

تحلیل آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت مرداب با استفاده از روش ALPRIFT بر اثر بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی

نریا داداشی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

سینا صادق‌فام* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

عطاالله ندیری (دانشیار)

یوسف محبی (کارشناس ارشد)

گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

در پژوهش حاضر با استفاده از روش ALPRIFT به ارزیابی آسیب‌پذیری فرونشست زمین در دشت مرداب پرداخته شده است. در این روش، از هفت لایه شامل محیط آبخوان، کاربری اراضی، پمپاژ، تغذیه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل و افت تراز ایستابی استفاده شد. با توجه به اهمیت افت تراز ایستابی، برای تهیه این لایه از دو راهکار استفاده شد. در راهکار اول از اختلاف ماهانه تراز آب طی سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۰ استفاده و لایه‌های مختلفی تهیه شد. در راهکار دوم از روند افت تراز ایستابی طی همان دوره زمانی بهره گرفته شد. نتایج نشان داد آسیب‌پذیری در راهکار اول برای سال‌های مختلف متفاوت بوده ولی در راهکار دوم، آسیب‌پذیری فارغ از تغییرات سالیانه ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مناطق جنوب شرقی و جنوب غربی دشت، شهر مرداب و مناطق یامچی و کوشک‌سرای در برابر فرونشست آسیب‌پذیرند و متوسط فرونشست دشت برابر ۲ سانتی‌متر طی سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۷ است.

dadashi.445@gmail.com
s.sadeghfam@maragheh.ac.ir
nadiri@tabrizu.ac.ir
yusef_19@yahoo.com

واژگان کلیدی: فرونشست زمین، آسیب‌پذیری، تداخل‌سنجی راداری، افت سطح آب زیرزمینی، دشت مرداب.

۱. مقدمه

آبخوان بر اثر تخلیه‌ی آب زیرزمینی دچار تغییر شده و زمین نشست می‌کند.^[۶] تراکم آبخوان بر خصوصیات هیدرودینامیکی آن تأثیر گذاشته و باعث کاهش نفوذپذیری و کاهش قابلیت ذخیره آب خواهد شد. علاوه بر این، پدیده‌ی فرونشست می‌تواند باعث بروز مشکلاتی از جمله تخریب سیستم‌های آبیاری، تغییر شیب رودخانه‌ها و جاده‌ها، ایجاد درز و ترک در سطح زمین، کاهش حاصل‌خیزی خاک، تغییر شیب سطح زمین، جابه‌جایی دکل‌ها و سازه‌ها و افزایش سیل‌خیزی منطقه شود. مطالعات انجام شده در زمینه‌ی فرونشست دشت‌ها را می‌توان در سه دسته تقسیم‌بندی کرد: الف) مطالعات مبتنی بر روابط تجربی یا مدل‌های ریاضی؛ ب) مطالعات انجام شده مبتنی بر GIS؛ ج) تحقیقات انجام شده توسط ترکیب GIS و تکنیک‌های سنجش از دور. در ادامه به بررسی اجمالی این مطالعات پرداخته می‌شود.

فانت و همکاران (۲۰۱۶) به منظور بررسی فرونشست در دره‌ی مرکزی کالیفرنیا از مدلی به نام «مدل هیدرولوژیکی دهکده‌ی مرکزی (CVHM)»^[۱] استفاده کردند. این مدل جریان آب زیرزمینی، جریان‌های سطحی، کشاورزی آبی، فرونشست و

فروریزش یا نشست سطح زمین بر اثر علل مختلف در مقیاس بزرگ و کوچک را «فرونشست زمین» می‌نامند. غالباً این واژه به حرکت قائم و رو به پایین سطح زمین اطلاق می‌شود که ممکن است با حرکت افقی نیز همراه باشد.^[۱] فرونشست زمین بر اثر فعالیت‌های انسانی همچون بهره‌برداری بلندمدت آب، نفت و گاز از مخازن زیرزمینی یا استخراج از معادن زیرزمینی تشدید می‌شود.^[۲] با این وجود مهم‌ترین علت فرونشست منطقه‌ی زمین، متراکم شدن محیط آبخوان بر اثر پمپاژ بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است.^[۳] این مسئله در آبخوان‌های ماسه‌بی متخلخل که به‌صورت بین لایه‌یی در لایه‌های آبدار رسی نفوذناپذیر قرار دارد، بسیار جدی بوده و موجب فرونشست گسترده می‌شود.^[۴] بر اساس آمار سال آبی ۸۱-۱۳۸۲ در کشور، حدود ۷۴٫۶ میلیارد مترمکعب آب از طریق چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌ها به دست می‌آید.^[۵] هنگامی که آبخوان بهره‌برداری می‌شود، نیروهای متعادل‌کننده‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱/۳۱، اصلاحیه ۱۳۹۸/۳/۲۸، پذیرش ۱۳۹۸/۴/۱۱.

DOI:10.24200/J30.2019.53189.2538

Archive of SID

تصاویر راداری InSAR و تبدیلات موجک^۷ برای ارزیابی فرورانشست منطقه‌ی زمین در دشت پکن^۸ شرقی در چین استفاده کردند. آنها از تصاویر ماهواره‌های TerraSAR-X و Envisat طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ برای شناسایی تغییرات سطح زمین بهره گرفتند. همچنین با استفاده از تکنیک تبدیل موجک ارتباط بین فرورانشست تجمعی و تراز هیدرولیکی آب را مشخص کردند و نهایتاً نشان دادند که بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل فرورانشست در دشت پکن است.^[۱۸]

ندیری و همکاران (۲۰۱۸)، چارچوب جدید ALPRIFT را برای برآورد شاخص آسیب‌پذیری فرورانشست در دشت شبستر در استان آذربایجان شرقی معرفی کردند. چارچوب پیشنهادی آنها شامل هفت لایه - داده‌ی پمپاژ، کاربری اراضی، محیط آبخوان، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل، تغذیه‌ی خالص آبخوان و افت سطح آب زیرزمینی است. آنها برای بهبود پیش‌بینی فرورانشست از مدل منطق فازی ساگنو (SFL)^۹ و روش تداخل‌سنجی راداری استفاده کردند. با به‌کارگیری مدل SFL در چارچوب ALPRIFT نقاط محتمل فرورانشست با دقت بالاتری شناسایی شدند.^[۱۹] در تحقیق حاضر نیز از چارچوب ALPRIFT استفاده شده است، اما با توجه به اهمیت لایه‌ی افت سطح آب زیرزمینی در پدیده فرورانشست، این لایه توسط دو راهکار مختلف تهیه شده است. در مطالعه‌ی ندیری و همکاران افت سطح آب زیرزمینی در یک سال آبی بررسی شده است^[۱۹] ولی در این تحقیق، علاوه بر راهکار مذکور، روند افت تراز سطح آب زیرزمینی طی یک دوره‌ی آماری (۱۳۹۰-۱۳۹۷) بررسی و بر اساس آن لایه‌ی مورد نظر تهیه شد. از سوی دیگر، در دهه‌های اخیر توسعه‌ی سریع کشاورزی همراه با رشد سریع جمعیت و افزایش نیاز آبی باعث بهره‌برداری بیرویه و افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت مرند شده است. لذا، ارزیابی آسیب‌پذیری در این دشت می‌تواند در مدیریت آبخوان این دشت مفید واقع شود.

۲. منطقه‌ی مورد مطالعه

دشت مرند به‌عنوان بخشی از حوضه‌ی آبخیز دریای خزر با مساحت تقریبی ۷۳۸ کیلومتر مربع در مختصات جغرافیایی ۳۸°۲۲'۱۲" تا ۳۸°۳۴'۴۴" عرض شمالی و ۴۵°۲۱'۰۳" تا ۴۶°۰۰'۰۰" طول شرقی در شمال غربی ایران قرار دارد. این دشت در غرب استان آذربایجان شرقی جای گرفته و توسط ارتفاعات بلند محصور گشته است و دارای شیب ملایمی در حدود ۲-۵ درصد از دامنه‌های شمالی و جنوبی و شرق به طرف مرکز دشت و در نهایت قسمت غربی است. ارتفاع متوسط کمینه و بیشینه‌ی دشت به ترتیب برابر ۱۲۵۷، ۴۸ و ۱۷۵۲ متر از سطح متوسط دریاها آزاد است. رودخانه‌ی زلیبیرچای بزرگترین و پربارترین رودخانه‌ی منطقه است که از دامنه‌های جنوبی کوه سلطان جهانگیر واقع در حد مشترک حوضه‌ی حاجیرچای و زلیبیرچای سرچشمه می‌گیرد و در جهت جنوب به شمال و به موازات خط تقسیم حوضه حرکت کرده و سپس به سمت غرب منحرف می‌شود و در جهت شرق به غرب و موازی با زنوز چای به مسیر حرکت خود ادامه می‌دهد. رودخانه‌ی زنوزچای یکی دیگر از رودخانه‌های منطقه است که از دامنه‌ی غربی رشته کوه‌های کیامکی سرچشمه می‌گیرد و در جهت شرقی - غربی حرکت و بعد از عبور از جنوب شهر زنوز و دریافت مسیل‌هایی وارد دشت مرند می‌شود.^[۲۰] آبخوان دشت مرند از نوع آزاد و محصور است ولی بر اثر برداشت بیش از حد و افت فشار، عملکرد خود را از دست داده است. متوسط بارش و درجه حرارت سالانه‌ی منطقه برای یک

