

ارائه چهارچوب عملی برای تعیین پتانسیل فرونشست زمین (مطالعه موردی: دشت اردبیل)

پری خلیفی^۱، عطا الله ندیری^{۲،۳،۴*}، اسفندیار عباس نوین پور^۵، مریم قره خانی^۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد آب شناسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۲- دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه تبریز، تبریز

۳- مرکز پژوهشی زمین پزشکی و زیست محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز

۴- مرکز پژوهشی مهندسی و علوم آب، دانشگاه تبریز، تبریز

۵- استادیار گروه علوم، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۶- دکتری آب شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nadiri@tabrizu.ac.ir

چکیده

در طی سالهای اخیر، فرونشست زمین در آبخوانها به یکی از مشکلات جدی زیست محیطی در اثر افزایش فعالیتهای کشاورزی و صنعتی تبدیل شده است. رشد جمعیت باعث استفاده بیش از حد منابع آب زیرزمینی در برخی مناطق ایران شده و نتیجه آن ظهور پدیده فرونشست در این نقاط از جمله دشت اردبیل می‌باشد. بنابراین شناسایی مناطق محتمل فرونشست و کنترل و مدیریت این مناطق می‌تواند به درک بهتر این پدیده پیچیده و جلوگیری احتمالی از خسارات ناشی از آن بیانجامد. در این پژوهش رهیافت جدیدی با استفاده از هفت پارامتر مؤثر بر فرونشست برای تعیین محدوده‌های مستعد فرونشست زمین پیشنهاد شده و کارایی چهارچوب پیشنهادی در آبخوان دشت اردبیل، مورد بررسی قرار گرفته است. در این چهارچوب هفت پارامتر مؤثر در فرونشست شامل افت سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبرفت و گسل به صورت هفت لایه رستری تهیه شده و بعد از رتبه‌دهی و وزن‌دهی شاخص پتانسیل فرونشست محاسبه گردیده است که مقدار آن برای دشت اردبیل بین ۸۰ تا ۱۵۴ به دست آمد. با توجه به عدم قطعیت موجود در وزنهای تخصیص داده شده توسط کارشناسان، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی وزنهای اعمال شده استفاده گردید. سپس نتایج حاصل از آن با فرونشست بدست آمده از تصاویر راداری ارزیابی شده با شواهد صحرایی مقایسه شد و مشخص گردید که چهارچوب بهینه شده، نتایج نسبی بهتری ارائه می‌دهد و قسمتهای جنوب و جنوب شرقی دشت دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان دشت اردبیل، پتانسیل فرونشست، تصاویر راداری، چهارچوب عملی

A Framework to Determine the Land Subsidence Potential (Case Study: Ardabil Plain)

P Khalifi¹, AA Nadiri^{2, 3, 4*}, E Abbas Novinpour⁵, M Gharekhani⁶

Received: November 7, 2017

Accepted: February 5, 2020

¹M.Sc. Graduate in Hydrgeology, Urmia University, Urmia, Iran

²Assoc. Prof., Dept. of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³Geomedical and Environmental Research Center, University of Tabriz, Tabriz, Iran

⁴Engineering and Water Sciences Research Center, University of Tabriz, Tabriz, Iran

⁵Assist. Prof., Dept. of Sciences, University of Urmia, Urmia, Iran

⁶Ph.D. in Hydrgeology, Tabriz University, Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: nadiri@tabrizu.ac.ir

Abstract

Recently, land subsidence has become one of the serious environmental problems due to the increased agricultural and industrial activities. Population growth has caused groundwater over extraction and land subsidence in some parts of country such as Ardabil plain. Therefore, identifying, control and management of high potential subsidence areas may help to better understanding this complex phenomenon and avoiding the possible damages. In this research, a new framework was suggested using seven effective parameters on subsidence to determine the areas that were vulnerable to land subsidence and its capability was evaluated in Ardabil plain aquifer. In this framework the considered seven effective parameters on land subsidence including groundwater level decline, aquifer media, recharge, pumping, land use, alluvium thickness and fault were prepared in the raster layer format, then the weights and ranks were assigned for layers to calculate Subsidence Potential Index (SPI). The SPI for Ardabil plain aquifer was obtained within range of 80 to 154. According to inherent uncertainty of the assigned weights by experts, the genetic algorithm was adopted to optimize the given weights. The results were compared with subsidence value obtained from radar images. The performance of optimized framework was indicated relatively better results. The higher SPI was located in the southern and Eastern parts of the plain.

Keywords: Ardabil plain aquifer, Framework, Radar image, Subsidence potential

مقدمه

موجب نشست زمین شده است (گالوی و همکاران ۱۹۹۹). برداشت بیش از حد آب زیرزمینی باعث پایین رفتن سطح ایستابی و کاهش فشار هیدرواستاتیک می‌شود، بنابراین بخش جامد یا ساختمان سفره پایداری خود را از دست می‌دهد و باعث فشرده‌شدن و از بین رفتن فضاهای مفید بین ذره‌ای به خصوص در ذرات سیلت و ماسه می‌شود و در نتیجه امکان فرونشست ماندگار زمین را به صورت تدریجی فراهم می‌آورد (پاچکو و همکاران ۲۰۰۶). در این صورت حتی اگر سطح آب زیرزمینی مجدداً بالا بیاید، امکان بازگشت زمین به حالت اولیه وجود ندارد. فرونشست از جمله مهمترین مخاطرات زمین شناسی است که به علت تلفات کم انسانی

فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست ناگهانی یا تدریجی رو به پایین سطح زمین می‌باشد که می‌تواند دارای اندکی جابجایی افقی باشد (باتس و جکسون ۱۹۸۰). فرونشست زمین می‌تواند تحت تاثیر عوامل طبیعی همچون انحلال تشکیلات زیرسطحی، آب شدگی یخ‌ها، تراکم نهشته‌ها، حرکات آرام پوسته، خروج گدازه از پوسته زمین و یا در اثر فعالیت‌های انسانی مانند معدن‌کاری و برداشت آب زیرزمینی یا نفت رخ دهد (وانگ و همکاران ۲۰۰۸). به طور کلی عوامل مختلفی می‌توانند بر روی فرونشست زمین تاثیر بگذارند ولی در بسیاری از مناطق برداشت بیش از حد آب زیرزمینی

