنین SSI_{\max} بیشترین مقدار فرونشست اندازه‌گیری شده توسط تصاویر راداری و SSI_i مقدار فرونشست اندازه‌گیری شده توسط تصاویر راداری است.

منطق فازی

هوش مصنوعی در سال ۱۳۴۴ شمسی به عنوان یک علم جدید ابداع شد ولی فعالیت در این زمینه از سال ۱۳۳۹ شمسی شروع شد فهیمی [۵]. تعاریف متعددی از هوش مصنوعی ارائه شده است. اکثراً تعاریفی که ارائه شده‌اند بر پایه یکی از چهار باور زیر است راسل و نورینگ [۲۵]: (۱) سیستم‌هایی که به طور منطقی فکر می‌کنند. (۲) سیستم‌هایی که به طور منطقی عمل می‌کنند. (۳) سیستم‌هایی که مانند

وابسته به دگرگونی سطح به کار برده می‌شود.

این تصویر توسط ماهواره سنتینل یک^۱ تصویربرداری می‌شود و به عنوان اولین ماهواره از سری ماهواره‌های پنج‌گانه کوپرنیکوس^۲ سازمان فضایی اروپا است که بطور شبانه روزی با هر شرایط آب و هوایی به تصویربرداری از سیاره زمین با استفاده از باند C می‌پردازد. این ماهواره برای مطالعه پدیده‌های مختلف سطح زمین در بازه زمانی طولانی مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماهواره سنتینل با چهار حالت تصویربرداری می‌کند و توان تفکیک مکانی آن کم‌تر از ده متر است. استفاده از این تصاویر بدین صورت انجام شد که ابتدا آماده‌سازی تصاویر Coregistration برای ایجاد تصاویر-Mas Slav و ter انجام گرفت و سپس برای تولید کردن تداخل‌سنجی فازه‌ها عملیات Interferometry انجام شد. تکنیک تداخل‌سنجی یک نوع تکنیک استفاده از تداخل ایجاد شده بین امواج الکترومغناطیسی جهت استخراج اطلاعات و جابجایی سطح زمین حاصل از زمین لرزه، زمین لغزش، تحرکات گسل و غیره است که این تکنیک اختلاف فاز بین دو تصویر را در جهت برآورد تغییرات سطحی محاسبه می‌کند و سپس جهت حذف اثرات توپوگرافی روی تصویر فازی از topo phase removal استفاده می‌کند. در این تحقیق برای حذف اثرات نویز از گلدشتاین استفاده گردید. در نهایت تصاویر به محیط شبیه‌سازی سیستم عامل لینوکس معرفی شد. در مرحله آخر نیز، تصویر به دست آمده در محیط لینوکس به تصویری با قابل اجرا در محیط sentinel toolbox تبدیل گردید و هم‌چنین تبدیل تصویر

1. Sentinel One
2. Copernicus

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Vul_i - \bar{Vul})^2}{\sum_{i=1}^n (Vul_i - \bar{Vul})^2} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Vul_i - \bar{Vul})(N_i - \bar{N})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Vul_i - \bar{Vul})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}} \quad (5)$$

در روابط بالا: Vul_i نتایج آسیب‌پذیری مشاهداتی، \bar{Vul} نتایج آسیب‌پذیری محاسباتی \bar{Vul} میانگین مشاهداتی، n تعداد کل مشاهداتی، N_i مقدار فرونشست اندازه‌گیری شده، \bar{N} میانگین مقدار فرونشست اندازه‌گیری شده، RMSE میزان خطای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی و R^2 ، r نشانگر میزان بازه شبکه است. هر چقدر میزان RMSE به صفر و R^2 و r به یک میل کنند این بدین معنی است که مقادیر مشاهداتی و محاسباتی بسیار به هم نزدیک است و مدل کم‌ترین خطا و بیشترین دقت را دارد.

