

کلید واژه‌ها: فرونشست زمین، افت سطح آب زیرزمینی، مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی، دشت اردبیل.

مقدمه

فرونشست زمین طبق تعریف انستیتو زمین شناسی ایالت متحده شامل پایین رفتن یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابجایی افقی اندک باشد [۳۱]. در سالیان گذشته، فعالیت‌های انسانی همچون تخلیه داز مدت آب [۶] [۱۳] [۱۵] و نفت و گاز [۵] [۲۵] [۲۸] از منابع زیرزمینی و معدن کاری [۲۷] از عوامل اصلی بوجود آمدن فرو نشست زمین در مناطق مختلف جهان بوده است [۳۱]. این پدیده باعث آسیب بر محیط زیست طبیعی و حتی ضررهای اقتصادی می‌شود. در سال ۱۸۲۵ اولین پژوهش در مورد فرونشست زمین در دنیا در بلژیک انجام شده است [۱۷]. در مناطق مختلفی از جهان و کشورهایی هم چون آمریکا، ژاپن، ایتالیا و تایلند، پدیده فرونشست مشاهده شده است [۱۴] [۲۹]. در سطح کشور ایران نیز فرونشست زمین در دشت‌هایی نظیر مشهد، کاشمر، اراک و یزد مشاهده و گزارش شده است [۱۴] [۲۴].

کیم [۱۲] در تحقیقی در شهر سامچوک کره با بکار بردن شبکه عصبی مصنوعی و سیستم اطلاعات جغرافیایی به پیش بینی فرونشست زمین پرداخته است. برای ارزیابی فاکتورهای حاکم بر فرونشست زمین، یک پایگاه داده فضایی از معیارهای مؤثر ایجاد شد. سپس شاخص مخاطره فرونشست زمین در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی نقشه سازی شد. نقشه مخاطره به وجود آمده برای فرونشست زمین با داده‌های میدانی و موقعیت‌های فرونشست موجود در منطقه دارای صحت ۹۶/۰۶ درصد را نشان می‌داد. بیبی [۴] به تحقیق ارزیابی ریسک فرونشست زمین در منطقه ساحلی تیان‌جین چین پرداخته است. در این مطالعه شاخص ارزیابی ریسک فرونشست زمین بر مبنای شاخص ریسک خطر به وجود آمده است. نقشه ریسک فرونشست زمین با ترکیب کردن مخاطره و آسیب‌پذیری و نقشه ظرفیت و کاهش فرونشست زمین ایجاد شده بود. مقادیر ریسک به ۵ طبقه خیلی بالا، بالا، متوسط، پایین و خیلی پایین طبقه‌بندی شد.

اوه [۲۰] به ارزیابی فرونشست زمین با بکار بردن سیستم

پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت اردبیل)

مهدی عالی پور اردی^۱، بهرام ملک محمدی^۲، حمیدرضا جعفری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۳

چکیده

برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و وجود نشانه‌های فرونشست زمین در دشت اردبیل، ضرورت نیاز به پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین در این دشت را نشان می‌دهند. هدف تحقیق حاضر تهیه نقشه احتمال فرونشست زمین و تعیین مناطق دارای ریسک بوده که برای این منظور از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی^۴ استفاده شد. لایه‌های اطلاعاتی شامل زمین‌شناسی، فاصله از گسل، افت سطح آب زیرزمینی، شیب و ضخامت آبرفت، به عنوان معیارهای مؤثر مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از نظر کارشناسان مقایسات زوجی معیارها انجام و وزن اختصاص یافته به هر معیار در سیستم اطلاعات جغرافیایی اعمال و میزان ریسک فرونشست زمین برآورد گردید. نتایج نشان داد که ۱۳ درصد منطقه دارای ریسک خیلی بالا، ۲۰ درصد دارای ریسک بالا، ۴۵ درصد دارای ریسک متوسط، ۱۶ درصد دارای ریسک پایین، ۶ درصد دارای ریسک خیلی پایین فرونشست زمین می‌باشد. حدود ۶۷/۵ درصد مناطق جنوبی در بخش ریسک‌های خیلی بالا و بالای فرونشست زمین قرار گرفته که به دلیل استفاده بیش از حد از آب‌های زیرزمینی می‌باشد. برای صحت‌سنجی نتایج، از اطلاعات میدانی چاه‌های دارای شکستگی در لوله جداره استفاده شد. نتایج صحت‌سنجی نشان داد که حدود ۸۰ درصد انطباق بین نقشه پهنه‌بندی خروجی از مدل با داده‌های میدانی وجود دارد.

۱- دانشجوی دکتری محیط زیست، ارزیابی و آمایش سرزمین، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۲- نویسنده مسئول و دانشیار گروه برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران. پست الکترونیک: Malekb@ut.ac.ir

۳- استاد گروه برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.

4. Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)

اطلاعات جغرافیایی و مدل WOE^۱ پرداخته است. از طریق آنالیز احتمالات ۷ فاکتور اصلی شامل عمق گسل‌ها، فاصله گسل‌ها، درجه شیب بدست آمده از نقشه‌های توپوگرافی، سطوح عمق آب زیرزمینی و قابلیت نشست از داده‌های فرو چاله، زمین‌شناسی و کاربری اراضی جهت فرونشست زمین تعیین گردید. نتایج آنالیزها صحت بکار بردن (ROC^۲) با داده‌ها و موقعیت‌های فرونشست قبلی را نشان می‌دهد. پوترا [۲۲] در تحقیق به ارزیابی ریسک فرونشست زمین در مناطق رانگ کوپ اندونزی پرداخته است. او در تحقیق خود نقشه ریسک فرونشست را بر اساس پنج پارامتر شیب زمین، لیتولوژی، پستی و بلندی، فاصله تا ساختارهای دره مانند (فرو چاله‌ها) و کاربری اراضی توسعه داده است. وزن‌ها برای چهار پارامتر اولیه به وسیله مدل AHP^۳ جهت نشان دادن قابلیت فرونشست تعیین شده و بعد از آن، یک سیستم ارزیابی ماتریس جهت تعیین ریسک استفاده شده است. نتایج مشخص کردند که بالاترین مناطق ریسک در نزدیکی مناطق فروچاله‌ها در تطابق با اطلاعات میدانی می‌باشند.

پارک [۲۱] در تحقیقی با عنوان کاربرد سیستم استنتاج عصبی-فازی به نقشه سازی خطر فرونشست زمین در منطقه سامچوک کره جنوبی پرداخته است. برای این کار از ترکیب سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سیستم استنتاج عصبی-فازی استفاده نموده است. پنج فاکتور و عامل اصلی فرونشست استخراج شده عبارت بودند از: ۱- عمق گسل ۲- فاصله از گسل ۳- درجه شیب ۴- زمین شناسی ۵- کاربری اراضی. توابع عضویت مختلف برای تهیه نقشه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده صحت روش مورد استفاده در تهیه نقشه خطر فرونشست می‌باشد.