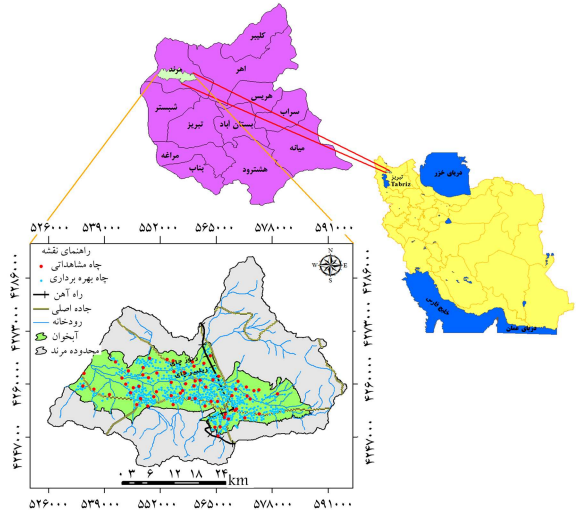
دیگر فرایندهای اصلی در دره مرکزی را به‌صورت ماهیانه شبیه‌سازی می‌کند.^[۷] شیرستا و همکاران (۲۰۱۷) با ترکیب یک مدل جریان آب زیرزمینی و سیستم مدل‌سازی جریان سطحی - زیرسطحی به شبیه‌سازی فرورانشست زمین تحت تأثیر تخلیه‌ی آب‌های زیرزمینی در دره‌ی کاتماندو^۲ واقع در کشور نپال پرداختند.^[۸] آنها سناریوهایی بر اساس تعداد جمعیت، وضعیت پوشش اراضی، الگوی بهره‌برداری از آب زیرزمینی و پارامترهای اقلیمی که در آینده رخ خواهند داد، تعریف کردند. در نهایت با استفاده از لایه‌های تراکم‌پذیری و ضخامت آبخوان و لایه‌ی رستری نوسانات سطح آب زیرزمینی، نقشه‌ی فرورانشست را تهیه کردند. میندرهاود و همکاران (۲۰۱۷) اثرات تخلیه‌ی ۲۵ ساله (۲۰۱۵-۱۹۹۱) آب زیرزمینی را بر فرورانشست دلتای مکانگ^۳ در ویتنام بررسی کردند. برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی آب زیرزمینی و درون‌یابی تغییرات زمانی و مکانی کاهش تراز آب از مدل سه‌بعدی MODFLOW استفاده کردند.^[۹] عیفی (۲۰۱۷) با استفاده از رابطه‌ی تجربی لامب - ویتمن به ارزیابی پتانسیل فرورانشست زمین و عوامل مؤثر بر آن در دشت فاروق - سیدان شهرستان مرودشت پرداخت. نتایج تحقیق وی نشان داد که عوامل تراکم و فشردگی میان لایه‌های رسی و برداشت بیرویه آب‌های زیرزمینی مؤثرترین عوامل فرورانشست زمین است.^[۱۰]

اکبری و همکاران (۲۰۰۹) با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی، نقشه‌ی افت سطح آب زیرزمینی را در آبخوان دشت مشهد تهیه کردند. آنها بر اساس نقشه‌های هم‌پهنه افت اظهار داشتند که سطح آب زیرزمینی در بخش‌های مرکزی و غربی آبخوان تا ۳۰ متر کاهش داشته است.^[۱۱] امیراحمدی و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از تلفیق لایه‌هایی نظیر لیتولوژی، هیدرولوژی، ژئومورفولوژی در محیط GIS، پدیده‌ی فرورانشست را در دشت اردبیل پیش‌بینی کردند و به این نتیجه رسیدند که در آینده احتمال وقوع فرورانشست در جنوب شرقی و غرب در این دشت وجود دارد.^[۱۲] نادری و همکاران (۲۰۱۸) از چارچوب GARDLIF به منظور شناسایی مناطق دارای احتمال فرورانشست در آبخوان دشت سلماس استفاده کردند. آنها در چارچوب مذکور از هفت لایه‌ی پمپاژ، کاربری اراضی، محیط آبخوان، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل، تغذیه‌ی خالص آبخوان و افت سطح آب زیرزمینی در محیط GIS استفاده کردند و نشان دادند که روش مذکور در پتانسیل‌یابی مناطق مختلف از نظر وقوع فرورانشست زمین کارایی قابل قبولی دارد.^[۱۳]

شمشکی و همکاران (۲۰۱۱)، با استفاده از روش تداخل‌سنجی ماهواره‌ی نشان دادند که در پهنه‌ی گسترده‌ی دشت هشنگرد در استان تهران، فرورانشست با نرخ بیشینه ۱۶ و نرخ متوسط ۸/۴ سانتیمتر بر سال در حال شکل‌گیری است.^[۱۴] ژنگ و همکاران (۲۰۱۴)، از تکنیک InSAR و GIS به منظور ارزیابی فرورانشست زمین در آبخوان نابی^۴ در ژاپن استفاده کردند. آنها اشاره کردند که استفاده از داده‌های GPV-MSM^۵ می‌تواند موجب بهبود نتایج InSAR شود.^[۱۵] دهقانی و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی به همراه روش سلسله‌مراتبی تحلیلی (AHP)^۶ به عنوان مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره در نرم‌افزار GIS به بررسی فرورانشست آبخوان رفسنجان پرداختند. آنها این شیوه را به‌عنوان روشی با دقت بالا توصیف کرده‌اند.^[۱۶] جی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های باند C سنجنده ENVISAT و ASAR و باند L سنجنده PALSAR ALOS نرخ فرورانشست زمین را در شهر باندیونگ اندونزی طی بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ به دست آوردند. آنها مشاهده کردند که نرخ فرورانشست در محدوده‌ی مورد مطالعه از ۲۴۰ تا ۴۰ میلی‌متر در سال بوده که علت اصلی آن صنعتی شدن و استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی در این منطقه است.^[۱۷] جانو و همکاران (۲۰۱۸)، از سری زمانی

جدول ۱. وزن‌های اختصاص یافته به هر یک از لایه‌های روش ALPRIFT.

| وزن لایه | ALPRIFT روش |
|----------|---------------------|
| ۵ | افت سطح آب زیرزمینی |
| ۵ | محیط آبخوان |
| ۴ | کاربری اراضی |
| ۴ | پمپاژ |
| ۳ | تغذیه‌ی خالص |
| ۲ | ضخامت آبخوان |
| ۱ | فاصله از گسل |



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه (دشت مرند).

جغرافیایی (GIS) پردازش‌های مکانی روی آنها صورت گرفت و در نهایت تلفیق شد. شکل ۳ مراحل مختلف اجرای روش ALPRIFT را نشان می‌دهد. در این روش، هر لایه با توجه به تأثیرگذاری آن در پدیده‌ی فرونشست دارای یک وزن بوده و بر اساس مقادیر موجود در هر سلول لایه، یک رتبه به آن مقدار اختصاص داده شد. اهمیت نسبی هر لایه نسبت به لایه‌ی دیگر، وزن آن لایه را مشخص می‌کند؛ وزن لایه‌ها بین ۱ تا ۵ متغیر بوده، به طوری که وزن بالاتر به مؤثرترین لایه در آسیب‌پذیری فرونشست و وزن پایین‌تر به کم‌اهمیت‌ترین لایه اختصاص یافت (جدول ۱). رتبه‌ی هر لایه با توجه به مقادیر سلول‌های همان لایه به دست می‌آید و بین ۱ تا ۱۰ متغیر است. هرچه رتبه‌ی یک سلول در یک لایه بیشتر باشد، احتمال خطر فرونشست زمین در آن منطقه افزایش می‌یابد. رتبه‌های مشخص شده برای مقادیر مختلف هر لایه در جدول ۲ ارائه شده است. بدین ترتیب، شاخص آسیب‌پذیری فرونشست (SVI) در هر سلول را می‌توان با استفاده از مقادیر رتبه و وزن هر لایه با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه کرد:

$$SVI = A_r A_w + L_r L_w + P_r P_w + R_r R_w + I_r I_w + F_r F_w + T_r T_w \quad (1)$$

که در آن SVI شاخص آسیب‌پذیری فرونشست، حروف بزرگ نشان‌دهنده‌ی لایه‌های ALPRIFT، و اندیس‌های r و w به ترتیب رتبه و وزن هر لایه است.

۱.۱.۳. آماده سازی داده‌ها

• محیط آبخوان (A)

این لایه‌ی اطلاعاتی شامل مشخصاتی از بافت و ساختمان خاک است. برای تهیه‌ی لایه‌ی محیط آبخوان دشت مرند، از ۴۲ لاگ حفاری زمین‌شناسی موجود در منطقه استفاده شد. ارزیابی جنس مواد تشکیل‌دهنده‌ی آبخوان دشت مرند نشان‌گر وجود شن، ماسه، سیلت و رس یا ترکیبی از آنهاست. با توجه به جنس مواد و جدول ۲، به هر لاگ یک رتبه بین ۱ تا ۱۰ اختصاص داده شد. سپس با توجه به مختصات جغرافیایی هر لاگ و با استفاده از روش درون‌یابی وزنی معکوس فاصله (IDW)^{۱۷} مقادیر رتبه‌های محاسبه شده به صورت مکانی درون‌یابی شد. لازم به ذکر است بر اساس بررسی‌های انجام شده مشاهده شد که روش IDW خطای کم‌تری نسبت به سایر تکنیک‌های درون‌یابی دارد.

• کاربری اراضی (L)

این لایه، نوع کاربری اراضی را مشخص کرده و محدوده‌ی رتبه‌ی آن از ۱ تا ۹ با توجه به نوع کاربری، متغیر است. لایه‌ی کاربری اراضی با استفاده از روش پردازش تصاویر در محیط نرم‌افزار Envi ۵٫۳ صورت گرفت. ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری تصاویر در مرحله‌ی پیش‌پردازش انجام شده و در مرحله‌ی پردازش، از

دوره‌ی ۳۰ ساله (۹۰-۱۳۶۰) به ترتیب در حدود ۲۴۲٫۷ میلی‌متر و ۱۱٫۴ درجه سانتی‌گراد بوده و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن جزء مناطق نیمه‌خشک و سرد زمستانی محسوب می‌شود. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی دشت مرند نشان داده شده است.