نتایج

در این پژوهش برای ارزیابی پتانسیل فرونشست در منطقه از یک چارچوب عملی (PCSM) استفاده گردید. در روش به کار گرفته شده، پس از تهیه هفت پارامتر به صورت هفت لایه رستری، مرحله بعد که تعیین اهمیت نسبی هر مؤلفه مؤثر و اختصاص وزن مناسب به هر یک از پارامترهاست انجام گرفت. بعد از تلفیق لایه‌ها، براساس رابطه (SPI) شاخص آسیب‌پذیری محاسبه شد که مقدار آن برای دشت اردبیل بین ۸۰ تا ۱۵۴ به دست آمد و مقدار شاخص همبستگی (CI) بین نقشه آسیب‌پذیری فرونشست و فرونشست حاصل از تصاویر راداری ۸۹ و مقدار ضریب تبیین (R^2) نیز ۰/۳ به دست آمد. بر اساس نقشه آسیب‌پذیری بیشترین آسیب‌پذیری منطقه مربوط به قسمت‌های جنوبی و جنوب شرقی دشت است (شکل ۳-الف). پس از تهیه نقشه فرونشست برای منطقه، به منظور صحت‌سنجی روش PCSM به کار برده شده، از پهنه‌بندی تصاویر راداری سینتتل ۱ که توسط نرم‌افزار سینتتل تولباکس ۱ پردازش شده استفاده گردید و فرونشست رخ داده در منطقه مورد نظر (به مدت یکسال مربوط به حد فاصل سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۴ از منطقه) به دست آمد و با مقایسه اختلاف بین این دو تصویر نقاط دارای پتانسیل بالای فرونشست به دست آمد. بدین صورت که ابتدا نقاط پیرومتری منطقه مشخص گردید سپس میزان فرونشست رخ داده در این نقاط با استفاده از داده‌های تصاویر راداری مشخص شد و سپس انطباق میزان فرونشست اندازه‌گیری شده توسط تصاویر راداری بر روی نقشه آسیب‌پذیری، نشان داد که کلیه نقاطی که دارای فرونشست زیاد هستند در محدوده خطر زیاد فرونشست قرار گرفته‌اند (شکل ۳-ب) و این امر صحت روش مورد استفاده در این پژوهش را ثابت می‌کند. از معایب این روش می‌توان به وزندهی پارامترها اشاره کرد زیرا وزن‌های اعمال شده به هر پارامتر در این روش توسط نظر کارشناسی انجام شده، بنابراین به منظور تصحیح وزن‌های داده شده به هر پارامتر و نیز بهینه‌سازی این چارچوب از روش هوش مصنوعی فازی سوگونو استفاده شد. برای انجام مدل فازی سوگونو داده‌های آسیب‌پذیری تصحیح شده توسط رابطه ۲ به

انسان فکر می‌کنند. (۴) سیستم‌هایی که مانند انسان عمل می‌کنند. مدل فازی یکی از شاخه‌های مختلف هوش مصنوعی است. اساس تئوری فازی برای اولین بار توسط زاده [۳۱] با عنوان "نظریه مجموعه‌های فازی" برای رشته‌های مختلف معرفی شد. مجموعه‌های فازی شامل مرزهای مبهم و تدریجی بین مرزهاست، که برای مقابله با ماهیت عدم قطعیت در سیستم و خطاهای انسانی به کار می‌رود و اعطای نژاد [۳۰]. سیستم فازی شامل سه بخش اصلی است: (۱) تعریف تابع عضویت یا فازی‌سازی داده‌ها: از اساسی‌ترین مفاهیم در منطق فازی تابع عضویت می‌باشد که برای هر عضو یک مقدار عضویت می‌دهد که مقدار آن بین صفر و یک است که صفر بدون عضویت و یک دارای عضویت کامل است و مقادیر بین این دو عضویت بخشی دارند، (۲) قوانین فازی و انتخاب عملگرهای فازی: ایجاد ارتباط بین ورودی و خروجی با استفاده از یک سری قوانین مثل اگر آنگاه (if→then) صورت می‌گیرد که اگر مربوط به متغیرهای ورودی و آنگاه مربوط به نتایج می‌باشد ندیری و همکاران [۱۶]. در صورتی که قوانین اگر-آنگاه دارای بیش از یک بخش باشد عملگرهای فازی به کار گرفته شده تا یک عدد که نمایانگر حاصل آن قانون است به دست آورده می‌شود و این عدد به دست آمده در تابع خروجی به کار گرفته می‌شود و (۳) غیر فازی‌سازی: وظیفه این مرحله تبدیل مجموعه‌های فازی به یک عدد است رجبی و همکاران [۲۳] که توسط عملگرهای فازی 'or and'، 'not' انجام می‌گیرد. غیرفازی‌سازی فرآیندی است که مقادیر ورودی را از طریق مجموعه قوانین فازی ایجاد شده می‌گذراند تا پیش‌بینی مدل را استخراج کند کوپولا و همکاران [۴] عملگر and به دو صورت کمینه‌سازی (min) و وزندهی (prod) و عملگر or به صورت بیشینه‌سازی عمل می‌کند. قسمت اصلی هر مدل فازی قوانین آن است که بسته به نوع مدلی که استفاده می‌شود متفاوت می‌باشد. یکی از انواع روش‌های فازی روش سوگونو می‌باشد که به طور وسیعی در مطالعات مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

