

"مقاله پژوهشی"

ارزیابی پتانسیل حساسیت اراضی نسبت به پدیده فرونشست با استفاده از روش PCSM و تئوری آنتروپی شانون (مطالعه موردی: دشت ابرکوه)

زهرا خسروانی^۱، محمد اخوان قالی‌باف^۲، مریم دهقانی^۳، ولی درهمی^۴ و مصطفی بولکا^۵

- ۱- دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، گروه احیاء و مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۲- استادیار گروه احیاء و مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، (نویسنده مسوول: makhavan@yazd.ac.ir)
۳- دانشیار بخش راه، ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۴- استاد بخش هوش مصنوعی، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۵- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اژه، از میر، ترکیه
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۱۵
صفحه: ۱۱۲ تا ۱۲۲

چکیده

هدف از این پژوهش، تهیه نقشه استعداد فرونشست دشت ابرکوه است. برای این منظور از داده‌های ۳۴ چاه پیرومتری (۱۳۹۷-۱۳۹۳) و ۷۷ لاگ حفاری استفاده شد. پنج عامل تأثیرگذار بر فرونشست شامل افت سطح آب زیرزمینی، جنس رسوبات آبخوان، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان و ضخامت لایه رس انتخاب و با استفاده از روش PCSM، هر یک از نقاط مطالعاتی رتبه‌دهی و لایه رستری آن‌ها با استفاده از میانمایی به روش کریجینگ تهیه شد. در ادامه با توجه به میزان اهمیت و تأثیر هر یک از پارامترهای مورد مطالعه در رخداد فرونشست، وزن هر یک لایه‌های مذکور با استفاده از تئوری آنتروپی شانون محاسبه شد. سپس با ضرب وزن هر یک از پارامترها در لایه‌های رستری مربوطه و تلفیق لایه‌ها با یکدیگر، نقشه پتانسیل فرونشست منطقه بدست آمد. در انتها جهت بررسی میزان دقت و صحت نقشه تولیدی، نتایج حاصل، با نقشه فرونشست مستخرج از تصاویر راداری Sentinel-1 مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نقشه پتانسیل فرونشست حاصل از روش PCSM نشان داد که مناطق شرقی، شمالی و شمال شرقی منطقه مورد مطالعه دارای بیشترین پتانسیل فرونشست است. این مناطق علاوه بر افت سطح آب زیرزمینی، دارای آبخوانی با میان لایه‌های رسی است که ضخامت قابل ملاحظه‌ای دارد. طبق نتایج تئوری آنتروپی شانون، ضخامت لایه رسی بیشترین تأثیر را در رخداد پدیده فرونشست نشان داد. تطابق نقشه پتانسیل فرونشست با نقشه مستخرج از تصاویر راداری، حکایت از دقت قابل قبول روش مورد استفاده (همبستگی ۰/۸۷) در پژوهش حاضر داشت.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، آنتروپی شانون، ابرکوه، تصاویر راداری، فرونشست

مقدمه

برهم خوردن تعادل و افزایش فشار حاصل از رسوبات بالایی شده، به طوری که تداخل رسوبات، با جورشدگی مجدد کاهش یافته و متراکم می‌شود. این تراکم به صورت فرونشست نمود پیدا خواهد کرد (۱۲).

فرونشست‌های ایجاد شده در اثر برداشت آب‌های زیرزمینی، در بسیاری از موارد غیر قابل برگشت به حالت اولیه بوده که همین امر، ضرورت شناسایی مناطق مستعد و ارزیابی پتانسیل فرونشست را در نقاط مختلف بیش از پیش یادآور می‌شود. لذا کاهش خطرات ناشی از وقوع فرونشست زمین نیازمند شناسایی مناطق مستعد، تعیین میزان اثرگذاری عوامل مختلف بر وقوع آن و برنامه‌ریزی برای کنترل و مدیریت فرونشست زمین است (۱۴).

امروزه استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی، پایش و مدل‌سازی فرونشست مورد توجه علاقمندان قرار گرفته است. با تهیه لایه‌های رستری عوامل مهم و تأثیرگذار موجود بر پدیده فرونشست و ترکیب آن‌ها، می‌توان نسبت به پیش‌بینی میزان پتانسیل رخداد فرونشست در منطقه اقدام کرد. شناسایی عوامل موثر بر پدیده فرونشست به دلیل ناشناخته بودن همه ابعاد و پیچیدگی خاص آن، به روشنی امکان‌پذیر نیست. عوامل متعددی در پدیده فرونشست دخالت دارند که نه تنها میزان تأثیر آن‌ها بر رخداد فرونشست به یک اندازه نیست، بلکه اثر آن‌ها از مکانی به مکان دیگر نیز تغییر می‌کند. بنابراین آگاهی

الگو و پراکنش نامناسب بارش و منابع آب سطحی، خصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور سبب شده است که منبع اصلی تامین نیازهای کشاورزی، شرب و صنعتی، آب‌های زیرزمینی باشد (۴). در چند دهه اخیر، برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی در دشت‌های کشور به کاهش قابل توجه سطح ایستابی منجر شده است (۸) که همواره به عنوان یکی از علل اصلی وقوع و گسترش پدیده فرونشست زمین در منابع مختلف علمی بیان شده است (۱۱). فرونشست زمین شامل پایین رفتن یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند جابجایی افقی اندکی نیز داشته باشد (۲). این واقعه، پدیده‌ای مورفولوژیک است که به سبب فراگیری فضایی و همچنین رخداد کند و بطئی آن، در عین خسارت بار بودن، وجود خارجی چندان مشخصی نداشته و به سهولت قابل شناسایی نیست (۲۰). در مقیاس جهانی، خطر فرونشست زمین بر اثر افت سطح آب در بین سال‌های ۱۹۷۰-۱۹۵۰ که هم زمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی است، به اوج خود رسید (۲۳). افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی سبب کاهش فشار هیدرودینامیکی و در نتیجه افزایش تنش موثر بر رسوبات و ایجاد نشست در زمین می‌شود. اگر جنس رسوبات، رس و سیلت باشد، به دلیل اینکه حالت الاستیسیته ندارد، پس از خروج آب، خاک آرایش جدید می‌گیرد. هنگامی که فشار هیدرولیکی آب کم می‌شود، موجب

است. مختاری و همکاران (۱۳) در بررسی پتانسیل وقوع فرونشست در حوزه آبخیز دشت تسوج با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، به این نتیجه دست یافتند که حدود یک سوم منطقه، دارای پتانسیل وضعیت بحرانی است.

پیش‌بینی و شناسایی مناطق مستعد فرونشست و اعمال راهکارهای مدیریتی زودهنگام، نقش مهمی در کاهش خطرات و خسارات ناشی از رخداد فرونشست زمین خواهد داشت. بنابراین هدف از این پژوهش شناسایی مناطق مستعد فرونشست دشت ابرکوه است تا با استفاده از مدیریت و کنترل به موقع عوامل موثر بر آن، خسارات ناشی از آن به حداقل ممکن برسد.