ژئو هوافنگ [۳۲] برای پیش بینی و بررسی فرونشست زمین از مدل پیش بینی‌گری استفاده نموده است. ژئو [۳۳] ریسک احتمال نشست زمین بر اثر برداشت آب زیرزمینی در آبخوان چانگ ژو را بررسی نموده است و برای این کار مدلی جدید به نام Cosserat continuum با مدلی کلاسیک به نام Cauchy continuum مقایسه نموده است.

اولین فرونشست ثبت شده در ایران مربوط به دشت رفسنجان در سال ۱۳۴۶ بوده است [۱۱]. از مطالعات اخیر در زمینه فرونشست زمین می‌توان به مطالعات نوروزی و همکاران درباره افت سطح آب زیرزمینی و بررسی نشست زمین در دشت درمیان [۱۹]، بررسی پدیده فرونشست زمین و شکستگی‌های موجود در منطقه رستاق جنوب میبد توسط زارع مهرجردی [۳۴]، مطالعات اسکانی و همکاران در زمینه بررسی علل فرونشست زمین در دشت سمنان [۸]، مطالعات شمشکی و همکاران در دشت هشتگرد [۲۶]، اشاره نمود. هم چنین امیر احمدی و همکاران [۱] در سال

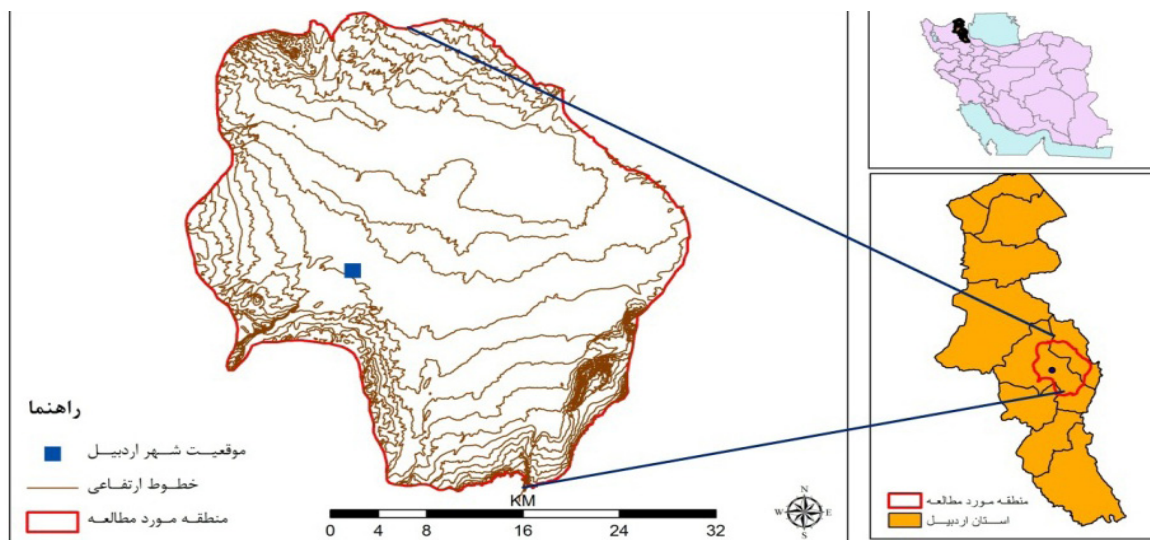
۱۳۹۲ به تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از GIS پرداخته اند که از حیث نحوه جمع بندی و تعیین مناطق احتمالی فرونشست زمین و مدل استفاده شده و معیارهای بررسی متفاوت از این تحقیق می‌باشد. اما مناطق نهایی احتمال فرونشست زمین تطابقت با نتایج این تحقیق را نشان می‌دهد.

در این مقاله با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی، پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین در دشت اردبیل انجام شده است. دشت اردبیل به دلیل استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۷ از طریق وزارت نیرو به عنوان دشت ممنوعه اعلام گردیده است. مطالعات میدانی و پرسش‌های محلی از کشاورزان نشان داد در سالیان اخیر در دشت اردبیل، ریزش‌های متعددی در ساختمان‌های مناطق روستایی اتفاق افتاده است. همچنین مشاهده وجود ترک‌های موجود در دیواره لوله جداره چاه‌ها و کج بودن تیر چراغ‌های برق در دشت باعث گردید تا در این تحقیق به بررسی احتمال فرونشست زمین در دشت اردبیل پرداخته شود. پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی و استفاده هم‌زمان از داده‌های ضخامت آبرفت و افت سطح آب زیرزمینی در دشت اردبیل در پیشینه تحقیق مشاهده نشد، که در این مقاله به آن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

دشت اردبیل در شمال غرب ایران و در قسمت شرقی فلات آذربایجان و از نظر تقسیمات کشوری در مرکز استان اردبیل واقع شده است. در بررسی زمین شناسی، دشت اردبیل با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول خاوری و ۳۸ درجه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. این منطقه به صورت حوزه بسته‌ای است که از شمال و غرب منطقه به کوه سبلان و کوه‌های اطراف آن (هرم داغی و کسری داغی) و از شرق و جنوب به رشته کوه‌های تالش (باغرو) منتهی می‌گردد. بنابراین زمین‌های حاشیه دشت از اطراف به سمت دشت شیب دارند. قسمت اعظم حوزه آبریز دشت را کوهستان‌ها در بر گرفته است. بلندترین نقطه آن قله سبلان با ارتفاع ۴۸۳۰ متر از سطح دریا است. پایین ترین نقطه در محدوده طرح دشت اردبیل می‌باشد که ارتفاع آن حدود ۱۳۰۰ متر از سطح دریا است. مساحت حوضه آبخوان اردبیل ۷۹۹ کیلومتر مربع و وسعت دشت اردبیل حدود ۱۲۱۱/۴۸ کیلومتر مربع می‌باشد. شکل شماره ۱ موقعیت دشت اردبیل در سطح استان و کشور را نشان می‌دهد.