سیستم استنتاج فازی سوگونو

سیستم استنتاج فازی سوگونو، توسط میشوسوگونو در سال ۱۹۸۵ شمسی پیشنهاد شد سوگونو [۲۷]. که هدف این سیستم توسعه یک رویکرد سیستماتیک برای تولید قوانین فازی است و بیشتر در سیستم‌های کنترلی و در زمینه‌هایی که نیاز به محاسبات ریاضی است به کار می‌رود.

معیارهای ارزیابی دقت مدل‌های هوش مصنوعی

در این پژوهش، برای ارزیابی دقت و کارایی هر مدل و توانایی آن برای پیش‌بینی فرونشست از سه معیار استفاده شده که شامل: جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و ضریب همبستگی (r) است و این سه معیار بدین گونه محاسبه می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Vul_i - \bar{Vul})^2}{n}} \quad (3)$$

همچنین شاخص همبستگی (CI) که مقدار آن بین مدل فازی سوگنو و داده راداری ۱۰۵ است که مقدارش نسبت به قبل از بهینه‌سازی به مقدار ۱۶ افزایش یافته است و هم‌چنین مقدار (RMSE) که از ۰/۱ کم‌تر می‌باشد، مشاهده می‌شود که از ۳۱ نقطه در نظر گرفته شده برای فرونشست رخ داده توسط تصاویر راداری هیچ نقطه‌ای با فرونشست بالا در دسته آسیب‌پذیری پایین قرار نگرفته است و نیز در مناطقی که مدل آسیب‌پذیری بالایی را نشان می‌دهد فرونشست ماکزیمم در آن منطقه رخ داده است و این می‌تواند دقت مدل را تأیید کند.