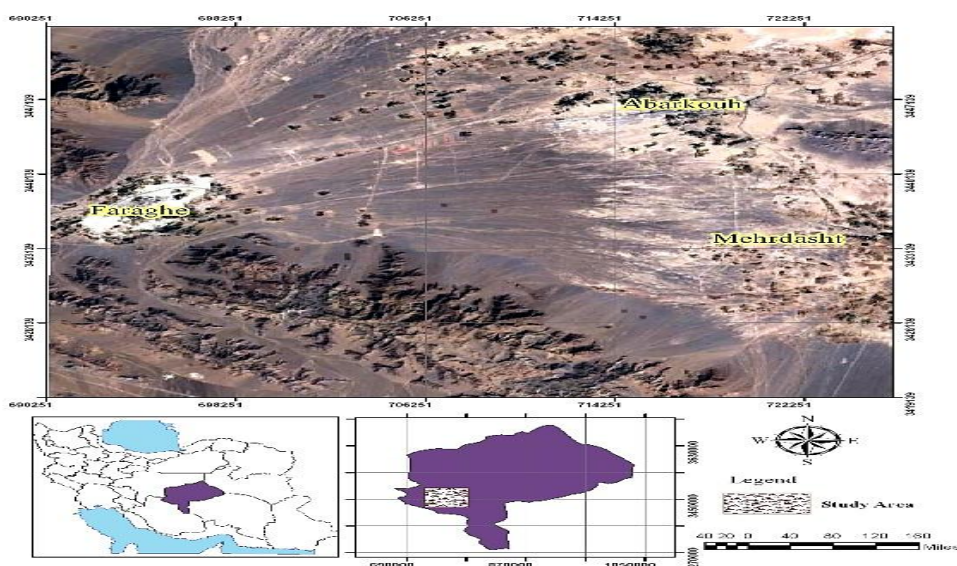
مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با وسعت حدود ۱۳۹۰ کیلومتر مربع در موقعیت جغرافیایی ۶۹۰۴۴۴ تا ۷۲۸۰۳۹ متر طول شرقی و ۳۴۱۸۱۲۱ تا ۳۴۵۵۰۱۸ متر عرض شمالی قرار دارد. این منطقه که بخشی از حوزه آبخیز ابرکوه - سیرجان است شامل تیپ‌های اراضی مخروط افکنه و دشت‌سرهای لخت است که از غرب، جنوب و جنوب غربی به ارتفاعات و از شرق به پلایای ابرکوه منتهی شده است. اراضی کم ارتفاع را رسوبات آبرفتی جوان کواترنر مانند رسوبات کنگلومرای تحکیم نیافته، پهنه‌های رسی، شنی و نمکی پوشانده است. ارتفاعات مشتمل بر تشکیلات آهکی و دولومیتی با رگه‌های کلسیتی است (شکل ۱). بر اساس اطلاعات پردازش شده در ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی سازمان هواشناسی کشور، متوسط دمای ماهانه و متوسط بارندگی سالانه منطقه مورد مطالعه در دشت و ارتفاعات به ترتیب ۱۷/۳ و ۱۵/۷ درجه سانتیگراد و ۸۵/۸ و ۱۷۲/۵ میلی‌متر است. با توجه به وضعیت دمایی و بارش موجود، می‌توان اقلیم منطقه را با توجه به طبقه بندی دومارتن، خشک دانست.

از نسبت تأثیر و وزن هر یک از پارامترهای موثر بر پدیده فرونشست، تا حدود زیادی می‌تواند در افزایش دقت و کارایی پایش و پیش‌بینی فرونشست موثر باشد. امروزه با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و روش‌های بهینه‌یابی، تا حدود زیادی به این مهم دست یافته‌اند.

پیشینه وقوع سوانح طبیعی و بررسی آن به قدمت تاریخ بشر است. در این زمینه پژوهش‌هایی در مناطق مختلف دنیا انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره خواهد شد:

زو و همکاران (۲۵) در پیش‌بینی فرونشست دشت سگا در ژاپن با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی، از لایه‌های مرتبط با چرخه هیدرولوژی استفاده کردند. نتایج نشان داد که تهیه نقشه فرونشست زمین با فرض سناریوهای مختلف پمپاژ آب، اطلاعات مهمی را برای تصمیم‌گیری در زمینه کاهش فرونشست زمین فراهم می‌کند. زنگ و همکاران (۲۴) با استفاده از مکانیزم بهبود یافته خاکستری - مارکوف، مدلی را برای پیش‌بینی فرونشست زمین ارائه دادند. مقایسه نتایج این روش با نتایج تکنیک INSAR، صحت روش مذکور را تأیید کرد. این روش می‌تواند برای پیش‌بینی کوتاه مدت مورد استفاده قرار گیرد. فام و همکاران (۱۶) به منظور احداث خطوط متمرکز انتقال شهری در هانوی ویتنام، در گام نخست به پیش‌بینی فرونشست زمین پرداختند. برای این کار از ترکیب ویژگی‌های ژئوتکنیک خاک زیرسطحی و داده‌های پایش آب زیرزمینی استفاده کردند. نتایج بیانگر آن بود که مقدار فرونشست در خطوط ساخت و ساز انتقال شهری، خصوصاً مناطقی که شامل لایه رس تراکم‌پذیر است، محتمل بوده و باید برنامه‌ریزی‌های لازم صورت پذیرد. عرب عامری و همکاران (۳) برای پیش‌بینی فرونشست زمین در دشت سمنان از یک رویکرد جدید محاسباتی هوش مصنوعی استفاده کردند. نتایج نشان داد بیشترین خطر فرونشست در اراضی کشاورزی که دارای افت شدید آب هستند، اتفاق افتاده



شکل ۱- محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Figure 1. Geographical Location of the Study Area

روش کار

در این پژوهش از روش Point Count System (PCSModel) (۱۵،۱۸) برای ارزیابی پتانسیل فرونشست در دشت ابرکوه استفاده شد. برای این منظور با توجه به منابع علمی موجود، پنج عامل شامل افت سطح آب زیرزمینی، جنس رسوبات آبخوان، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان و ضخامت لایه رس به عنوان عوامل موثر در پدیده فرونشست انتخاب شد. با توجه به اینکه هر کدام از این عوامل دارای دامنه تغییراتی هستند و این تغییرات، تأثیر متفاوتی بر میزان فرونشست دارد، لذا هر عامل به بازه‌هایی تقسیم‌بندی شد که به هر بازه بر اساس میزان اثر آن در وقوع فرونشست، رتبه‌ای از ۱ تا ۱۰ تعلق گرفت (جدول ۱). رتبه ۱ به معنای کم‌اثرترین و رتبه ۱۰ موثرترین بازه در وقوع فرونشست است (۱۴). در هر یک از پارامترهای موثر در فرونشست، بعد از تخصیص رتبه متناسب با موقعیت مکانی، لایه رستری آن‌ها تهیه شد. در مجموع آماده‌سازی پنج لایه رستری در دستور کار قرار گرفت که در ادامه به اختصار شرح داده شده است:

افت سطح آب زیرزمینی: برای تهیه میزان افت سطح آب زیرزمینی، از داده‌های ۳۴ چاه پیژومتری اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای استان یزد (۱۳۹۷-۱۳۹۳) استفاده شد (شکل ۲-الف). پس از محاسبه افت سطح آب در هر یک از پیژومترها (شکل ۲-ب)، بر اساس جدول شماره ۱، نقشه

رستری نهایی میزان افت سطح آب منطقه، با استفاده از روش کریجینگ کلاسه‌بندی شد. (شکل ۳-الف).

محیط آبخوان: با استفاده از اطلاعات ۷۷ لاگ حفاری (۱۷)، جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان مشخص شد. سپس با اعمال رتبه‌دهی (جدول ۱) و محاسبه میانگین رتبه‌ها در هر لاگ، درون‌یابی با استفاده از روش کریجینگ انجام و لایه رستری محیط آبخوان تهیه شد (شکل ۳-ب).

کاربری اراضی: برای تهیه لایه کاربری اراضی از شیپ‌فایل اخذ شده از سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده گردید (شکل ۲-ج). با توجه به تأثیر کاربری‌های مختلف بر روی فرونشست و طبق جدول ۱، به هر یک از کاربری‌ها رتبه‌ای اختصاص داده شد و نقشه رستری جدید ترسیم شد (شکل ۳-ج).

ضخامت آبخوان: با استفاده از داده‌های ژئوالکترونیک موجود (۱۶)، میزان ضخامت آبرفت در مناطق مختلف محاسبه گردید (شکل ۲-د). سپس با توجه به جدول ۱، رتبه‌بندی و با استفاده از روش کریجینگ، درون‌یابی شده و نقشه رستری آن تهیه شد (شکل ۳-د).

ضخامت لایه رس: با توجه به اهمیت بالای رسوبات ریز دانه خصوصاً رس، ضخامت رسوبات رسی در هر یک از لاگ‌های حفاری محاسبه (شکل ۲-ه) و با توجه به جدول شماره ۱، رتبه‌بندی شدند. در ادامه با استفاده از میان‌یابی به روش کریجینگ، نقشه رستری آن ترسیم شد (شکل ۳-ه).

جدول ۱- رتبه‌بندی محدوده پارامترها (۱۰)

Table 1. Leveling the range of parameters (10)

ضخامت آبخوان (متر)		افت سطح آب زیرزمین (متر در سال)		ضخامت لایه رس (متر)	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۱	۰-۲۵	۱	۰-۰/۲	۱	۰-۲
۲	۲۵-۵۵	۲	۰/۲-۰/۵	۲	۲-۵
۳	۵۵-۹۰	۳	۰/۵-۰/۹	۳	۵-۹
۴	۹۰-۱۳۰	۴	۰/۹-۱/۴	۴	۹-۱۴
۵	۱۳۰-۱۷۵	۵	۱/۴-۲	۵	۱۴-۲۰
۶	۱۷۵-۲۲۵	۶	۲-۲/۷	۶	۲۰-۲۷
۷	۲۲۵-۲۸۰	۷	۲/۷-۳/۵	۷	۲۷-۳۵
۸	۲۸۰-۳۴۰	۸	۳/۵-۴/۴	۸	۳۵-۴۴
۹	۳۴۰-۴۰۵	۹	۴/۴-۵/۴	۹	۴۴-۵۴
۱۰	۴۰۵>	۱۰	۵/۴>	۱۰	۵۴>
جنس رسوبات آبخوان			کاربری اراضی		
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۸-۱۰	رس	۹-۱۰	معدنکاری، استخراج منابع و کشاورزی آبی	۸-۱۰	کشاورزی آبی
۸-۹	سیلت	۷-۹	احداث سد	۸-۹	مناطق مسکونی
۶-۸	سنگ‌های رسوبی کارستی شده	۶-۹	مناطق مسکونی	۶-۸	کشاورزی دیم
۳-۵	ماسه	۴-۸	کشاورزی دیم	۴-۸	مرتع
۲-۳	شن	۱-۲	زمین بایر	۱-۲	دریاچه
۱-۳	سنگ‌های رسوبی کارستی نشده و سنگ‌های آذرین و دگرگون	۱-۲	زمین بایر	۱-۲	کارخانجات و نیروگاه‌ها
۸-۱۰	خاک‌های دارای مواد آلی با شرایط اکسیداسیون	۱	دریاچه	۱	حمل و نقل
		۴-۸	کارخانجات و نیروگاه‌ها	۴-۸	
		۳-۸	حمل و نقل	۳-۸	

در ادامه باید نسبت مقدار شاخص مربوط به پارامتر j در نمونه i را بر اساس معادله زیر محاسبه کرد:

$$P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (۵)$$

آنتروپی اطلاعات نیز به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (۶)$$

هرچه مقدار آنتروپی کمتر باشد، تاثیر پارامتر j بیشتر خواهد بود. پس از محاسبه میزان آنتروپی، وزن آنتروپی (w_i) هر پارامتر j با استفاده از رابطه زیر بدست آمد:

$$w_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{m=1}^n (1 - e_j)} \quad (۷)$$

در ادامه از مجموع حاصلضرب وزن هر پارامتر در لایه رستری تهیه شده در مراحل قبل و تلفیق لایه‌ها، نقشه میزان استعداد فرونشست محدوده مورد مطالعه بدست آمد. سپس به منظور ارزیابی دقت نتایج حاصل، نقشه پتانسیل فرونشست منطقه، با نقشه فرونشست تولید شده از تصاویر راداری که به عنوان دقیق‌ترین روش محاسبه فرونشست شناخته شده است، مقایسه گردید.

استفاده از تصاویر راداری Sentinel-1 در تهیه نقشه فرونشست

یکی از ابزارهای توانمند جهت پایش پدیده فرونشست، روش تداخل‌سنجی راداری است. این روش با مقایسه فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه، در دو زمان مختلف اخذ شده‌اند، قادر به تعیین تغییرات سطح زمین در آن بازه زمانی می‌باشد. فاز اخذ شده از یک عارضه بر روی سطح زمین متناسب با فاصله آن تا سنجنده راداری است. بنابراین ایجاد تغییر در این فاصله بر روی فاز اندازه‌گیری شده اثر می‌گذارد. به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری، تصویری به نام اینترفروگرام (Interferogram) ساخته می‌شود. یک اینترفروگرام تصویری است که حاوی اختلاف فاز دو تصویر راداریست که با دقت نسبت به هم ثبت هندسی شده‌اند (۵).

برای اندازه‌گیری میزان فرونشست دشت ابرکوه، از ۴۶ تصویر راداری با روزه مجازی SAR، مربوط به دوره زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ استفاده شد (۹۷-۱۳۹۳). این تصاویر، مربوط به ماهواره Sentinel-1 از سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC با پلاریزاسیون VV اخذ شد. این نوع داده‌ها، داده‌های خامی هستند که تنها پردازش‌های اولیه بر روی آن‌ها انجام گرفته و به تصاویر تک منظر تبدیل شده‌اند و اطلاعات آن‌ها به هیچ عنوان مخدوش نگردیده است.

برای حذف اثر توپوگرافی از اینترفروگرام‌های پردازش شده، مدل ارتفاعی رقومی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰

محاسبه وزن‌های پارامترهای موثر بر فرونشست با استفاده از تئوری آنتروپی شانون

شانون (Shannon) مفهوم اطلاعات علمی یا آنتروپی اطلاعاتی را تحت عنوان آنتروپی شانون معرفی کرد. آنتروپی را می‌توان به عنوان معیاری از میزان آشفتگی در داخل سیستم تعریف نمود (۲۱). در واقع آنتروپی شانون مقدار عدم قطعیت داده‌های پیش‌بینی شده از یک رخداد تصادفی را بیان می‌کند. وجود اطلاعات مشخص در یک مسئله که سبب کاهش و یا از بین رفتن عدم قطعیت می‌گردد، می‌تواند به عنوان یک شاخص در آنتروپی استفاده شود (۲۱). آنتروپی شانون به صورت زیر قابل تعریف است:

تعداد n داده به صورت $x \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ با احتمال $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)$ مفروض است. میزان آنتروپی که یک مقدار واقعی غیر صفر، جمع پذیر و یک تابع پیوسته با احتمال p است به صورت زیر تعریف می‌شود (۱۸):

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 p_i \quad (۱)$$

که $H(X)$ مقدار آنتروپی و p_i میزان احتمال x_i می‌باشد. برای محاسبه وزن هر یک از پارامترهای موثر بر فرونشست، بر اساس آنتروپی شانون به ترتیب زیر عمل می‌کنیم: اگر تعداد m نمونه در دسترس باشد و تصمیم بر ارزیابی بر اساس n پارامتر باشد، بر اساس داده‌های مشاهداتی ماتریس مقادیر ویژه X به صورت زیر خواهد بود:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

در ادامه باید آماده سازی داده‌ها را به منظور کاهش تاثیر ایجاد شده توسط اختلاف واحد پارامترهای مختلف موثر بر فرونشست انجام داد. بر این اساس با استفاده از تابع زیر نرمال سازی داده‌ها انجام شد:

$$y_{ij} = \frac{(x_{ij})_{\max} - x_{ij}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (۳)$$

پس از نرمال سازی داده‌های خام، ماتریس استاندارد داده‌ها به صورت زیر خواهد بود:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

(به عنوان مرجع) مقایسه شد تا صحت روش PCSM مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج و بحث

در این پژوهش برای ارزیابی پتانسیل فرونشست دشت ابرکوه، از یک چارچوب عملی (PCSM) استفاده گردید. پس از آماده سازی و پردازش داده‌ها، کلاس‌بندی داده‌های مکانی طبق جدول شماره ۱ انجام و بر اساس روش کریجینگ، میانبایی رتبه‌ها انجام شد. این فرایند برای هر یک از ۵ عامل موثر در رخداد فرونشست تکرار و لایه‌های رستری مربوطه تهیه شد (شکل ۳).

به‌منظور تعیین وزن هر یک از عوامل موثر بر فرونشست، از روش تئوری آنتروپی شانون استفاده شد. نتایج نشان داد (جدول ۲) که بیشترین و کمترین وزن، با مقادیر ۰/۳۲۵ و ۰/۰۷۵ به ترتیب مربوط به ضخامت لایه رس و جنس رسوبات آبخوان است. البته همانطور که قبلاً ذکر شد میزان تأثیر هر یک از عوامل و شدت آن از محیطی به محیط دیگر می‌تواند متغیر باشد. برای مثال در تحقیقات مشابهی که توسط ندیری و همکاران (۱۵) و مختاری و همکاران (۱۳) انجام شد، بیشترین تأثیر را افت سطح آب زیرزمینی و کمترین تأثیر را به ترتیب ضخامت رسوبات و شاخص رطوبت توپوگرافی معرفی کردند.

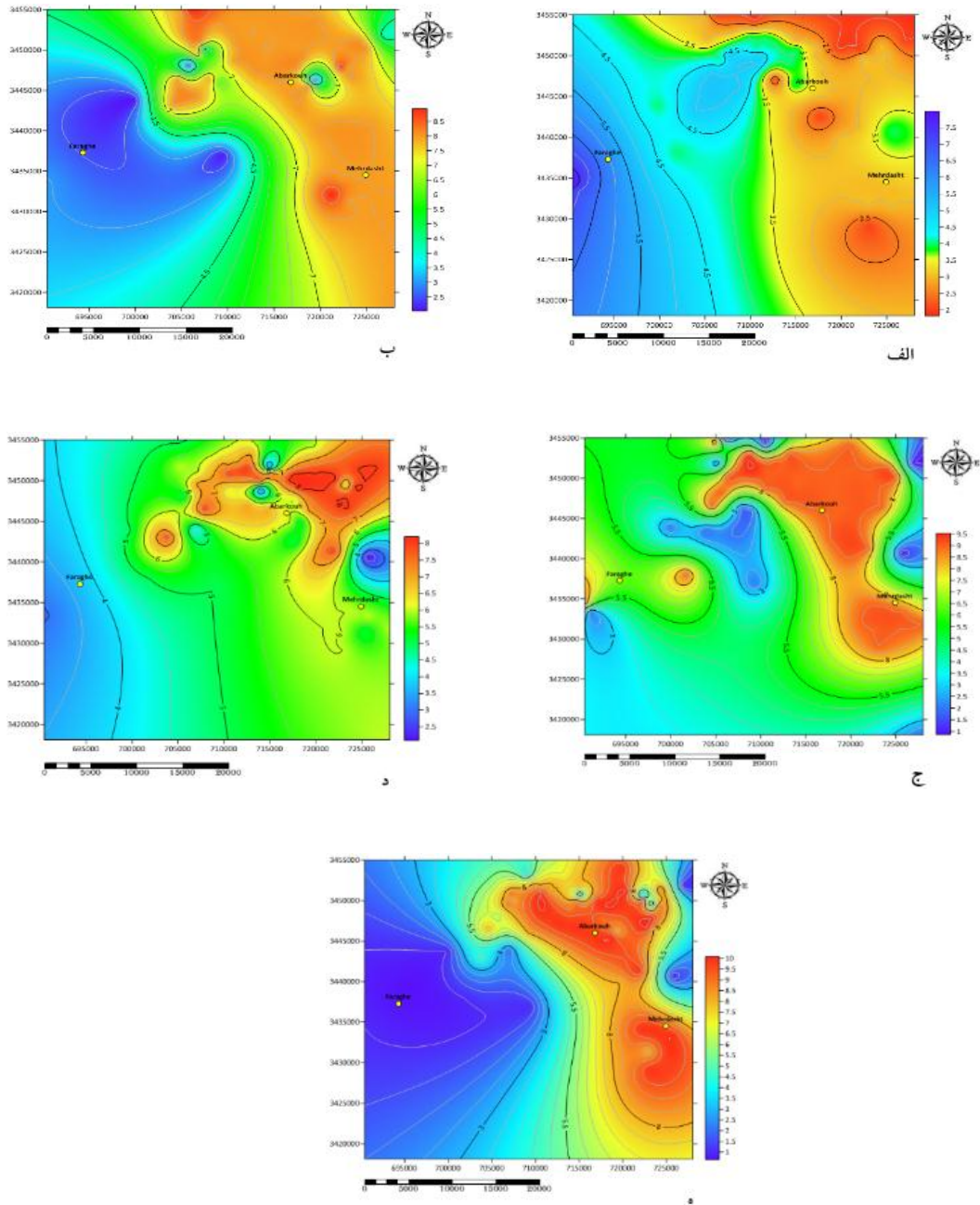
با ضرب کردن وزن لایه‌های بدست آمده از تئوری آنتروپی شانون در لایه‌های رستری ایجاد شده در مرحله قبل و جمع کردن لایه‌ها با یکدیگر، نقشه نهایی پتانسیل فرونشست دشت ابرکوه تهیه شد (شکل ۴). اعداد روی نقشه نشان دهنده مقدار پتانسیل منطقه برای فرونشست است که با افزایش اعداد، این پتانسیل هم افزایش می‌یابد.

متر مورد استفاده قرار گرفت. جهت تحلیل سری زمانی جابجایی از الگوریتم مینی بر خط مبنای کوتاه (SBAS) استفاده شد (۶). به منظور تحلیل سری زمانی، در ابتدا باید اثر خطای مداری را از اینترفروگرام‌ها حذف نماییم. بدین منظور صفحه‌ای را به کمک نقاط خارج از محدوده فرونشست و حتی الامکان دور از آن، بر روی منطقه برازش داده و آن را از اینترفروگرام‌ها کم کردیم. همچنین یک نقطه در منطقه به عنوان نقطه مرجع انتخاب شده و جابجایی‌ها نسبت به آن محاسبه شدند. در میان تصاویر، یک تاریخ به عنوان مبدأ زمانی انتخاب شد تا تغییرات تصاویر، همگی نسبت به آن مبدأ زمانی سنجیده شوند. اینترفروگرام‌ها نقش مشاهدات را دارا بوده و مجهولات، فاز مربوط به جابه‌جایی در هر اپک تصویر برداری است (۱۹). مجهولات به کمک حل کمترین مربعات با دخالت دادن شرط نرم‌کنندگی جهت کاهش نوسانات ناشی از اتمسفر، از سری زمانی برآورد شدند. پس از برآورد فاز جابجایی در هر اپک زمانی، میزان جابه‌جایی در هر اپک برای هر پیکسل اینترفروگرام‌ها، با ضرب ضریب $\lambda/4\pi$ در فاز برآورد شده به دست می‌آید. بدین صورت می‌توان سری زمانی در هر پیکسل را به ازای هر اپک تصویربرداری ترسیم نمود. حال به هر سری زمانی، خطی برازش داده می‌شود که از روی آن می‌توان سرعت متوسط جابجایی را در هر پیکسل در بازه زمانی مورد نظر به دست آورد. بدین صورت نرخ متوسط جابجایی بدست می‌آید (۱۹). تمام مراحل پردازش تداخل‌سنجی راداری در نرم‌افزار GMTSAR تحت سیستم عامل لینوکس و کلیه مراحل برنامه نویسی مربوط به تحلیل سری زمانی و برآورد سرعت متوسط جابجایی در محیط Matlab انجام شد. در ادامه نقشه فرونشست حاصل از تلفیق PCSM و تئوری آنتروپی شانون با نقشه فرونشست مستخرج از تصاویر راداری

جدول ۲- وزن هر یک از پارامترهای موثر بر فرونشست با استفاده از تئوری آنتروپی شانون

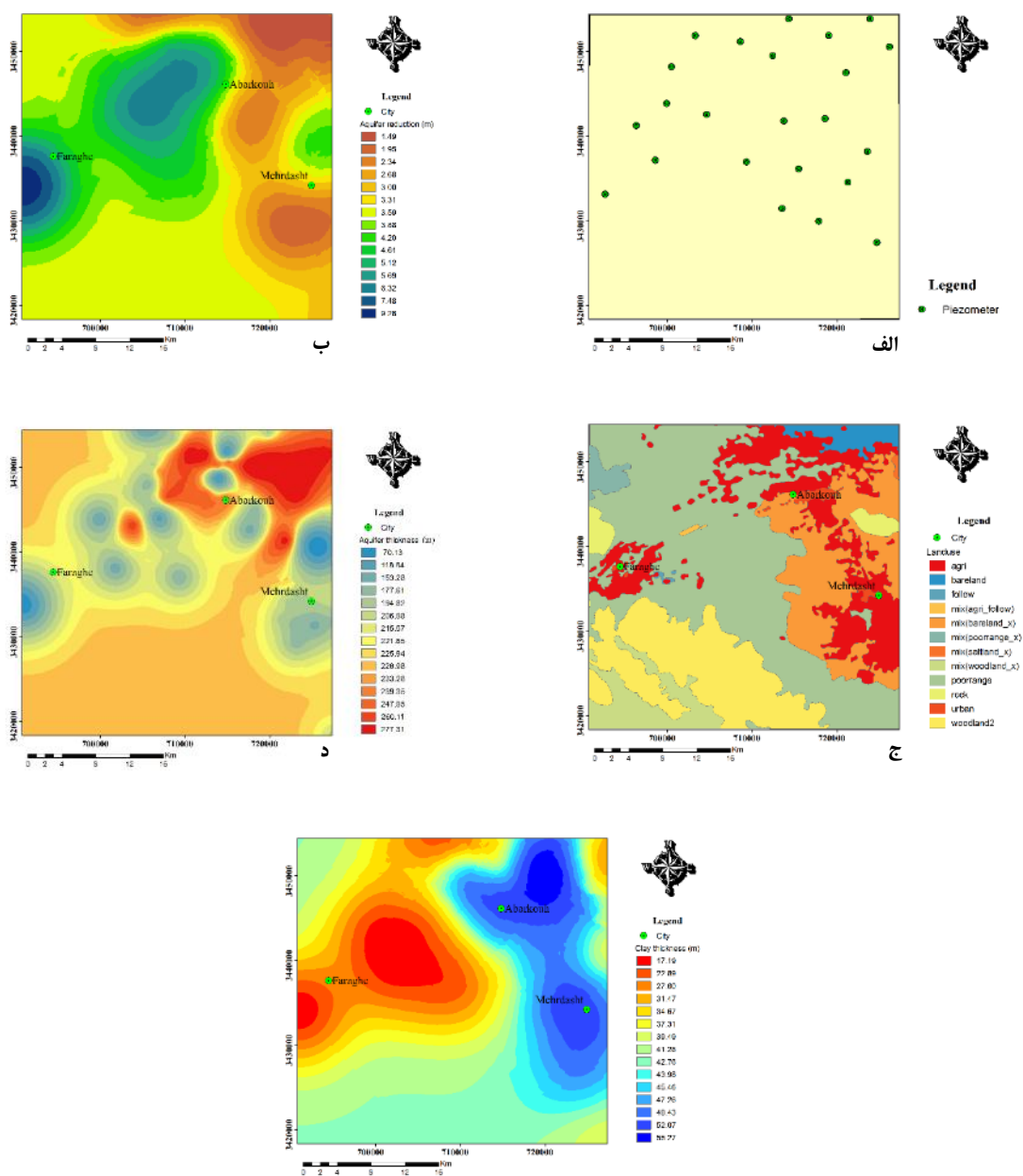
Table 2. Weight of each effective parameter on land subsidence using Shannon's entropy theory

نوع لایه	افت سطح آب زیرزمینی	جنس رسوبات آبخوان	کاربری اراضی	ضخامت آبخوان	ضخامت لایه رس
وزن عامل	۰/۱۴۹	۰/۰۷۵	۰/۲۹۸	۰/۱۵۳	۰/۳۲۵



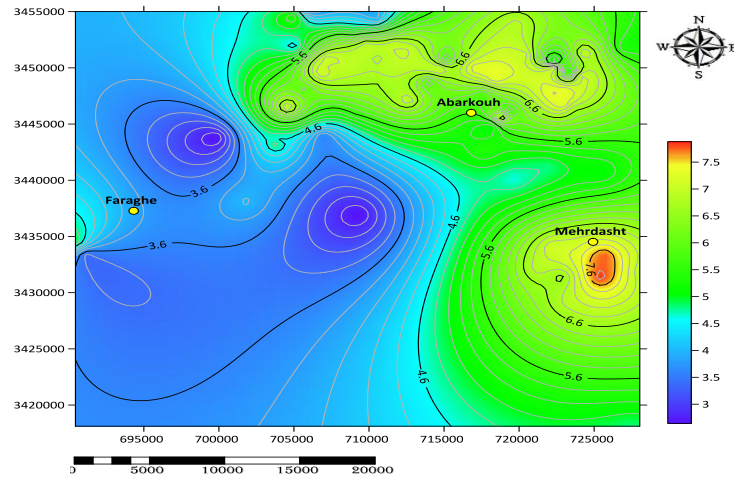
شکل ۲- نقشه پارامترهای موثر بر فرونشست (الف: پراکنش چاه‌های پیزومتری، ب: افت سطح آب زیرزمینی، ج: کاربری اراضی، د: ضخامت آبخوان، ه: ضخامت لایه رس)

Figure 2. Map of effective parameters on land subsidence (A: Distribution of piezometer wells, B: Groundwater drawdown, C: Land use, D: Aquifer thickness, E: Thickness of the clay layer)



شکل ۳- نقشه رتبه‌بندی پارامترهای موثر بر فرونشست (الف: افت سطح آب زیرزمینی، ب: جنس آبخوان، ج: کاربری اراضی، د: ضخامت آبخوان، ه: ضخامت لایه رس)

Figure 3. Classification map of effective parameters on land subsidence (A: Groundwater drawdown, B: Lithology of the aquifer, C: Land use, D: Aquifer thickness, E: Thickness of the clay layer)



شکل ۴- نقشه پتانسیل فرونشست دشت ابرکوه با استفاده از روش PCSM
Figure 4. Land Subsidence map of Abarkouh plain using PCSM

ریز دانه و از جنس رس و ترکیبات رس‌دار هستند. اما مناطق غربی که پتانسیل فرونشست کمتری دارند، بیشتر از ماسه و قلوه‌سنگ تشکیل شده‌اند. مختاری و همکاران (۱۳) پس از بررسی فرونشست دشت تسوج بیان داشت که افت سطح سفره آب زیرزمینی به همراه ریز دانه بودن رسوبات این دشت، از دلایل اصلی فرونشست این منطقه است.

مقایسه نقشه کاربری اراضی با نقشه پتانسیل فرونشست نشان از هم‌پوشانی بالای اراضی کشاورزی و مسکونی با مناطق با پتانسیل بالای فرونشست دارد. مناطق با کاربری مرتع و اراضی بایر، از پتانسیل کمتری برای رخداد فرونشست برخوردار است. خلیفی و همکاران (۱۰) در تحقیقی مشابه به این موضوع اشاره کرده‌اند.

ضخامت آبخوان از دیگر عواملی است که مورد بررسی قرار گرفت. در حالت کلی مشاهده می‌شود که فرونشست، بیشتر در مکان‌هایی اتفاق می‌افتد که ضخامت آبخوان بیشتر باشد. زیرا احتمال برداشت آب در آبخوان‌های ضخیم بیشتر بوده و این امر، زمینه برای رخداد پدیده فرونشست را مساعد می‌کند. از طرف دیگر ضخامت بیشتر، دارای وزن بیشتری بوده و به سبب افزایش فشار بر لایه‌های پایین‌تر، پدیده تحکیم و فرونشست را افزایش می‌دهد. نقشه ضخامت آبرفت منطقه نیز نشان می‌دهد که بیشترین ضخامت آبرفت در شمال و شمال شرق منطقه قرار دارد و گستره‌ای از آن تا نواحی شرقی ادامه دارد که انطباق خوبی با مناطق با پتانسیل بالا در نقشه فرونشست دارد.

سفره آب زیرزمینی معمولاً از میان‌لایه‌های ریزدانه که قابلیت تراکم بالایی دارند تشکیل شده است. پایه نظری تراکم میان‌لایه‌ها بر اساس اصل ترزاقی (Terzaghi) در مورد فشار موثر می‌باشد. این اصل بیان می‌دارد هنگامی که آب از سفره خارج شود، این میان‌لایه‌ها که اغلب از رس و سیلت تشکیل شده‌اند، متراکم می‌گردند. بنابراین سفره به دلیل تغییر در میزان فشار، دچار تغییر شکل یا جابجایی می‌شود. هر چقدر

با توجه به شکل، بیشترین پتانسیل فرونشست در شرق منطقه و بعد از آن در نواحی شمالی و شمال شرقی مشاهده می‌شود. به طور کلی نیمه شرقی منطقه نسبت به نیمه غربی آن از پتانسیل بیشتری برای فرونشست برخوردار است.

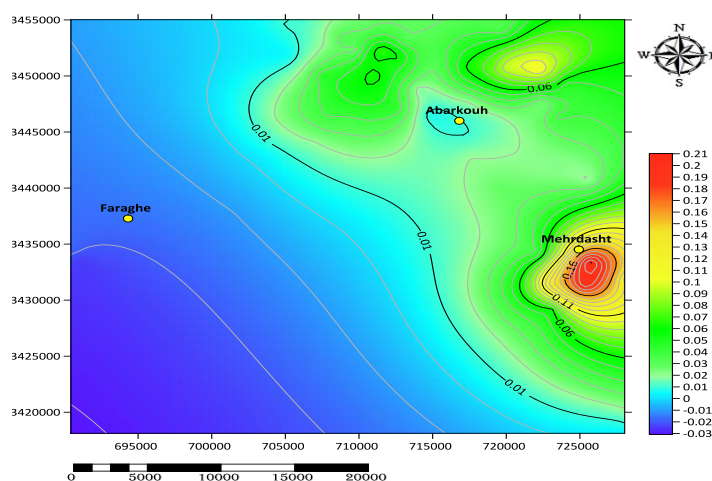
بررسی نقشه‌های عوامل موثر بر پتانسیل فرونشست (شکل ۳) نشان می‌دهد که در غالب نقشه‌ها، عواملی که در ظهور پدیده فرونشست نقش دارند، بیشتر در مناطق شرقی، شمالی و شمال شرقی پراکنش دارند. نقشه افت سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه میزان افت سطح آب در نواحی غربی بیشتر است، اما پتانسیل فرونشست در نیمه شرقی به صورت مشهودی نمود پیدا کرده است. معمولاً کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش موثر، زمان‌بر است. بنابراین به دنبال کاهش سطح پی‌زومتری، فرونشست با تأخیر زمانی رخ خواهد داد. لذا این احتمال وجود دارد که فرونشست حاضر، مربوط به تأثیر افت آب در گذشته باشد که طبق بررسی‌های انجام شده، نقشه پتانسیل فرونشست با الگوی تغییرات سطح آب در سال‌های قبل هم‌خوانی دارد. از طرف دیگر می‌توان این‌گونه استنباط کرد که در فرونشست‌های با منشاء افت سطح آب زیرزمین، اگرچه افت سطح آب ضروری است، اما کافی نبوده و عوامل موثر دیگری مانند ضخامت لایه‌های ریزدانه این پدیده را کنترل می‌کنند. نتایج مطالعات حقیقت مهر و همکاران (۹) در بررسی فرونشست هشترگرد نیز حاکی از آن بود که در برخی مناطق به علت ضخامت رسوبات ریزدانه و قابلیت هدایت هیدرولیکی اندک این رسوبات، گاه ممکن است تأخیر زمانی بین کاهش سطح آب زیرزمینی و رخداد فرونشست وجود داشته باشد. بنابراین همواره نمی‌توان رابطه خطی‌ای بین کاهش سطح آب زیرزمینی و رخداد فرونشست سطح زمین متصور شد.

تطابق نقشه فرونشست با نقشه جنس رسوبات آبخوان نشان می‌دهد که مناطقی که از پتانسیل بیشتر فرونشست برخوردار هستند، در مکان‌هایی قرار دارند که بیشتر رسوبات،

است. منطقه دوم با بیشینه فرونشست ۱۰ سانتی‌متر در شمال شرق منطقه قرار دارد. منطقه سوم نیز در شمال منطقه مورد مطالعه قرار داشته و بیشترین مقدار فرونشست آن ۶ سانتی‌متر است. مناطق شمال شرق و شمالی، در واقع اراضی کشاورزی پیرامون شهر ابرکوه هستند. مقدار فرونشست در دیگر قسمت‌ها کمتر بوده و میزان آن در برخی مناطق بسیار ناچیز و حتی نزدیک به صفر است. مقایسه دو تصویر و همچنین همبستگی خوب بین نقاط مشترک دو تصویر (۰/۸۷) صحت روش مذکور را تایید می‌کند.

خلیفی و همکاران (۱۰) و طاهری زنگی و واعظی هیر (۲۲) برای بررسی صحت نقشه فرونشست مستخرج از مدل‌های پیشنهادی خود، نقشه‌های مذکور را با نقشه فرونشست تهیه شده از تصاویر راداری مقایسه کردند. مقدار همبستگی در این مطالعات به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۷۷ بدست آمد.

که ضخامت این رسوبات بیشتر باشد، احتمال فشردگی و فرونشست آبخوان نیز بیشتر خواهد شد. به عبارت دیگر مقدار فرونشست به ضخامت و تراکم‌پذیری لایه‌ها بستگی دارد. حضور رسوبات رسی ضخیم در مناطق با پتانسیل بالای فرونشست، صحت این مطالب را تایید می‌کند. عقیفی (۱) در تحقیق خود به نقش تراکم و فشردگی میان لایه‌های رسی بر اثر برداشت بی‌رویه آب در پدیده فرونشست اشاره کرده است. پس از تهیه نقشه پتانسیل فرونشست دشت ابرکوه، به منظور صحت‌سنجی روش مورد استفاده، از تصاویر راداری Sentinel-1 استفاده گردید و نقشه فرونشست منطقه در بازه زمانی مشابه (۹۷-۱۳۹۳) تهیه شد (شکل ۵). این نقشه نشان می‌دهد که پدیده فرونشست در ۳ ناحیه به صورت فعال‌تر حادث شده است. بیشترین مقدار فرونشست در طول دوره بررسی (۴ سال)، در شرق منطقه و به مقدار ۲۲ سانتی‌متر رخ داده است. این منطقه جزء اراضی کشاورزی منطقه مهردشت



شکل ۵- نقشه پتانسیل فرونشست دشت ابرکوه با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (متر)
Figure 5. Land Subsidence map of Abarkouh plain using interferogram (m)

برای مدیران و برنامه‌ریزان برای انجام عملیات پیشگیری از وقوع فرونشست یا کاهش خطرات ناشی از آن مورد استفاده قرار گیرد.

استفاده از روش پژوهش حاضر با توجه به نتایج خوب آن در بررسی پتانسیل فرونشست مناطق، توصیه می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به عنوان یک راهنمای مناسب

منابع

1. Afifi, M.A. 2017. Assess the potential of land subsidence and its related factors (Case study: Plain Saidan Farouk Marvdasht). *Quantitative Geomorphological Research*, 5(3): 121-132.
2. Amighpey, M., Z. Mousavi, H. Nankali, S. Arabi, M. Sedighi and S. Hosseini. 2008. Studying subsidence in Iran with leveling and permanent GPS observations. *Geophysical Research Abstracts*, 10.
3. Arabameri, A., S. Saha, J.P. Tiefenbacher, A. Cerda, T. Biggs, B. Pradhan, P.T. Ngo and A.L. Collins. 2020. A novel ensemble computational intelligence approach for the spatial prediction of land subsidence susceptibility. *Science of the Total Environment*, 726: 85-95.
4. Asadzadeh, F., M. Kaki, S. Shakira and B. Raei. 2016. Impact of drought on groundwater quality and groundwater level in Qorveh-Chardoli Plain. *Water Resources Research*, 12(3): 153-165 (In Persian).
5. Daniel, R., C. Maisons, S. Carnec, C. Le Mouelic, C. King and S. Hosford. 2003. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement. *Remote Sensing of Environment*, 88(4): 468-478.

6. Dehghani, M., M.J. ValadanZoej, I. Entezam, S. Saatchi and A. Shemshaki. 2011. Interferometric measurements of ground surface subsidence induced by overexploitation of groundwater. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4(1): 56-73.
7. Gao, Y., E. Alexander and R.J. Barnes. 2005. Karst database implementation in Minnesota: analysis of sinkhole distribution. *Environmental Geology*, 47(8): 1083-1098.
8. Garechae, H.R., A.A. Nazari Samani, Sh. Khalighi Sigarugi, A. Fathabadi and Kh. Ahmad Alee. 2020. Assessing the Factors Affecting the Salinity Risk of Groundwater using Data Mining and Statistical Methods in arid and Semi-Arid Regions. *Degradation and Rehabilitation of Natural Land*, 1(1): 45-60.
9. Haghghatmehr, P., M.J. Valadanzouj, R. Tajik, S. Jabari, M.R. Sahebi, R. Eslami, M. Ganjiyan and M. Dehghani. 2012. Time Series Analysis of Hashtgerd Subsidence Using Radar Interferometry and Global Positioning System. *Geosciences*, 22: 105-114.
10. Khalifi, P., A.A. Nadiri, E. Abbas Novinpour and M. Gharekhani. 2019. Estimation of subsidence potential index using the PCSM Method and fuzzy model in Ardabil plain aquifer. *Iran-Watershed Management Science and Engineering*, 13(45): 44-54 (In Persian).
11. Maghsoudi, Y., R. Amani and H. Ahmadi. 2019. A study on land subsidence in west of Tehran using sentinel-1 images and persistent scatters interferometry. *Iran-Water Resources*, 15(1): 299-313 (In Persian).
12. Maleki, A. and P. Rezaee. 2016. Forecast locations at risk of subsidence plain Kermanshah. *The Journal of Spatial Planning*, 20(1): 235-251 (In Persian).
13. Mokhtari, D., H. Ebrahimi and S. Salmani. 2019. Land subsidence susceptibility modeling using random forest approach (Case study: Tasuj plane catchment). *RS and GIS for Natural Resources*, 10(3): 93-105 (In Persian).
14. Nadiri, A.A., T. Taheri, G.H. Bazegari and K.H. Didehban. 2018. A framework to estimation of aquifer subsidence potential using genetic algorithm. *Water Resources Research*, 14(2): 174-185 (In Persian).
15. Nadiri, A.A., M. Gharekhani, R. Khatibi and A. Asghari Moghaddam. 2017. Assessment of groundwater vulnerability using supervised committee to combine fuzzy logic models. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(9): 8562-8577.
16. Pham, H.G., T.H. Vu, D.H. Nguyen, T.H.A. Nguyen and N.M. Nguyen. 2020. Land subsidence prediction for a new urban mass rapid transit line in Hanoi. *Underground Space*, 5(2): 93-104.
17. Pourab, Consulting Engineers, 2012. *Geology and Hydrogeology Reports*. (Abarkouh). 173 pp.
18. Sadeghfam, S., Y. Hassanzadeh, A.A. Nadiri and R. Khatibi. 2016. Mapping groundwater potential field using catastrophe fuzzy membership functions and Jenks optimization method: a case study of Maragheh-Bonab plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(7): 545.
19. Saffari, A., F. Jafari and S.M. Tavakoli Sabour. 2016. Monitoring its land subsidence and its relation to groundwater harvesting case study: Karaj Plain-Shahriar. *Quantitative Geomorphological Research*, 5(2): 82-93.
20. Sharifikia, M. 2010. Evaluation of land subsidence related disasters in plains and residential areas of Iran. *Iranian Association of Engineering Geology*, 3(3): 43-58 (In Persian)
21. Shyu, G.S., B.Y. Cheng, C.T. Chiang, P.H. Yao and T.K. 2011. Applying factor analysis combined with kriging and information entropy theory for mapping and evaluating the stability of groundwater quality variation in taiwan. *International Journal of Environment Research and Public Health*, 8(4): 1084-1109.
22. Taheri Zangi, S. and A. Vaezihir. 2020. Vulnerability of Shazand Plain Subsidence Caused by Groundwater Level Reduction Using Weighting Model and Its Validation Analysis Using Radar Interferometry. *Echohydrology*, 7(1): 183-194.
23. Waltham, A.C. 1989. *Ground subsidence*. 1st Edition Blackie and Son Ltd. New York, USA, 49-97.
24. Zeng, D., K. Yinghai, G. Huili, L. Xiaojuan and L. Zhenhong. 2017. Land subsidence prediction in Beijing based on PS-InSAR technique and improved Grey-Markov model. *GIS Science and Remote Sensing*, 54(6): 797-818.
25. Zhou, G., T. Esaki and J. Mori. 2003. GIS-based spatial and temporal prediction system development for regional land subsidence hazard mitigation. *Environmental Geology*, 44(6): 665-678.

Evaluation of Land Sensitivity Potential to Subsidence Phenomenon using PCSM Method and Shannon's Entropy Theory (Case Study: Abarkouh Plain)

Zahra Khosravani¹, Mohammad Akhavan Ghalibaf², Maryam Dehghani³,
Vali Derhami⁴ and Mustafa Bolca⁵

1- Ph.D. Student of Combat Desertification, Department of Arid Land and Desert Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Iran

2- Assistant Professor of Arid Land and Desert Management Department, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Iran (Corresponding author: makhavan@yazd.ac.ir)

3- Associated Professor of Civil and Environmental Engineering Department, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz

4- Professor of Computer Engineering Department, Faculty of Engineering, Yazd University, Iran.

5- Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Ege University, Izmir, Turkey

Received: June 12, 2021

Accepted: September 6, 2021

Abstract

The goal of this study is to prepare the potential map of subsidence in Abarkouh plain. For this purpose, data of 34 piezometer wells and 77 logs were used. Five factors affecting the subsidence include groundwater level, lithology of the aquifer, land use, aquifer thickness, and the thickness of the clay layer were selected and with Point Count System Model (PCSM) using, each study points leveled and their raster layers prepared with using Kriging interpolation. According to the importance and effect of each studied parameters in the occurrence of the subsidence, the weight of each layer was calculated using the Shannon's entropy theory. Then, the raster layers multiplied by weight of each parameter and combined together, and the potential map of the land subsidence was obtained. Finally, in order to investigate the accuracy and validation of the produced map, the results compared with the land subsidence map that obtained from Sentinel -1 radar image. The results of the land subsidence potential map (PCSM method) showed that the eastern, northern and northeastern regions of the study area had the highest potential of subsidence. Besides the groundwater table drawdown, these areas contain clay with considerable thickness. According to the Shannon entropy theory, the thickness of the clay layer had a maximum effect on the subsidence occurrence. The comparison of subsidence potential map with the subsidence map that extracted from radar images showed the high efficiency ($R=0.87$) of the method that used in the present study.

Keyword: Abarkouh, Aquifer, Radar image, Shannon Theory, Subsidence