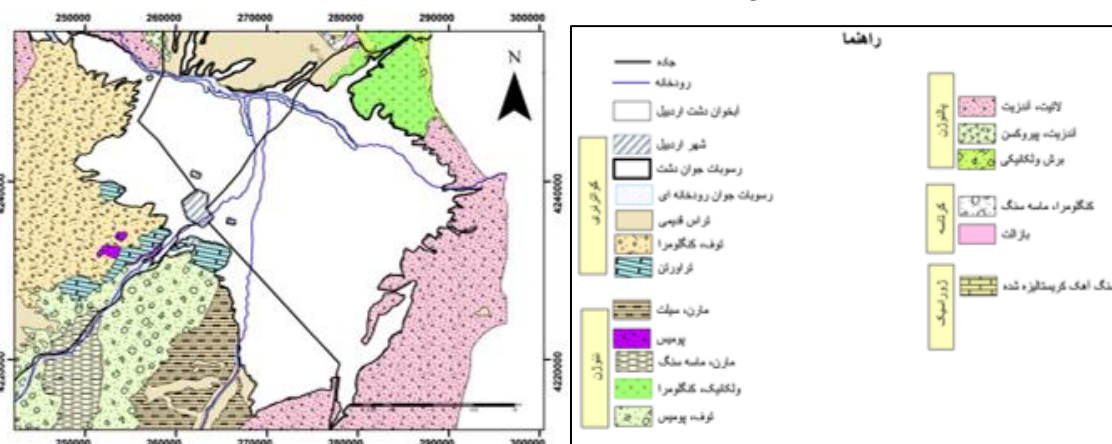
است تا بتوان با مدیریت صحیح، از وقوع فرونشست در آبخوانها جلوگیری کرد و به منظور نشان دادن عملکرد این روش دشت اردبیل به عنوان منطقه مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین صورت که ابتدا با استفاده از هفت پارامتر موثر از جمله: افت سطح آب زیرزمینی، پمپاژ آب‌های زیرزمینی، تغذیه، محیط آبخوان، ضخامت آبرفت، کاربری اراضی و تاثیر گسل نقشه آسیب‌پذیری دشت نسبت به فرونشست به دست آمد و سپس برای صحت‌سنجی چهارچوب ارائه شده، از نقشه پهنه‌بندی فرونشست حاصل از تصاویر رادار در منطقه استفاده گردید. از مزایای این چهارچوب عملی می‌توان به هزینه اندک و تعداد داده‌های کم اشاره کرد و ضعف عمده آن، اعمال نظر کارشناسی برای تعیین وزن پارامترهای به کار رفته در این چهارچوب است که برای این منظور از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی وزن‌های اعمال شده استفاده گردید. روش ارائه شده می‌تواند روشی ساده برای تعیین مناطق مستعد فرونشست در دشت اردبیل و سایر دشتهای باشد و مسیر مدیریت این فاجعه هیدروژئولوژیکی را هموار سازد.

منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، آبخوان دشت اردبیل است که دارای وسعتی حدود ۹۹۰ کیلومتر مربع می‌باشد و از لحاظ توپوگرافی قسمت پیرامون منطقه کوهستانی و قسمت مرکزی آن دشت آبرفتی است (شکل ۱). ارتفاعات بخش‌های غربی و شرقی دشت به ترتیب مربوط به کوه سبلان و کوه تالش است که از گدازه‌های آتشفشانی تشکیل شده است. بیشترین ارتفاع در این منطقه مربوط به قله سبلان با ارتفاع ۴۷۸۸ متر از سطح دریا و کمترین ارتفاع مربوط به قسمت خروجی در شمال غربی دشت با ارتفاع ۱۱۰۸ متر از سطح دریاست. سه رودخانه اصلی این دشت رودخانه قره سو، بالخلوچای و قره چای می‌باشد. به دلیل اینکه محدوده مورد مطالعه در یک منطقه کوهستانی قرار دارد آب‌های حاصل از

و سرعت کم و تدریجی بودن آن نسبت به سایر پدیده‌های ناگهانی مانند زمین لرزه و زمین لغزش و سیل و غیره کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این پدیده با مخاطرات طبیعی از قبیل افت توپوگرافی سطح زمین همراه است که در اکثر مواقع برگشت‌ناپذیر است. فرونشست یک مسئله جهانی به شمار می‌رود و در بیشتر از ۱۵۰ شهر در کشورهای مختلف جهان از جمله آمریکا، ایتالیا، تایلند، ژاپن و مکزیک گزارش و بررسی شده است (هو و همکاران ۲۰۰۴). اولین مطالعه انجام گرفته در مورد فرونشست زمین در سال ۱۸۲۵ و در بلژیک انجام یافته است. پس از آن فرونشست‌های ایجاد شده در شهر ونیز ایتالیا که در طول سالهای ۱۹۳۰ تا ۱۹۷۳ حدود ۱۵ سانتیمتر فرونشست داشته است، گزارش شده است (گامبولاتی و همکاران ۱۹۷۴). با توجه به گزارشات، فرونشست متعددی از نقاط خشک و کم باران از قبیل ایالت آریزونا، کالیفرنیا، آمریکا، شهرهای اوزاکا و توکیو در ژاپن و مناطق دیگر ارائه شده است (لارسون و همکاران ۲۰۰۱). همچنین می‌توان به فرونشست تایلند در طی ۳۵ سال گذشته اشاره نمود که در اثر پمپاژ آب در طی نشست سالانه ۱۲۰ میلیمتر ایجاد شده است (فین-وج و همکاران ۲۰۰۶). در سال‌های اخیر پدیده فرونشست در بسیاری از شهرهای کشور ایران به دلایل مختلفی رخ داده و مورد بررسی قرار گرفته است از جمله: بررسی پدیده نشست زمین و شکستگی‌های موجود در منطقه رستاق (زارع مهرجردی ۲۰۱۱)، جاده‌های دشت یزدکان (کمک پناه ۲۰۰۷) و دشتهای استان فارس (رهنما ۲۰۱۲ و رهنما ۲۰۱۴). تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی مقدار فرونشست زمین پس از ایجاد فرونشست ارائه شده است. اما به عنوان یک قاعده کلی پیشگیری از انجام فرونشست آسانتر و عاقلانه‌تر از بعد از ایجاد فرونشست است. بنابراین گام اول برای جلوگیری از وقوع این پدیده، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر از لحاظ فرونشست است. در این تحقیق چهارچوبی جدید و کاربردی برای ارزیابی مناطق دارای پتانسیل فرونشست در آبخوان ارائه شده

همچنین سازندهای سنوزوئیک اغلب چین خورده و سازندهای قدیمی تر تنها در بخش های شمالی یافت می شود (قره خانی و همکاران، ۲۰۱۵؛ کرد ۲۰۱۴).



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه.

آخر برای بهینه سازی وزن های اعمال شده توسط نظر کارشناس، روش الگوریتم ژنتیک به کار برده شده است. چهارچوب برای پیش بینی نقاط محتمل فرونشست

این چهارچوب به منظور نشان دادن مناطق دارای پتانسیل فرونشست به کار می رود و این کار با جمع کردن عوامل کلیدی هیدروژئولوژیکی موثر بر فرونشست انجام می شود که شامل هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی: افت آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان و تاثیر گسل می باشد (ندیری و همکاران، ۲۰۱۸). این پارامترها توسط سامانه اطلاعات جغرافیایی پردازش می شوند. سپس برای یکسان سازی واحدهای مختلف لایه ها و تعیین اهمیت هر یک از پارامترها بر روی فرونشست، رتبه دهی انجام می گیرد که این انتخاب بازه ها و رتبه دهی با توجه به گزارشاتی که در تمام نقاط جهان ارائه شده صورت می گیرد. در این رتبه دهی به بازه ای که کمترین تاثیر را بر فرونشست داشته باشد عدد ۱ و بازه ای که بیشترین تاثیر را داشته باشد عدد ۱۰ اختصاص می یابد. یکی از مهمترین مراحل

مواد و روش ها

در این پژوهش از روش^۱ PCSM ندیری و همکاران (۲۰۱۷، a, b, c، ۲۰۱۵) برای ارزیابی نقاط دارای پتانسیل بالای آسیب پذیری فرونشست در آبخوان استفاده شده است. در این روش، ابتدا پارامترهای موثر در فرونشست مورد بررسی قرار گرفت سپس نقشه های مربوط به هر یک از پارامترها با استفاده از منابع اطلاعاتی گوناگون از جمله داده های پیزومتری، لاگ چاه- های مشاهده ای، نتایج آزمایش های پمپاژ، نقشه کاربری اراضی و نقشه گسل ها تهیه گردید. تجزیه و تحلیل این اطلاعات در محیط نرم افزار ArcGIS انجام گرفت و در نهایت نقشه پارامترهای موثر در شاخص پتانسیل فرونشست (SPI)^۲ دشت اردبیل به صورت هفت لایه رستری تهیه گردید و سپس به هر یک از پارامترها وزن کارشناسی اختصاص داده شد. چگونگی تهیه لایه ها در ادامه به طور کامل توضیح داده شده است. برای صحت سنجی این روش از فرونشست اندازه گیری شده توسط تصاویر راداری در منطقه استفاده شد سپس در مرحله

² Subsidence Potential Index (SPI)

¹ Point Count System Models

الکترومغناطیسی جهت استخراج اطلاعات و جابجایی سطح زمین حاصل از زمین لرزه، زمین لغزش، حرکات گسل و غیره می باشد که این تکنیک اختلاف فاز بین دو تصویر را جهت برآورد تغییرات سطحی محاسبه می کند و برای حذف اثرات توپوگرافی روی فازی از، Topo، phase removal استفاده می کند (مقصودی و همکاران ۲۰۱۵). در تکنیک تداخل سنجی به کار برده شده در این تحقیق، به منظور حذف اثرات نویز از گلدشتاین استفاده شد سپس تصاویر به محیط شبیه سازی سیستم عامل لینوکس معرفی گردید و در نهایت، تصویر به دست آمده در محیط لینوکس به تصویری با قابلیت اجرا در محیط Sentinel toolbox تبدیل شد و سپس تعریف سیستم مختصات، تبدیل تصویر فازی به ارتفاع و جابه جایی انجام گرفت و سرانجام نقشه جابه جایی یا فرونشست منطقه مورد نظر حاصل گردید.

الگوریتم ژنتیک^۳ (GA)

الگوریتم ژنتیک یک روش یادگیری بر پایه تکامل بیولوژیک می باشد. این روش توسط جان هولند در سال ۱۹۷۰ معرفی گردید (هولند ۱۹۷۵). این روش شامل یک معادله ارتباط دهنده بین متغیرهای ورودی و خروجی می باشد (فربود نام و همکاران ۲۰۰۹) که بر مبنای تکامل جانوران تدوین شده و الگوریتمهای تکاملی نامیده می شوند. GA یک روش آماری برای بهینه سازی جستجو در حل یک مسئله بوده و جزئی از محاسبات تکاملی می باشد (ندیری و همکاران ۲۰۱۳). این الگو در سال ۱۹۸۹ روشی متفاوت را برای حل مسائل بهینه سازی ارائه کرده است (بروک ۲۰۰۱). الگوریتم ژنتیک مجموعه ای از راه حل های ممکن را تولید می کند که هر یک از این راه حل ها با استفاده از یک تابع تناسب مورد ارزیابی قرار می گیرند. سپس تعدادی از بهترین راه حل ها باعث ایجاد راه حل های جدیدی می شوند و این کار باعث تکامل راه حل ها می شود و فضای جستجو در جهتی

قبل از تلفیق مولفه ها و نقشه های مربوطه، تعیین اهمیت نسبی هر مولفه موثر و اختصاص وزن مناسب به هر یک از آنهاست. وزندهی به هر مؤلفه می تواند براساس دانش کارشناس، داده های مینا و یا ترکیبی از آنها صورت گیرد.

در این تحقیق براساس دانش کارشناسی و با توجه به اهمیت هر پارامتر بر روی فرونشست (باور، ۱۹۷۸)، وزنی بین ۱ (کمترین تاثیر) تا ۵ (بیشترین تاثیر) در نظر گرفته شد و براساس این وزن ها شاخص آسیب پذیری فرونشست طبق رابطه زیر محاسبه گردید.

$$SPI = GrGw + ArAw + RrRw + PrPw + LrLw + IrIw + FrFw \quad [1]$$

در رابطه بالا، SPI شاخص پتانسیل فرونشست است. G, A, R, P, L, I, F به ترتیب پارامترهای افت آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان و تاثیر گسل می باشد و r رتبه های مربوط به هر کدام از پارامترها و w وزنی است که به هر پارامتر تخصیص داده شده است.

تصاویر راداری INSAR

تصویر راداری توسط ماهواره سنتینل ۱ تصویربرداری می شود. این ماهواره به عنوان اولین ماهواره از سری ماهواره های پنج گانه کوپرنیکوس سازمان فضایی اروپاست که بطور شبانه روزی به تصویربرداری از سیاره زمین با استفاده از باند C می پردازد و ادامه دهنده راه سایر ماهواره های راداری است. این ماهواره برای مطالعه پدیده های مختلف سطح زمین بکار می رود و نیز برای مطالعه در بازه زمانی طولانی مدت مورد استفاده قرار می گیرد. ماهواره سنتینل با ۴ حالت تصویربرداری و توان تفکیک مکانی کمتر از ۱۰ متر است. داده های ماهواره سنتینل بصورت دو قطبی و با تفکیک زمانی بالا می باشد. تکنیک تداخل سنجی یک نوع تکنیک استفاده از تداخل ایجاد شده بین امواج

³ Genetic Algorithm

پایینی و نشست وسیع در سطح زمین میگردد (رهنما و میراثی ۲۰۱۶). بنابراین هرچه آب زیرزمینی پایبتر رود نشست تشدید می‌یابد. برای تهیه نقشه افت سطح آب زیرزمینی، در مرحله اول میزان افت سطح آب زیرزمینی در پیژومترهای منطقه برای یک سال (۱۳۹۵-۱۳۹۴) محاسبه گردید و سپس در محیط نرم افزار ArcGIS برای داده‌های نقطه‌ای حاصل از پیژومترها، درونیابی انجام گرفت و نقشه افت سطح آب زیرزمینی برای کل آبخوان بدست آمد. در مرحله بعد، رتبه‌دهی براساس جدول ۱ انجام گرفت به طوری که برای افت‌های بیشتر رتبه ۱۰ و برای افت‌های کمتر رتبه ۱ در نظر گرفته شد و در نهایت لایه افت آب زیرزمینی تهیه گردید (شکل ۲- الف).

محیط آبخوان: قابلیت تراکم رسوبات ریزدانه خیلی بیشتر از ماسه‌ها و سنگریزه‌ها می‌باشد. در نتیجه هرچقدر رسوبات دانه‌ریزتر و از جنس رس و سیلت باشد امکان فرونشست بیشتر می‌شود بنابراین در رتبه-دهی، رسوبات دانه‌ریز رتبه بیشتری می‌گیرد و هرچقدر رسوبات دانه درشت‌تر باشد رتبه کمتر می‌گیرد. برای تهیه نقشه محیط آبخوان با استفاده از لاگ چاه‌های منطقه، جنس مواد تشکیل دهنده‌ی آبخوان با توجه به ضخامت هر لایه مشخص شد و سپس با اعمال رتبه‌دهی طبق جدول ۱ و پس از محاسبه میانگین رتبه‌ها، مقدار متوسط رتبه‌های مربوط به جنس رسوبات در هر پیژومتر بدست آمد. در مرحله بعد، با انجام درونیابی به روش IDW نقشه محیط آبخوان برای کل منطقه مورد مطالعه تهیه گردید و در نهایت برای تلفیق با لایه‌های دیگر به حالت رستری تبدیل شد و لایه‌ی محیط آبخوان به دست آمد (شکل ۲- ب).

تغذیه: تغذیه خالص مقدار آبی است که به زمین نفوذ می‌کند و به سطح ایستابی می‌رسد و مانع از افت می‌شود. بنابراین هر چقدر تغذیه بیشتر باشد افت کمتر می‌شود و هرچقدر افت سطح آب زیرزمینی کمتر باشد فرونشست نیز کمتر اتفاق می‌افتد. برای ایجاد لایه تغذیه

تکامل پیدا می‌کند که به راه حل مطلوب و مناسب برسد. بنابراین در صورت انتخاب درست پارامترها، این روش می‌تواند بسیار موثر باشد. بدین صورت که همزمان بر روی مجموعه‌ای از پارامترها عمل می‌کند. برای این منظور در مرحله اول، هر کدام از پارامترها کدگذاری می‌شوند و جمعیت تصادفی اولیه پارامترها تولید می‌شود و سپس تابع هدف اعضای جمعیت محاسبه می‌شود. عملگرهای الگوریتم به صورت جابجایی و جهش عمل می‌کند و تا زمانی که تابع هدف به دست آید تولید نسل بعدی ادامه دارد (ندیری و همکاران ۲۰۱۵). در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی وزن‌های اعمال شده به هر یک از پارامترها استفاده شده است. متغیرهای ورودی تصمیم مسئله شامل هفت وزن داده شده به هفت پارامتر موثر بر فرونشست است که بعنوان جمعیت اولیه به مدل بهینه‌سازی GA وارد می‌شوند و تابع هدف، حداکثر سازی ضریب همبستگی پیرسون است که با استفاده از رابطه ۲ به دست آمده این ضریب بین فرونشست‌های اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه و شاخص پتانسیل فرونشست حاصل از تلفیق لایه‌ها می‌باشد. همچنین قیود استفاده شده بین ۱ تا ۵ می‌باشد. مدل بهینه‌سازی زمانی متوقف می‌شود که توابع هدف در تکرار متوالی یکسان باشند به این معنی که تغییر و یا بهبودی در تابع هدف ایجاد نشود.

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n(\sum x^2) - (\sum x)^2][n(\sum y^2) - (\sum y)^2]}} \quad [2]$$

در رابطه ۲، r ضریب همبستگی پیرسون بین فرونشست‌های اندازه‌گیری شده و شاخص پتانسیل فرونشست حاصل از تلفیق لایه‌ها را نشان می‌دهد.

تهیه و آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی

افت سطح آب زیرزمینی: برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی از لایه‌های پایینی باعث کاهش فشار در لایه‌های زیرین و به همان میزان فشار سربار ناشی از وزن لایه‌های بالایی موجب کاهش حجم در لایه‌های

فرونشست زمین تاثیر بگذارد. بنابراین تاثیر هر یک از این عوامل بر روی فرونشست می تواند متنوع باشد. برای تهیه لایه کاربری اراضی از نقشه کاربری اراضی اخذ شده از سازمان نقشه برداری استفاده گردید. سپس با توجه به تاثیر هر کدام از عوامل طبق جدول ۱ به هر یک از عوامل رتبه ای اختصاص داده شد و سپس لایه کاربری اراضی تهیه گردید (شکل ۲- ث).

ضخامت آبرفت: با توجه به متغیر بودن لایه بندی خاک و عمق سنگ بستر که به تناسب آن ضخامت لایه های ریزدانه هم متفاوت است در حالت کلی مشاهده میشود که نشست زمین بیشتر در لایه هایی اتفاق می افتد که ضخامت آبرفت بیشتر باشد. برای تهیه لایه ضخامت آبرفت از داده های ژئوفیزیک سطحی، چاه پیمایی و مطالعات قبلی انجام شده در منطقه (کرد و همکاران ۲۰۱۳) استفاده شد و میزان ضخامت آبرفت در هر چاه محاسبه گردید و سپس با بکارگیری درونیابی، ضخامت آبرفت برای کل منطقه مورد مطالعه بدست آمد. در نهایت با اعمال رتبه دهی طبق جدول ۱، لایه ضخامت آبخوان تهیه گردید (شکل ۲- ج).

تأثیر گسل: حرکات تکتونیکی از قبیل گسل ها بر روی فرونشست تاثیر میگذارند بدین صورت که لرزش ناشی از گسل باعث ایجاد تراکم در خاک می شود و این عامل می تواند باعث تغییر چیدمان خاک شود و چیدمان جدیدی را با کاهش حجم به وجود آورد که باعث فرونشست شود. برای تهیه لایه گسل از تصاویر ماهواره ای و نقشه زمین شناسی منطقه استفاده شد و سپس با استفاده از نرم افزار ArcGIS فاصله از گسل برای هر بخش از منطقه به دست آمد و سپس با توجه به فاصله از گسل رتبه بندی طبق جدول ۱ انجام گرفت و لایه گسل ایجاد گردید (شکل ۲- چ).

از روش ندیری و همکاران (a,b, c۲۰۱۷) استفاده شد. بدین صورت که با استفاده از روش تیسسن، مساحت دشت به چندضلعی هایی تقسیم شد و سپس با توجه به مقدار پمپاژ از هر چندضلعی تیسسن و اختلاف سطح آب و میزان ضریب ذخیره آبخوان، میزان تغذیه محاسبه گردید (شکل ۲- پ). در نهایت برای مقادیر تغذیه محاسبه شده، بازه هایی انتخاب گردید و سپس برای هر بازه رتبه ای طبق جدول ۱ تعیین شد به طوری که برای تغذیه کمتر رتبه ۱۰ و برای تغذیه بیشتر رتبه ۱ اختصاص داده شد.

پمپاژ: در دشت اردبیل میانگین آب مصرفی برای مصارف شرب، صنعتی و کشاورزی به ترتیب حدود ۲۶، ۴ و ۱۷۷ میلیون مترمکعب بر سال می باشد که ۸۹٪ این آب از منابع آب زیرزمینی و ۱۱٪ آن از آب سطحی تأمین می گردد (کرد و همکاران ۲۰۱۳). این برداشت آب از چاه ها می تواند باعث فرونشست زمین شود، بدین صورت که اگر میزان تغذیه آبخوان کمتر از میزان پمپاژ آبخوان باشد و آبخوان نتواند میزان آب پمپاژ شده را جبران کند سطح آب زیرزمینی افت می کند و در نتیجه موجب فرونشست می شود. برای تهیه لایه پمپاژ، ابتدا موقعیت پیزومترهای موجود در منطقه و میزان پمپاژ از دشت برای مدت یکسال به محیط اکسل وارد و سپس در محیط نرم افزار ArcGIS با به کارگیری روش تیسسن، منطقه مورد مطالعه بر اساس موقعیت پیزومترها به چندضلعی هایی تقسیم گردید سپس مقدار پمپاژ از هر چندضلعی تیسسن محاسبه و بر مساحت همان چندضلعی تیسسن تقسیم گردید. به این ترتیب بعد از محاسبه میزان پمپاژ برای کل دشت و ایجاد لایه رستری، رتبه دهی با توجه به بازه های انتخاب شده طبق جدول ۱ انجام گرفت و در نهایت لایه پمپاژ ایجاد گردید (شکل ۲- ت).

کاربری اراضی: استفاده از زمین برای موارد مختلف از جمله استخراج نفت، گاز و آب و همچنین استفاده های دیگر از قبیل کشاورزی و غیره که برای هدف های مختلف انجام می شود، می تواند بر روی

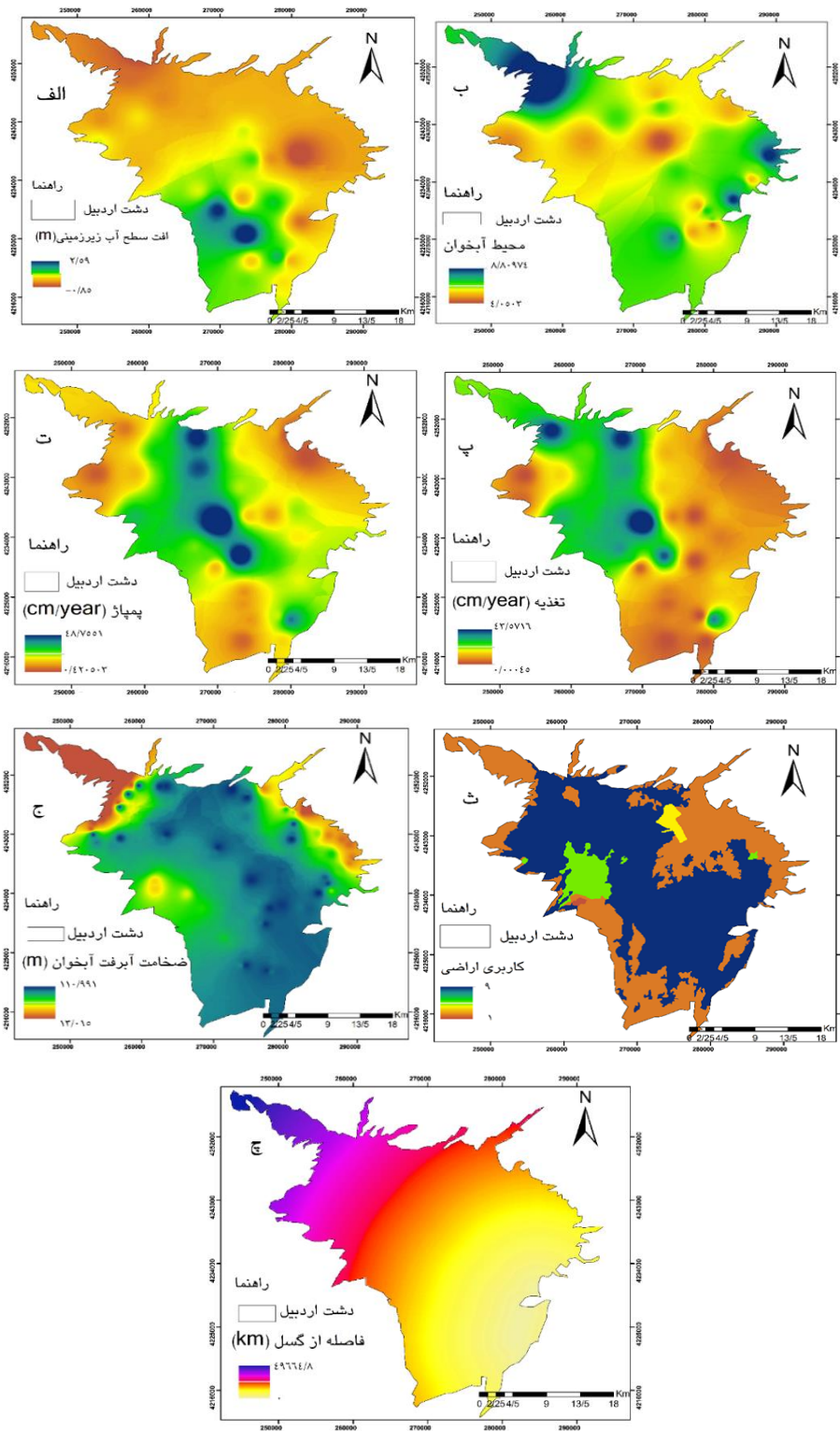
جدول ۱- کلاسه‌بندی و رتبه‌های مربوط به پارامترهای چهارچوب عملی.

افت سطح آب زیرزمینی (m)			کاربری اراضی			ضخامت آبخوان (m)		
محدوده	رتبه	وزن	محدوده	رتبه	وزن	محدوده	رتبه	وزن
۰ - ۰/۲	۱		معدنکاری و استخراج منابع نفت و گاز و آب	۹ - ۱۰		۲۵-۰	۱	
۰/۲ - ۰/۵	۲		کشاورزی آبی			۵۵-۲۵	۲	
۰/۵ - ۰/۹	۳	۵	احداث سد	۷ - ۹	۳	۹۰-۵۵	۳	۳
۰/۹ - ۱/۴	۴		مناطق مسکونی	۶ - ۹		۹۰ - ۱۳۰	۴	
۱/۴ - ۲	۵		کشاورزی دیم	۴ - ۸		۱۷۵-۱۳۰	۵	
۲-۲/۷	۶		مرتع	۱ - ۲		۲۲۵-۱۷۵	۶	
۲/۷ - ۳/۵	۷		زمین بایر و دریاچه	۱		۲۸۰-۲۲۵	۷	
۳/۵ - ۴/۴	۸		کارخانجات و نیروگاه‌ها	۴ - ۸		۳۴۰-۲۸۰	۸	
۴/۴ - ۵/۴	۹		حمل و نقل	۳ - ۸		۴۰۵-۳۴۰	۹	
> ۵/۴	۱۰					> ۴۰۵	۱۰	

پمپاژ از آب زیرزمینی (cm year ⁻¹)			محیط آبخوان			تغذیه (cm year ⁻¹)		
محدوده	رتبه	وزن	محدوده	رتبه	وزن	محدوده	رتبه	وزن
< ۰/۰۰۰۱	۱		رس	۸-۱۰		۴-۰	۱۰	
۰/۰۰۰۱ - ۰/۰۰۵	۲		سیلت	۸-۹		۹-۴	۹	
۰/۰۰۵ - ۰/۰۱	۳	۴	سنگ‌های رسوبی (آهک و تبخیری‌ها) کارستی	۶-۸	۵	۱۴-۹	۷	۴
۰/۰۱ - ۰/۵	۴		شده			۱۹-۱۴	۵	
۰/۵ - ۱	۵		ماسه	۳-۵		۲۴-۱۹	۳	
۱ - ۰	۶		شن	۲-۳		> ۲۴	۱	
۰ - ۲۰	۷		سنگ‌های رسوبی (آهک و تبخیری‌ها) کارستی	۱-۳				
۲۰ - ۴۰	۸		نشده					
۴۰ - ۶۵	۹		سنگ‌های آذرین و دگرگونی	۱-۳				
> ۶۵	۱۰		خاک‌های دارای مواد آلی با شرایط اکسیداسیون	۸-۱۰				

فاصله از گسل (km)

محدوده	رتبه	وزن
۰ - ۱	۱۰	
۱ - ۲	۸	
۲ - ۳	۶	۱
۳ - ۴	۴	
۴ - ۵	۲	
> ۵	۱	



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

در این پژوهش برای ارزیابی نقاط محتمل فرونشست در دشت اردبیل از منابع اطلاعاتی قابل دسترس استفاده شد و سپس با تجزیه و تحلیل این

نتایج و بحث

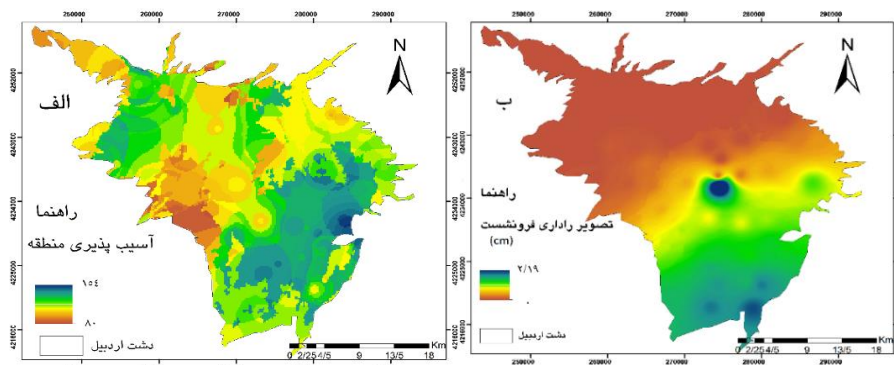
نتایج حاصل از تلفیق لایه‌ها

ارائه شده از پهنه‌بندی تصاویر راداری INSAR ماهواره سنتینل ۱، برای زمانهای بین ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ به مدت دوازده ماه استفاده شد و با مقایسه اختلاف بین این دو تصویر نقاط دارای پتانسیل بالای فرونشست حاصل گردید (شکل ۳-ب). به منظور صحت‌سنجی، ابتدا میزان فرونشست رخ داده در قسمت‌های مختلف دشت با استفاده از داده‌های تصاویر راداری مشخص شد و سپس با انطباق میزان فرونشست اندازه‌گیری شده توسط تصاویر راداری بر روی نقشه آسیب‌پذیری فرونشست تهیه شده (شکل ۳-الف)، مشخص شد که کلیه نقاطی که دارای فرونشست زیاد هستند در محدوده خطر زیاد فرونشست قرار گرفته‌اند که این امر صحت روش مورد استفاده در این پژوهش را تایید می‌کند.

اطلاعات در محیط نرم افزار ArcGIS پارامترها به صورت هفت لایه رستری که در شکل ۲ نشان داده شده است تهیه گردید. سپس برای تعیین اهمیت هر کدام از پارامترها وزندهی مطابق جدول ۱ انجام گرفت و بعد از تلفیق لایه‌ها شاخص آسیب‌پذیری محاسبه شد. شاخص آسیب‌پذیری فرونشست برای دشت اردبیل بین ۸۰ تا ۱۵۴ به دست آمد که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری متوسط (۱۳۲-۸۰) و زیاد (۱۳۲-۱۵۴) است و بیشترین آسیب‌پذیری فرونشست منطقه مربوط به قسمت‌های جنوبی و جنوب‌شرقی دشت می‌باشد.

مقایسه نتایج با تصاویر راداری

پس از هم‌پوشانی لایه‌های ایجاد شده و تهیه نقشه آسیب‌پذیری فرونشست، برای صحت‌سنجی چهارچوب



شکل ۳-الف) نقشه پهنه‌بندی فرونشست با استفاده از تلفیق لایه‌ها؛ ب) نقشه پهنه‌بندی فرونشست منطقه با استفاده از تصاویر راداری.

است. همانطور که مشاهده می‌شود وزن لایه‌های پمپاژ، ضخامت آبخوان و گسل نسبت به وزنی که توسط نظر کارشناسی اعمال شده بود افزایش پیدا کرده است همچنین بقیه لایه‌ها نیز هر کدام تغییراتی را متحمل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در منطقه مطالعاتی افت آب زیرزمینی و پمپاژ هم جهت با هم عمل می‌کنند. وقتی پمپاژ افزایش می‌یابد افت سطح آب زیرزمینی بیشتر می‌شود و چون وزن لایه پمپاژ افزایش یافته برای حفظ تعادل از میزان وزن لایه افت سطح آب زیرزمینی کم شده است. در حقیقت روش GA وزنه‌های این دو پارامتر را متعادل می‌کند. در حالی که بر اساس نظر کارشناسی دو

مقایسه نتایج با الگوریتم ژنتیک

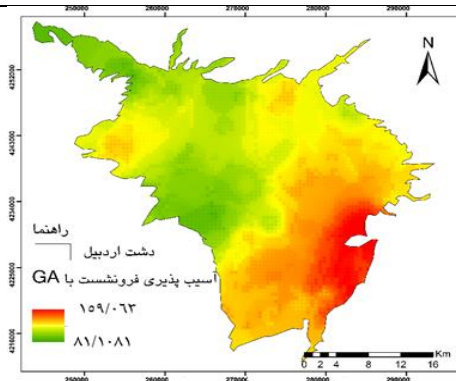
در این پژوهش، به منظور دقیق‌تر شدن وزنه‌های استفاده شده و افزایش ضریب همبستگی بین مقادیر فرونشست اندازه‌گیری شده توسط تصاویر راداری و مقادیر پتانسیل فرونشست در چهارچوب عملی ارائه شده از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شد. مقدار وزنی که از این روش به دست آمد وزنی بین ۱ تا ۴/۸۹ است. نتیجه بدست آمده در جدول ۲ نشان داده شده است که در این جدول وزنه‌های بدست آمده از روش الگوریتم ژنتیک و وزنه‌های استفاده شده در چهارچوب عملی مقایسه شده

پارامتر می‌تواند جدا از هم تاثیر بگذارد و همیشه هم جهت نیست و چون در این مدل مؤثرترین پارامتر بر روی فرونشست مربوط به پارامتر پمپاژ می‌باشد و افت سطح آب زیرزمینی هم جهت با پمپاژ عمل می‌کند و همچنین شاید عوامل دیگری هم باشد که بر روی افت آب زیرزمینی تاثیر داشته باشد که در این تحقیق دیده نمی‌شود ولی شاید در مطالعات دیگر برحسب شرایط منطقه ای این وزن‌ها به گونه ای دیگر تغییر کند. برای لایه محیط آبخوان با توجه به اینکه ذرات خاک غالب در منطقه از نوع ماسه می‌باشد و تاثیر ماسه بر روی فرونشست نسبت به رس و سیلت کمتر است وزن این لایه توسط GA کاهش یافته است. برای ضخامت آبخوان نیز با توجه به اینکه در این پارامتر عامل موثر ضخامت لایه هاست و دانه بندی دخالت ندارد، بنابراین می‌تواند وزن بیشتری بگیرد و نیز وزن بدست آمده از الگوریتم ژنتیک برای لایه فاصله از گسل نشان می‌دهد که تاثیر گسل از مقداری که در نظر کارشناسی در نظر گرفته شده است بیشتر است. طبق جدول ۲، ضریب همبستگی پیرسون بین نقشه

فرونشست حاصل از تصاویر راداری و نقشه فرونشست پهنه‌بندی شده به روش وزن‌دهی با الگوریتم ژنتیک و وزن‌دهی با نظر کارشناسی به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۴۵ بدست آمد که این نشان‌دهنده توانایی و کارایی الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی وزن‌ها می‌باشد. همچنین دلیل تفاوت زیاد در ضریب همبستگی دو روش را می‌توان در کمبود داده‌های لاگ زمین‌شناسی، اطلاعات لایه‌های هیدرواستراتیگرافی و تعداد پیزومترهای موجود در دشت و همچنین عدم قطعیت در لایه‌های تهیه شده در چهارچوب عملی ارائه شده و پردازش تصاویر راداری جستجو کرد. شکل ۴ نقشه آسیب‌پذیری فرونشست دشت اردبیل را با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) نشان می‌دهد که شاخص آسیب‌پذیری با استفاده مدل GA بین ۸۱ تا ۱۵۹ به دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود همانند نقشه آسیب‌پذیری که از چهارچوب عملی به دست آمده بود در این نقشه نیز بیشترین مقدار فرونشست مربوط به قسمت جنوب و جنوب‌شرقی دشت است.

جدول ۲- وزن‌های تصحیح شده با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک (GA) و ضریب همبستگی.

روش‌های استفاده شده	افت سطح آب زیرزمینی	محیط آبخوان	میزان تغذیه	میزان پمپاژ	کاربری اراضی	ضخامت آبخوان	فاصله از گسل	ضریب همبستگی پیرسون
وزن کارشناسی اعمال شده به هر پارامتر	۵	۵	۴	۴	۳	۲	۱	۰/۴۵
وزن حاصل از بهینه سازی GA	۱/۰۳	۳/۱۱	۳/۴۷	۴/۸۹	۱/۳۰	۴/۵۹	۳/۷۷	۰/۷۷



شکل ۴- نقشه آسیب‌پذیری منطقه با روش GA.

نتیجه‌گیری کلی

رستری تهیه شد و بعد از وزندهی، شاخص آسیب‌پذیری محاسبه گردید. سپس برای بهینه‌سازی وزندهی استفاده شده که توسط نظر کارشناسی صورت گرفته بود از روش الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شد و نتایج حاصل نشان داد که بر اساس این روش، قسمت‌های جنوب و جنوب‌شرقی دشت پتانسیل آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به فرونشست دارد. بنابراین با استفاده از این چهارچوب می‌توان محدوده‌هایی که در حال حاضر با فرونشست مواجه نیستند ولی ممکن است در آینده با خطر فرونشست مواجه شوند را با هزینه و اطلاعات کم و با سرعت بالا نسبت به سایر روشهای دیگر شناسایی کرد. زیرا این چهارچوب محدوده‌های محتمل به فرونشست را براساس اولویتشان مشخص می‌کند تا بتوان روشهای مدیریتی مشخصی برای جلوگیری از پدیده فرونشست را ارائه داد.

هدف از این پژوهش ارائه چهارچوبی برای پیش‌بینی پدیده فرونشست زمین است. زیرا پیش‌بینی نقاط محتمل فرونشست می‌تواند به درک بهتر این پدیده و جلوگیری از خسارات و مشکلات ناشی از آن بیانجامد. در این پژوهش رهیافت جدیدی برای پیش‌بینی مناطق محتمل پدیده فرونشست دشت اردبیل ارائه شده است که امکان پیش‌بینی نقاط محتمل فرونشستی در دشت اردبیل را با دقت قابل قبولی ارائه داده است. دشت اردبیل از مناطق فعال کشاورزی است که به دلیل پمپاژ بیش از حد و غیرمجاز از چاه‌ها دچار افت سطح آب زیرزمینی و به دنبال آن فرونشست شده است. بنابراین ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان این دشت و تعیین مناطق با پتانسیل بیشتر فرونشست ضرورت دارد. در همین راستا هفت پارامتر موثر بر فرونشست تعیین و به صورت هفت لایه

منابع مورد استفاده

- Bates RL and Jackson JA, 1980. Glossary of Geology (second edition). Publish by American Geological Institute Alexandria, Virginia.
- Bouwer H, 1978. Groundwater Hydrology. McGraw-Hill Book, New York, 480p
- Brookes CJ, 2001. A genetic algorithm for designing optimal patch configurations in GIS. International Journal of Geographical Information Science 15(6):539-559.
- Farboudfam N, Ghorbani MA and Alami MT, 2009. River flow prediction using genetic programming (case study: Lighvan river watershed). Water and Soil Science- University of Tabriz 19:107-123.
- Galloway D, Jones DR and Ingebritsen SE, 1999. Land Subsidence in the United States, U.S. Geological Survey, Virginia USA.
- Gambolati G, Gatto P and Freeze RA, 1974. Mathematical simulation of the subsidence of Venice: 2. Results, Water Resource Research 10:563-577.
- Gharekhani M, Nadiri A, Asghari Moghadam A and Sadeghi Aghdam F, 2015. Optimization of DRASTIC model by support vector machine and artificial neural network for evaluating of intrinsic vulnerability of Ardabil plain aquifer. Journal of Eco Hydrology 3:311-324. (In Persian with English abstract)
- Holland JH, 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. University of Michigan Press, Ann Arbor, USA.
- Hu RL, Yue ZQ, Wang LC and Wang SJ, 2004. Review on current status and challenging issues of and subsidence in China. Engineering Geology 76:65-77.
- Komak Panah A, 2007. Geotechnical investigation on the land failure of Yazd-Ardakan road network. Journal of Transportation 2:181-194. (In Persian with English abstract)
- Kord M, 2014. Numerical modeling of the Ardabil plain aquifer and its management using optimization of Groundwater extraction. Ph.D thesis of Hydrogeology. Department of Geology, Faculty of Natural Science, University of Tabriz. (In Persian with English abstract)
- Kord M, Asghari Moghaddam A and Nakhaeei M, 2013. Assessment of ground water quality for irrigation in Ardabil Plain. International Journal of Agriculture and Crop Sciences 5(18): 2135-2140.
- Kord M, Asghari Moghaddam A and Nakhaeei M, 2013. Investigation of hydrogeological characteristics of Ardabil Plain aquifer, Northwest of Iran. ISESCO Journal of Science and Technology 9(15): 63-69.

- Larson KJ, Barasaoslu H and Marino MA, 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 of Hydrology* 242:79-102.
- Maghsoudi Y and Mahdavi S, 2015. *The Basics of Remote Sensing Radar*. Publications of Khaje Nasir al-Din Tusi University. (In Persian)
- Mahdi Pour F, 2006. Locating recreational services complexes using a spatial information system with an emphasis on genetic algorithm. Master thesis, Khajeh Nasir Tusi University. (In Persian)
- Nadiri AA, Fijani E, Tsai FTC and Asghari Moghaddam A, 2013. Supervised committee machine with artificial intelligence for prediction of fluoride concentration. *Journal of Hydrology Information* 15(4):1474-1490.
- Nadiri A, Hassan M and Asadi S, 2015. Supervised intelligence committee machine to evaluate field performance of photocatalytic asphalt pavement for ambient Air purification. *Transportation Research Record: Transaction Research* (2528): 96-105.
- Nadiri AA, Gharekhani M, Khatibi R, Sadeghfam S and Asghari Moghaddam A, 2017a. Groundwater vulnerability indices conditioned by supervised intelligence committee machine (SICM). *Science of the Total Environment* 574:691-706.
- Nadiri AA, Sedghi Z, Khatibi R and Gharekhani M, 2017b. Mapping vulnerability of multiple aquifers using multiple models and fuzzy logic to objectively derive model structures. *Science of the Total Environment* 593-594:75-90.
- Nadiri AA, Gharekhani M, Khatibi R and Moghaddam AA, 2017c. Assessment of groundwater vulnerability using supervised committee to combine fuzzy logic models. *Environmental Science and Pollution Research* 24(9):8562-8577.
- 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.
- Phien-wej N, Giao P and Nutalaya P, 2006. Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology* 82:187-201.
- 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.
- 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.
- Rahnema H and Mirassi S, 2016. Analysis and evaluate the effective parameters on land subsidence. *Modares Civil Engineering Journal* 1:45-54. (In Persian with English abstract)
- Wang GY, You G, Shi B, Yu J and Tuck M, 2009. Long-term land subsidence and strata compression in changzhou, China. *Engineering Geology* 104:109-118.
- Zare Mehrjerdi AA, 2011. Investigation of ground subsidence reasons and fractures in Rostagh area, south of Meybod. *Journal of Geography and Environmental Planning* 3:166-155. (In Persian with English abstract)