جدول ۲- نتایج مدل فازی ساخته شده توسط سیستم استنتاج فازی سوگنو

Table 2. Results of the fuzzy model made by Sugeno Fuzzy Inference System

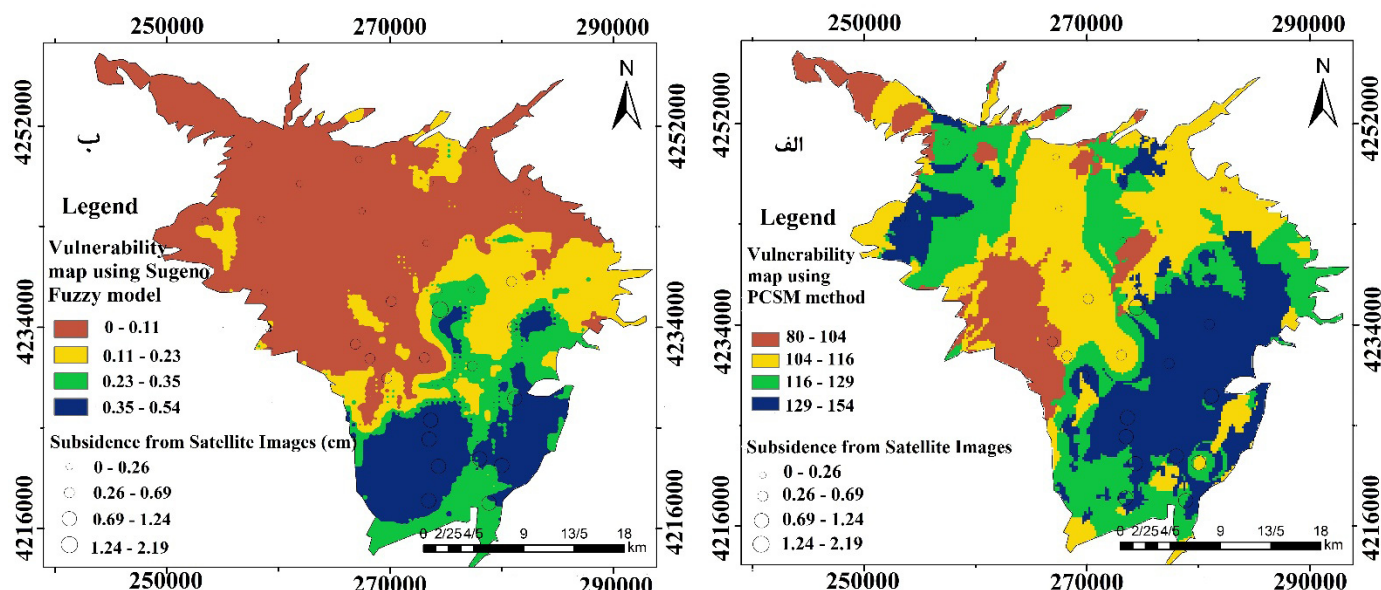
شاخص همبستگی	دشت اردبیل	معیار ارزیابی	مراحل
CI	Ardebil Plain	Evaluation criteria	Steps
105	0.08	RMSE ضریب خطا	مرحله آموزش
	0.78	R ² ضریب تعیین	Training Step
	0.1	RMSE ضریب خطا	مرحله آزمایش
	0.6	R ² ضریب تعیین	Testing Step

هم‌چنین طبق نتایج به دست آمده می‌توان گفت که مدل فازی سوگنو کارایی لازم را برای بهینه‌سازی وزن‌های داده شده در چارچوب عملی به کار برده شده را دارد. هم‌چنین نتایج به دست

همراه مقادیر هفت لایه به دست آمده به محیط اکسل وارد شد. این داده‌ها در محیط اکسل به صورت بانک اطلاعاتی متشکل از ۳۸۱۰ داده به دست آمد که این تعداد داده در محیط نرم‌افزار MATLAB به دو بخش، ۸۰ درصد برای مرحله آموزش و ۲۰ درصد برای مرحله آزمون انتخاب شد ندیری و همکاران [۱۵] بدین صورت که دو بخش داده‌های آزمون به تعداد ۳۰۴۸ نقطه و داده‌های آزمایش به تعداد ۷۶۲ نقطه ایجاد شد. از داده‌های مدل، ورودی‌ها جهت ساختن سیستم استنتاج فازی مشخص شدند. ورودی‌های مدل شامل هفت پارامتر مؤثر بر فرونشست می‌باشد و خروجی مدل، شاخص آسیب‌پذیری فرونشست تصحیح شده می‌باشد. در سیستم استنتاج فازی سوگنو، جهت تخمین مقدار فرونشست از ده شعاع دسته بندی متفاوت که مقدار آن بین صفر تا یک است استفاده شد. از بین شعاع‌های دسته‌بندی شعاع (۰/۴) با کم‌ترین (RMSE) و بیشترین (R²) انتخاب شد که مقادیر آن‌ها در (جدول ۲) ارائه شده است.