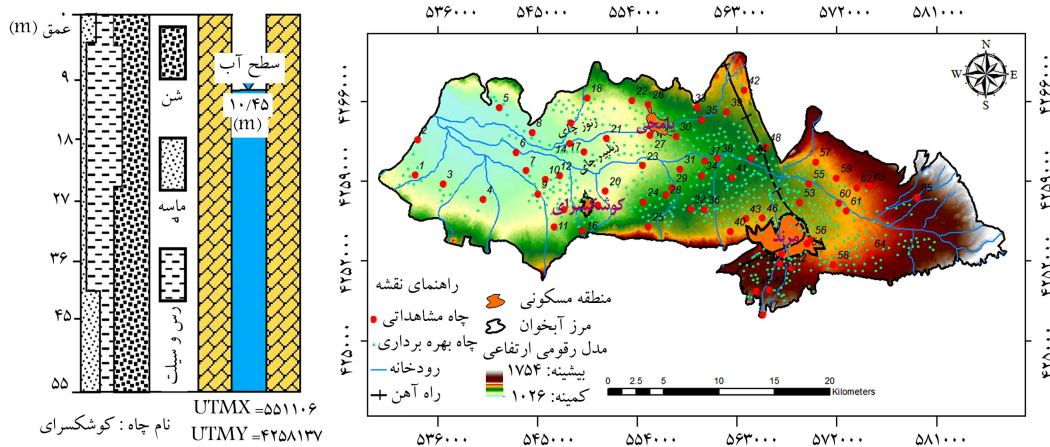
۱.۲. هیدروژئولوژی آبخوان دشت مرند

در آبخوان دشت مرند ۱۲۳ چاه مشاهداتی برای برداشت تراز آب زیرزمینی وجود دارد که از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۷ داده‌های آنها توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ی آذربایجان شرقی ثبت شده است. از این تعداد تنها ۶۵ چاه مشاهداتی بین سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۷ دارای اطلاعات تکمیلی بوده و از آنها برای آنالیزها استفاده شد. تراز آب زیرزمینی در محدوده‌ی مطالعاتی در یک دهه‌ی گذشته به دلیل افزایش جمعیت و رشد تقاضا در بخش کشاورزی، صنعت شرب به شدت کاهش یافته است. بر اساس نتایج آزمایش‌های پمپاژ، بیشینه‌ی قابلیت انتقال دشت برای آبخوان آزاد برابر با ۴۵۰ متر مربع در روز است.^[۱۱] به طور کلی عمق آب زیرزمینی در بخش شمالی دشت کم‌تر از عمق آب در بخش‌های شرقی و جنوبی دشت است. عمق آب در حوالی شهرستان مرند حدود ۶۰ متر، در محدوده‌ی روستای یامچی ۴۰ متر و در روستای کشک‌سرای ۲۰ متر است (شکل ۲). با توجه به توپوگرافی منطقه، جهت عمومی جریان آب زیرزمینی در دشت از حواشی به سمت مرکز و از شرق به غرب است.

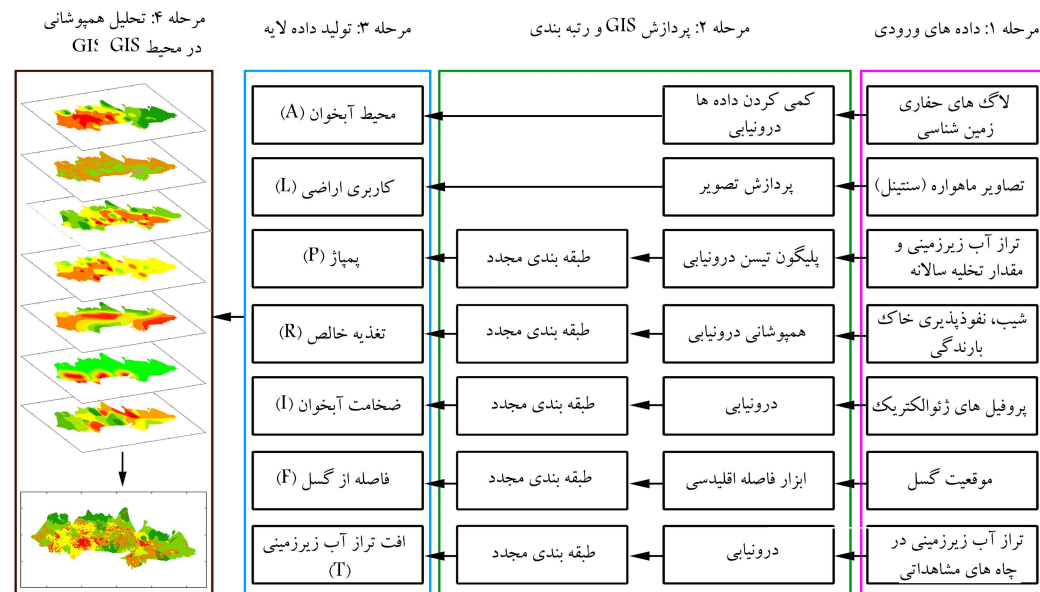
۳. روش شناسی

۱.۳. روش ALPRIFT

روش ALPRIFT برای ارزیابی آسیب‌پذیری پدیده فرونشست از هفت لایه - داده استفاده می‌کند که شامل ویژگی‌های فیزیکی، هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی، به ویژه ساختمان و بافت خاک است. لایه‌های مشارکت داده شده شامل: محیط آبخوان (A)^{۱۰}، کاربری اراضی (L)^{۱۱}، پمپاژ (P)^{۱۲}، تغذیه‌ی خالص (R)^{۱۳}، ضخامت آبخوان (I)^{۱۴}، فاصله از گسل (F)^{۱۵} و افت تراز آب زیرزمینی (T)^{۱۶} است. هر یک از این لایه‌ها به صورت مجزا تجزیه و تحلیل شده و سپس توسط سیستم اطلاعات



شکل ۲. موقعیت چاه‌های مشاهداتی آبخوان دشت مرند.



شکل ۳. مراحل اجرای مدل و تهیه نقشه‌ی فرورفتگی زمین در مدل ALPRIFT.

شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) ^{۱۸} برای شناسایی کاربری‌های اراضی مختلف استفاده شد. به منظور طبقه‌بندی کاربری‌های اراضی مختلف از روش طبقه‌بندی نظارت شده ^{۱۹} همراه با پیشینه‌ی درست‌نمایی ^{۲۰} بهره گرفته شد. این تکنیک با توجه به ضریب کاپا، ارزیابی و تطابق نتایج با داده‌های محلی انتخاب شده است. در مرحله‌ی پس‌پردازش، نتایج به دست آمده ارزیابی شد و بدین ترتیب لایه‌ی رستری کاربری اراضی تهیه شده و مقادیر رتبه به آن اختصاص یافت.

• **پمپاژ آب زیرزمینی (P)**
مقادیر تخلیه‌ی سالانه‌ی دشت مرند در سال آبی ۱۳۹۴-۹۵ با استفاده از ۸۰۶ چاه بهره‌برداری موجود در منطقه محاسبه شد. تعداد ۶۵ چاه مشاهداتی در محدوده‌ی آبخوان انتخاب و برای هریک از آنها شبکه‌بندی تیسن ^{۲۱} ترسیم شد. بدین ترتیب، با مجموع پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری واقع در هر پلیگون و با تقسیم آن بر مساحت همان پلیگون، مقدار تخلیه‌ی سالانه‌ی آن منطقه مشخص شده و به چاه مشاهداتی قرار گرفته در هر پلیگون نسبت داده می‌شود. سپس با استفاده از روش درون‌یابی

• **تغذیه‌ی خالص (R)**
در تحقیق حاضر، لایه‌ی تغذیه‌ی خالص با استفاده از روش پیسکوپو (۲۰۰۱) تهیه شد. ^[۲۲] در روش مذکور از سه لایه‌ی رستری بارندگی، شیب و نفوذپذیری خاک برای آماده‌سازی لایه‌ی تغذیه‌ی خالص استفاده شد. به منظور تهیه‌ی لایه‌ی رستری بارندگی از داده‌های ایستگاه مرند در بازه زمانی مهر ۱۳۹۵ تا مهر ۱۳۹۶ استفاده شد. نقشه‌ی بارندگی با به‌کارگیری روش درون‌یابی IDW ترسیم و کلاسه‌بندی شد. نقشه‌ی شیب منطقه توسط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. شیب منطقه‌ی مورد مطالعه در محدوده‌ی صفر تا ۷۶ درصد تغییر می‌کند. درجه‌ی نفوذپذیری خاک منطقه‌ی مورد مطالعه بر اساس نقشه‌ی خاک به پنج رده‌ی خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شدند. سپس، به هر کدام از کلاس‌های هر لایه‌ی رتبه بدون بعدی اختصاص داده شد. جدول ۳ رتبه‌های تعیین شده به هر رده را ارائه می‌کند.

جدول ۲. طبقه‌بندی و رتبه‌دهی به لایه‌های روش ALPRIFT.

| کاربری اراضی | | افت سطح آب زیرزمینی (متر در سال) | | تخلیه آبخوان (سانتی‌متر در سال) | | تغذیه‌ی خالص (سانتی‌متر در سال) | |
|--------------|------------------------|-------------------------------------|---------|------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| رتبه | دامنه | رتبه | دامنه | رتبه | دامنه | رتبه | دامنه |
| ۱ | ارضای باير، ديم و مرتع | ۱ | ۰-۰/۲ | ۶ | ۱-۵ | ۱ | ۲۴ < |
| ۵ | مناطق شهری و مسکونی | ۲ | ۰/۲-۰/۵ | ۷ | ۵-۲۰ | ۳ | ۱۸-۲۴ |
| ۹ | مناطق کشاورزی آبی | ۳ | ۰/۵-۰/۹ | ۸ | ۲۰-۴۰ | ۶ | ۱۲-۱۸ |
| | | ۴ | ۰/۹-۱/۴ | ۹ | ۴۰-۶۵ | ۸ | ۸-۱۲ |
| | | ۵ | ۱/۴-۲ | ۱۰ | ۶۵ < | ۹ | ۴-۸ |
| | | ۶ | ۲-۲/۷ | | | | |
| | | ۷ | ۲/۷-۳/۵ | | | | |
| | | ۸ | ۳/۵-۴/۴ | | | | |
| | | ۹ | ۴/۴-۵/۴ | | | | |
| | | ۱۰ | ۵/۴ < | | | | |

| محیط آبخوان | | ضخامت آبخوان (متر) | | فاصله از گسل (کیلومتر) | |
|-------------|-------------------------|--------------------|---------|------------------------|-------|
| رتبه | دامنه | رتبه | دامنه | رتبه | دامنه |
| ۳ | رسوبات آبرفتی دانه‌درشت | ۱ | ۰-۲۵ | ۱ | ۵ < |
| ۵ | ماسه و کنگلومرا | ۲ | ۲۵-۵۵ | ۲ | ۴-۵ |
| ۷ | ماسه و سیلت با رس زیاد | ۳ | ۵۵-۹۰ | ۳ | ۳-۴ |
| ۹ | سیلت و رس | ۴ | ۹۰-۱۳۰ | ۴ | ۲-۳ |
| | | ۵ | ۱۳۰-۱۷۵ | ۵ | ۱-۲ |
| | | ۶ | ۱۳۰-۲۲۵ | ۶ | ۰-۱ |
| | | ۷ | ۲۲۵-۲۸۰ | ۷ | |
| | | ۸ | ۲۸۰-۳۴۰ | ۸ | |

جدول ۳. رتبه‌دهی لایه‌های مؤثر در لایه‌ی تغذیه‌ی خالص (R).

| شیب (درصد) | | بارندگی (میلی‌متر) | | نفوذپذیری خاک | |
|------------|------|--------------------|------|---------------|-----------|
| محدوده | رتبه | محدوده | رتبه | محدوده | رتبه |
| ۲ > | ۴ | ۸۵۰ < | ۴ | ۵ | خیلی زیاد |
| ۱۰-۲ | ۳ | ۷۰۰-۸۵۰ | ۳ | ۴ | زیاد |
| ۱۰-۳۳ | ۲ | ۵۰۰-۷۰۰ | ۲ | ۳ | متوسط |
| ۳۳ < | ۱ | ۵۰۰ > | ۱ | ۲ | کم |
| | | | | ۱ | خیلی کم |

از پروفیل‌های ژئوالکتریک اندازه‌گیری شده با استفاده از روش وزنی معکوس فاصله درون‌یابی و سپس نقشه‌ی هم‌ضخامت آبخوان تهیه شد. در مرحله‌ی بعدی لایه‌ی ضخامت آبخوان با استفاده از مقادیر رتبه‌بندی توصیه شده در جدول ۲، مجدداً طبقه‌بندی انجام شد.

• فاصله از گسل (F)

نقشه‌ی گسل‌های موجود در محدوده‌ی مورد مطالعه از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. سپس در نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از ابزارهای تحلیل مکانی و روش فاصله‌ی اقلیدسی، نقشه‌ی فاصله از گسل تولید شده و مطابق با جدول ۲ رتبه‌دهی لایه انجام شد. هرچه منطقه‌ی به گسل نزدیکتر باشد احتمال فرونشست زمین بیشتر و دارای رتبه بالاتری است و مناطقی که بیشتر از ۵ کیلومتر با گسل فاصله داشته باشند خطر فرونشست در آن نواحی کم‌تر است.

• افت تراز آب زیرزمینی (T)

با توجه به اهمیت و وزن بالای لایه‌ی افت تراز آب زیرزمینی در پدیده فرونشست، از دو راهکار برای ساخت لایه‌ی مذکور استفاده شد. به منظور تهیه نقشه‌ی افت سطح آب آبخوان دشت مرند، از آمار تراز آب زیرزمینی ۶۵ حلقه چاه مشاهداتی بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ که از سازمان آب منطقه‌ی استان آذربایجان شرقی تهیه شده بود، استفاده شد. در راهکار اول، این لایه بر اساس اختلاف تراز ایستایی در یک سال به خصوص تهیه شد. به منظور ارزیابی تغییرپذیری آسیب‌پذیری، این لایه

نقشه‌ی تغذیه‌ی خالص توسط رابطه‌ی ۲ ساخته شده است که شامل ویژگی‌های موجود است. این رابطه، توانایی یک ناحیه را نسبت به ناحیه‌ی دیگر به لحاظ تغذیه‌ی خالص محاسبه می‌کند.^[۲۴]

$$(۲) \text{ نفوذپذیری خاک} + \text{بارندگی} + \text{درصد شیب} = \text{تغذیه‌ی خالص}$$

نقشه‌ی تغذیه‌ی خالص با استفاده از روش درون‌یابی IDW به دست آمده و با توجه به جدول ۲ به هر یک از پیکسل‌های لایه‌ی مذکور یک رتبه تخصیص می‌یابد.

• ضخامت آبخوان (I)

رسوبات آبرفتی در دشت ضخامت‌های متفاوتی دارند که با استفاده از پروفیل‌های ژئوالکتریک اندازه‌گیری می‌شود. مقادیر داده‌های ضخامت آبخوان در محل هر یک

Archive of SID

حد تصاویر اصلی و فرعی با هم انطباق دارند و برای تولید نقشه‌های فرونشست زمین و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) مناسب‌اند. مقدار انسجام بین صفر تا ۱ است؛ انسجام پوشش گیاهی پایین و انسجام مناطق مسکونی بالاست.

• حذف فاز توپوگرافی

به منظور دست‌یابی به فاز جابه‌جایی و در نتیجه برآورد میزان فرونشست سطح زمین لازم است که اثر توپوگرافی زمین از تداخل‌نگاشت حذف شود. برای حذف اثر توپوگرافی از تداخل‌نگاشت، مقادیر مدل رقومی ارتفاعی (DEM) از تداخل‌نگاشت‌ها کاسته می‌شود.

• بازیابی فاز^{۲۲}

در نهایت تداخل‌نگاشت‌ها وارد مرحله بازیابی فاز می‌شوند. خروجی روش تداخل‌سنجی متداول، دسته‌ی فازهای دارای ابهام (بازیابی نشده) است. بازیابی فاز، فرایندی است به منظور برآورد فازهای بدون ابهام از آرایه‌های دوبعدی از مقدار فازهایی که بین صفر تا 2π مدوله شده‌اند. از آنجا که در روش متداول به ازای هر پیکسل تصویر یک فاز برآورد می‌شود، به راحتی می‌توان بازیابی فاز را در بعد مکان اجرا کرد. بدین ترتیب، مقادیر فرونشست سطح زمین به دست خواهد آمد.

۴. نتایج و بحث

در شکل ۴ نتایج مربوط به تداخل‌سنجی راداری طی بازه زمانی فروردین ۱۳۹۶ تا فروردین ۱۳۹۷ نمایش داده شده است. اگرچه نتایج پردازش InSAR میزان جابه‌جایی عمودی زمین را در یک دوره‌ی معین محاسبه می‌کند، مقایسه‌ی بین مقادیر InSAR و شاخص آسیب‌پذیری، عملکرد روش پیشنهادی را مشخص خواهد کرد. ملاحظه می‌شود که بیشینه‌ی فرونشست زمین در دشت مرند ۱۵ سانتی‌متر بوده و در نواحی مرکزی و غربی آبخوان رخ داده است. همچنین مقدار متوسط فرونشست کل دشت در این بازه زمانی برابر ۲ سانتی‌متر است. لایه - داده‌های مشارکت داده شده نیز بر اساس آن چه در بخش ۳ گفته شد، تهیه شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است لایه‌ی افت تراز ایستابی در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت. چنان که ملاحظه می‌شود، جنس محیط آبخوان دشت مرند از شرق به غرب دارای ترکیبات شنی و ماسه‌ی تا لایه‌های متراکم رسی هستند. در حوالی منطقه‌ی کوشک‌سرای و مناطق هموار دشت، جنس آبخوان از ذرات ریزتری تشکیل

طی سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۰ بر اساس راهکار اول محاسبه شد. اما در راهکار دوم، تغییرات افت تراز آب زیرزمینی در طول دوره‌ی آماری (۹۷-۱۳۹۰) برای هر یک از چاه‌های مشاهداتی ترسیم و شیب افت تراز ایستابی به‌عنوان متوسط افت سالانه در چاه مذکور در نظر گرفته شد. در مرحله‌ی بعد، لایه‌ی رستری افت سطح آب زیرزمینی با به‌کارگیری روش درون‌یابی IDW برای هر کدام از راهکارهای مذکور تهیه و بر اساس جدول ۲ رتبه‌دهی شد.

۲.۱.۳. هم‌پوشانی لایه‌ها

در نرم‌افزار GIS هر مجموعه داده - لایه را می‌توان به صورت پیکسل به پیکسل و با استفاده از اپراتورهای تحلیل مکانی با یکدیگر ترکیب کرد، که اصطلاحاً این روش «تحلیل هم‌پوشانی»^{۲۲} نامیده می‌شود. تحلیل هم‌پوشانی روشی برای تلفیق لایه‌های مختلف برای رسیدن به نتیجه‌ی نهایی به‌عنوان نماینده‌ی از تمامی لایه‌های مشارکت داده شده است. با به‌کارگیری تکنیک تحلیل هم‌پوشانی به صورت وزن‌دار (رابطه‌ی ۱)، نقشه‌ی آسیب‌پذیری محاسبه شد.

۲.۳. تحلیل تداخل‌سنجی

فرونشست زمین را می‌توان با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ^{۲۳} اندازه‌گیری کرد، اما به دلیل محدودیت‌های هزینه، به کارگیری آن در تمامی مناطق امکان‌پذیر نیست.^[۲۳] در چنین شرایطی، تکنیک سنجنش از دور بر مبنای تصاویر ماهواره‌ی می‌تواند جایگزین مناسبی برای تخمین فرونشست زمین باشد. لذا در تحقیق حاضر از تصاویر ماهواره Sentinel-1 و تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) در دوره‌ی زمانی فروردین ۱۳۹۷ تا فروردین ۱۳۹۸ استفاده شد. تصاویر InSAR دارای قدرت تفکیک ۱۰ متر هستند که باید روی آنها پردازش‌هایی انجام شود.

۱.۲.۳. مراحل تداخل‌سنجی

• انتخاب زوج تصویر

برای انجام مراحل تداخل‌سنجی، تصاویر ورودی باید شامل دو یا تعداد بیشتری ترکیب تک‌منظره (SLC) ^{۲۴} از یک منطقه‌ی یکسان باشد که در آنها موقعیت ماهواره تنها اندکی با هم فرق می‌کند. در این تصاویر، سطرها نشان‌گر آزیموت و ستون‌ها بیان‌گر راستای برد^{۲۵} هستند.

• انطباق^{۲۶} تصاویر

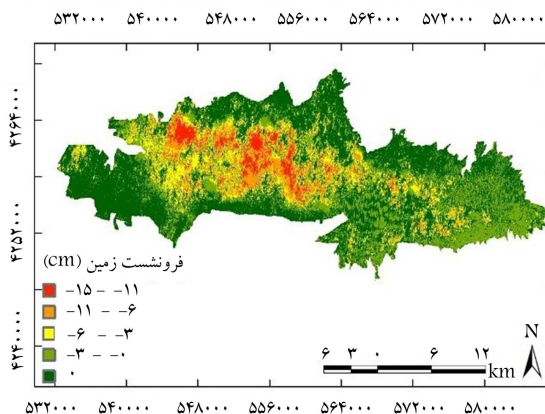
در این مرحله یکی از تصاویر، تصویر اصلی و مابقی تصاویر فرعی‌اند. به منظور محاسبه‌ی دقیق اختلاف فاز بین دو تصویر لازم است که پیکسل‌های متناظر هر دو تصویر اصلی و فرعی بر هم منطبق شوند. انطباق تصاویر تضمین می‌کند که هر عارضه روی زمین در پیکسل یکسانی در تصویر اصلی و فرعی قرار دارد.

• اعمال فیلتر طیفی^{۲۷}

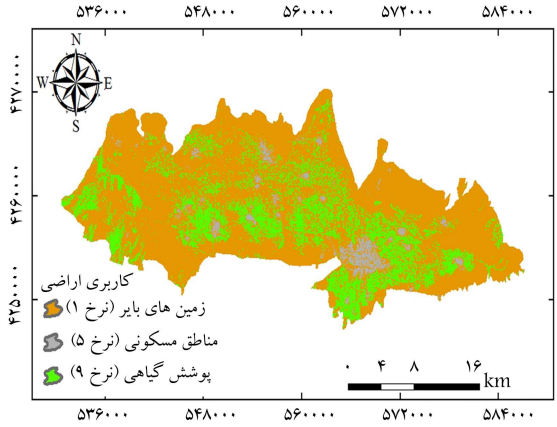
فیلتر طیفی نسبت سیگنال به نویز را در تداخل‌نگاشت^{۲۸} بهبود می‌بخشد. این کاهش نویز ناشی از فیلتر کردن قسمت‌های غیرهم‌پوشانی طیف است. این طیف غیرهم‌پوشانی در محدوده‌ی بین تصویر اصلی و فرعی ناشی از تفاوت اندکی است که بین زاویه‌ی دید سنسورها وجود دارد.

• ساخت تداخل‌نگاشت و محاسبه‌ی انسجام^{۲۹}

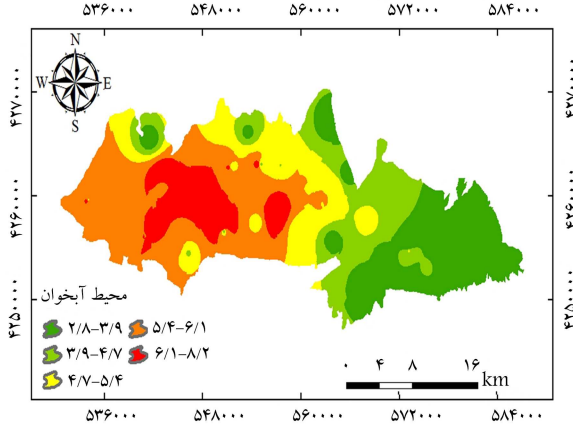
تداخل‌نگاشت از ضرب متقابل تصویر اصلی در تصویر فرعی حاصل می‌شود. دامنه‌ی ^{۳۰} تداخل‌نگاشت از حاصل ضرب دامنه‌ی دو تصویر اولیه به دست می‌آید و فاز^{۳۱} آن برابر با اختلاف فاز بین دو تصویر است. انسجام نشان می‌دهد که تا چه



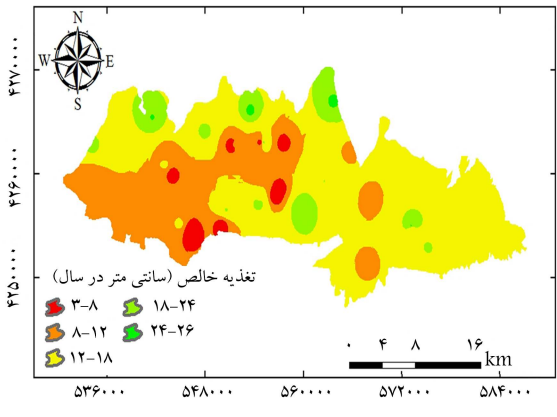
شکل ۴. نقشه‌ی فرونشست زمین به دست آمده از تداخل‌سنجی راداری (InSAR) در دشت مرند.



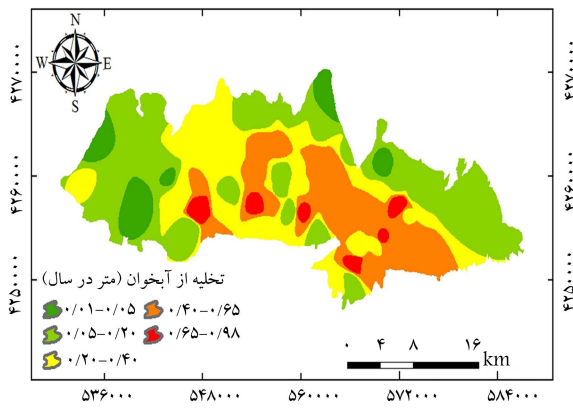
ب) کاربری اراضی؛



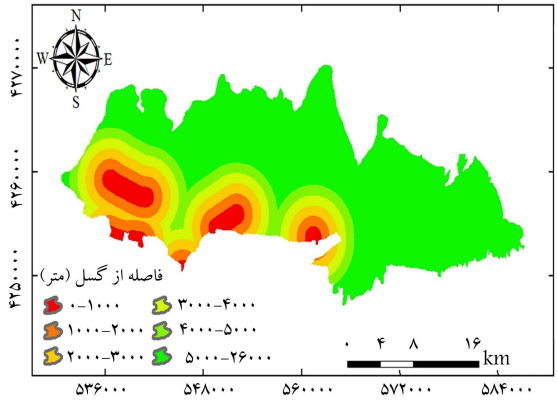
الف) محیط آبخوان؛



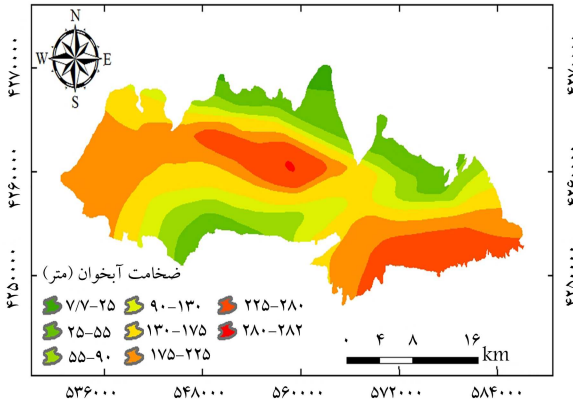
د) تغذیه ی خالص؛



ج) تخلیه آب زیرزمینی؛



و) فاصله از گسل.



ه) ضخامت آبخوان؛

شکل ۵. لایه‌های مشارکت داده شده در روش ALPRIFT.

می‌شود. به طوری که سالانه بین ۵/۱ تا ۱ متر از منابع آب زیرزمینی برداشت صورت می‌گیرد. از سوی دیگر، میزان پمپاژ سالانه‌ی آب زیرزمینی در اراضی کشاورزی حاشیه‌ی منطقه‌ی یامچی و کوشک‌سرای نیز قابل توجه است. کم‌ترین میزان تخلیه‌ی آب زیرزمینی در شمال و شمال شرقی آبخوان و بخش غربی و هموار آن که فاقد مناطق مسکونی است، صورت گرفته است (شکل ۵ ج). نقشه‌ی تغذیه‌ی خالص‌ی نشان می‌دهد که ناحیه‌ی جنوب غربی آبخوان و مساحتی از آن که بین منطقه‌ی یامچی و کوشک‌سرای قرار گرفته دارای کم‌ترین تغذیه‌ی آب زیرزمینی است (شکل ۵).

شده است (شکل ۵ الف). در بررسی لایه‌ی کاربری اراضی مشاهده شد ۷۴/۹٪ از مساحت آبخوان را زمین‌های بایر، ۳/۱٪ آن را مناطق مسکونی و ۲۲٪ مابقی را پوشش گیاهی تشکیل داده است. زمین‌های بایر کم‌تر در معرض خطر فرونشست بوده و به همین علت رتبه‌ی ۱ را به خود اختصاص داده و نواحی دارای پوشش گیاهی مستعد فرونشست بوده که در نقشه‌ی کاربری اراضی با رتبه‌ی ۹ مشخص شده است (شکل ۵ ب). با توجه به تخلیه‌ی آب زیرزمینی می‌توان دریافت که در اراضی کشاورزی اطراف شهر مرند بیشترین میزان تخلیه‌ی آب زیرزمینی انجام

| محیط آبخوان | فاصله از گسل (کیلومتر) | | کاربری اراضی | | ضخامت آبخوان (متر) | | تخلیه از آبخوان (سانتی متر در سال) | | تغذیه‌ی خالص (سانتی متر در سال) | | |
|----------------------------|---------------------------|----------|--------------|------------------------|--------------------|-------|---------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|--|
| | سهم (%) | دامنه | سهم (%) | دامنه | سهم (%) | دامنه | سهم (%) | دامنه | سهم (%) | دامنه | |
| رسوبات آبرفتی دانه‌درشت | ۰٫۷ | ۵ < ۶۴٫۱ | ۷۴٫۹ | اراضی بایر، دیم و مرتع | ۰-۲۵ | ۰٫۹ | ۱-۵ | ۷٫۲ | ۰٫۳ | ۲۴ < | |
| ماسه و کنگلومرا | ۴۸٫۴ | ۴-۵ | ۸٫۵ | مناطق شهری و مسکونی | ۲۵-۵۵ | ۱۱٫۱ | ۵-۲۰ | ۳۹٫۷ | ۷٫۶ | ۱۸-۲۴ | |
| ماسه و سیلت رس زیاد | ۵۰٫۲ | ۳-۴ | ۸٫۸ | مناطق کشاورزی آبی | ۵۵-۹۰ | ۱۱٫۴ | ۲۰-۴۰ | ۲۷٫۳ | ۶۰٫۵ | ۱۲-۱۸ | |
| سیلت و رس | ۰٫۷ | ۲-۳ | ۸٫۲ | | ۹۰-۱۳۰ | ۱۲ | ۴۰-۶۵ | ۲۲٫۸ | ۲۸٫۸ | ۸-۱۲ | |
| | | ۱-۲ | ۶٫۴ | | ۱۳۰-۱۷۵ | ۲۱٫۷ | ۶۵ < | ۳٫۱ | ۲٫۷ | ۴-۸ | |
| | | ۰-۱ | ۴ | | ۱۳۰-۲۲۵ | ۲۷٫۵ | | | | | |
| | | | | | ۲۲۵-۲۸۰ | ۱۵٫۲ | | | | | |
| | | | | | ۲۸۰-۳۴۰ | ۰٫۱ | | | | | |

پیشنهادی نمایش می‌دهد. نقشه‌ی آسیب‌پذیری فرورانشست زمین بر اساس روش بهینه‌سازی جنکس^{۳۳} به ۵ رده با خطر فرورانشست بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد. در این شکل تأثیر نوسانات فصلی در راهکار اول مشهود بوده که منجر به نتایج متفاوت آسیب‌پذیری شده است. با این حال می‌توان دریافت که در نتایج هر دو راهکار، بالاترین شاخص فرورانشست در مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی حاشیه آن حادث شده است. لذا، شهر مرند و منطقه‌ی مسکونی یامچی و کوشک‌سرای در خطر احتمالی فرورانشست شدید قرار داشته و باید برای پیش‌بینی خطرات آینده تدابیری لحاظ شود. اما خطر فرورانشست زمین در نیمه شمالی دشت مرند پایین بوده و جزء مناطق با خطر فرورانشست پایین محسوب می‌شوند.

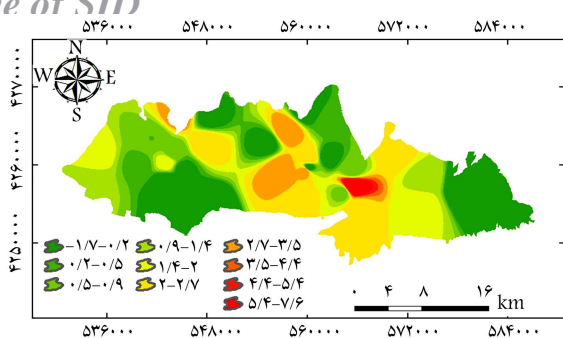
برای ارزیابی راهکارهای مختلف تخمین آسیب‌پذیری فرورانشست دشت مرند، از منحنی مشخصه‌ی عملکرد سیستم (ROC) استفاده می‌شود. منحنی ROC، عملکرد نسبی هر راهکار را نسبت به مقادیر حاصل از تحلیل تداخل سنجی ارزیابی کرده و سطح زیرمنحنی (AUC) بیانگر دقت آن راهکار است؛ به طوری که بهترین راهکار، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد. مقادیر AUC از ۰٫۵ تا ۱ متغیر است.^[۲۴] در شکل ۸ منحنی ROC و مقادیر AUC مربوط به هر یک از راهکارهای به کار رفته در تحقیق حاضر نشان داده شده است. نتایج منحنی ROC نشان می‌دهد که بالاترین مقدار AUC برای سال‌های ۹۱-۹۰ و ۹۷-۹۶ در راهکار اول مشاهده شده که مقادیر آن نیز به ترتیب برابر ۰٫۶۶۸ و ۰٫۶۶۷ است. باید در نظر داشت با توجه به این که تحلیل تداخل سنجی در سال ۹۶-۹۷ انجام شده، بیشترین مقدار AUC برای نقشه‌ی آسیب‌پذیری سال ۹۶-۹۷ منطقی به نظر می‌رسد. ولی ممکن است در برخی دشت‌ها افت تراز ایستابی تأثیر خود را با کمی تأخیر در نتایج تحلیل تداخل سنجی نشان دهد. این مسئله به ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان بستگی دارد. مقدار AUC برای نتایج راهکار دوم نیز نسبتاً بالاست (۰٫۶۴) اگرچه نسبت به مقادیر ماکزیمم AUC کم‌تر است. با توجه به عملکرد قابل قبول در راهکار دوم و کاهش اثر نوسانات زمانی و فصلی در نتایج آن، می‌توان اظهار داشت این راهکار نتایج قابل اطمینان‌تری ارائه داده است.

ضخامت آبخوان دشت مرند از ۷ متر در نواحی شمالی آبخوان تا ۲۸۲ متر در ناحیه‌ی مرکزی آن متغیر است (شکل ۵ هـ). با توجه به عبور خط گسل از نواحی جنوبی و جنوب غربی آبخوان، احتمال فرورانشست زمین بر اثر زلزله در این مناطق بیشتر است (شکل ۵ و). در جدول ۴ مساحت هر کلاس از لایه‌های ALPRIFT بر حسب درصد ارائه شده است.

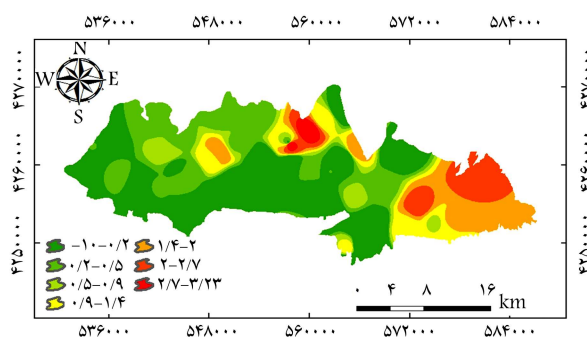
قبلاً نیز اشاره شد که در تحقیق حاضر برای تهیه‌ی لایه‌ی افت تراز آب زیرزمینی از دو راهکار استفاده شده است. در راهکار اول اختلاف تراز آب زیرزمینی در اردیبهشت ماه هر سال (برای مثال اردیبهشت سال ۱۳۹۶) با فروردین ماه سال آینده (برای مثال فروردین ۱۳۹۷) برای کلیه‌ی سال‌های آماری محاسبه شده است. این روند برای سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۰ تکرار شده است. شکل ۶ الف تا ۶ ز نقشه‌ی افت تراز آب زیرزمینی را بین سال‌های مختلف آماری نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است، در سال ۱۳۹۴ اطلاعات تراز آب زیرزمینی موجود نبوده و لذا اختلاف اردیبهشت سال ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۵ مد نظر قرار گرفته است. چنان‌که مشاهده می‌شود، الگوی مکانی افت تراز ایستابی در راهکار اول، برای هر سال متفاوت بوده و لذا می‌تواند به نتایج متفاوت آسیب‌پذیری نیز منجر شود. وجود الگوی‌های مکانی متفاوت افت تراز ایستابی در راهکار اول می‌تواند از نوسانات فصلی نیز تأثیر بگیرد.

نتایج افت تراز ایستابی در راهکار دوم، به دلیل این که روند افت تراز ایستابی در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۰ در هر یک از چاه‌های مشاهداتی به عنوان افت متوسط سالانه تراز آب زیرزمینی در نظر گرفته شده، نوسانات فصلی تأثیر چشم‌گیری نداشته و نتایج آسیب‌پذیری را به صورت مستقل از تغییرات فصلی ارائه می‌دهد. شکل ۶ ز نقشه‌ی افت سطح ایستابی را بر اساس راهکار دوم نشان می‌دهد. بر این اساس، متوسط افت سالانه‌ی تراز آب زیرزمینی در منطقه‌ی مورد مطالعه تا ۳ متر در سال برآورد شد که اراضی کشاورزی حاشیه‌ی کوشک‌سرای و یامچی بالاترین نرخ افت سطح ایستابی را داشته‌اند. بدین ترتیب با توجه به شکل ۶، در تحقیق حاضر هفت لایه‌ی مختلف برای بررسی تأثیر لایه‌ی افت تراز آب زیرزمینی بر آسیب‌پذیری فرورانشست بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ در نظر گرفته شد.

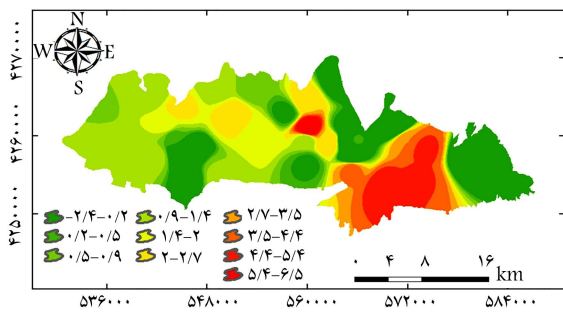
شکل ۷ نقشه‌ی آسیب‌پذیری فرورانشست دشت مرند را بر اساس راهکارهای



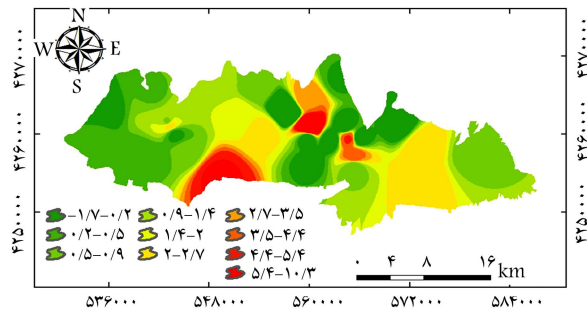
ب) اختلاف تراز در اردیبهشت ۱۳۹۱ تا فروردین ۱۳۹۲؛



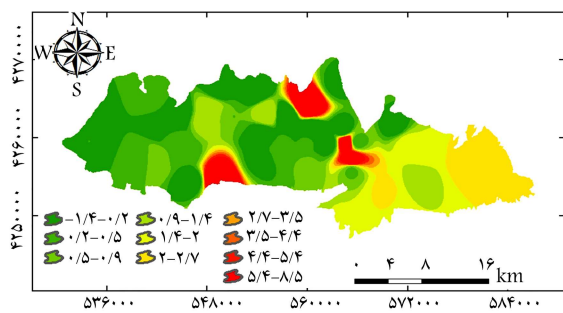
الف) اختلاف تراز در اردیبهشت ۱۳۹۰ تا فروردین ۱۳۹۱؛



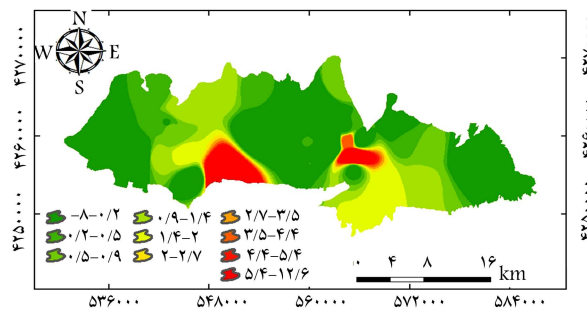
د) اختلاف تراز در اردیبهشت ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۵؛



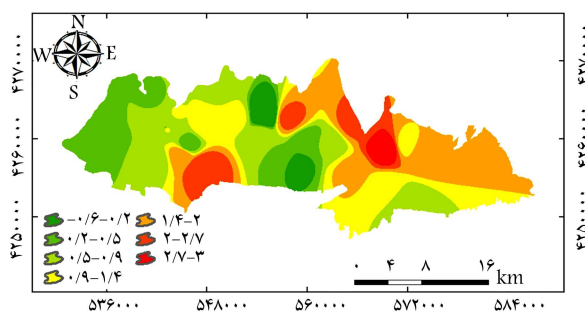
ج) اختلاف تراز در اردیبهشت ۱۳۹۲ تا فروردین ۱۳۹۳؛



و) اختلاف تراز در اردیبهشت ۱۳۹۶ تا فروردین ۱۳۹۷؛



ه) اختلاف تراز در اردیبهشت ۱۳۹۵ تا فروردین ۱۳۹۶؛



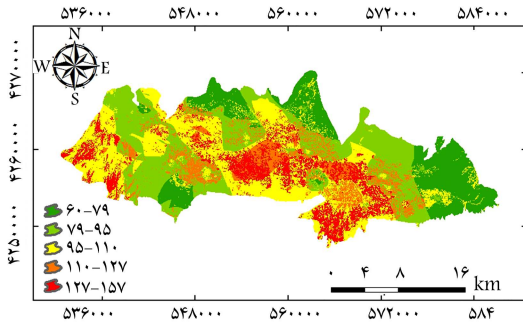
ز) شیب افت تراز ایستایی (راهکار دوم).

شکل ۶. لایه‌ی افت تراز آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه بر اساس راهکار اول و دوم.

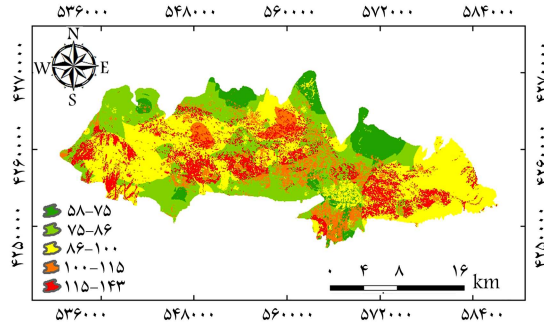
۵. نتیجه‌گیری

ازگسل (F) و افت سطح ایستایی (T) استفاده شد. با توجه به وابستگی زمانی نتایج آسیب‌پذیری فرونشست بر لایه‌ی افت سطح ایستایی، دو راهکار برای تهیه‌ی این لایه در نظر گرفته شد. در راهکار اول افت تراز ایستایی در چاه‌های مشاهداتی برای یک سال (طی سال‌های ۹۷-۹۰) و در راهکار دوم روند افت تراز ایستایی در همان دوره‌ی آماری برای تهیه‌ی لایه‌ی افت تراز ایستایی استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی توسط

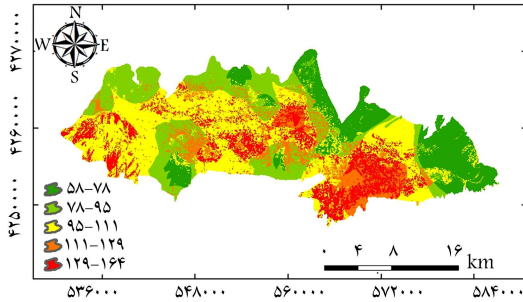
در تحقیق حاضر، برای ارزیابی آسیب‌پذیری مکانی پدیده‌ی فرونشست زمین در دشت مرند از روش ALPRIFT و هفت داده - لایه‌ی محیط آبخوان (A)، کاربری اراضی (L)، تخلیه آبخوان (P)، تغذیه‌ی خالص (R)، ضخامت آبخوان (I)، فاصله



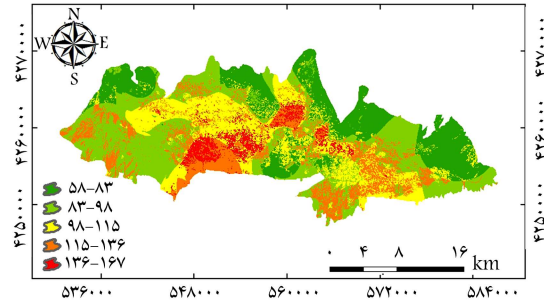
ب) آسیب پذیری در اردیبهشت ۱۳۹۱ تا فروردین ۱۳۹۲



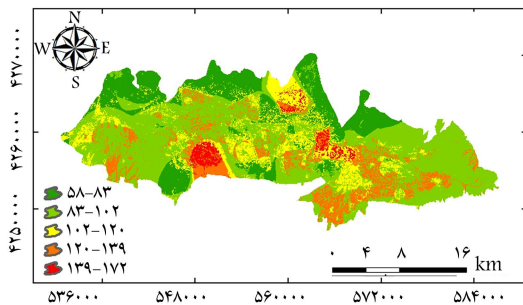
الف) آسیب پذیری در اردیبهشت ۱۳۹۰ تا فروردین ۱۳۹۱



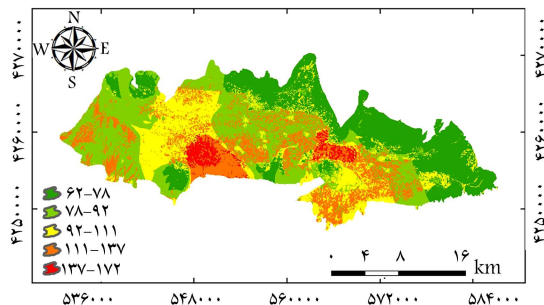
د) آسیب پذیری در اردیبهشت ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۵



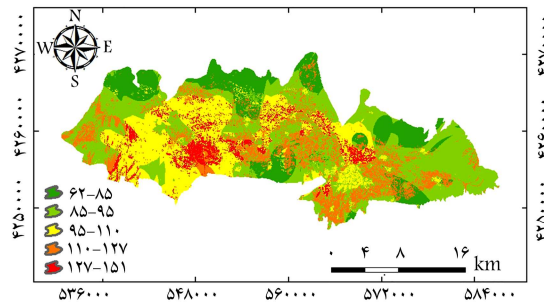
ج) آسیب پذیری در اردیبهشت ۱۳۹۲ تا فروردین ۱۳۹۳



و) آسیب پذیری در اردیبهشت ۱۳۹۶ تا فروردین ۱۳۹۷



ه) آسیب پذیری در اردیبهشت ۱۳۹۵ تا فروردین ۱۳۹۶

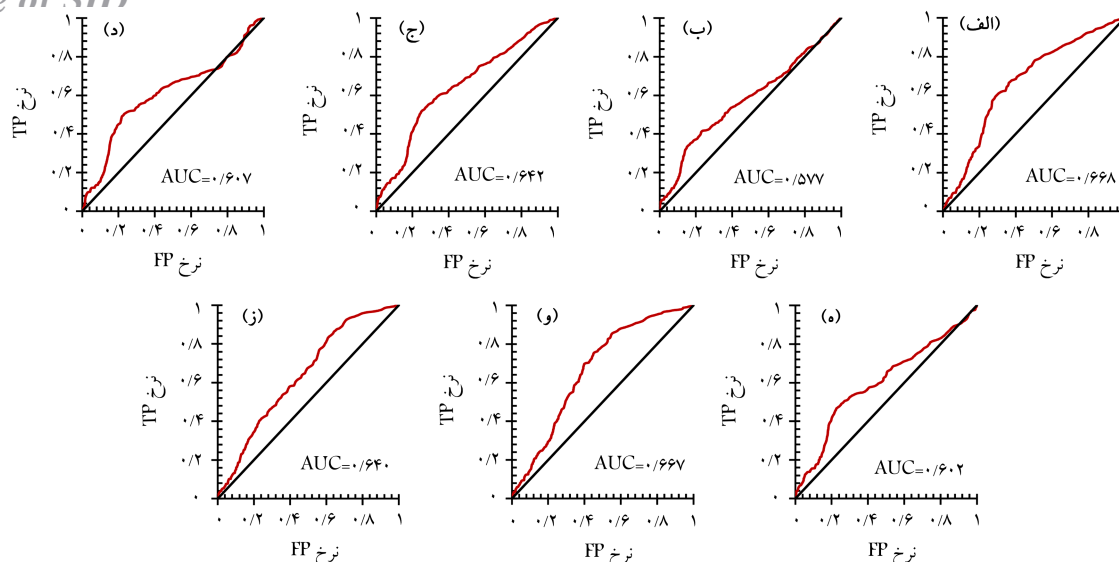


ز) آسیب پذیری براساس شیب افت تراز ایستایی - راهکار دوم.

شکل ۷. نقشه‌ی آسیب‌پذیری فرانشست زمین در دشت مرند بر اساس راهکار اول و دوم.

راهکار دوم، نتایج حاصل از این راهکار به‌عنوان آسیب‌پذیری دشت مرند معرفی شده و در سایر مطالعات نیز می‌توان پس از انجام بررسی‌های لازم، از این راهکار برای تهیه‌ی لایه‌ی افت تراز آب زیرزمینی استفاده کرد. بر اساس نتایج آسیب‌پذیری راهکار دوم مشاهده شد احتمال خطر فرانشست زمین در اراضی کشاورزی واقع در جنوب شرقی و جنوب غربی دشت بیشتر بوده و بالا رفتن بهره‌برداری از منابع آب

منحنی ROC نشان داد که آسیب‌پذیری مربوط به سال‌های ۹۰-۹۱ و ۹۶-۹۷ در راهکار اول بهترین عملکرد را ارائه کرده به طوری که مساحت زیر منحنی ROC به ترتیب برابر ۰/۶۶۸ و ۰/۶۶۷ محاسبه شد. آسیب‌پذیری راهکار دوم نیز نتایج قابل قبولی را ارائه کرده به طوری که مقدار مساحت زیر منحنی ROC برابر ۰/۶۶۴ محاسبه شد. ولی با توجه به کاهش اثر تغییرات زمانی و فصلی لایه‌ی افت تراز ایستابی در



الف) اردیبهشت ۱۳۹۰ تا فروردین ۱۳۹۱؛ ب) اردیبهشت ۱۳۹۱ تا فروردین ۱۳۹۲؛
 ج) اردیبهشت ۱۳۹۲ تا فروردین ۱۳۹۳؛ د) اردیبهشت ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۵؛
 ه) اردیبهشت ۱۳۹۵ تا فروردین ۱۳۹۶؛ و) اردیبهشت ۱۳۹۶ تا فروردین ۱۳۹۷؛
 ز) راهکار دوم (شیب تراز سطح ایستایی از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷).
 شکل ۸. منحنی ROC و مقادیر AUC بدست آمده برای راهکار اول و دوم.

ایستایی (بیشتر از ۵/۴ متر در سال) مشاهده شد. لذا با توجه به همبستگی میان عوامل مؤثر در پدیده فرونشست، می‌توان برای جلوگیری از این پدیده اقدامات لازم را در سیاست‌های بهره‌برداری لحاظ کرد و در جهت مدیریت منابع آب زیرزمینی برنامه‌ریزی اقدام کرد.

تقدیر و تشکر

نوشتار حاضر در قالب طرح تحقیقاتی به شماره ۹۷۰۰۹۳۸۳، مصوب صندوق حمایت از پژوهش‌گران و فناوران کشور انجام شده و بدین‌وسیله از حمایت‌های این سازمان تشکر و قدردانی می‌شود.

زیرزمینی میزان فرونشست مناطق مسکونی شهر مرند، یامچی و کوشک‌سرای را در معرض تهدید جدی قرار داده است. بر همین اساس، ۲۰/۸٪ از مساحت محدودی مورد مطالعه در رده آسیب‌پذیری بسیار کم، ۴۹/۷٪ آن در رده آسیب‌پذیری کم، ۱۳/۶٪ از آن در رده آسیب‌پذیری متوسط، ۱۳/۶٪ در رده آسیب‌پذیری زیاد و نهایتاً ۲/۲٪ مساحت دشت مرند در رده آسیب‌پذیری بسیار زیاد فرونشست قرار داشتند. علاوه بر این، طبقات فرونشست‌های با آسیب‌پذیری بسیار زیاد و زیاد در دشت مرند در محیط آبخون ماسه‌بی با سیلت و رس زیاد همراه با کنگومرا (۹۶/۴ درصد)، شیب‌های کم (۲-۰ درصد)، در زمین‌های دارای پوشش گیاهی (۸۷/۳ درصد)، نواحی با تخلیه‌ی آبخوان خیلی زیاد (۶۵-۴۰ سانتی‌متر در سال)، همراه با تغذیه‌ی خالص متوسط (۱۸-۱۲ سانتی‌متر در سال) و دارای بیشترین افت سطح

پانویس‌ها

- central valley hydrologic model
- Kathmandu
- Mekong
- Nobi
- grid point value of meso-scale model (GPV-MSM)
- analytic hierarchy process
- wavelet transforms
- Beijing
- sugeno fuzzy logic
- aquifer media (A)
- land use (L)
- pumping of groundwater (P)
- recharge (R)
- impacts of aquifer thickness (I)
- fault distance (F)
- decline in water table (T)
- inverse Distance Weighting (IDW)
- normalized difference vegetation index (NDVI)
- supervised classification
- maximum likelihood
- theissen
- overlay analysis
- global position system (GPS)
- single look complex
- range
- coregistering
- spectral filtering
- interferogram
- coherence

30. amplitude
31. phase
32. phase unwrapping
33. jenks natural breaks classification method
34. receiver operating characteristic (ROC)
35. area under curve (AUC)

(References) منابع

1. Taheri Tizro, A., "Groundwater", 2th End, pp. 304, Razi University Press, Kermanshah, Iran (In Persian) (2008).
2. Wang, G.Y., You, G., Shi, B. and et al. "Long-term land subsidence and strata compression in Changzhou, China", *Engineering Geology*, **104**(1-2), pp. 109-118 (2009).
3. Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E. and et al. "Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the queretaro valley, Mexico", *Engineering Geology*, **84**, pp. 143-160 (2006).
4. Liu, C.W., Lin, W.S. and Cheng, L.H. "Estimation of land subsidence caused by loss of smectite interlayer water in shallow aquifer systems", *Hydrogeology Journal*, **14**, pp. 508-525 (2006).
5. Khosroshahi, M. "The important index of desertification from water aspect", *Journal of Forest and Rangeland*, **74**, pp. 18-22 (In Persian) (2007).
6. Alkhamis, R., Kariminasab, S. and Aryana, F. "Investigating the effect of land subsidence due to groundwater discharges on well casing damage", *Journal of Water and Wastewater*, **6**, pp. 78-88 (In Persian) (2006).
7. Faunt, C.C., Sneed, M., Traum, J. and et al. "Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA", *Hydrogeology Journal*, **24**, pp. 675-684.
8. Shrestha, P.K., Shakya, N.M., Pandey, V.P. and et al. "Model-based estimation of land subsidence in Kathmandu Valley, Nepal", *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **8**, pp. 974-996 (2007).
9. Minderhoud, P.S.J., Erkens, G., Pham, V.H. and et al. "Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the mekong delta, Vietnam", *Environmental Research Letters*, **12**, pp. 064006 (2017).
10. Affi, M.E. "Assess the potential of land subsidence and its related factors (case study: saidan farouk marvdasht plain)", *Quantitative Geomorphological Research Journal*, **5**(3), pp. 121-132 (In Persian) (2017).
11. Akbari, M., Jarge, M.R. and Madani Sadat, H. "Assessment of decreasing of groundwater-table using geographic information system (GIS) (case study: mashhad plain aquifer)", *Journal of Water and Soil Conservation*, **16**(4), pp. 63-78 (In Persian) (2009).
12. Amirahmadi, A., Maali Ahari, N. and Ahmadi T. "The determination of probable subsidence areas of Ardebil plain by the use of GIS", *Journal of Geography and Planning*, **17**(46), pp. 1-23 (In Persian) (2014).
13. Naderi, K., Nadiri, A.A., Asghari Moghaddam, A. and et al. "A new approach to determine probable land subsidence areas (case study: the salmas plain aquifer)", *Iranian Journal of ECOHYDROLOGY*, **5**(1), pp. 85-97 (In Persian) (2018).
14. Shemshaki, A., Mohammadi, Y. and Bolourchi, M.j. "Investigation on confined aquifer & its role on subsidence occurrence in hashtgerd plain", *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, **20**(79), pp. 137-142 (In Persian) (2011).
15. Zheng, M., Fukuyama, K. and Sanga-Ngoie, K. "Application of InSAR and GIS techniques to ground subsidence assessment in the Nobi plain, central Japan", *Sensors*, **14**(1), pp. 492-509 (2014).
16. Dehghani, M., Rastegarfar, M., Akbar Ashrafi, R. and et al. "Interferometric SAR and geospatial techniques used for subsidence study in the Rafsanjan plain", *American Journal of Environmental Engineering*, **4**(2), pp. 32-40 (2014).
17. Ge, L., Ng, A.H.M., Li, X. and et al. "Land subsidence characteristics of bandung basin as revealed by ENVISAT ASAR and ALOS PALSAR interferometry", *Remote Sensing of Environment*, **154**, pp. 46-60 (2014).
18. Gao, M., Gong, H., Chen, B. and et al. "Regional land subsidence analysis in eastern beijing plain by InSAR time series and wavelet transforms", *Remote Sens.*, **10**(365), pp. 1-17 (2018).
19. Nadiri, A.A., Taheri, Z., Khatibi, R. and et al. "Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT", *Science of the Total Environment*, **628-629**, pp. 1043-1057 (2018).
20. Fakhri, M.S., Asghari Moghaddam, A. and Najib, M. "Application of statistical methods and saturation indices in groundwater quality assessment of the Marand plain", *Journal of Water and Soil Conservation*, **22**(6), pp. 117-133 (In Persian) (2016).
21. Fakhri, M.S., Asghari Moghaddam, A., Najib, M. and et al. "Investigation of nitrate concentrations in groundwater resources of marand plain and groundwater vulnerability assessment using AVI and GODS methods", *Journal of Environmental Studies*, **41**(1), pp. 49-66 (In Persian) (2015).
22. Piscopo, G. "Groundwater vulnerability map, explanatory notes, castlereagh catchment, NSW", Department of Land and Water Conservation, Australia (2001).
23. Moiwo, J.P. and Tao, F. "Satellite signal shows storage-unloading subsidence in North China", *Hydrol. Earth Syst. Sci*, **12**, pp. 6043-6075 (2015).
24. Pradhan, B., Abokharima, M.H., Jebur, N.M. and et al. "Land subsidence susceptibility mapping at Kinta valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS", *Natural Hazards*, **73**(2), pp. 1019-1042 (2014).