

برآورد فرونشست دشت قروه با استفاده از روش GARDLIF-SD و تداخل‌سنجی راداری

مینا رحیمی^۱، مهری کاکلی^۲، فرخ اسدزاده^۳، وحید رضوردی نژاد^{۴*}

- ۱- دکتری علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
 - ۲- کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
 - ۳- استاد گروه مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
 - ۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
- * نویسنده مسئول: v.verdinejad@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱۲

چکیده

دشت قروه در منطقه خشک و نیمه‌خشک کشور واقع شده است و به دلیل کمبود منابع آب سطحی، وابستگی زیادی به منابع آب زیرزمینی دارد. استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، وقوع پدیده فرونشست را به دنبال دارد. در این مطالعه، به ارزیابی آسیب‌پذیری دشت قروه نسبت به فرونشست با استفاده از روش GARDLIF-SD پرداخته شده است. برای این منظور از نه پارامتر موثر شامل افت سطح آب زیرزمینی (G)، محیط آبخوان (A)، تغذیه خالص (R)، مقدار پمپاژ (D)، کاربری اراضی (L)، ضخامت آبخوان (I)، فاصله از گسل (F)، شیب (S) و فاصله از رودخانه (D) استفاده و نقشه فرونشست در محیط ArcGIS 10.8 تهیه و در سه کلاس متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که ۶۱/۵۸ درصد از مساحت دشت قروه در معرض آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد نسبت به فرونشست قرار دارد. بررسی داده‌های راداری ماهواره سنتینل-۱ در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳، فرونشست‌هایی در بازه ۲۰۰ تا ۱۰۴۳ میلی‌متر را آشکار کرد. بازدیدهای میدانی نیز وقوع پدیده فرونشست در اطراف پیژومترهای قروه، سریش‌آباد و آب‌بند ویهج را تأیید کرد. بررسی‌ها نشان داد که علت اصلی وقوع پدیده فرونشست در دشت قروه، برداشت بی‌رویه آب از منابع زیرزمینی برای مصارف کشاورزی است. لذا، مدیریت بهینه و توجه به نحوه مصرف آب از این منابع ارزشمند امری ضروری است.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آسیب‌پذیری، تداخل‌سنجی راداری، سنتینل-۱، فرونشست.

مقدمه

کشاورزی، شرب و صنعت استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران، برداشت آب از منابع زیرزمینی از میزان تغذیه سالیانه آن‌ها بیشتر بوده است. این امر به معنای استخراج و استفاده از آبی است که در طول هزاران سال در لایه‌های آبدار زمین ذخیره شده است. از فرونشست به‌عنوان زلزله خاموش که یک خطر زمین‌شناسی است یاد می‌شود که تحت تأثیر عوامل مختلف ایجاد می‌شود (Park et al., 2014). با افت تراز آب زیرزمینی و متراکم شدن لایه‌های زمین، نفوذپذیری و ضریب ذخیره آبخوان کاهش می‌یابد. بنابراین مهم‌ترین دلیل ایجاد فرونشست در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تراکم سفره‌های آب زیرزمینی در اثر استخراج بی‌رویه آب از این منابع است. خطر فرونشست زمین

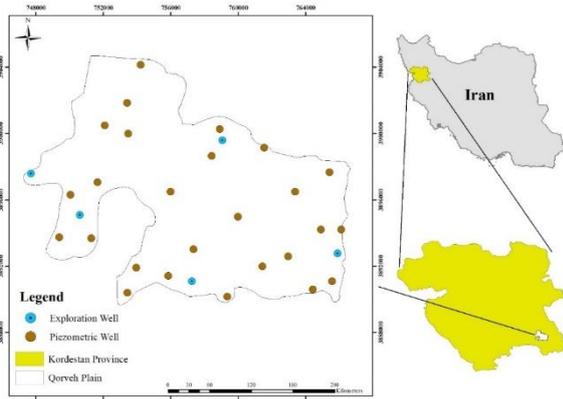
امروزه آب به‌عنوان یک منبع حیات‌بخش، بیش از هر زمان دیگری مورد توجه است و حفظ و صیانت از این منابع، بهره‌برداری بهینه، اقتصادی و عادلانه از آن چالشی فراگیر است (شایان و همکاران، ۱۳۹۵). محدودیت در منابع آب، افزایش جمعیت، کاهش بارندگی، افزایش مصرف آب، افزایش خشکسالی و کاهش کیفیت منابع آب از جمله چالش‌های موجود در رابطه با آب است و توجه به منابع آب در کشورهایی مانند ایران که در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع شده‌اند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (اکبری اریمی و همکاران، ۱۳۹۸). به دلیل عدم دسترسی به آب‌های سطحی در بیشتر مناطق جهان، از منابع آب زیرزمینی برای مصارف مختلف نظیر

آب زیرزمینی را برآورد نمودند. در این مطالعه، نرخ فرونشست برآورد شده با میزان فرونشست به دست آمده از تصاویر راداری (DInSAR) از ماهواره سنتیل-۱ ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که میزان فرونشست با کاهش سطح آب زیرزمینی همبستگی معنی داری نداشته است و الزاماً بیشترین میزان فرونشست در مناطقی که بیشترین کاهش سطح آب زیرزمینی رخ داده، همراه نبوده است. عمادالدین و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری به بررسی فرونشست دشت فسا طی دوره آماری ۲۰۱۶-۲۰۲۰ پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد در مناطقی که افت سطح آب زیرزمینی در بیشترین میزان قرار دارد، خطر فرونشست نیز بیشتر می باشد. (Ghasemi et al. (2023 نقشه پتانسیل فرونشست زمین در آبخوان استان همدان را با استفاده از روش های یادگیری ماشین و استفاده از دو مدل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان تهیه نمودند. لایه های ورودی در این مطالعه شامل مدل رقومی ارتفاعی، شیب، جهت شیب، پلان و انحنای پروفیل، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی، بافت خاک، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، سازندهای زمین شناسی، کاربری اراضی و افت سطح آب زیرزمینی می باشند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد دقت مدل SVM و RF به ترتیب ۸۹ درصد و ۹۶ درصد بوده و کارایی مدل RF در تعیین پتانسیل فرونشست بیشتر است. داداشی و همکاران (۱۳۹۹) آسیب پذیری فرونشست آبخوان دشت مرند طی سال های ۱۳۹۷-۱۳۹۶ را با استفاده از ALPRIFT بررسی نمودند. لایه های ورودی در این مطالعه شامل محیط آبخوان، کاربری اراضی، پمپاژ، تغذیه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل و افت تراز آب زیرزمینی می باشند. مطابق نتایج حاصله، مناطق جنوب شرقی و جنوب غربی دشت در برابر فرونشست آسیب پذیر هستند و متوسط فرونشست در این دشت برابر با ۲ سانتی متر است. نادری و همکاران (۱۳۹۷) برای شناسایی و تعیین مناطق مستعد فرونشست در آبخوان دشت سلماس از روش GARDLIF استفاده نمودند. بر اساس نتایج حاصله، بیشترین احتمال وقوع فرونشست مربوط به مناطق اطراف قره قشلاق که در شمال شرق دشت سلماس واقع شده است، می باشد. این محققان برای تعیین میزان تأثیرپذیری هر کدام از پارامترهای ورودی از روش تحلیل

در جهان بین سال های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ و همزمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی در نقاط مختلف جهان شروع شده است. میزان فرونشست زمین معمولاً به اندازه ۱ تا ۱۰ سانتی-متر به ازای هر متر افت سطح آب زیرزمینی است (اکبری اریمی و همکاران، ۱۳۹۸). در سال های اخیر، پدیده فرونشست، در دشت های زیادی از کشور که از منابع آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی استفاده می نمایند افزایش یافته است. از جمله این دشت ها می توان به دشت های کاشمر (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۷)، سمنان (اکبری اریمی و همکاران، ۱۳۹۸)، مرند (داداشی و همکاران، ۱۳۹۹)، اردبیل (خلیفی و همکاران، ۱۴۰۰)، فسا (عمادالدین و همکاران، ۱۴۰۲) و سلماس (نجفی ایگدیر و همکاران، ۱۴۰۳) اشاره نمود.