صحت‌سنجی مدل فازی سوگنو با استفاده از داده‌های تصاویر راداری

برای اینکه درستی یا نادرستی بهبود چارچوب عملی به کار برده شده توسط مدل فازی سوگنو مشخص شود صحت‌سنجی صورت گرفت. در صحت‌سنجی مدل هر چقدر تفاوت بین نتایج واقعی و اندازه‌گیری شده با نتایج به دست آمده از پیش بینی مدل کم‌تر باشد می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ترکیب پارامترهای به کار گرفته شده در مدل درست است. با توجه به (شکل ۳- ب) که نقشه آسیب‌پذیری تصحیح شده با مدل فازی سوگنو را نشان می‌دهد و مقدار فرونشست رخ داده توسط تصاویر راداری در کنار پیرومترها بر روی نقشه به صورت دایره تو خالی مشخص شده است. با توجه به رابطه (۳و۴) مقادیر ضریب تبیین (R²) که مقدار آن ۰/۷۵ و



شکل ۳- نقشه آسیب‌پذیری آبخیز دشت اردبیل با استفاده از دو روش؛ الف) روش PCSM؛ ب) مدل فازی سوگنو
Fig 3. The vulnerability map of Ardebil plain aquifer using two methods; a) PCSM method; b) Sugeno fuzzy model

in southeastern Harris County. Texas: Environmental Geology. 1: 154-149.

4. Coppola, E.A. Duckstein, L. and Davis, D. 2002. Fuzzy Rule-based Methodology for Estimating Monthly Groundwater Recharge in a Temperate Watershed. Journal of Hydrologic Engineering. 4: 326-335.

5. Fahimi, M. 1996. Artificial Intelligence and Techniques. Sharif University of Technology Publication, Translation. (In Persian)

6. Galloway, D. Jones, D.R. and Ingebritsen, S.E. editors 1999. Land subsidence in the United States Geological Survey, U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey. 1: 177-182.

7. Gambolati, G. Gatto, P. and Freeze, R.A. 1974. Mathematical simulation of the subsidence of Venice. 2. Results, Water Resource. 10: 563-577.

8. Gharekhani, M. Nadiri, A. Asghari Moghadam, A. and Sadeghi Aghdam, F. 2015. Optimization of the DRASTIC Model using a support vector machine and artificial neural network to evaluate the inherent vulnerability of the aquifer in Ardebil plain. Journal of Eco hydrology. 3: 311-324. (In Persian)

9. Hu, R.L. Yue, Z.Q. Wang, L.C. and Wang, S.J. 2004. Review on current status and challenging issues of and subsidence in China. Engineering Geology. 76: 65-77.

10. Komak panah, A. 2007. Study of the causes of earth fault in the roads of Yazd plain of Ardakan. Journal of Transportation. 2: 194-181. (In Persian)

11. Larson, K.J. Barasaolu, H. and Marino, M.A. 2001. Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the loss banos-kettlman city area, California, using a calibrated numerical simulation model. Journal hydrology. 242: 79-102.

12. Maghsoudi, Y. and Mahdavi, S. 2015. The Basics of Remote Sensing Radar. Publications of Khaje Nasir al-Din Tusi.

13. Nadiri, A.A. Fijani, E. Tsai, F. and Asghari-moghaddam, A. 2013. Supervised Committee Machine with Artificial Intelligence for Prediction of Fluoride Concentration. Journal of Hydro informatics. 15(4): 1474-1490.

14. Nadiri, A.A. Hassan, M.M. and Asadi, S. 2015.

آمده از مدل فازی سوگنو، نشان می دهد که مدل به کار برده شده در این پژوهش به منظور ارزیابی مناطق آسیب پذیر فرونشست قابل کاربرد است.