1. Weights-of-evidence(WOE)
2. Relative Operating Characteristic (ROC)
3. Analytical Hierarchy Process(AHP)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت اردبیل در استان اردبیل و کشور ایران

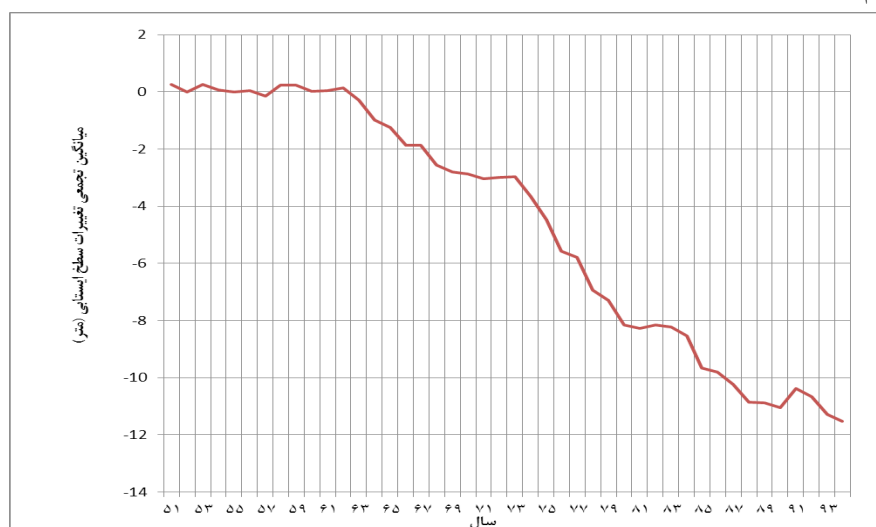
Figure 1. Location of Ardabil Plain in Ardabil Province and Iran

را می‌پوشاند، این رسوبات از مواد آوری رسوبات پالئوژن و نئوژن و پادگانه‌های آبرفتی کهن تشکیل شده‌اند [۳].

آبخوان دشت اردبیل به صورت آزاد در نواحی خاصی از دشت شامل جنوب شرقی و شرق دشت به صورت آبخوان سطحی معلق نیمه تحت فشار وجود دارد. قبلاً در بخش شرقی دشت آبخوان تحت فشار و آرتزین وجود داشته که به دلیل حفر چاه‌های بهره برداری، از نظر آبدهی و فشار آرتزین در ۲۰ سال اخیر کاهش یافته است. عمق سطح آب زیرزمینی در ناحیه شمالی دشت برابر ۲ تا ۱۰ متر، ناحیه شرقی برابر ۷/۵ تا ۳۰ متر، ناحیه جنوبی برابر ۱۰ تا ۵۶ متر و ناحیه غربی برابر ۱ تا ۱۵ متر است. افت متوسط آبخوان دشت اردبیل بر اساس هیدروگراف واحد آب زیرزمینی در دوره دراز مدت ۲۱ ساله طی سال‌های ۱۳۵۱ تا ۱۳۹۴ برابر ۱۲ متر (در هر سال ۰/۳۵ متر) بوده است که در شکل ۲ روند تغییرات آن ارائه شده است [۲۳].

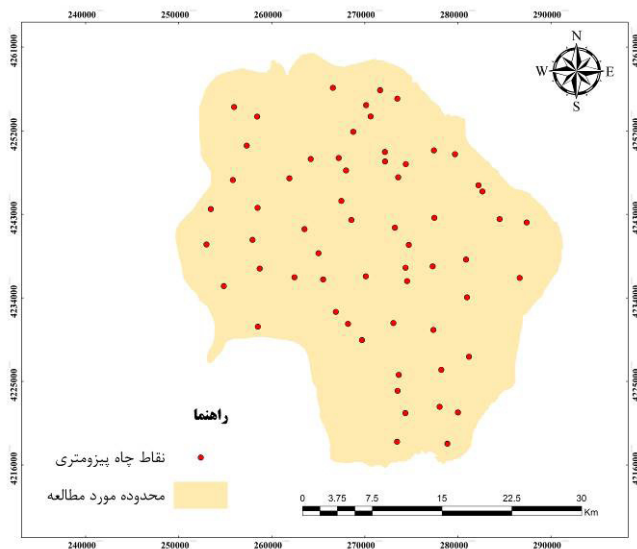
استان اردبیل به لحاظ ساختمان زمین شناسی به واحد زمین شناسی البرز و به ویژه البرز غربی و آذربایجان تعلق دارد که خود بخشی از قسمت شمالی کوه زایی آلپ-همپالیا در آسیای غربی به شمار می‌رود. بخش عمده‌ای از نواحی میانی استان اردبیل را سنگ‌های ولکانیکی و سنگ‌های سنوزوئیک تشکیل می‌دهد. علاوه بر آن، در سطح دشت اردبیل نیز رسوبات آبرفتی عصر حاضر مشاهده می‌شود. بررسی زلزله خیزی این بخش از استان اردبیل موید این است که در قلمرو عملیاتی گسل‌هایی نظیر اردبیل، بزقوش، هروآباد و آستارا قرار گرفته و به همین دلیل ضریب آسیب پذیری بالایی دارد [۹] [۱۰].

دشت اردبیل بیشتر از توالی عظیم سنگ‌های آتشفشانی ائوسن پدید آمده ولی به علت پایین افتادگی روی آن توسط انباشته‌های بستر دشت پر شده است. روند گسل‌هایی نظیر هیر، دویل، نئور شمال خاوری- جنوب باختری است [۱۰]. رسوبات دشت، شامل سیلیت و رس و خیلی کم کنگولومرا است که سرتاسر دشت اردبیل



شکل ۲ - میانگین تجمعی تغییرات سطح ایستابی آبخوان دشت اردبیل بین سال‌های ۱۳۵۰ الی ۱۳۹۴ [۳۰].

Figure 2. Cumulative average of groundwater level changes in Ardabil plain aquifer between 1972-2016

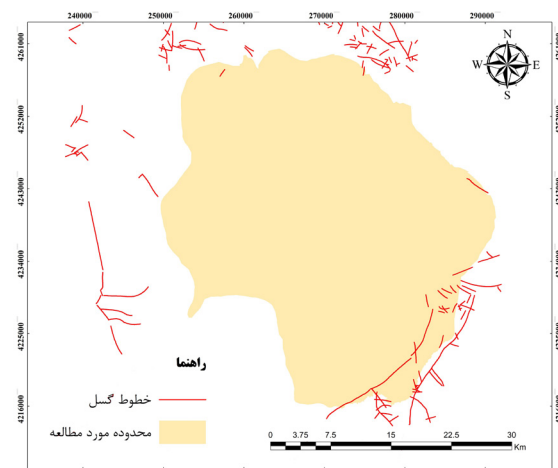


شکل ۴- موقعیت چاههای پیزومتری مورد استفاده در این تحقیق
Figure 4. Location of Pizeometric wells used in this research

می باشد که این نقاط ضعف در روش باکلی (۱۹۸۵) رفع گردیده است [۱۶]. از این رو در این مطالعه از روش AHP فازی باکلی^۱ استفاده شد. برای این حالت از برنامه نویسی در محیط نرم افزاری MATLAB و از عملگر دوزنقه ای استفاده گردید. در این مدل از دوسطح هدف و معیار استفاده گردید که هدف از مدل تعیین و پهنه بندی مناطق دارای ریسک فرونشست زمین در دشت اردبیل می باشد که از ۵ معیار برای دستیابی به این هدف استفاده شد. از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی به منظور وزن دهی به معیارها برای پهنه بندی احتمال ریسک فرونشست زمین در دشت اردبیل استفاده شد. محاسبه وزن ها از طریق برنامه نویسی در محیط نرم افزار MATLAB انجام گردید. تمامی معیارها به صورت دوتایی (دو به دو) باهم مقایسه شدند. برای انجام این محاسبات از نظر کارشناسان خبره (حدود ۳۲ نفر) در منطقه استفاده گردید. در روش باکلی، کارشناسان از متغیرهای زبانی برای انجام مقایسات زوجی استفاده می کنند و سپس با استفاده از توابع عضویت مربوط به هر یک از عبارات زبانی عدد فازی دوزنقه ای مربوط به آن معیار در جدول جایگزین می گردد.

مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی باکلی

روش AHP فازی ارائه شده توسط باکلی، شکل تعمیم یافته ای از روش AHP کلاسیک می باشد. در این روش برای مقایسه زوجی گزینه ها از اعداد فازی و برای به دست آوردن وزن ها و ارجحیت ها از روش میانگین گیری هندسی استفاده می گردد. این روش به سادگی به حالت فازی قابل تعمیم می باشد؛ و همچنین جواب یگانه ای برای ماتریس مقایسات زوجی تعیین می نماید. در این روش شخص تصمیم گیرنده می تواند مقایسات زوجی المان های هر سطح را در قالب اعداد فازی دوزنقه ای بیان نماید. توابع عضویت دوزنقه ای و



شکل ۳- موقعیت خطوط گسل در محدوده مورد مطالعه
Figure 3. Fault lines situations in study area

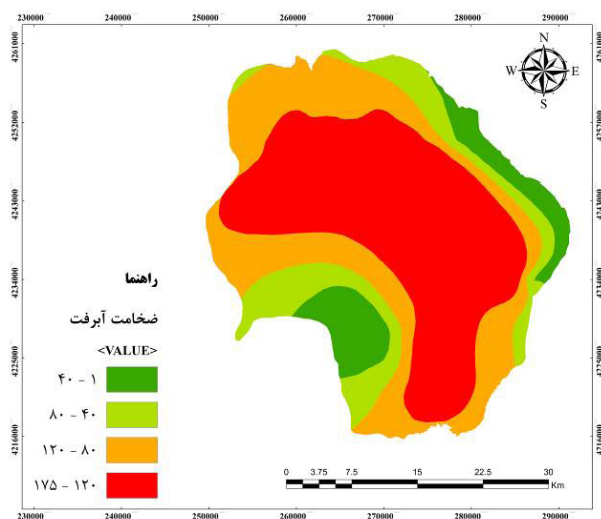
به منظور پهنه بندی ریسک فرونشست زمین در دشت اردبیل از ۵ عامل زمین شناسی، میزان شیب، فاصله از خطوط گسل (شکل ۳)، میزان افت سطح آب زیرزمینی (حدود ۶۰ چاه پیزومتری که در شکل ۴ نشان داده شده است) و ضخامت آبرفت استفاده شد. ابتدا نقشه های اولیه وارد سیستم اطلاعات جغرافیایی شده و بصورت سیستم مختصات یکسان تبدیل گردید. سپس به منظور تهیه نقشه پهنه ریسک فرونشست زمین، تمامی نقشه ها رستری شدند. برای این منظور بطور مثال برای نقشه خطوط گسل از تابع فاصله در سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. در نهایت به منظور تهیه نقشه نهایی از مدل تحلیل فرایند سلسله مراتبی فازی استفاده شد. برای این منظور مدل مذکور بر اساس تابع دوزنقه ای در سیستم نرم افزار MATLAB برنامه نویسی شده و سپس اعداد مقایسه و وارد برنامه شده و عدد نهایی برای هر معیار که نشان دهنده وزن آنها می باشد بدست آمد. اعداد بدست آمده در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی برای هر معیار بر روی نقشه مربوطه اعمال شده و نقشه نهایی از اعمال وزنی معیارها، نشان دهنده نقشه احتمال ریسک فرونشست زمین در منطقه می باشد. توضیحات مربوط به مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی در ادامه ارائه شده است.

مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

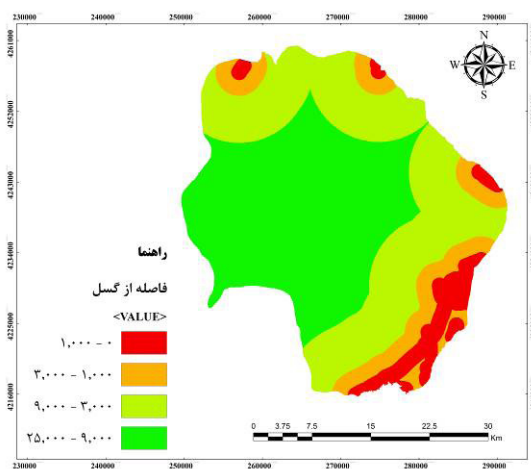
مفهوم فازی بودن در روش AHP، به صورت غیرمستقیم و بدون استفاده از مجموعه های فازی مورد توجه قرار گرفته است. در واقع در این روش با استفاده از عبارت های زبانی، مفهوم فازی بودن در تعیین ماتریس های مقایسه زوجی دخالت داده می شود. اما محققین با تعمیم روش فوق، روش هایی پیشنهاد نموده اند که در آنها از اعداد فازی برای بیان ارجحیت المان ها استفاده می گردد. در این میان می توان به روش های ارائه شده توسط لارهن و پدریچ و باکلی اشاره نمود. روش لارهن و پدریچ دارای یک سری نقاط ضعف

1. Buckley

می‌دهد. جهت ایجاد نقشه، خطوط گسل موجود در نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه رقومی گردید و سپس از طریق سیستم اطلاعات جغرافیایی، نقشه مورد نظر استخراج گردید. به دلیل امکان اثر گذاشتن فعالیت‌های گسل (نظیر زلزله) بر روی امکان فرونشست زمین، هر چه فاصله از خطوط گسل بیشتر باشد نشان دهنده این است که منطقه تناسب کمتری برای احتمال فرونشست زمین را دارا بوده و هرچه فاصله به خطوط نزدیکتر شود این میزان احتمال بیشتر می‌شود.



شکل ۶- نقشه هم تراز ضخامت آبرفت (بر حسب متر)
Figure 6. Alluvium thickness map (meter)



شکل ۷- نقشه فاصله از گسل (بر حسب متر)
Figure 7. Distance from faults map (meter)

اطلاعات میزان افت سالیانه سطح آب زیرزمینی ۶۰ چاه پیزومتری موجود در منطقه، به منظور تهیه داده اولیه مربوط افت آب‌های زیرزمینی استفاده شد. بر این اساس، قسمت جنوبی منطقه دارای بیشترین میزان افت سالیانه سطح آب زیرزمینی و قسمت شمالی منطقه کم‌ترین میزان افت در سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.

مثلی به دلیل سادگی که دارند بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. تابع عضویت دوزنقه‌ای^۱ مطابق با رابطه ۱ به چهار پارامتر عددی a , b , c و d وابسته است:

$$\text{Trapezoidal } (x: a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x < d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (1)$$

فاکتورهای a و d در قاعده بزرگ دوزنقه و فاکتورهای b و c در قاعده کوچک آن قرار می‌گیرند. به عنوان مثال در شکل ۵، عدد فازی مثلی (۴، ۵، ۶) نشان دهنده ارجحیت ۵ با درجه عضویت یک می‌باشد. عدد فازی دوزنقه‌ای (۵، ۶، ۸، ۹) مشخص‌کننده ارجحیت بین ۶ تا ۸ با درجه عضویت یک می‌باشند که هر چه عدد درجه عضویت به عدد یک نزدیک باشد نشان‌دهنده میزان تاثیرگذاری بیشتر عدد مربوطه در تعیین وزن معیار می‌باشد [۲] [۱۸].



شکل ۵- اعداد فازی نمونه برای نشان دادن ارجحیت در روش باکلی

Figure 5. Samples of Fuzzy numbers to present prioritize in Buckley method

داده‌های پایه بعد از بررسی اولیه و ورود به سیستم اطلاعات جغرافیایی، به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی باید بصورت رستری شده تا بتوان بصورت آنالیز پیکسل مینا برای تعیین بهتر نقاط دارای ریسک فرونشست زمین استفاده گردند. بدین منظور لایه اولیه، در کل منطقه پهنه‌بندی گردید.

برای ایجاد این نقشه‌های پایه در سیستم اطلاعات جغرافیایی از نرم‌افزار Arc GIS 10.2 [۷] استفاده شد. شکل (۶) نشان‌دهنده نقشه ضخامت آبرفت به صورت خطوط هم تراز در منطقه می‌باشد. بر اساس این شکل توزیع ضخامت آبرفت در کل منطقه یکسان می‌باشد و از حاشیه به مرکز محدوده مورد مطالعه بر ضخامت آبرفت افزوده می‌شود. بیشترین ضخامت آبرفت در حدود ۱۷۴ متر و در محدوده مرکزی دشت می‌باشد و کم‌ترین در حاشیه‌های جنوب غربی و شمال شرقی دشت به دلیل نزدیکی به مناطق کوهستانی می‌باشد. شکل (۷) نقشه فاصله از گسل‌های منطقه مورد مطالعه را نشان

1. Trapezoidal membership function

برای ایجاد نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاعی منطقه استفاده گردید. بر این اساس بیشتر منطقه دارای شیب ملایم بوده که در منطقه توزیع شده است. اما شیب عمومی دشت به سمت رودخانه قره سو در قسمت شمالی دشت می باشد. بر اساس نقشه ساختارهای زمین شناسی موجود در منطقه و موقعیت آن ها مشاهده می گردد که بیشتر قسمت های دشت توسط لایه های زمین شناسی کواترنری پوشیده شده است، که این امر نشان دهنده جوان بودن و در حال تکامل بودن ساختار زمین شناسی منطقه می باشد.

نتایج

در راستای تهیه نقشه فرونشست زمین در دشت اردبیل و به منظور اجرای مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی، بر اساس مطالب ارائه شده در بخش روش تحقیق، مقایسات زوجی معیارها توسط پرسش دهندگان برای منطقه اردبیل انجام گردید که جدول (۱) عبارات زبانی فازی و جدول (۲) اعداد فازی در وزن دهی معیارها

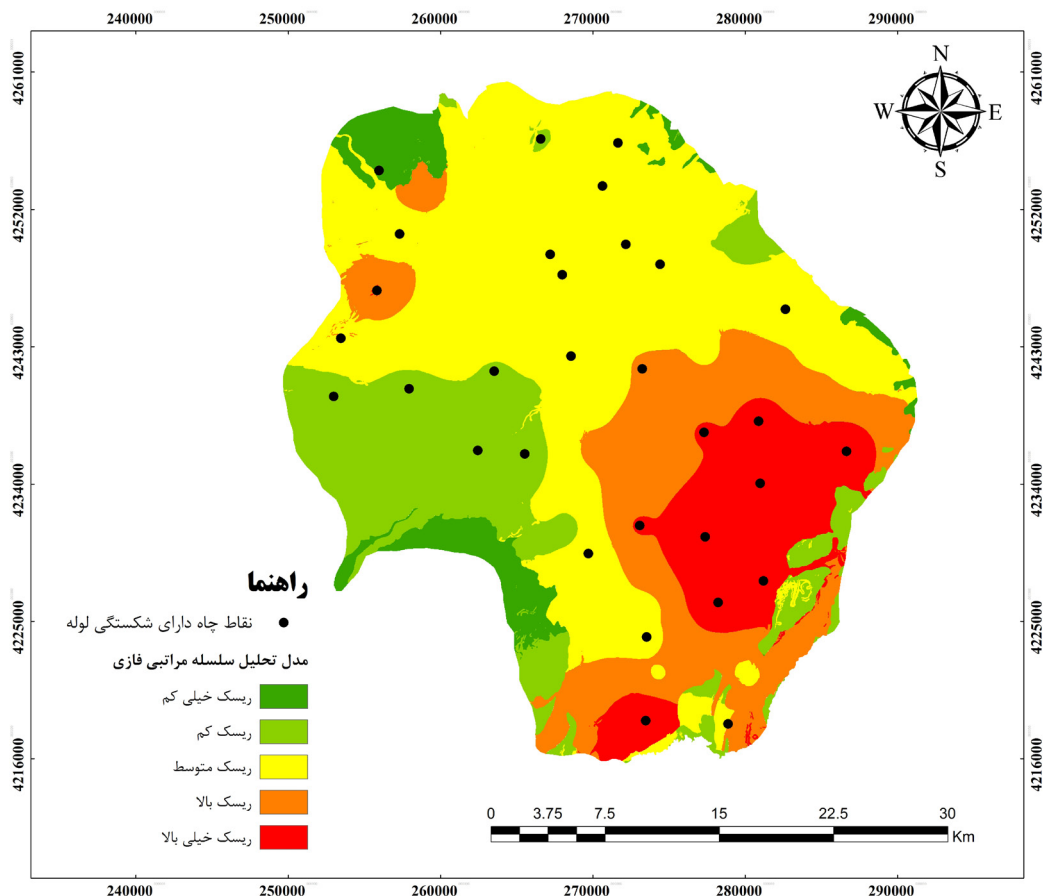
در فرونشست زمین را نشان می دهد. بطور مثال بر اساس نظرات خبرگان در دشت اردبیل در جدول (۱)، عدد عبارت زبانی L2 به معنای ارجحیت در محدوده دو برابر می باشد. همچنین اعداد کسری بطور مثال 1/2 نشان دهنده ترجیح دوبرابر اما برعکس می باشد، بدین معنی که عامل ستونی بر عامل سطری ارجحیت دارد. برای مثال در دومین سطر و مقایسه بین عامل افت آب های زیرزمینی و زمین شناسی، ارجحیت 1/2 نشان دهنده ارجحیت دو برابر عامل افت آب های زیرزمینی بر عامل زمین شناسی می باشد. در جدول شماره (۲) مقایسات زبانی حاصل از جدول ۱ برای پهنه بندی فرونشست زمین در دشت اردبیل بصورت عبارات فازی دوزنقه ای نشان داده شده است. بطور مثال عبارت زبانی L2 از جدول (۱) برای تعمیم در جدول (۲) بصورت عبارت فازی ۱-۲-۲-۳ نشان داده شده است که این اعداد بر اساس توضیحات شکل ۵ میزان ارجحیت را نشان می دهند. با اجرای مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی و بدست آوردن وزن