مطالعه لشکری پور و همکاران (۱۳۸۷) در دشت کاشمر نشان داد که وقوع پدیده فرونشست و شکاف های زمین عمدتاً ناشی از افت شدید سطح آب زیرزمینی بر اثر برداشت های بی رویه، در کنار ویژگی های زمین شناسی آبخوان از جمله بافت ریزدانه و تراکم پذیر آن است؛ عواملی که موجب افزایش پتانسیل فشردگی و در نهایت نشست زمین می گردند. اکبری اریمی و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه ای پیرامون پدیده فرونشست در دشت سمنان به این نتیجه دست یافتند که طی یک دوره آماری ۲۴ ساله (۱۳۷۲ تا ۱۳۹۶)، برداشت مستمر از منابع آب زیرزمینی منجر به افت ۹/۱۸ متری سطح آب زیرزمینی شده و تحکیم لایه های رسی و بروز فرونشست زمین را به دنبال داشته است. نجفی ایگدیر و همکاران (۱۴۰۳) برای برآورد فرونشست دشت سلماس از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری با درجه مصنوعی طی سال های آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷-۱۳۹۸ استفاده نمودند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد میانگین سرعت جابجایی ناشی از فرونشست، ۵ سانتی متر است. بررسی تغییرات منابع آب زیرزمینی نیز نشانگر روند کاهشی در این منابع است. این محققان در مطالعه خود علت اصلی ایجاد فرونشست در دشت سلماس را نیز تخلیه آب های زیرزمینی دانسته اند. (Elci et al. (2023 جریان آب زیرزمینی چهار حوضه واقع در کشورهای ایتالیا، اسپانیا، ترکیه و اردن، با ویژگی های هیدروژئولوژیکی مختلف را با استفاده از مدل MODFLOW مدل سازی و نرخ فرونشست ناشی از پمپاژ

شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۳۹۷). در آبخوان دشت قروه، ۵ حلقه چاه اکتشافی و ۲۶ حلقه چاه مشاهداتی وجود دارد. در سطح آبخوان آبرفتی دشت قروه، حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی و بخش‌های شرب و صنعت به ترتیب ۴۰/۲۷ و ۹/۴۶ میلیون مترمکعب در سال است. با توجه به نوع بافت خاک و روش‌های آبیاری که اغلب تحت فشار می‌باشند، میزان آب برگشتی از مصارف کشاورزی و شرب و صنعت به ترتیب برابر با ۱۲/۰۶ و ۷/۱۲ میلیون مترمکعب به آبخوان می‌باشد (گزارش مطالعات منابع آب شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۳۹۷). برای تهیه لایه افت سطح آب زیرزمینی، از آمار ماهانه تراز سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهداتی که توسط شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان جمع‌آوری شده است، استفاده شد. برای تهیه لایه محیط آبخوان نیز از لاگ چاه‌های حفاری استفاده شد.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبریز قروه در استان کردستان و ایران.
Figure 1- Location of Ghorveh watershed at Kordestan province and Iran.

دشت قروه دارای مجموعه سنگ‌های آذرین و رسوبی (دگرگون شده) و کوه‌هایی با فعالیت آتشفشانی مربوط به قبل از سنوزوئیک و اوایل کواترنری می‌باشد که در نیمه جنوبی علاوه بر ماگماتیزم، پدیده دگرگونی نیز تغییرات زیادی را به وجود آورده است. ارتفاعات اطراف دشت، غالباً از سنگ‌های آذرین بیرونی و بیشتر از نوع آندزیتیک، سنگ‌های آذرین درونی از نوع گرانیت، دیوریت و سنگ‌های دگرگونی از نوع میکاشیست و گنیاس می‌باشند. شمال منطقه از مورفولوژی آرامی برخوردار است. چشمه‌های باباگور از جمله معروف‌ترین چشمه‌های آهک‌ساز در شمال شرقی دشت می‌باشند که در اطراف این چشمه‌ها، تداوم رسوب‌گذاری ناشی از فعل و انفعالات شیمیایی

حساسیت با حذف نقشه استفاده نمودند. نتایج نشان داد پارامترهای پمپاژ و کاربری اراضی دارای بیشترین تأثیر و فاصله از گسل کم‌ترین تأثیر بر شاخص GARDLIF را دارد.

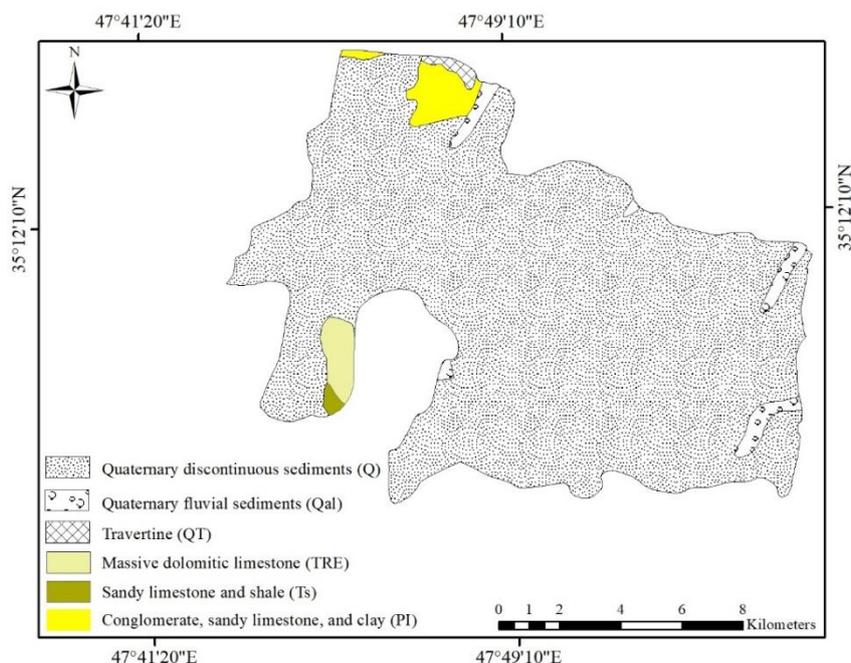
با توجه به اهمیت پدیده فرونشست برای بسیاری از مناطق دنیا و به خصوص دشت‌های کشور ایران، شناسایی مناطق مستعد فرونشست و برنامه‌ریزی جهت مدیریت صحیح آبخوان و جلوگیری از وقوع فرونشست و یا درنظر گرفتن تمهیدات خاص برای کاهش تأثیرات آن امری ضروری است. دشت قروه از جمله دشت‌های ممنوعه کشور است که در شرق استان کردستان واقع شده است. به دلیل برداشت بی‌رویه و کاهش بارندگی‌ها در حوضه آبریز، بیلان منابع آب زیرزمینی این دشت از سال ۱۳۹۴ منفی بوده است و میزان تغذیه، با وجود تمهیدات اخذ شده از سوی مدیران ذیربط، تاکنون افزایشی نداشته است. بنابراین؛ در این پژوهش، آسیب‌پذیری فرونشست دشت قروه با اصلاح شاخص GARDLIF و افزودن پارامترهای مهم و موثر بر آن شامل شیب و فاصله از رودخانه برآورد گردید.

مواد و روش‌ها محدوده مطالعاتی

محدوده مطالعاتی، دشت قروه با ۱۰۶۵/۳۱ کیلومترمربع مساحت در شرق استان کردستان و با طول جغرافیایی $30^{\circ} 47'$ تا $30^{\circ} 48'$ و عرض‌های جغرافیایی $30^{\circ} 35'$ تا $30^{\circ} 34'$ می‌باشد (شکل ۱). دشت قروه، در محدوده بلندی‌های کوه سیاه به ارتفاع ۲۲۸۷ متر، کوه قراول به ارتفاع ۲۱۰۰ متر با جهت شمالی تا کوه پیرویوسف به ارتفاع ۲۰۰۰ متر در جهت غربی و در امتداد خط‌الراس تا کوه قرقیه به ارتفاع ۱۹۰۰ متر و با جهت جنوب غربی تا روستای شادی‌آباد به ارتفاع ۱۷۰۰ متر قرار دارد. این محدوده، در جنوب به ارتفاعات بلند نظیر کوه دروازه با ارتفاع ۳۱۶۲ متر، ابراهیم عطار با ارتفاع ۲۷۹۳ متر و دره‌های پرشیب نظیر دره اوریه و ویهچ محدود است که از این دو دره، دو آبراهه اوریه و ویهچ وارد دشت شده و در شمال شرقی منطقه به رودخانه دائمی چم‌شور وارد می‌شوند (مقیم‌ی و همکاران، ۱۴۰۱). در سطح دشت قروه، مقدار متوسط بارش سالانه طی سال‌های اخیر کاهش یافته است به طوری که در سال ۱۳۹۵، مقدار متوسط بارش سالانه ۳۰۷ میلی‌متر بوده است (اسدزاده و همکاران، ۱۳۹۵) و در سال ۱۳۹۷ این مقدار به ۲۹۳/۸۷ میلی‌متر رسیده است (گزارش مطالعات منابع آب

سفید رنگ، مارن و ماسه سنگ و گنگومرا و در بعضی نقاط با رس آهکی تشکیل شده‌اند. نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی در شکل ۲ ارائه شده است (گزارش زمین‌شناسی شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۳۹۷).

آب‌های زیرزمینی را می‌توان مشاهده کرد. در همین ناحیه، چندین تپه به اشکال گنبدی و طولی وجود دارد که بلندترین آن‌ها تپه‌ای است که از ده‌های بابا گورگور نام دارد. سری‌های ترشیری در شمال این دشت تا بیجار، مشتمل بر مجموعه‌ای از رسوبات ائوسن-الیگومیوسن بوده و از آهک، آهک‌های رسی



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی حوزه آبخیز قروه.

Figure 2- Geological map of Ghorveh watershed.

وزن‌های یک تا پنج برای پارامترهای روش GARDLIF در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای شیب و فاصله از رودخانه از پارامترهای بسیار موثر بر فرونشست می‌باشند. اگر شیب زمین کم باشد، آب جاری شده در سطح زمین فرصت بیشتری برای نفوذ در سطح زمین دارد و اگر شیب زمین زیاد باشد آب جاری شده در زمان کوتاهی از دسترس خارج خواهد شد. رودخانه‌ها از جمله منابع مهم تغذیه منابع آب زیرزمینی می‌باشند. بدیهی است هرچه فاصله از رودخانه‌ها زیادتر باشد، تغذیه منابع آب زیرزمینی کمتر خواهد بود و برعکس. با توجه به اهمیت این دو پارامتر مهم بر منابع آب زیرزمینی، برای بهبود دقت روش GARDLIF، در این مطالعه، پارامترهای شیب و فاصله از رودخانه به عنوان ورودی‌های این روش در نظر گرفته شده و روشی جدید تحت عنوان GARDLIF-SD برای تعیین آسیب-پذیری فرونشست دشت قروه مورد استفاده قرار گرفت. شاخص

روش آسیب‌پذیری فرونشست GARDLIF-SD

فرونشست زمین متأثر از پارامترهای مختلفی از جمله فعالیت‌های انسانی و پارامترهای زمین‌شناسی است (نادری و همکاران، ۱۳۹۷). روش GARDLIF از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی شامل افت سالانه سطح آب زیرزمینی (G)، محیط آبخوان (A)، تغذیه خالص (R)، مقدار تخلیه یا پمپاژ (D)، کاربری اراضی (L)، ضخامت آبخوان (I) و فاصله از گسل (F) تشکیل شده است (نادری و همکاران، ۱۳۹۷). در این روش، ابتدا اطلاعات مربوط به پارامترها به صورت تلفیقی تجزیه و تحلیل شده و سپس در محیط ArcGIS پردازش می‌شوند. در این روش، هر پارامتر دارای یک رتبه و یک وزن برحسب اهمیت آن پارامتر می‌باشد. رتبه پارامترهای GARDLIF بین یک تا ۱۰ متغیر است. رتبه یک به معنای کمترین و ۱۰ بیشترین خطر برای فرونشست زمین می‌باشد. با توجه به اهمیت نسبی هر پارامتر نسبت به پارامتر دیگر،

پارامتر دارای بالاترین رتبه می‌باشد که نشانگر اهمیت آن در آسیب‌پذیری فرونشست می‌باشد. اسدی و همکاران (۱۴۰۰) محدودیت دسترسی به منابع آب سطحی که منجر به بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی شده و افت شدید تراز آب زیرزمینی را به‌دنبال داشته است را عامل اصلی وقوع پدیده فرونشست برشمرده‌اند.

محیط آبخوان (A)

محیط آبخوان به خصوصیات مواد تشکیل دهنده منطقه اشباع نظیر میزان تخلخل، جنس و اندازه ذرات بستگی دارد. خاک‌های ریزدانه، بسیار بیشتر از ماسه و سنگریزه‌ها قابلیت تراکم دارند. بنابراین فرونشست شدید در مکان‌هایی که رسوبات رسی ضخیمی وجود داشته و یا لایه‌های آبدار، میان لایه‌های رس و سیلت قرار گرفته باشند، رخ می‌دهد. در خاک-های ریزدانه، به‌علت نفوذپذیری کم، نشست زمین به تدریج و طی سالیان طولانی صورت می‌گیرد. بیشترین مقدار فرونشست در خاک‌های آلی، به‌علت ضریب تراکم‌پذیری زیاد این نوع مصالح می‌باشد (نادری و همکاران، ۱۳۹۷). مطابق با وزن‌های ارائه شده در جدول ۱ مشاهده می‌شود که این پارامتر، وزن ۴ را به خود اختصاص داده است که نشان از اهمیت بالای آن است.

مقدار تغذیه خالص (R)

تغذیه خالص عبارت است از میزان آبی که از طریق منطقه غیراشباع خاک و توسط عوامل مختلفی نظیر بارش به آب زیرزمینی می‌رسد. بدیهی است که هرچه در منطقه‌ای، تغذیه آبخوان بیشتر باشد، فشار هیدرولیکی افزایش یافته و احتمال وقوع فرونشست کمتر خواهد بود (Chatsrimab et al., 2020). بنابراین در رتبه‌بندی این پارامتر برای تعیین مناطق مستعد فرونشست، به مناطقی که میزان تغذیه در آن‌ها بیشتر است رتبه کمتری اختصاص خواهد یافت. روش‌های مختلفی برای محاسبه مقدار تغذیه خالص وجود دارد که در این مطالعه، از روش اسکالن و همکاران استفاده شد (Scanlon et al., 2002). در این روش، تغذیه براساس تغییرات سطح آب بین دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از ضریب ذخیره آبخوان و براساس رابطه ۲ میزان تغذیه محاسبه می‌گردد.

روش GARDLIF-SD براساس وزن‌دهی به مجموع پارامترها محاسبه می‌شود (رابطه ۱) (نادری و همکاران، ۱۳۹۷):

$$GI = G_r G_w + A_r A_w + R_r R_w + D_r D_w + L_r L_w + I_r I_w + F_r F_w \quad (1)$$

که در آن، GI شاخص آسیب‌پذیری، حروف بزرگ نشان دهنده پارامترهای روش، r رتبه و w وزنی است که به هر پارامتر اختصاص داده می‌شود. با محاسبه شاخص GI، نواحی مستعد فرونشست آبخوان قابل تشخیص می‌باشد. هرچه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد، بیانگر احتمال بیشتر برای وقوع فرونشست است.

جدول ۱- وزن‌های اختصاص یافته به پارامترهای روش

GARDLIF-SD

Table 1- The weights assigned to the parameters of the GARDLIF-SD model.

Parameters	Relative weight
Groundwater level decline (G)	5
Aquifer media (A)	4
Net recharge (R)	2
Aquifer discharge (D)	4
Land use (L)	5
Aquifer thickness (I)	3
Distance from fault (F)	1
Slope (S)	3
Distance from river (D)	3

پارامترهای روش GARDLIF-SD

افت سطح آب زیرزمینی (G)

با کاهش سطح آب در آبخوان‌های آزاد، خاک مرتبط با بخشی که آب خود را از دست داده است، از حالت شناوری خارج می‌شود و با وارد کردن وزن بیشتر به لایه‌های زیرین، تراکم خاک افزایش می‌یابد که افزایش احتمال وقوع فرونشست را به‌دنبال دارد. زمانی که دبی پمپاژ، از دبی قابل اطمینان در آبخوان‌های تحت فشار زیادتر شود، سطح آزاد آب یا سطح پیژومتریک افت می‌یابد (Bouwer, 1993). پایین رفتن سطح پیژومتریک، سبب کاهش فشار بالا آورنده آب شده و افزایش فشار موثر خاک بالای آبخوان را به‌دنبال دارد که این امر سبب متراکم شدن خاک و فرونشست زمین می‌شود (رهنما و میراثی، ۱۳۹۵). رتبه‌بندی مقادیر مختلف افت سطح آب زیرزمینی و دیگر پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به رتبه‌های ارائه شده در جدول ۲ مشاهده می‌شود که این

$$R = S_y \times \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (2)$$

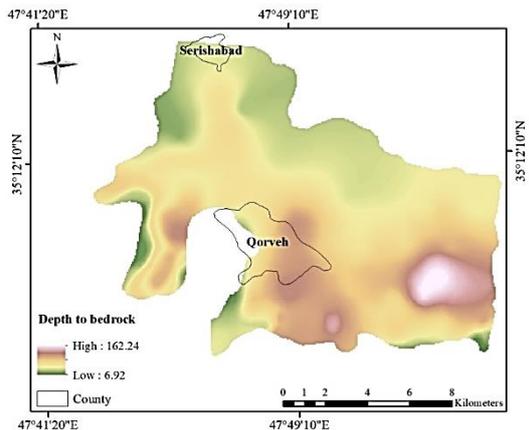
اسکنلن فرض بر این است که تغییرات تراز آب زیرزمینی، ناشی از تغذیه آبخوان از سطح است و پمپاژی از آبخوان صورت نمی‌گیرد.

که در آن، R: میزان تغذیه، S_y : آبدهی ویژه یا ضریب ذخیره، Δh : تغییرات سطح آب و Δt : تغییرات زمان است. در روش

جدول ۲- بازه‌ها و رتبه‌های مربوط به پارامترهای روش GARDLIF-SD.

Table 2- Ranges and rates related to parameters in the GARDLIF-SD method.

Aquifer discharge (cm year ⁻¹)		Net recharge (cm year ⁻¹)		Aquifer media		Groundwater level decline (m year ⁻¹)	
Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate
0-0.0004	1	0-4	10	Coarse-grained alluvial sediments	3-6	0-0.02	1
0.0004-0.005	2	4-9	9	Clay and silt	9-10	0.02-0.05	2
0.005-0.01	3	9-14	7	Sand with minor amounts of silt and clay	6-8	0.05-0.1	3
0.01-0.5	4	14-19	5	Sandstone and conglomerate	3-5	0.1-0.3	4
0.5-1	5	19-24	3	Karstic limestone	7-9	0.3-0.6	5
1-5	6	>24	1	Igneous or metamorphic rock	1-4	0.6-0.9	6
5-20	7	-	-	Sand and gravel with high silt and clay content	7-9	0.9-1.2	7
20-40	8	-	-	Organic soils (peat and peat-rich materials)	8-10	1.2-1.5	8
40-65	9	-	-	-	-	1.5-2	9
>65	10	-	-	-	-	>2	10
Aquifer thickness (m)		Land use		Distance from fault (km)			
Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate		
>25	1	Rainfed agricultural areas	1-3	<1	10		
25-55	2	Rangelands and forest areas	1-3	1-2	8		
55-90	3	Fallow lands and natural areas	1-3	2-3	6		
90-130	4	Urban areas, dam construction sites, airports, ports, and industrial zones	4-8	3-4	4		
130-175	5	Cultivation of perennial crops such as orchards and vineyards	6-8	4-5	2		
175-225	6	Mining and extraction of mineral resources such as coal	5-9	>5	1		
225-280	7	Oil fields and oil and gas extraction sites	8-10	-	-		
280-340	8	Irrigated areas (annual crops)	8-10	-	-		
340-405	9	-	-	-	-		
>405	10	-	-	-	-		
Distance from river (m)		Slope (%)					
Range	Rate	Range	Rate				
0-152	1	0-2	10				
152-320	2	2-5	9				
320-524	3	5-7	8				
524-725	4	7-12	6				
725-1000	5	12-15	5				
1000-1220	6	15-20	4				
1220-1440	7	20-30	3				
1440-1660	8	>30	1				
1660-1880	9	-	-				
>1880	10	-	-				



شکل ۳- نقشه هم‌عمق سنگ کف دشت قروه.
Figure 3 - Bedrock depth contour map of the Ghorveh Plain.

فاصله از گسل (F)

عوامل ساختمانی و تکتونیکی مانند گسل و درزها، از عوامل تأثیرگذار بر فرونشست هستند. هرچه فاصله از گسل زیادتر باشد، تأثیر آن بر فرونشست کم‌تر خواهد بود. بنابراین در این روش، برای مناطقی که به ترتیب بیشتر از پنج کیلومتر و کمتر از یک کیلومتر از گسل فاصله دارند به ترتیب رتبه‌های ۱ و ۱۰ اختصاص داده می‌شود (نادری و همکاران، ۱۳۹۷).

شیب (S)

شیب زمین می‌تواند توزیع تنش و حرکت زیرسطحی را تغییر دهد. معمولاً مناطق با شیب کمتر مستعد فرونشست بیشتری هستند، زیرا تجمع رسوبات و کاهش نفوذپذیری خاک در این مناطق بیشتر است. در شیب‌های تند، فرایندهای هیدرولوژیکی و حرکت آب زیرزمینی می‌توانند متفاوت باشند و نرخ فرونشست را کاهش دهند (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱). برای تهیه نقشه شیب، از خطوط توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 استفاده شده است.

فاصله از رودخانه (D)

وجود رودخانه‌ها در محدوده‌های آبخوان، باعث تغذیه آن می‌شوند. جریان آب رودخانه‌ها در مناطقی که پست و دارای شیب کمی هستند به کندی صورت می‌گیرد و این امر امکان نفوذ آب به اعماق زمین را به دنبال دارد. رابطه فرونشست با فاصله از رودخانه در حوضه‌های آبریز آبخوان‌ها مستقیم بوده و با افزایش فاصله از رودخانه‌ها، احتمال وقوع فرونشست بیشتر می‌شود (شایان و همکاران، ۱۳۹۵).

مقدار تخلیه از آبخوان (D)

استخراج بیش از حد مایعات از آبخوان، فرونشست قابل توجه زمین را به دنبال دارد. پمپاژ از آبخوان، عملکردی برعکس تغذیه آبخوان دارد. اگر در منطقه‌ای پمپاژ بیشتر باشد، احتمال وقوع فرونشست هم بیشتر خواهد بود (خلیفی و همکاران، ۱۴۰۰). بنابراین، مطابق جدول ۲، برای مناطقی با تخلیه بیشتر، رتبه بیشتر و برای مناطقی با تخلیه کمتر، رتبه کمتری اختصاص می‌یابد.

کاربری اراضی (L)

کاربری‌های مختلف زمین می‌توانند اثرات مختلفی بر فرونشست داشته باشند. فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی که با استخراج آب از منابع آب زیرزمینی همراه هستند، سبب افزایش پتانسیل آسیب‌پذیری فرونشست در یک منطقه می‌شوند. به علاوه معدن‌کاری، احداث فرودگاه و توسعه مناطق مسکونی نیز بر فرونشست زمین موثر است. در این‌گونه مناطق که تراکم‌پذیری خاک زیاد است نشست زمین صورت می‌گیرد. با توجه به اهمیت بالای این پارامتر بر فرونشست زمین، بالاترین وزن نیز برای آن در نظر گرفته شده است.

ضخامت آبخوان (I)

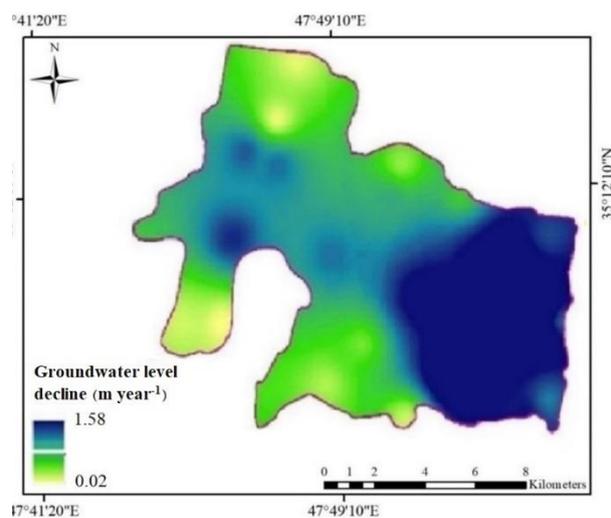
با کاهش هرچه بیشتر سطح آزاد آب در آبخوان‌ها، که ناشی از برداشت بی‌رویه آب از این منابع است، احتمال وقوع فرونشست در لایه‌های آبدار و لایه‌های ریزدانه که ضخامت بیشتری دارند، افزایش می‌یابد. زیرا با خالی شدن منافذ از آب، فشار ناشی از وزن لایه‌های بالایی، فشردگی لایه‌های زیرین را به دنبال خواهد داشت. بنابراین، در مکان‌هایی که ضخامت لایه آبدار بیشتر است، امکان وقوع فرونشست بیشتر بوده و رتبه اختصاصی نیز نسبت به مناطقی با ضخامت کم، بیشتر خواهد بود (Bouwer, 1993). نقشه هم‌عمق سنگ کف در شکل ۳ ارائه شده است.

روش همپوشانی وزن دار

روش همپوشانی وزن دار در سال ۱۹۹۰ برای تهیه نقشه-ای متشکل از چندین لایه رستری با وزن دادن به هر لایه برحسب اهمیت آن‌ها توسعه داده شد (Saati, 1990). با توجه به ارائه نتایج قابل اعتماد توسط این روش در مطالعات مختلف، در این مطالعه نیز از روش همپوشانی وزن دار در محیط نرم افزار ArcGIS 10.8 استفاده شد.

تداخل سنجی راداری

در این تحقیق برای تعیین میزان فرونشست منطقه، از تصاویر راداری سنتینل ۱- استفاده شد. برای این منظور از ۸ تصویر در دوره زمانی ۱۵ آبان ۱۳۹۶ (۲۰۱۷) تا یکم مهر ۱۴۰۲ (۲۰۲۳) که از باند C ماهواره سنتینل ۱- استخراج شده بود، استفاده و مراحل پردازش تداخل سنجی راداری در نرم افزار SNAP 9 انجام شد. در این پژوهش، تداخل نماها بر مبنای روش SBAS تشکیل شده‌اند، به این صورت که تنها زوج تصاویری که دارای طول خط مبنای مکانی و همچنین زمانی کوتاه بودند برای انجام پردازش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در این روش، از بروز خطای توپوگرافی و نویزها نیز جلوگیری می‌شود. خروجی میزان فرونشست در دشت قروه با پردازش خودکار با استفاده از تصویر پایه با اسکرپت‌های بسته متن باز پایتون نرم‌افزار اسنپ تهیه شد و نتایج حاصله از آن با نتایج با نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد فرونشست حاصل از روش GARDLIF-SD مقایسه شد.



شکل ۴- میزان افت سطح آب زیرزمینی در دشت قروه.
Figure 4- Groundwater level down map in Ghorveh plain.

نتایج و بحث

وزن دهی به لایه‌ها

نتایج تحلیل داده‌های ۲۶ حلقه چاه پیژومتری در دشت قروه طی ۳۳ سال گذشته نشان می‌دهد که میزان افت سطح آب زیرزمینی در این منطقه بین ۰/۰۲ تا ۱/۵۸ متر در سال متغیر بوده است. به‌طور متوسط، افت سطح آب زیرزمینی در این دشت سالانه حدود ۰/۷ متر بوده است.

پارامتر افت سطح آب زیرزمینی طبق بازه‌های ارائه شده در جدول ۲، در نه کلاس طبقه‌بندی شده است. همانطور که در شکل ۵-a مشاهده می‌شود، بیشتر مناطق دشت در کلاس‌های پنج و شش قرار دارند. علاوه بر این، بیشترین افت سطح آب زیرزمینی در نواحی شرقی و مرکزی دشت، که عمدتاً شامل اراضی کشاورزی است، مشاهده شده است. کاهش بلندمدت سطح آب زیرزمینی در اثر آبیاری، به‌ویژه در آبخوان‌هایی با لایه‌های سیلت و رس نیمه‌تحکیم یافته، موجب رهاسازی ناگهانی آب از آبخوان‌ها و فشرده شدن آن می‌شود که در نهایت به‌صورت فرونشست در سطح زمین نمایان می‌شود (رهنما و میراثی، ۱۳۹۵). این پارامتر یکی از موثرترین عوامل در تعیین آسیب‌پذیری فرونشست است و بالاترین وزن را در مدل دارد. ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۲) با بررسی فرونشست دشت عباس ایلام با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری به این نتیجه رسیدند که افت سطح آب زیرزمینی علت اصلی فرونشست در این دشت می‌باشد که حتی در صورت جبران افت آب زیرزمینی رخ داده، جبران کامل فرونشست رخ داده امکان‌پذیر نیست و در عمل بخشی از آبخوان برای همیشه تحکیم یافته و قابل احیا نخواهد بود.

نقشه محیط آبخوان در شکل ۵-b ارائه شده است. بررسی جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان دشت قروه نشان می‌دهد که اکثر مناطق این دشت حاوی رس و ماسه هستند، در حالی که مواد تشکیل‌دهنده مناطق شمال غربی و شرقی دشت ترکیبی از آهک، بازالت و سنگ آهک نولومیتی است.

با توجه به اینکه هرچه جنس مواد سازنده یک آبخوان رسی‌تر باشد، احتمال وقوع فرونشست بیشتر است، برای این مناطق رتبه ۸ و برای سایر مناطق رتبه‌های ۶ و ۷ در نظر گرفته شد. در تحقیقی که آرم و همکاران (۱۴۰۱) در خصوص فرونشست در اصفهان انجام داده‌اند، مشخص شده که در مناطقی با خاک ریزدانه، برداشت بی‌رویه آب از منابع زیرزمینی باعث افزایش فرونشست می‌شود. در حالی که در مناطق با خاک درشت‌دانه،

و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی باعث افزایش میزان افت سطح آب زیرزمینی شده و به دنبال آن، وقوع پدیده فرونشست در این دشت قابل پیش‌بینی است.

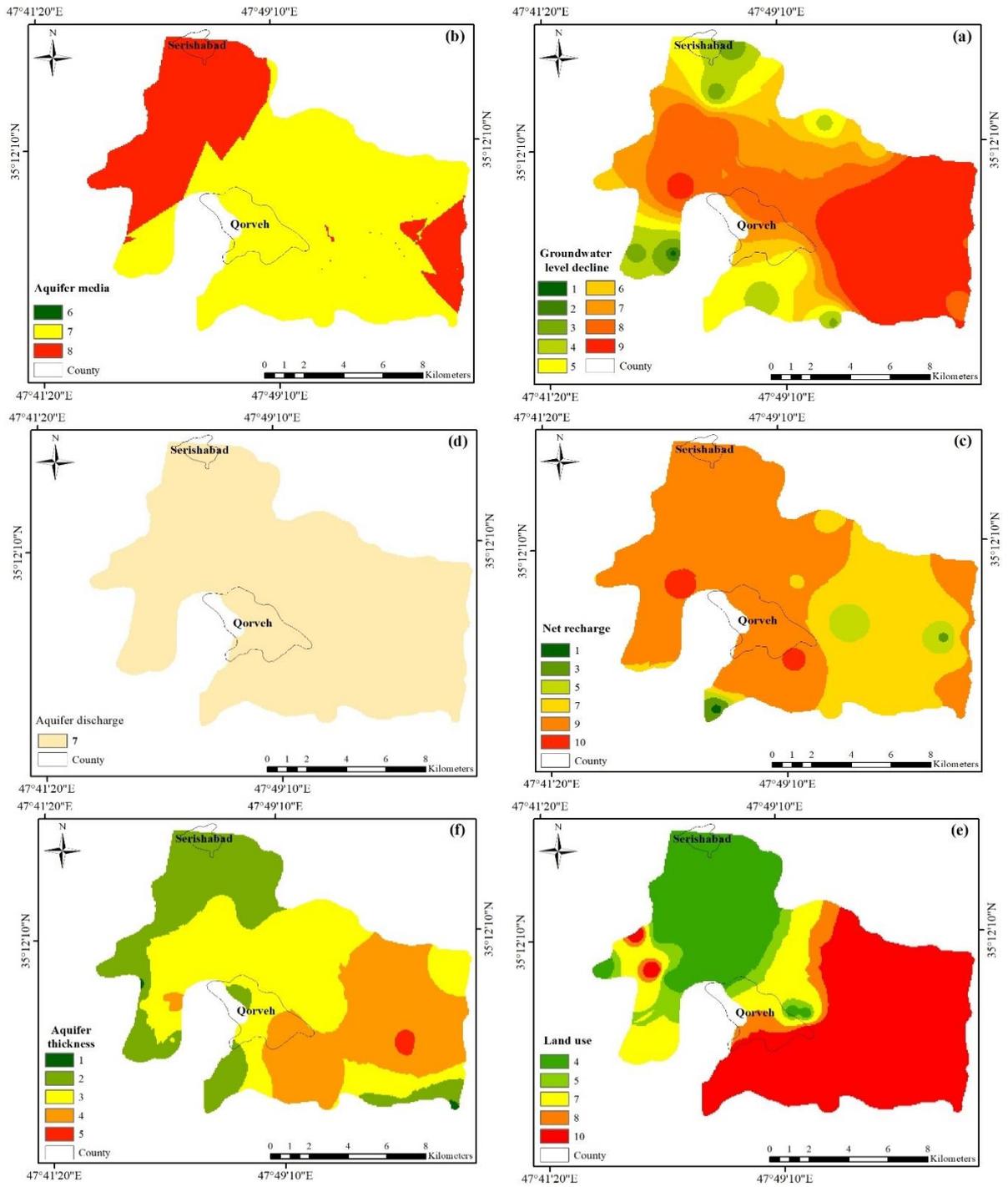
اطلاعات مربوط به ضخامت رسوبات آبرفتی آبخوان دشت قروه از تحلیل داده‌های حاصل از مقاطع ژئوالکتریک به دست آمده است. براساس شکل ۵-f، ضخامت رسوبات بین ۶/۹۲ تا ۱۶۲/۲۴ متر متغیر بوده و بخش عمده‌ای از منطقه در کلاس ضخامت ۵۵ تا ۹۰ متر قرار دارد. در روستاهای خریله، قاسم، شکوه‌آباد، سنگین‌آباد و جعفرآباد ضخامت رسوبات در بازه ۹۰ تا ۱۳۰ متر مشاهده می‌شود، در حالی که در نواحی شمالی دشت، ضخامت رسوبات به حداقل مقدار خود می‌رسد. به طور کلی، هرچه ضخامت آبرفت در منطقه‌ای بیشتر باشد، پتانسیل وقوع فرونشست در آن بیشتر خواهد بود. این یافته با نتایج مطالعه شایان و همکاران (۱۳۹۵) که افزایش ضخامت رسوبات آبرفتی با افزایش احتمال فرونشست را گزارش نموده‌اند، هم‌راستا است. خلیفی و همکاران (۱۴۰۰) نیز تأکید کرده‌اند که هرچه ضخامت آبرفت بیشتر باشد، فرونشست زمین نیز شدت بیشتری خواهد داشت.

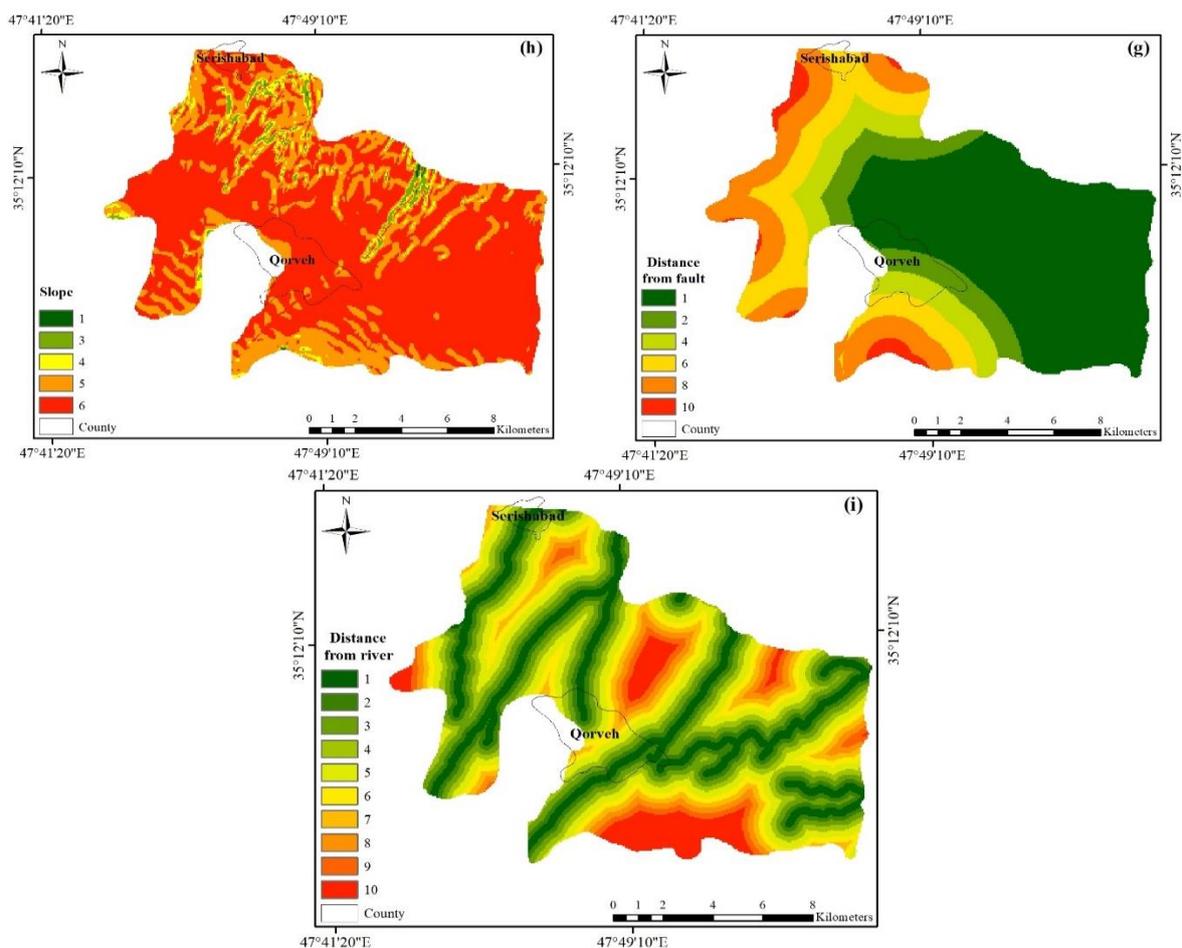
یکی از عوامل مؤثر در شدت فرونشست، فاصله از گسل‌ها است (شکل ۵-g). نتایج نشان می‌دهد که نواحی جنوبی، مرکزی و شرقی دشت قروه در مجاورت نزدیک‌تری با گسل‌ها قرار دارند و به همین دلیل رتبه‌های بالاتر (۱۰ تا ۶) را به خود اختصاص داده‌اند. در حالی که نواحی غربی و شمال شرقی که فاصله بیشتری از گسل‌ها دارند، در کلاس‌هایی با رتبه پایین‌تر قرار گرفته‌اند. به طور کلی، با افزایش فاصله از گسل‌ها احتمال وقوع فرونشست کاهش می‌یابد و بالعکس. این الگو با نتایج پژوهش فرزین‌کیا و همکاران (۱۳۹۷) نیز مطابقت دارد که در آن تأثیر نزدیکی گسل‌های اصلی و فرعی بر افزایش میزان فرونشست در دشت جوبین تأیید شده است.

کاهش سطح آب زیرزمینی با نرخ کمتری موجب فرونشست خواهد شد.

در دشت قروه، تخلیه آبخوان بین ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر در سال گزارش شده است. براین اساس، مطابق با بازه‌های ارائه شده در جدول ۲، تخلیه آبخوان در یک کلاس طبقه‌بندی شده است (شکل ۵-d). بررسی میزان تخلیه آبخوان در این دشت نشان می‌دهد که میزان تخلیه در مناطق شرقی بیشتر از سایر نواحی است. این امر به دلیل تجمع اراضی کشاورزی در بخش شرقی دشت می‌باشد. خلیفی و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای که به بررسی فرونشست در دشت اردبیل پرداخته‌اند، گزارش کرده‌اند که اگر میزان تخلیه از آبخوان بیشتر از میزان تغذیه آبخوان باشد و آبخوان نتواند آب خارج شده را جبران کند، سطح آب زیرزمینی کاهش یافته و احتمال وقوع فرونشست افزایش می‌یابد.

نقشه کاربری اراضی دشت قروه در شکل ۵-e نمایش داده شده است. بر اساس بازه‌های ارائه شده در جدول ۲، مشاهده می‌شود که اراضی کشاورزی آبی، باغات و مناطق مسکونی بیشترین تأثیر را در احتمال وقوع فرونشست دارند. در نتیجه، مناطق شرقی، مرکزی و غربی دشت قروه که شامل اراضی کشاورزی، باغات و مناطق مسکونی هستند، رتبه‌های پنج تا ده را به خود اختصاص داده‌اند. در حالی که مناطق شمالی دشت که عمدتاً شامل اراضی دیم و بایر هستند، رتبه ۴ را دارند. گنجائیان و همکاران (۱۴۰۱) در تحقیقی که به بررسی وضعیت فرونشست در محدوده شهری همدان پرداخته‌اند، به این نتیجه رسیدند که توسعه فیزیکی شهرها، فشار بیشتری بر سازه‌های انسانی وارد می‌آورد که موجب تشدید میزان فرونشست می‌شود. علاوه بر این، افت منابع آب زیرزمینی در همدان، علت اصلی فرونشست در این منطقه بوده است. در دشت قروه، به دلیل نبود موانع ژئومورفولوژیکی، شرایط برای توسعه اراضی کشاورزی مساعد بوده است. بنابراین، توسعه اراضی کشاورزی





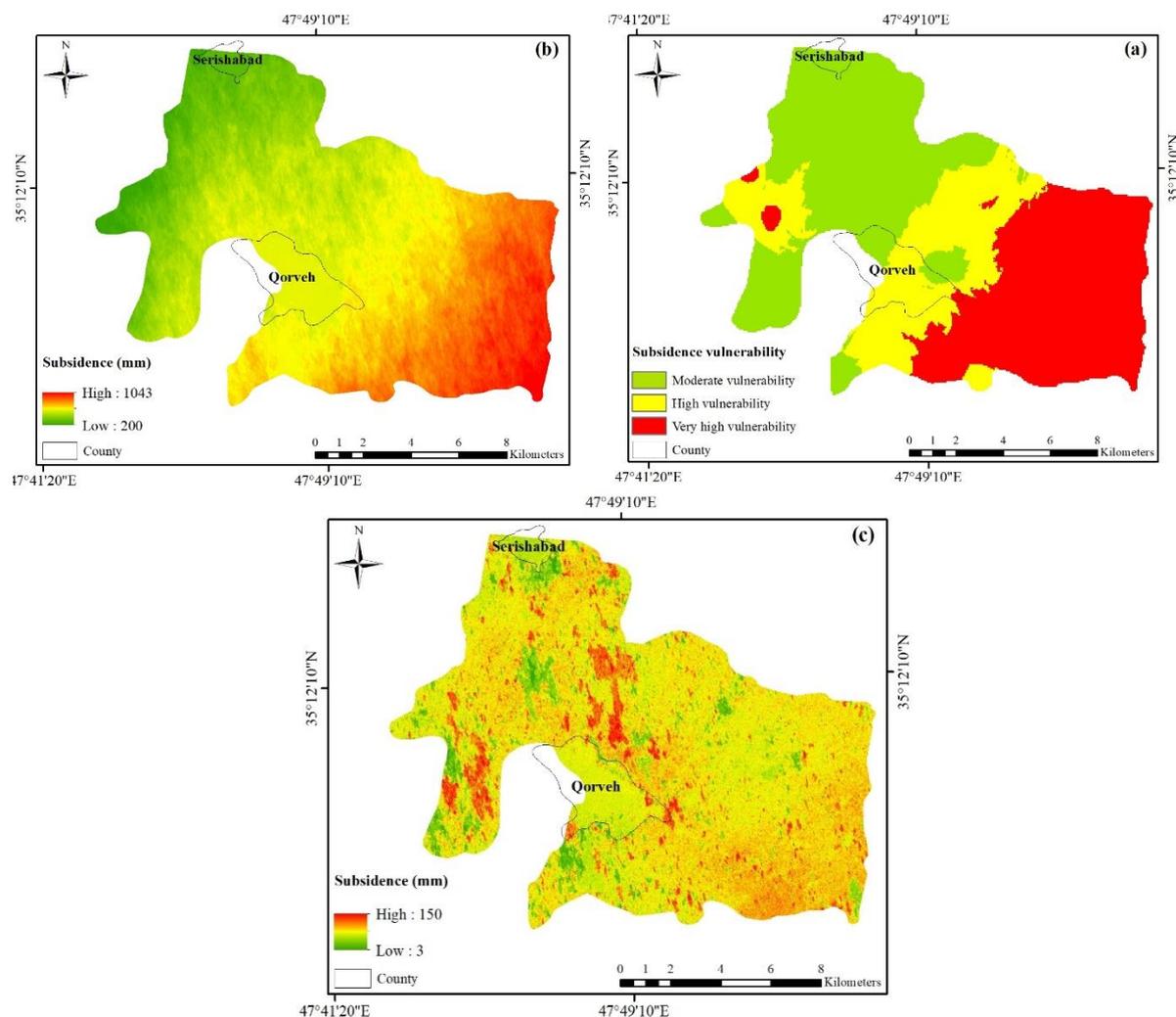
شکل ۵- لایه‌های ورودی روش GARDLIF-SD.
Figure 5- Input Layers of GARDLIF-SD Method.

رودخانه‌ها نزدیک‌تر بوده و در نتیجه، میزان تغذیه آب زیرزمینی در این بخش‌ها نسبت به سایر مناطق بیشتر است. به‌طور کلی، هرچه فاصله یک منطقه از رودخانه‌های سطحی افزایش یابد، احتمال وقوع پدیده فرونشست نیز بیشتر می‌شود. براین اساس، در طبقه‌بندی نواحی دشت قروه، مناطق نزدیک به رودخانه‌ها رتبه‌های پایین‌تری (نشان‌دهنده احتمال کمتر فرونشست) و مناطق دورتر، رتبه‌های بالاتری (نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر) دریافت کرده‌اند. مطالعات پیشین نیز این روند را تأیید می‌کنند. به‌عنوان نمونه، فرزین‌کیا و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهش خود پیرامون فرونشست دشت جوین، گزارش کردند که رودخانه کالشور، به‌عنوان رودخانه اصلی این دشت، با جریان سالیانه خود و وقوع سیلاب‌ها، نقش مؤثری در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی ایفا کرده و در نتیجه، میزان فرونشست در مجاورت آن کمتر بوده است. همچنین، شایان و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای پیرامون پهنه‌بندی فرونشست

نقشه شیب دشت قروه در شکل ۵-h ارائه شده است. تحلیل نقشه درصد شیب نشان می‌دهد که بخش اعظم سطح دشت دارای شیب کم بوده و تنها نواحی حاشیه‌ای آبخوان و مناطق مرتفع پیرامونی دارای شیب‌های بالاتر هستند. میانگین شیب در سطح دشت برابر با ۱/۷ درصد برآورد شده است. با توجه به الگوی توزیع شیب، این پارامتر در پنج کلاس مختلف طبقه‌بندی شده و به آن‌ها رتبه‌هایی از یک تا شش اختصاص داده شده است. طبقه‌بندی مذکور نقش مؤثری در تحلیل خطرپذیری فرونشست دارد، چرا که شیب زمین می‌تواند بر نحوه تجمع و حرکت آب در زیرسطح و همچنین الگوهای بهره‌برداری از منابع آب تأثیرگذار باشد. در دشت قروه، سه رودخانه قزل‌اوزن، شور و تلوار جریان دارند که به‌عنوان مهم‌ترین منابع تغذیه آب سطحی در این منطقه شناخته می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۵-i نمایش داده شده است، آبخوان در نواحی مرکزی و شرقی دشت به این

محیط نرم‌افزار ArcGIS نسخه 10.8، به کمک تکنیک همپوشانی وزنی انجام شد. در نهایت، نقشه نهایی آسیب‌پذیری فرونشست دشت قروه تهیه گردید (شکل ۶-ا). علاوه بر این، نتایج حاصل از محاسبه میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری برای بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ در شکل ۶-ب و برای بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ در شکل ۶-ج نمایش داده شده است.

در حوزه آبخیز قره‌چای همدان نشان دادند که فاصله زیاد از منابع آب سطحی یکی از عوامل مؤثر در افزایش برداشت از چاه‌ها و در نتیجه، افت سطح آب زیرزمینی و افزایش احتمال فرونشست است. این نتایج با یافته‌های حاضر نیز تطابق کامل دارند. با بهره‌گیری از روش GARDLIF-SD و با در نظر گرفتن وزن‌های معیارها مطابق جدول ۱، فرآیند تلفیق لایه‌ها در



شکل ۶-ا آسیب‌پذیری فرونشست با روش GARDLIF-SD، ۶-ب مقدار فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (۲۰۱۷-۲۰۲۳) و ۶-ج مقدار فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (۲۰۱۷-۲۰۱۸).

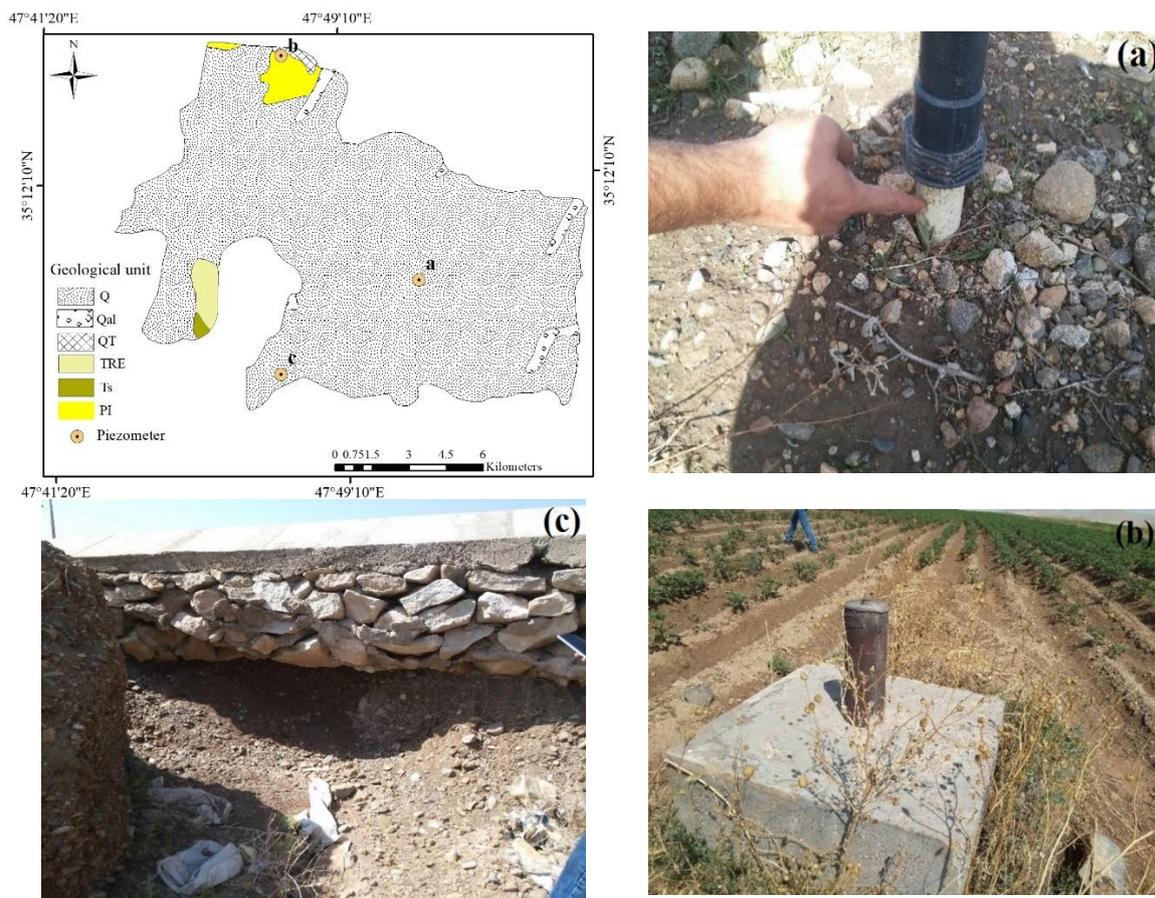
Figure 6 a- Subsidence vulnerability via GARDLIF-SD method (2017-2023), b- Subsidence using Radar Interferometry method (2017-2023), and c- Subsidence using Radar Interferometry method (2017-2018).

نسبت به فرونشست قرار دارند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، بخش‌های شمالی تا مرکزی دشت قروه در کلاس متوسط و مناطق شرقی و بخشی از نواحی جنوبی در کلاس بسیار زیاد قرار دارند. همچنین، نواحی غربی دشت در

نقشه تهیه‌شده در سه کلاس متوسط، زیاد و بسیار زیاد طبقه‌بندی شد. براساس نتایج حاصل از این نقشه، ۳۸/۴۲ درصد از محدوده در کلاس متوسط، ۲۴/۷۸ درصد در کلاس زیاد و ۳۶/۸۰ درصد نیز در کلاس بسیار زیاد آسیب‌پذیری

مناطق دارای آسیب پذیری بالا در روش پیشنهادی نیز مطابقت دارد. همچنین، میزان فرونشست طی بازه ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ در حدود ۳ تا ۱۵۰ میلی متر اندازه گیری شده است (شکل ۶-ع). بررسی مطالعات پیشین نیز مؤید فعال بودن پدیده فرونشست در دشت قروه است. اصغری سراسکانرود و فتح الهی (۱۴۰۱) با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، نرخ فرونشست زمین در بخشی از دشت قروه را طی سال های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ بررسی کرده و گزارش داده اند که فرونشست سالانه به ۱۲ سانتی متر می رسد. همچنین، محمدخان و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ طی سال های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ به بررسی اثر افت سطح آب زیرزمینی بر فرونشست دشت قروه پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که میزان فرونشست در این بازه بین ۶۱ تا ۲۱۶ میلی متر بوده و بیشترین نرخ فرونشست مربوط به مناطق شرقی و غربی این دشت می باشد.

کلاس های زیاد و بسیار زیاد جای گرفته اند. وجود اراضی وسیع کشاورزی در این مناطق، برداشت بیش از حد آب زیرزمینی به ویژه برای مصارف کشاورزی و ماهیت رسی مواد سازنده آبخوان، از جمله عوامل اصلی آسیب پذیری بالای این مناطق نسبت به پدیده فرونشست هستند. فیجانی و زارعی (۱۴۰۳) نیز در مطالعه خود که به بررسی فرونشست در آبخوان هومند-آب سرد پرداخته اند، نشان دادند که بیشترین میزان فرونشست در بخش هایی رخ داده است که بیشترین برداشت و افت آب زیرزمینی را داشته اند. بازدیدهای میدانی نیز این موضوع را تأیید می کند؛ به طوری که در اطراف پیزومترهای دیوزند و سریش آباد (شکل ۷-الف و ب) و نیز پیرامون آب بند ویهج (شکل ۷-ع)، آثار قابل مشاهده ای از فرونشست زمین گزارش شده است. مطابق نتایج حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری، میزان فرونشست در دشت قروه طی سال های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ در بازه ۲۰۰ تا ۱۰۴۳ میلی متر بوده است که با



شکل ۷- موقعیت چاه های پیزومتری (a) دیوزند، (b) سریش آباد و (c) آب بند ویهج.

Figure 7- Location of Piezometric Wells at a) Divzand, b) Serishabad, c) Veihaj Dike.

نتیجه گیری

دانست. در نتیجه، پیشنهاد می‌گردد که مدیران و تصمیم‌گیرندگان حوزه آب، با در نظر گرفتن تدابیری نظیر نصب کنتورهای هوشمند بر روی چاه‌ها، جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز و کف‌شکنی‌های غیرقانونی، تهیه گزارش جامع از وضعیت اراضی کشاورزی دیم و آبی و شناسایی محصولات مناسب و کم‌مصرف آب برای کشت در منطقه، در جهت حفظ منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از گسترش پدیده فرونشست اقدام نمایند.

منابع

آزرم، ز.، مهرابی، ح.، نادری، س.، ۱۴۰۱. بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری (منطقه مطالعاتی: اصفهان). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۴۴ (۱۱)، ۱۷۳-۱۹۱.

ابراهیمی، ش.، رضایی، ا.، موسوی، ز.، ۱۴۰۲. بررسی فرونشست آبخوان دشت عباس ایلام در دو دوره افت و خیز تراز آب زیرزمینی به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری. هیدروژئولوژی، ۸ (۲)، ۱۶۹-۱۵۸.

اسدی، م.، گنجائیان، ح.، جاودانی، م.، قادری حسب، م.، ۱۴۰۰. ارزیابی ارتباط بین عوامل طبیعی و میزان فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از تصاویر رادار. هیدروژئولوژی، ۶ (۱)، ۲۲-۱۳.

اسدزاده، ف.، کاکلی، م.، شکیبای، س.، راعی، ب.، ۱۳۹۵. تأثیر خشکسالی بر کیفیت و سطح آب زیرزمینی دشت قروه و چهاردولی. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۲ (۳)، ۱۵۳-۱۶۵.

اکبری اریمی، ح.، مومنی، ع.، خراسانی، ا.، ۱۳۹۸. بررسی فرونشست دشت سمنان ناشی از برداشت آب زیرزمینی. یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، ۱۳ (۲۶)، ۹۶-۱۱۰.

اصغری سراسکانرود، ص.، فتح‌الهی، آ.، ۱۴۰۱. برآورد فرونشست سطح زمین در بخشی از دشت قروه با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری. نهمین همایش ملی انجمن ایرانی ژئومورفولوژی. ۱۰ اسفند، تهران.

دشت قروه از نظر اقلیمی در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک واقع شده و به دلیل میانگین بارش اندک و عدم دسترسی به منابع آب سطحی، وابستگی زیادی به منابع آب زیرزمینی دارد. در واقع، منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه، منابع آب زیرزمینی است. در پژوهش حاضر، به منظور تعیین و شناسایی مناطق مستعد فرونشست در آبخوان دشت قروه، از روش GARDLIF-SD با استفاده از نه پارامتر مؤثر شامل: افت سطح ایستابی، تغذیه خالص، کاربری اراضی، محیط آبخوان، مقادیر تخلیه از آبخوان، ضخامت آبخوان، شیب، فاصله از رودخانه و فاصله از گسل استفاده شد. نتایج حاصل از این روش نشان داد که ۶۱/۵۸ درصد از مساحت دشت قروه دارای آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد نسبت به پدیده فرونشست است. براساس تحلیل‌های انجام‌شده بر روی تصاویر ماهواره‌ای، میزان فرونشست در این دشت طی دوره زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ در بازه‌ای بین ۳ تا ۱۵۰ میلی‌متر برآورد شد. همچنین، مقادیر فرونشست در بازه بلندمدت‌تر (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳) به میزان ۲۰۰ تا ۱۰۴۳ میلی‌متر گزارش شده است که رقم قابل توجهی محسوب می‌شود و در صورت تداوم می‌تواند منجر به تخریب تأسیسات، بناها، آب‌بندهای تغذیه مصنوعی، و اراضی کشاورزی شده و خسارات جبران‌ناپذیری به منطقه وارد نماید. تبدیل دشت قروه به یکی از دشت‌های ممنوعه کشور و منفی شدن بیلان منابع آب در این منطقه نیز گواهی بر بحرانی بودن وضعیت منابع آب زیرزمینی آن است. بازدیدهای میدانی نیز صحت نقشه پهنه‌بندی حاصل از روش پیشنهادی را تأیید نموده‌اند؛ به طوری که شکاف‌های مشاهده‌شده در آب‌بندها و نشست پیزومترها، بروز پدیده فرونشست را اثبات می‌کنند.

به طور کلی، مطابق با نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و روش GARDLIF-SD، بیشترین میزان فرونشست در مناطق شرقی، جنوبی و غربی دشت و نیز در اطراف پیزومترهای قروه، سریش‌آباد و آب‌بند محدوده ویهچ مشاهده شده است. بررسی‌ها نشان داد که بیشترین میزان فرونشست، منطبق بر اراضی کشاورزی آبی دشت قروه است. بنابراین، می‌توان عامل اصلی بروز پدیده فرونشست در این دشت را توسعه اراضی کشاورزی آبی و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی

- خلیفی، پ.، ندیری، ع.، نوین پور، ا.ع.، قره‌خانی، م.، ۱۴۰۰. ارائه چهارچوب عملی برای تعیین پتانسیل فرونشست زمین (مطالعه موردی: دشت اردبیل). نشریه دانش آب و خاک، ۳۱ (۴)، ۱۱-۲۳.
- داداشی، ث.، صادق فام، س.، ندیری، ع.، محبی، ی.، ۱۳۹۹. تحلیل آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت مرند با استفاده از روش ALPRIFT بر اثر بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی. مهندسی عمران شریف، ۲۶ (۱)، ۶۹-۸۵.
- رهنما، ح.، میراثی، س.، ۱۳۹۵. تحلیل و ارزیابی پارامترهای موثر بر فرونشست زمین. مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، ۱۶ (۱)، ۴۵-۵۳.
- شایان، س.، یمانی، م.، یادگاری، م.، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان. هیدروژئومورفولوژی، ۹، ۱۳۹-۱۵۸.
- شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۳۹۷. گزارش مطالعات منابع آب دشت‌های قروه-دهگلان.
- شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۳۹۷. گزارش زمین‌شناسی دشت‌های قروه-دهگلان.
- عمادالدین، س.، قاسمی، م.، قریشی، د.، ۱۴۰۲. بررسی فرونشست زمین به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل‌سنجی راداری در دشت فسا. مهندسی جغرافیایی سرزمین، ۷ (۴)، ۷۶۷-۷۷۸.
- عابدینی، م.، آقایی، ل.، اصغری سراسکانرود، ص.، ۱۴۰۱. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP (مطالعه موردی: دشت اردبیل). جغرافیا و مخاطرات طبیعی، ۱۱ (۴۴)، ۴۳-۶۸.
- فرزین کیا، ر.، امیراحمدی، ا.، زنگنه اسدی، م.، زندی، ر.، ۱۴۰۰. پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت جوی با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای-فازی. فصلنامه علمی فضای جغرافیایی، ۷۶ (۲۱)، ۵۱-۷۱.
- فیجانی، ا.، زارعی، پ.، ۱۴۰۳. ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین در آبخوان هومند-آسرد با استفاده از روش‌های سنجش از دور و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی. هیدروژئولوژی، ۹ (۱)، ۱-۱۵.
- گنجائیان، ح.، اسدی، م.، منبری، ف.، ابراهیمی، ع.، ۱۴۰۱. تحلیل وضعیت فرونشست محدوده شهری همدان با استفاده از تصاویر راداری و ماهواره‌ای. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۴۴ (۱۱)، ۲۲۱-۲۳۶.
- نجفی ایگدیر، ا.، چوبین، ب.، شیرانی، ک.، ۱۴۰۳. برآورد فرونشست دشت سلماس با استفاده از دستورالعمل تداخل-سنجی تفاضلی راداری با دریچه مصنوعی. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۱۱)، ۹۸-۱۱۳.
- لشکری پور، غ. ر.، غفوری، م.، رستمی بارانی، ح.، ۱۳۸۷. بررسی علل تشکیل شکافها و فرونشست زمین در غرب دشت کاشمر. مطالعات زمین‌شناسی، ۱ (۱)، ۹۵-۱۱۱.
- مقیم، ه.، محمدزاده، آ.، عباس‌نوین پور، ا.، امینی، س.، ۱۴۰۱. ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی بر کیفیت منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قروه، استان کردستان). یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، ۱۶ (۳۱)، ۳۱-۱۳.
- محمدخان، ش.، گنجائیان، ح.، گروسی، ل.، زنگنه تبار، ز.، ۱۳۹۸. ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ (محدوده مورد مطالعه: دشت قروه). فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۲۸ (۱۱۲): ۲۲۹-۲۱۹.
- نادری، ک.، ندیری، ع.، اصغری مقدم، ا.، کرد، م.، ۱۳۹۷. روشی جدید برای شناسایی و تعیین مناطق در معرض خطر فرونشست (مطالعه موردی: آبخوان دشت سلماس). اکوهیدرولوژی، ۵ (۱)، ۸۵-۹۷.

Reference

Bouwer, H., 1993. Groundwater Hydrology. translated by: Lotfi-Sadigh A. 13. Tabriz: Sahand University of Technology Press (In Persian).

Chatrsimab, Z., Alesheikh, A., Vosoghi, B., Behzadi, S., Modiri, M., 2020. Land Subsidence Modelling Using Particle Swarm Optimization Algorithm and Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar. *ECOPERSIA*, 8(2): 77-87.

Elci, A., Meisina, C., Guardiola-Albert, C., Tomas, R., 2023. Groundwater Flow Modeling for Investigation of Exploitation Induced Land Subsidence. Conference: 50. Worldwide Congress of the International Association of Hydrogeologists (IAH) At: Cape Town, South Africa.

Ghasemi, A., Bahmani, O., Akhavan, S., Pourghasemi, H.R., 2023. Investigation of land-subsidence phenomenon and aquifer vulnerability using machine models and GIS technique. *Natural Hazards*, 118: 1645–1671.

Park, I., Lee, J., Lee, S., 2014. Ensemble of ground subsidence hazard maps using fuzzy logic. *Center of Eur J Geoscience*, 6(2): 207–218.

Scanlon, B., Healy, R., Cook, P., 2002. Choosing Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge. *Journal of Hydrology*, 10(1): 18-39.