بحث و نتیجه گیری

هدف از این پژوهش، تعیین نقاط محتمل فرونشست در آبخوان دشت اردبیل با استفاده از چارچوب عملی و بهینه سازی آن با استفاده از مدل هوش مصنوعی است. به دلیل اینکه آبخوان دشت اردبیل از مناطق فعال کشاورزی است بنابراین حجم استخراج آب از منابع آب زیرزمینی نیز در این منطقه زیاد است و همین امر باعث فرونشست در این منطقه شده و باعث شده که قسمت هایی از این دشت به عنوان مناطق ممنوعه اعلام شود. با این حال همچنان استخراج منابع آب زیرزمینی در این دشت ادامه دارد و فرونشست رفته رفته تشدید می یابد. بنابراین ارزیابی نقاط آسیب پذیر و تعیین مناطق با پتانسیل بیشتر فرونشست در این دشت ضرورت دارد. بدین منظور هفت پارامتر موثر بر فرونشست به صورت هفت لایه رستری تهیه شد و مقدار شاخص آسیب پذیری به دست آمد که مقدار آن بین ۸۰ تا ۱۵۴ است. سپس شاخص به دست آمده با مقدار فرونشست به دست آمده با استفاده از تصاویر راداری مقایسه شد که نتایج حاصل، صحت چارچوب عملی را نشان داد. سپس برای بهینه سازی وزن های اعمال شده در چهارچوب، از مدل هوش مصنوعی فازی سوگنو استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل فازی سوگنو با بیشترین ضریب همبستگی (r) و کمترین خطا (RMSE) کارایی زیادی را برای بهینه سازی مدل دارند. براساس این مدل قسمت های جنوب و جنوب شرقی دارای پتانسیل آسیب پذیری فرونشست بیشتری نسبت به سایر مناطق است و باید این مناطق بیشتر مدیریت شود. این روش ارائه شده، روشی کارا برای پیشگیری از فرونشست در دشت ها می باشد و می تواند برای دشت های دیگر نیز که عموماً با پدیده فرونشست مواجه هستند یا احتمالاً در آینده مواجه خواهند شد استفاده شود.

منابع

1. Behnifeer, A. Ghanbarzadeh, H. and Eshraghi, A. 2010. Investigating the factors affecting subsidence in Mashhad Plain and its geomorphic consequences. Quarterly Journal of Geography and Urban Planning, Zagros Outlook. 5: 132-146. (In Persian)

2. Chieh-Hung, C. Wang, C. Hsu, Y. Shui-Beih, Y. and Long-Chen, K. 2010. Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan, Taiwan. Engineering Geology. 115: 122-131.

3. Clanton, U. and Amsbury, D. 1975. Active faults

Estimation of Stonehenge wave of petro physical logs using intelligent consulting machine in Sarvak Formation of Plain Abadan Formation. *Journal of Science University of Tehran*. 2: 1-10. (In Persian)

24. Ranjbar, M. Jafari, N. 2009. Investigating the Factors Affecting the Subsidence of the Lands of the Ashtar Plain. *Geography Quarterly (Scientific-Research Journal of Iranian Geographic Society)*. (18-19): 1-155. (In Persian).

25. Russell, S. and Norvig, P. 2010. *Artificial intelligence a modern approach*. Third edition, 152p

26. Salehi, R. Ghafoori, M. Lashkaripour, G. and Dehghani, M. 2011 Investigation Subsidence of the southern Mahyar plain, the effects of cracks on the farms, 7th Conference on Geology. *Engineering and Environment of Iran, Shahrood University of Technology, Shahrivar*, 7-1 p. (In Persian)

27. Sugeno, M. 1985. *Industrial applications of fuzzy control*, Elsevier Science Publication Co. 278 p.

28. Taheri Tizrou, A. 2008. *Groundwater management*. Second edition, Razi University Press, Karaj, 221p. (In Persian)

29. Tayfur, G. Nadiri, A.A. and moghaddam, A.A. 2014. Supervised intelligent committee machine method for hydraulic conductivity estimation. *Water resources management*. 28: 1173-1184.

30. VaeziNejad, S.M. and Toufigh, M.M. and Marandi, S.M. 2011. Zonation and prediction of land subsidence (case study-Kerman, Iran). *International journal of geosciences*. 2: 102-110.