جدول ۱- ماتریس مقایسه زوجی معیارها به صورت متغیرهای زبانی
Table 1. Pairwise comparison matrix for criteria on linguistic variables

معیارها		افت آب های زیرزمینی	زمین شناسی	فاصله از گسل	شیب	ضخامت آبرفت
		Groundwater Decline	Geology	Distance from Fault	Slope	Alluvium Thickness
افت آب های زیرزمینی	Groundwater Decline	1	L2	L4	L5	L4
زمین شناسی	Geology	L 1/2	1	L2	L3	L2
فاصله از گسل	Distance from Fault	L 1/4	L 1/2	1	L2	L3
شیب	Slope	1/5 L	L 1/3	L 1/2	1	1
ضخامت آبرفت	Alluvium Thickness	L 1/4	L 1/2	L 1/3	1	1

جدول ۲- ماتریس مقایسات زوجی پارامترها
Table 2. Pairwise comparison matrix for parameters

معیارها		افت آب های زیرزمینی	زمین شناسی	فاصله از گسل	شیب	ضخامت آبرفت	وزن نهایی بدست آمده
		Groundwater Decline	Geology	Distance from Fault	Slope	Alluvium Thickness	Final weight
افت آب های زیرزمینی	Groundwater Decline	1-1-1-1	1-2-2-3	3-4-4-5	4-5-5-6	3-4-4-5	0.4472
زمین شناسی	Geology	1-1/2-1/2-1/3	1-1-1-1	1-2-2-3	2-3-3-4	1-2-2-3	0.2319
فاصله از گسل	Distance from Fault	1/3-1/4-1/4-1/5	1-1/2-1/2-1/3	1-1-1-1	1-2-2-3	2-3-3-4	0.1530
شیب	Slope	1/4-1/5-1/5-1/6	1/2-1/3-1/3-1/4	1-1/2-1/2-1/3	1-1-1-1	1-1-1-1	0.0821
ضخامت آبرفت	Alluvium Thickness	1/3-1/4-1/4-1/5	1-1/2-1/2-1/3	1/2-1/3-1/3-1/4	1-1-1-1	1-1-1-1	0.0858



شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی احتمال ریسک فرونشست زمین بر اساس مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی و موقعیت چاه‌های صحت سنجی
Figure 8. Land subsidence risk zoning map based on FAHP model and location of validation wells

ارزیابی ریسک مربوط به مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی نشان می‌دهد. جدول ۳ نشان دهنده تعداد چاه‌ها در ریسک‌های مختلف احتمال فرونشست زمین برای مدل می‌باشد. بر اساس این جدول بیشترین تعداد چاه‌های دارای شکستگی لوله در جداره چاه در بخش ریسک متوسط در حدود ۱۲ حلقه چاه و سپس در بخش ریسک خیلی بالا در حدود ۱۰ حلقه چاه می‌باشد که با توجه به این موارد ریسک‌های متوسط، بالا و خیلی بالا در حدود ۲۴ حلقه از ۳۱ حلقه دارای شکستگی لوله جداره را بخود اختصاص داده‌اند. صحت سنجی مدل نشان داد که انطباق نزدیک به ۸۰ درصد بین خروجی مدل (ریسک متوسط به بالا) با داده‌های میدانی وجود دارد که نشان دهنده کارایی قابل قبول مدل استفاده شده در تهیه نقشه پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین می‌باشد. جدول (۴) نشان دهنده مقادیر احتمال ریسک حاصل از مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی در منطقه می‌باشد. این جدول نشان دهنده این می‌باشد که ۳۳ درصد منطقه در ریسک‌های بالا و خیلی بالا و ۴۵ درصد در ریسک متوسط فرونشست زمین قرار دارد که تمامی آمارها نشان دهنده خطر بالای ریسک فرونشست زمین در منطقه می‌باشد. در صورتیکه منطقه را به ۴ منطقه ۱- تحت تأثیر شهر اردبیل ۲- منطقه

و وارد نمودن در سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطابق با بخش مواد و روش‌ها) نتیجه نهایی برای میزان ریسک احتمال فرونشست زمین برای دشت اردبیل طبق شکل (۸) می‌باشد. با توجه به شکل (۸) بیشترین ریسک فرونشست زمین در مناطق جنوبی و جنوب شرقی دشت و توزیع ریسک کم مربوط به حاشیه‌های دشت می‌باشد که با توجه به معیارهای بکار برده شده در مدل این مناطق دارای کم‌ترین اثر در هر کدام از معیارها بوده‌اند.

صحت سنجی مدل

با توجه به کمبود مشاهدات در زمینه فرونشست‌های نقطه‌ای در منطقه، به بررسی لوله‌های جداره چاه‌های دارای شکستگی در منطقه پرداخته شد. در این بررسی چاه‌هایی که لوله‌های آن‌ها به طور متناوب و پی‌درپی در عمق چاه دچار شکستگی شده و تعویض می‌گردیدند از طریق دستگاه موقعیت یاب جهانی^۱ برداشت گردید. سپس نقاط برداشت شده وارد سیستم اطلاعات جغرافیایی گردید تا با نقشه حاصل از مدل در برآورد ارزیابی ریسک تطبیق گردد. شکل ۸ موقعیت نقاط چاه‌های دارای شکستگی لوله جداره را در نقشه

1. Global Positioning System (GPS)

جدول ۳- تعداد چاه‌های دارای شکستگی لوله جدار در مدل FAHP

Table 3. Number of pipe fractured wells in FAHP model

چاه‌های دارای شکستگی لوله در مدل FAHP			
Wells have pipe fractured on FAHP model			
		تعداد	درصد
		Number	Percent
ریسک خیلی بالا	Very high risk	10	33
ریسک بالا	High risk	2	6
ریسک متوسط	Moderate risk	12	39
ریسک پایین	Low risk	6	19
ریسک خیلی پایین	Very low risk	1	3

جدول ۴- مقادیر ریسک فرونشست در منطقه مورد مطالعه

Table 4. Subsidence risk amounts in the study area

			درصد
			Percent
	مساحت (کیلومتر مربع)		
	Area (Square Kilometer)		
ریسک خیلی بالا	Very high risk	160.91	13
ریسک بالا	High risk	240.5	20
ریسک متوسط	Moderate risk	546.06	45
ریسک پایین	Low risk	196.38	16
ریسک خیلی پایین	Very low risk	67.63	6

جدول ۵- تحلیل مقادیر ریسک فرونشست زمین در نواحی مختلف دشت اردبیل

Table 5. Analysis of land subsidence risk levels in different areas of Ardabil plain

		منطقه تحت تأثیر شهر اردبیل (غرب)		منطقه جنوبی دشت		منطقه شمالی دشت		منطقه شرقی دشت	
		Area effected by Ardabil city (West)		South of plain		North of plain		East of plain	
		مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد
		Area (Km ²)	Percent	Area (Km ²)	Percent	Area (Km ²)	Percent	Area (Km ²)	Percent
ریسک خیلی بالا	Very high risk	0	0	110.83	35	0.36	0.1	50.12	15
ریسک بالا	High risk	1.64	0.6	103.06	32.5	27.89	7	108.02	34.4
ریسک متوسط	Moderate risk	92.96	34.2	57.1	18	113.14	83	100.9	32.1
ریسک پایین	Low risk	149.02	54.9	40.66	13	5.66	1.5	50.12	15.9
ریسک خیلی پایین	Very low risk	27.48	10.3	4.66	1.5	31.25	8.4	4.45	2.6

بحث و نتیجه‌گیری

در طول سه دهه گذشته افزایش استفاده از آب‌های زیرزمینی در دشت اردبیل باعث افت زیاد در سطح آب‌های زیرزمینی شده است، که این کاهش، باعث پدیدار شدن علائم فرونشست در منطقه گردیده است. بر این اساس در مطالعه حاضر به بررسی احتمال

جنوبی ۳- منطقه شمالی ۴- منطقه شرقی دشت تقسیم نماییم، جدول (۵) نشان دهنده سهم هر منطقه در احتمال ریسک می‌باشد. بر این اساس حوزه جنوبی دشت اردبیل دارای بیشترین احتمال‌های ریسک بالا و خیلی بالای فرونشست زمین را بخود اختصاص داده است.

منابع

1. Amirahmadi, A. Moali, N. and Ahmadi, T. 2013. Determination probability land subsidence area using GIS. Geography and planning. 46:1-23. (In Persian)
2. Azizi, A. 2012. Locating power plants with using multi criteria decision making and fuzzy logic in GIS (case study: Ardebil province). Msc. Thesis. Graduated Faculty of Environment. University of Tehran. (In Persian)
3. Babakhani, A. and Rahimzadeh, F. 1988. Detailed Geologic quadrangle Ardebil map. Scale 1:250000. Iran Geological Survey. (In Persian)
4. Beibei, H. Jun, Z. Wang, J. Zhenlou, C. Dongqi, W. and Shiyuan, X. 2009. Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China. Environmental Earth Science. 59: 269-276.
5. Cassiani, G. and Zoccatelli, C. 2000. Subsidence risk in Venice and nearby areas, Italy, owing to offshore gas fields: a stochastic analysis. Environmental Engineering Geoscience. 6(2): 115-128.
6. Chai, J-C. Shen, S-L. Zhu, H-H. and Zhang, X-L. 2004. Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai. Geotechnique. 54(2): 143-147.
7. Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2013. ArcGIS 10.2. Geographic Information System (GIS) Software. 380 New York Street, Redlands, CA 923738100, USA. <http://www.esri.com>.
8. Eskani, Gh.h. and Jadidi, S. 2011. Determination Land subsidence causing in Semnan Plain. Earth science and mine journal. 60: 25-28. (In Persian)
9. Geological maps of Ardebil 1:100000. 1997. Iran Geological Survey. Created by: Khodabandeh, A.A. and Amin fazl, A. (In Persian)
10. Geological maps of Astara 1:100000. 1997. Iran Geological Survey. Created by: Khodabandeh, A.A. and Supervised by: Babakhani, A.R. (In Persian)
11. Hossein milani, M. 1994. Overdraft of groundwater resources and its effects. Proceedings of the National Conference of groundwater resources, Sirjan. Pp. 91-98. (In Persian)
12. Kim, K. Lee, S. and Oh, H. 2009. Prediction of ground subsidence in Samcheok City, Korea using artificial neural networks and GIS. Environmental Geology. 58: 61-70.
13. Lamont-Black J. Baker A. Younger PL. and Cooper AH. 2005. Utilizing seasonal variations in hydro

فرونشست زمین در سطح منطقه بر مبنای مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی باکلی گردید. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که ۱۳ درصد منطقه دارای ریسک خیلی بالا، ۲۰ درصد دارای ریسک بالا، ۴۵ درصد دارای ریسک متوسط، ۱۶ درصد دارای ریسک پایین، ۶ درصد دارای ریسک خیلی پایین فرونشست زمین می باشد. هم چنین این نتایج نشان دهنده این بود که ریسک بالای فرونشست زمین بیشتر در مناطق جنوب و جنوب شرق منطقه وجود دارد و حدود ۵/۶۷ درصد مناطق جنوبی در بخش ریسک های خیلی بالا و بالای فرونشست زمین قرار گرفته که به دلیل استفاده بیش از حد از آب های زیرزمینی در این مناطق می باشد. با توجه به نقشه پهنه بندی، توزیع ریسک بالای فرونشست زمین در مناطق جنوبی و جنوب شرقی دشت و توزیع ریسک کم مربوط به حاشیه های دشت می باشد. با توجه به مطالعات میدانی در این مناطق برای استفاده از آب جهت مصارف کشاورزی بیشتر از آب های زیرزمینی استفاده می شود. وجود محصولات پر آب همچون سیب زمینی و چغندر قند کشت شده در این مناطق احتمال ریسک بالای فرونشست در این مناطق را بالا می برد، بطوریکه در برخی از چاه های این مناطق شاهد کاهش چشمگیر سطح آب زیرزمینی در حدود ۲/۵ متر در سال می باشند. در صورتیکه در بیشتر مناطق شمالی دشت، به دلیل نزدیکی به رودخانه قره سو و سرچشمه های آن، این کاهش بسیار کم بوده و در این مناطق عوامل دیگر هم چون فاصله از گسل، ضخامت آبرفت و زمین شناسی باعث پیش بینی احتمال ریسک گردیده است. مدل بکار برده شده در این تحقیق و دقت مناسب نتایج آن نشان دهنده امکان استفاده از مدل جهت مطالعات آینده در مناطق مختلف کشور می باشد.

پیشنهادهای

در مطالعات آتی به منظور دسترسی دقیق تر به داده های لایه های مختلف خاک برای پیش بینی فرونشست بصورت کمی، می توان از اطلاعات ژئوالکتریک، ژئوتکنیکی و آب شناختی در منطقه استفاده نمود. با توجه به اینکه مناطق مختلف در محدوده مورد مطالعه، شرایط و ویژگی های اکولوژیکی و انسانی مختلفی دارا می باشند، پیشنهاد می گردد منطقه بر اساس ویژگی های یکسان و همگن به چندین منطقه مختلف تقسیم شده و به طور جداگانه برای هر منطقه احتمال ریسک برآورد گردد. استفاده از داده های ماهواره ای رادار مینا، برای تعیین فرونشست در منطقه بصورت کمی می تواند کمک کننده باشد.

تشکر

از شرکت آب منطقه ای اردبیل و اداره کل حفاظت محیط زیست استان اردبیل به خاطر در اختیار گذاشتن اطلاعات پایه مورد نیاز این تحقیق، تشکر و قدردانی می گردد. بخشی از این تحقیق تحت قرارداد تحقیقاتی شماره ۹۰۰/۱۵۷۰۷ مورخ ۱۳۹۲/۴/۶ شرکت آب منطقه ای اردبیل حمایت مالی شده است که از ایشان نیز تشکر و قدردانی می شود.

23. Ramazan pour, M. 2010. Modelling Groundwater of Ardebil plain. Msc. Thesis. Islamic Azad university- Mahabad branch. (In Persian)
24. Salehi, R. Ghafari, M. Lashkaripour, Gh and Dehghani, M. 2012. Land subsidence monitoring in south mahyar plain by InSAR method. the 16th conference of Geological society of Iran, Shiraz, Iran. (In Persian)
25. Salmanpour, A. 2005. Subsidence and Depression and its implications for Iran and the world. industry expansion Journal. 124. (In Persian)
26. Shemshaki, A. Mohammadi, Y. and Bolorch, M.J. 2011. Confined Aquifer identification and its role in the formation of ground subsidence in the Hashtgerd plain. Journal of Earth Sciences. 79: 137-142. (In Persian)
27. Singh, M.M. 1992. Mine subsidence. In: Hartman, H.L. (Ed.), SME Mining Engineers Handbook. pp. 938-971.
28. Soleimani, M. 2007. Opportunities and constraints in the choice of subjects geomorphological Urban Development Case Study: Darab. MA. Thesis. University of Tarbiat Modarres. (In Persian)
29. USGS. 1999. Land subsidence in the United States. In: Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., and Ochoa, G., Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Queretaro valley, Mexico.
30. Water ground company of Ardabil. 2013. Information of water initial data on excel. not provided information. 3 p. (In Persian)
31. Yamani, M. Najafi, A. and Abedini, M.H. 2008. Relation land subsidence and Groundwater level decline in Qarebalaq plan, Fars Province. Geography. 3(8-9): 9-27. (In Persian)
32. Xu, Houfanf. Liu, B. and Fang, Z. 2014. New grey prediction model and its application in forecasting land subsidence in coal mine. Natural Hazards. 71:1181-1194.
33. Xu, Y. Yuan, Y. Shen, Sh. Yin, Z. Wu, H. 2015. Investigation into subsidence hazards due to groundwater pumping from Aquifer II in Changzhou, China. Natural Hazards. 78(1); 281-296.
34. Zare mehrjerdi, A.A. 2011. Study of land subsidence and cracks in Rustaq district south Meibod. Journal of Geography and Environmental Planning. 22(3). (In Persian)
- geochemistry and excitation-emission fluorescence to develop a conceptual groundwater flow model with implications for subsidence hazards: An example from Co. Durham, UK. Environmental Geology. 48(3): 320-335.
14. Lashkaripour, Gh. Ghafari, M. and Rostami, H.R. 2009. An investigation on the mechanism of earth-fissures and land subsidence in the western part of Kashmar Plain. Geological studies. 1(1):95-111. (In Persian)
15. Liu, C.W. Lin, W.S. and Cheng, L.H. 2006. Estimation of land subsidence caused by loss of smectite interlayer water in shallow aquifer systems. Hydrogeology Journal. 14: 508-525.
16. Motiee Langroodi, S.H. Nasiri, H. and Mostafaei, A. 2012. Models of ecological land potential in terms of agricultural and rangeland with using FAHP in GIS (case study: Marvdasht). Land use Planning Journal In press. (In Persian)
17. National coal Board. 1975. Subsidence Engineering Hand book. National coal Board mining Department London. 111p.
18. Nasiri, H. 2011. Models of ecological land potential in terms of agricultural and rangeland with using multi criteria decision making and fuzzy logic in GIS (case study: Marvdasht). Msc. Thesis. Faculty of Geography. University of Tehran. (In Persian)
19. Norozi, Gh.R. Rahnema rad, J. and Darmiani, A. 2011. Decline in groundwater levels and investigate the Earth Summit in Darmian plain. Proceedings of the Thirtieth Meeting of Earth Sciences. Geological Survey and Mineral Exploration country. (In Persian)
20. Oh, H. and Lee, S. 2010. Assessment of ground subsidence using GIS and the weights-of-evidence model. Engineering Geology. 115: 36-48.
21. Park, I. Choi, J. Jin Lee, M. and Lee, S. 2012. Application of an adaptive neuro fuzzy inference system to ground subsidence hazard mapping. Computers & Geosciences. 48: 228-238.
22. Putra, D.P.E. Setianto, A. Keokhampui, K. and Fukuoka, H. 2011. Land Subsidence Risk Assessment Case Study: Rongkop, Gunung Kidul, Yogyakarta-Indonesia. The 4th AUN/SEEDNet Regional Conference on GeoDisaster Mitigation in ASEAN "Past tragedies are the lessons for future mitigation". The Royal Paradise Hotel & Spa, Phuket, Thailand.

*Abstract***Risk Zoning of Land Subsidence Due to Groundwater Level Declining using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (Case Study: Ardabil Plain)**M. Aalipour Erdi¹, B. Malekmohammadi² and H. R. Jafari³

Received: 2014/06/08 Accepted: 2017/02/21

Over exploitation of groundwater and exist of land subsidence evidences in Ardabil plain, demonstrate necessity of land subsidence risk zoning in this plain. The purpose of this study was to preparation land subsidence probability map and determines the high-risk areas with using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) model. Information layers including; geological formation, distance from the fault, rate of groundwater level decline, slope and thickness of alluvium were used as effective factors. The pairwise comparisons for criteria were done by using experts' opinions. Obtained weights were assigned to each layer in the Geographic Information System (GIS) and land subsidence risks were calculated. The results show that this plain has 13 percent of very high risk, 20 percent of high risk, 45 percent of moderate risk, 16 percent of low risk and 6 percent of very low risk of land subsidence. Also, about 67.5 percent of the southern regions of area, due to excessive use of groundwater, have very high and high class of land subsidence risk. For verification of the results, field data of fractured pipe wells were used. The verification results show that almost 80 percent of model outputs (moderate to high risk) are consistent with field data.

Keywords: *Ground subsidence, Groundwater depletion, Fuzzy analytical hierarchy process (FAHP), Ardabil plain.*

1. Ph.D. Candidate of environment-Evaluation and Land use planning, Faculty of Natural resources, University of Tehran.

2- Associate professor, Department of Environmental planning and Management, Graduated Faculty of Environment, University of Tehran, Corresponding author, Email: malekb@ut.ac.ir.

3- Professor, Department of Environmental planning and Management, Graduated Faculty of Environment, University of Tehran.