31. Zadeh, L. 1965. Fuzzy sets. *Information and control*. 8(3): 338-353.

32. Zare Mehrjerdi, A. 2011. Investigating the phenomenon of earthquake and fractures in the Rastagaq area of the south of Meybod. *Journal of Geography and Environmental Planning*. 3: 166-155. (In Persian)

Supervised Intelligence Committee Machine to Evaluate Field Performance of Photocatalytic Asphalt Pavement for Ambient Air Purification. *Transportation Research Record*. (2528): 96-105.

15. Nadiri, A.A. Gharekhani, M. Khatibi, R. Sadeghfam, S. and Asghari moghadam, A. 2017. Groundwater vulnerability Indices conditioned by supervised Intelligence Committee Machine (SICM). *Science of the Total Environment*. 574:691- 706.

16. Nadiri, A.A., Shokri, S., Tsai, F.T-C., Asghari Moghaddam, A 2018a. Prediction of Effluent Quality Parameters of a Wastewater Treatment Plant Using a Supervised Committee Fuzzy Logic Model. *Journal of Cleaner Production* 180: 539-549.

17. Nadiri, A.A. Taheri, Z. Khatibi, R. Barzegari, G. and Dideban, K., 2018b. Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT. *Journal Science of The Total Environment*, 628: 1043–1057.

18. Pacheco, J. Arzate, J. Rojas, E. Arroyo, M. Yutsis, V. and Ochoa, G. 2006. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Queretaro valley. Mexico. *Engineering Geology*. 84: 143-160.

19. Phien-wej, N. Giao, P.H. and Nutalaya, P. 2006. Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology*. 82: 187-201.

20. Rahnema, H. and Mirasi, S. 2012. Seismic and Geotechnical Study of Land Subsidence and Vulnerability of Rural Buildings. *International Journal of Geosciences*. 3: 878-884.

21. Rahnema, H. and Mirassi, S. 2014. Crisis Management Concerning Underground Water Falling and Land Subsidence Occurrence in the Plains of Iran. *Advances in Environmental Biology*. 8(5): 1453-1465.

22. Rahnema, H. Mirassi, S. 2016. Analysis and evaluate the effective parameters on land subsidence. *Modares Civil Engineering Journal*. 1: 256-45. (In Persian)

23. Rajabi, M. Bahloli, B. and Mousavi, S.J. 2009.

*Abstract***Estimation of Subsidence Potential Index Using the PCSM Method and Fuzzy Model in Ardabil Plain Aquifer**P. Khalifi¹, A. A. Nadiri², E. Abbas Novinpour³ and M. Gharekhani⁴

Received: 01-12-2017

Accepted: 04-08-2018

Recently, land subsidence due to natural and human factors changed to catastrophic destruction for the residential, agricultural and industrial areas. In this study, the high potential subsidence areas of Ardabil plain were identified to control and manage this phenomenon. Thus, the seven effective parameters on the subsidence were rated and weighted and the subsidence potential index (SPI) was calculated for study area. The SPI value for the Ardabil Plain was obtained between 80 and 154. Then the results of this method were verified by occurred subsidence which is obtained through INSAR image analysis for the study area. Although the results are acceptable but to increase the framework efficiency and accuracy of results, the fuzzy model adopted to optimize this framework. In this way, seven effective parameters on the SPI were used as the input of the FL model and the value of the corrected SPI by obtained observed subsidence from INSAR images was defined as the output of the model. The results of this method showed that the southern and southeastern parts of the plain have the high subsidence potential.

Keywords: *Subsidence, Vulnerability, Radar images, Sugeno fuzzy*

1. M.Sc. Faculty of Sciences, Urmia University.

2. Corresponding Author and Associated Professor, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Email: nadiri@tabrizu.ac.ir

3. Assistant Professor, Faculty of Sciences, Urmia University.

4. Ph.D. Candidate in Hydrogeology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz.