



## شناسایی مناطق مستعد فرونشست زمین دشت خوی با چهار چوب GARDLIF

فیاض اخوت<sup>۱</sup>، اسفندیار عباس نوین پور<sup>۲</sup>، معصومه آهنگری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، زمین شناسی گرایش آب شناسی، دانشگاه ارومیه، ایران. Email: fayazokhovat720@gmail.com

<sup>۲</sup>استادیار گروه زمین شناسی، دانشگاه ارومیه، ایران. Email: e.abbasnovinpour@urmia.ac.ir

<sup>۳</sup>استادیار، گروه زمین شناسی، دانشگاه ارومیه، ایران. Email: m.ahangari@urmia.ac.ir

### چکیده

برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی یکی از عوامل کلیدی به‌وجود آمدن فرونشست است که بسیاری از مناطق شهری و کشاورزی در سراسر جهان را تحت تأثیر قرار داده است. دشت خوی در شمال غرب ایران قرار دارد و یکی از زیرحوضه‌های آبریز ارس می‌باشد. در این پژوهش به‌منظور شناسایی مناطق آسیب‌پذیر ناشی از فرونشست زمین در دشت خوی از چهارچوب GARDLIF استفاده شده است. چهارچوب GARDLIF از هفت پارامتر 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. در این روش، پس از تهیه لایه‌های رستری پارامترها و رتبه‌بندی آنها، نقشه آسیب‌پذیری فرونشست به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده حاکی از بیشترین امکان وقوع فرونشست مربوط به مناطق اطراف شهر فیروزق و بخش غربی و شمال آبخوان است. در شواهد میدانی نیز در محدوده شهر فیروزق فرونشست به صورت فروچاله‌ها و شکاف مشاهده شد. نتایج تحلیل حساسیت به روش حذف پارامتر از نقشه آسیب‌پذیری برای دشت خوی نشان داد که مؤثرترین پارامتر به ترتیب پمپاژ از آبخوان (D) و کاربری اراضی (L) به ترتیب با میانگین تغییرات ۱/۷۲ و ۱/۶۱ و کم اثرترین پارامتر فاصله از گسل با میانگین تغییرات ۰/۰۸ می‌باشد.

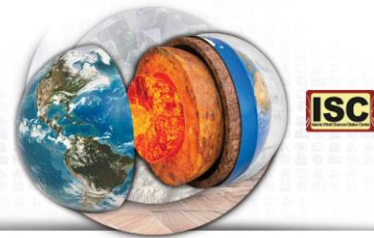
### واژه‌های کلیدی

چهارچوب GARDLIF، دشت خوی، فرونشست.



## ۱. مقاله

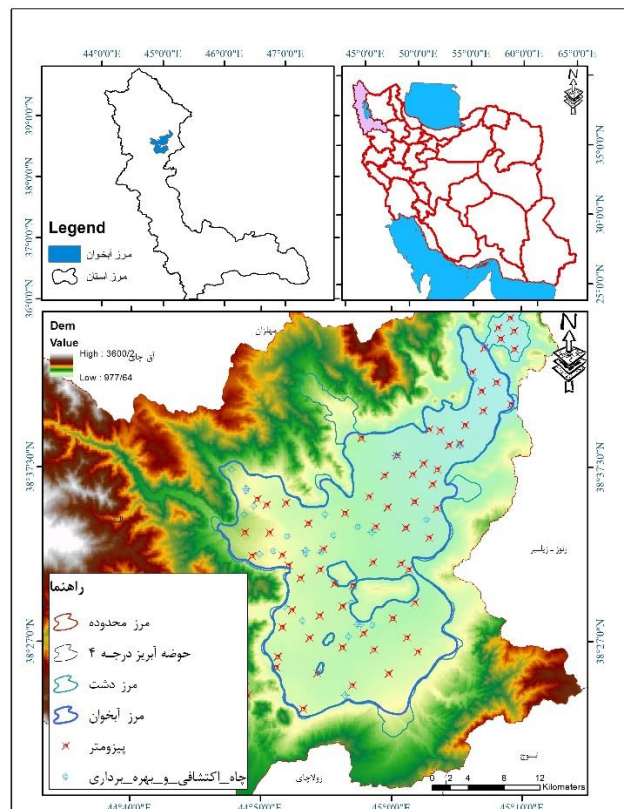
فرونشست زمین یکی از پدیده‌هایی است که در ایران بسیار زیاد در دهه‌های اخیر در دشت‌های حاصلخیز دیده می‌شود که اگر بدرستی مدیریت نشود خسارات جبران ناپذیری را به بار خواهد آورد [3]. طبق تحقیقات انجام شده نرخ (میزان) فرونشست در اثر عوامل طبیعی به میزان یک سانتی‌متر در سال اما ناشی از عوامل انسانی ۵۰ سانتی‌متر در سال است [4]. این پدیده در بسیاری از نقاط جهان و دشت‌های ایران باعث شده جان انسان‌ها به خطر بی‌افتد و همچنین خسارات سنگین مالی را به همراه داشته باشد [5]. همچنین باعث تغییر شکل توپوگرافی، آسیب به زیرساخت‌ها و امکانات شهری، شدت سیلاب، کاهش ظرفیت سفره‌های آب زیرزمینی برای ذخیره می‌شود [6]. بنابراین شناسایی عوامل مؤثر بر فرونشست زمین با استفاده از مدل‌سازی و نقشه‌برداری برای جلوگیری از این خسارات امر بسیار مهمی است [7]. مختلفی در این زمینه انجام شده است که به تعدادی از آنها اشاره می‌گردد. نجفی و همکاران (۲۰۲۰) پهنه‌بندی فرونشست زمین دشت قره بلاغ در استان فارس را با استفاده از سنجش از دور، GIS و مدل‌های احتمال (EBF) و (BT) در پلتفرم Engine گوگل ارث (GEE) انجام دادند. با استفاده از سه روش CSR (مرکز تحقیقات فضایی در دانشگاه تگزاس)، JRL (آزمایشگاه رانش جت) و GFZ (مرکز تحقیقات آلمانی علوم زمین) بیشترین تغییرات در عمق آب به ترتیب ۱۷/۷۷-، ۱۵/۰۹- و ۱۶/۵۵- بدست آوردند. روابط بین فرونشست زمین و ده عامل مؤثر را با الگوریتم‌های معرفی شده نشان داد که در مرحله اعتبارسنجی با منحنی ROC دقت EBF ۹۳/۲ درصد و BT ۹۹/۸ درصد داشتند. آنها بیان کردند که نقشه‌های حساسیت فرونشست زمین تهیه شده با مدل‌ها می‌تواند به مدیران آب-های زیرزمینی منطقه کمک نماید تا از تلفات جانی و خسارات مالی جلوگیری نماید [8]. محبی تفرشی و همکاران (۲۰۲۱) خطر فرونشست زمین آبخوان ورامین را با استفاده از منطق فازی در محیط ArcGIS مورد ارزیابی قرار دادند. آنها از ۱۴ عامل مؤثر بر فرونشست شامل ضخامت آبخوان، عمق سنگ بستر، میزان آبدهی چاه‌های پمپاژ، قابلیت انتقال، بازده ویژه، کاهش آب زیرزمینی در ۲۰ سال، نوع خاک، شیب، ارتفاع، فرسایش، بارندگی سالانه، فاصله از گسل، واحدهای سنگ شناسی و کاربری اراضی استفاده کردند. نتایج بررسی مدل‌ها نشان داد که مدل همپوشانی فازی گاما ۰/۸ با بیشترین فراوانی دارای رتبه یک و مدل همپوشانی SUM با بیشترین فراوانی رتبه ۱۶ در بین سایر مدل‌های فازی را داشته و به ترتیب به عنوان سازگارترین و بدترین مدل سازگار مشاهده شده معرفی شد [9]. فرزین‌کیا و همکاران (۱۴۰۰) پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت جوبین را با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای- فازی با لایه‌های اطلاعاتی شامل لیتولوژی، خاک، بارش، سطح پیرومتری، ارتفاع، تکتونیک، تراکم چاه‌ها، کاربری اراضی، شیب، ژئومورفولوژی، آبراهه، پوشش گیاهی انجام دادند. آنها در نرم افزار Supper Decesion مقایسات زوجی معیارها و وزن‌دهی را انجام دادند و سپس لایه‌های مربوط به هر کدام از عوامل را در محیط ArcGIS آماده‌سازی نمودند. در نهایت با تلفیق وزنی لایه‌ها و کلاس‌بندی نقشه فرونشست زمین با روش‌های ANP & FUZZY تهیه کردند. نتایج نشان داد که حدود ۵۶ درصد از منطقه قسمت‌های مرکزی دشت جوبین دارای خطر زیاد تا خیلی زیاد بوده و همچنین تراکم بالای چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و افت بالای آب زیرزمینی بدلیل برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی دشت جزو عوامل تعیین کننده در فرونشست در نواحی مرکزی می‌باشند [1]. در این پژوهش سعی می‌گردد با استفاده از عوامل مؤثر زمین‌شناسی و انسانی و با استفاده از روش جامع GARDLIF و ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی نقشه آسیب‌پذیری فرونشست زمین در دشت خوی تهیه گردد. دشت خوی از مناطق فعال کشاورزی، دامداری و صنعت است و در آن حدود ۱۳۵۵ حلقه چاه برای استخراج از منابع آب زیرزمینی وجود دارد. براساس مطالعات اولیه توسط سازمان‌های زیربط که در دشت خوی انجام دادند نرخ فرونشست زمین در این منطقه سالانه ۳ تا ۷ سانتی‌متر بیان کرده‌اند و بیشترین تأثیرات آن ناشی از عوامل انسانی از جمله برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و فرسایش خاک بیان کردند. همچنین مطالعات میدانی و مشاهده شکاف‌های بوجود آمده و ترک‌های ایجاد شده باعث گردید تا در این پژوهش به شناسایی مناطق مستعد فرونشست زمین در دشت خوی با استفاده از چهارچوب GARDLIF پرداخته شود و مقایسه میزان فرونشست برآورد شده با میزان شواهد میدانی رخ داده در طول سالهای گذشته قرار گرفت. در نهایت برای تعیین اثرگذارترین پارامتر روی میزان فرونشست در محدوده دشت خوی از تحلیل حساسیت استفاده شد.



## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲ منطقه مورد مطالعه

دشت خوی در استان آذربایجان غربی و در بین ۱۵' و ۴۴' تا ۱۲' و ۴۵' طول شرقی و ۱۹' و ۳۸' تا ۵۱' و ۳۸' عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). مساحت دشت ۶۶۰/۵۷ کیلومتر مربع می‌باشد. محدوده شامل رودخانه‌های قطورچای، قازان چای، هندوان چای و رودلند است. خوی و فیروق مهمترین شهرهای واقع در این محدوده هستند. رودخانه قطورچای که مهمترین رودخانه محدوده است، در نزدیکی شهر خوی (جنوب خوی) به رودخانه الوندچای که از ارتفاعات ۲۶۰۰ الی ۲۷۰۰ متری کوه‌های نظربیک و فوج با نام رود پیراقلو سرچشمه می‌گیرد و جهت جریان آن از شمال غربی به جنوب شرقی می‌باشد، اتصال پیدا می‌کند. قسمتهای پایین دست آبخوان تحت فشار دشت خوی از مخروط افکنه قطورچای، بخش شرقی و مرکز دشت (شرق و شمال شرق شهرستان خوی) از مخروط افکنه الوندچای تشکیل شده است. به علت اینکه تپه‌های مرکز دشت (کوه آغچه قشلاق) ارتباط مخروط افکنه قطورچای را با نیمه شمالی دشت خوی قطع کرده است، تغذیه سفره‌های تحت فشار شمال شرق و شرق شهرستان خوی تنها توسط مخروط افکنه الوندچای تأمین می‌شود. مساحت کلی محدوده خوی ۶۶۰/۵۷ کیلومتر مربع است که از این مقدار ۵۹۰/۶۳ کیلومترمربع آن را آبخوان آبرفتی تشکیل می‌دهد. بیشترین دما و کمترین دمای محدوده در ایستگاه مظفرآباد به ترتیب در ماه‌های تیر و دی به میزان ۲۴/۲ و ۱/۱- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میزان بارندگی سالانه در این محدوده در سطح دشت ۲۷۶/۷ میلی‌متر و در ارتفاعات ۳۸۱/۵ میلی‌متر می‌باشد و بیشترین بارندگی‌ها در ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت رخ می‌دهد. در این آبخوان ۲۷ حلقه چاه اکتشافی و ۶۹ حلقه چاه مشاهداتی حفر شده است که موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت آبخوان دشت خوی در ایران و استان آذربایجان غربی





## ۳.۲ روش کار

### ۱.۳.۲ چهارچوب GARDLIF

در یک آبخوان فاکتورهای مختلفی می‌تواند بر فرورنشست زمین تأثیر بگذارد. به‌طور کلی، فرورنشست متأثر از فعالیت‌های انسانی و پارامترهای زمین‌شناسی است. این مدل 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. ابتدا اطلاعات مربوط به این پارامترها به‌صورت تلفیقی تجزیه و تحلیل شده و سپس در محیط ArcGIS پردازش می‌شوند. در این مدل به هر پارامتر یک رتبه و یک وزن بر حسب اهمیت پارامتر اختصاص داده می‌شود. رتبه پارامترهای GARDLIF بین یک تا ۱۰ متغیر است، به‌طوری‌که یک به معنای کمترین و ۱۰ بیشترین خطر برای فرورنشست زمین در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اهمیت نسبی هر پارامتر نسبت به پارامتر دیگر، وزن‌های یک تا پنج برای هفت پارامتر مدل GARDLIF در نظر گرفته شده است، مطابق جدول ۱ مؤثرترین پارامتر در آسیب‌پذیری فرورنشست، وزن پنج و به کم‌ترین اثر آن وزن یک اختصاص یافت. شاخص مدل GARDLIF براساس وزن‌دهی به مجموع پارامترها محاسبه می‌شود (رابطه ۱).

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

در رابطه فوق GI شاخص آسیب‌پذیری، حروف بزرگ نشان‌دهنده پارامترهای مدل، I رتبه و W وزنی است که به هر پارامتر اختصاص داده می‌شود. با محاسبه شاخص GI، نواحی مستعد فرورنشست آبخوان قابل تشخیص می‌باشد. هرچه این شاخص بزرگ‌تر باشد، بیان می‌کند که خطر فرورنشست احتمالی بیشتر است. قابل ذکر است که شاخص بدست آمده فقط یک ارزیابی نسبی را ارائه می‌کند و نواحی به‌شدت محتمل فرورنشست را از مناطق کمتر متحمل جدا می‌سازد و قابلیت ارزیابی مطلق را ندارد.

جدول ۱. وزن‌های اختصاص یافته به پارامترهای مدل [2] GARDLIF

| وزن نسبی | پارامترها           |
|----------|---------------------|
| ۵        | افت سطح آب زیرزمینی |
| ۴        | محیط آبخوان         |
| ۲        | مقدار تغذیه خالص    |
| ۴        | مقدار تخلیه آبخوان  |
| ۵        | کاربری اراضی        |
| ۳        | ضخامت آبخوان        |
| ۱        | فاصله از گسل        |

جدول ۲. بازه‌ها و رتبه‌های مربوط به پارامترهای مختلف در مدل [2] GARDLIF

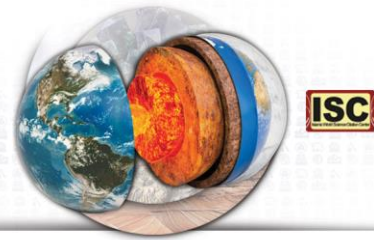
| تخلیه از آبخوان<br>(سانتی‌متر در سال) |      | تغذیه خالص<br>(سانتی‌متر در سال) |      | محیط آبخوان                       |        | افت سطح آب زیرزمینی (متر)<br>در سال |      |
|---------------------------------------|------|----------------------------------|------|-----------------------------------|--------|-------------------------------------|------|
| محدوده                                | رتبه | محدوده                           | رتبه | محدوده                            | رتبه   | محدوده                              | رتبه |
| ۰/۰۰۰۴ - ۰                            | ۱    | ۴ - ۰                            | ۱۰   | رسوبات آبرفتی دانه‌درشت           | ۶ - ۳  | ۰/۰۲ - ۰                            | ۱    |
| ۰/۰۰۵ - ۰/۰۰۰۴                        | ۲    | ۹ - ۴                            | ۹    | رس و سیلت                         | ۱۰ - ۹ | ۰/۰۵ - ۰/۰۲                         | ۲    |
| ۰/۰۱ - ۰/۰۰۵                          | ۳    | ۱۴ - ۹                           | ۷    | ماسه با اندکی سیلت و رس           | ۸ - ۶  | ۰/۱ - ۰/۰۵                          | ۳    |
| ۰/۵ - ۰/۰۱                            | ۴    | ۱۹ - ۱۴                          | ۵    | ماسه‌سنگ و کنگلومرا               | ۵ - ۳  | ۰/۳ - ۰/۱                           | ۴    |
| ۱ - ۰/۵                               | ۵    | ۲۴ - ۱۹                          | ۳    | سنگ آهک کارستی                    | ۹ - ۷  | ۰/۶ - ۰/۳                           | ۵    |
| ۵ - ۱                                 | ۶    | >۲۴                              | ۱    | سنگ آذرین با دگرگونی              | ۴ - ۱  | ۰/۹ - ۰/۶                           | ۶    |
| ۲۰ - ۵                                | ۷    |                                  |      | ماسه و گراول با سیلت و رس زیاد    | ۹ - ۷  | ۱/۲ - ۰/۹                           | ۷    |
| ۴۰ - ۲۰                               | ۸    |                                  |      | خاک‌های آلی (پیت و مواد تورب‌دار) | ۱۰ - ۸ | ۱/۵ - ۱/۲                           | ۸    |
| ۶۵ - ۴۰                               | ۹    |                                  |      |                                   |        | ۲ - ۱/۵                             | ۹    |
| >۶۵                                   | ۱۰   |                                  |      |                                   |        | >۲                                  | ۱۰   |



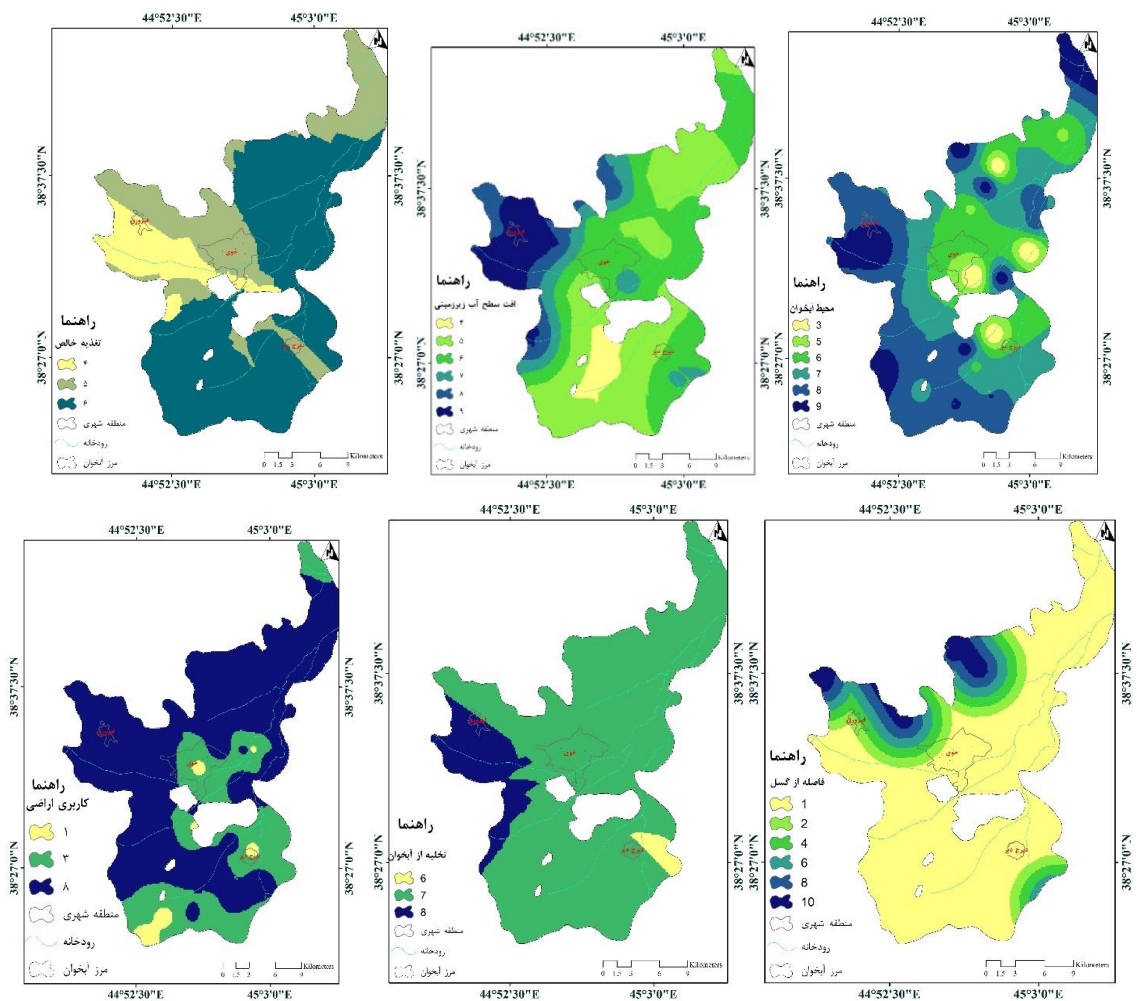
| ضخامت آبخوان (متر) |      | کاربری اراضی  |      | فاصله از گسل (کیلومتر) |      |
|--------------------|------|---|------|------------------------|------|
| محدوده             | رتبه | محدوده  | رتبه | محدوده                 | رتبه |
| >25                | 1    | مناطق آبیاری (کشت محصولات سالانه، مزارع برنج و چغندرقد)               | 10-8 | <1                     | 10   |
| 55-25              | 2    | کشت محصولات دائمی (باغها، مزارع انگور)                                | 8-6  | 2-1                    | 8    |
| 90-55              | 3    | مناطق کشاورزی دیم   | 3-1  | 3-2                    | 6    |
| 130-90             | 4    | مراعات و مناطق جنگلی  | 3-1  | 4-3                    | 4    |
| 175-130            | 5    | زمینهای بایر و مناطق طبیعی  | 3-1  | 5-4                    | 2    |
| 225-175            | 6    | مناطق شهری، محل احداث سد، فرودگاهها، بنادر و مناطق صنعتی و تجاری فعال | 8-4  | >5                     | 1    |
| 280-225            | 7    | میدان نفتی و محل استخراج نفت و گاز                                    | 10-8 |                        |      |
| 340-280            | 8    | معدن کاری و استخراج مواد معدنی مانند زغال سنگ                         | 9-5  |                        |      |
| 405-340            | 9    |   |      |                        |      |
| >405               | 10   |   |      |                        |      |

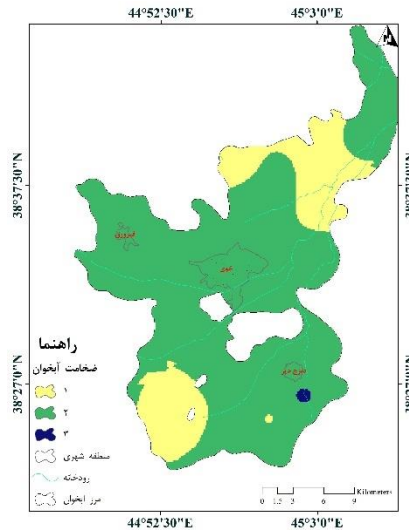
### ۳. نتایج

برای تهیه نقشه افت سطح آب آبخوان دشت خوی، آمار سطح آب زیرزمینی ۶۶ حلقه چاه مشاهده‌ای (شکل ۱) در دوره ۱۲ ساله (۱۴۰۰-۱۳۸۸) از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی تهیه شد. مقدار افت متوسط سالانه در هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای طی این مدت محاسبه شد. سپس، برای تبدیل داده‌های افت نقطه‌ای در چاه‌های یاد شده به سطح، از روش درون‌یابی استفاده شد. برای انجام درون‌یابی، روش‌های معکوس وزنی فاصله (IDW)، کریجینگ معمولی و کریجینگ ساده به کار گرفته شد. در نهایت روش کریجینگ معمولی که خطای محاسباتی کمتری نسبت به سایر روش‌ها را داشت برای درون‌یابی افت متوسط سالانه سطح آب زیرزمینی انتخاب شد. به این ترتیب نقشه هم‌ارزش افت متوسط سالانه سطح آب زیرزمینی تهیه شد. در مرحله بعد، مطابق جدول ۲ کلاس‌بندی و رتبه‌دهی انجام شد و نقشه رتبه‌بندی افت متوسط سالانه آب زیرزمینی به دست آمد (شکل ۵). در این پژوهش برای محاسبه مقدار تغذیه آبخوان، از روش تغییرات حجم آب زیرزمینی آبخوان استفاده شد. با توجه به اینکه از آبخوان دشت خوی پمپاژ انجام می‌گیرد، محاسبه میزان تغذیه خالص مطابق فرمول (۱۶) انجام گردید. تغییرات سالانه سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای منطقه برای سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ (اختلاف سطح آب مهر ۱۳۹۹ و مهر ۱۴۰۰) محاسبه شد. با ضرب این تغییرات در ضریب ذخیره آبخوان ( پنج درصد)، تغییرات حجم مخزن به دست می‌آید. برای چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه شبکه‌بندی تبسن رسم شد و مجموع پمپاژ از چاه‌های واقع در هر پلی‌گون محاسبه شد (آمار چاه‌های پمپاژ از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی اخذ شده است). با استفاده از روش کریجینگ ساده (بدلیل خطای محاسباتی کمتر نسبت به سایر روش‌ها) درون‌یابی انجام گردید. سپس، با استفاده از جدول (۲) کلاس‌بندی و رتبه‌بندی انجام و لایه تغذیه خالص و مقدار پمپاژ برای چهارچوب تهیه شد (شکل ۵). برای تهیه لایه محیط آبخوان دشت خوی از لاگ چاه‌های اکتشافی منطقه استفاده شده است. برحسب نسبت جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان در هر یک از چاه‌ها، مطابق معیارهای چهارچوب GARDLIF و با توجه به جدول شماره (۲) یک ارزش عددی بین سه تا نه به هر چاه اختصاص داده شد. سپس این اطلاعات وارد محیط Excel شد و براساس مختصات جغرافیایی مربوط به آن، در محیط نرم‌افزار ArcGIS به یک لایه نقطه‌ای تبدیل گردید و سپس با استفاده از روش معکوس وزنی فاصله درون‌یابی شد و به کل منطقه تعمیم داده شد و به این ترتیب نقشه لایه محیط آبخوان دشت خوی تهیه شد. مطابق شکل (۵) مواد تشکیل دهنده آبخوان دشت خوی در بخش‌های شرقی و شمال غربی رتبه کمتری داشته و درشت دانه هستند. بخش‌های مرکزی و جنوبی قطر ذرات کاهش، لایه‌های رس و سیلت به صورت بین لایه‌ای مابین طبقات دیگر سبب تشکیل آبخوان موجود در منطقه شده است. در ارتباط با ضخامت آبخوان نتایج بدست آمده براساس معیار چهارچوب GARDLIF نشان می‌دهد که آبخوان خوی بیشتر در بخش‌های غرب و جنوبی شرقی و جنوب غربی در حوزه آبریز آند بین ۳۰ تا ۵۰ متر و در بخشی از جنوبی و شمال آبخوان ضخامت آبرفت به ۲۰ تا ۲۵ متر می‌رسد. شکل (۵-۱) نقشه رتبه‌بندی شده ضخامت آبرفت آبخوان خوی که از روی لاگ‌های حفاری



محاسبه شده است را نشان می‌دهد. برای تهیه لایه فاصله از گسل‌های منطقه، موقعیت گسل‌های موجود را از روی نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده است، به دست آمد و در محیط ArcGIS استفاده از فاصله اقلیدسی نقشه فاصله از گسل تهیه و براساس معیار چهارچوب GARDLIF رتبه‌دهی انجام شد. در مطالعه منطقه مشاهده شد که وجود سفره تحت فشار و چاه‌های آرتزین در جنوب غربی شهرستان خوی با آبدهی خوب احتمالاً عامل آن گسل فیرورق است که لایه‌های نفوذناپذیر را در برابر لایه‌های نفوذپذیر قرار داده و بدین ترتیب حرکت آب زیرزمینی را سد نموده است (حاجی حسینلو، ۱۳۹۷). همچنین وجود چاه‌های عمیق دیگر از نوع آرتزین در محدوده شرق و شمال شرق یعنی روستاهای پکاچیک، سدابدال، گوهران، سعیدآباد، شوراب و بولاماج هستند که از قسمت غرب آبخوان تغذیه می‌شوند. اگرچه رودخانه قطورچای در محدوده نیز می‌تواند مؤثر باشد. همانطور که در نقشه (۵-۵) نیز مشاهده می‌گردد بخش غرب و جنوب شرقی به گسل‌های منطقه نزدیک است و بیشترین رتبه بندی را داشته است. برای تهیه نقشه کاربری اراضی از نقشه کاربری محدوده خوی استفاده شد و رتبه‌دهی انجام شد.

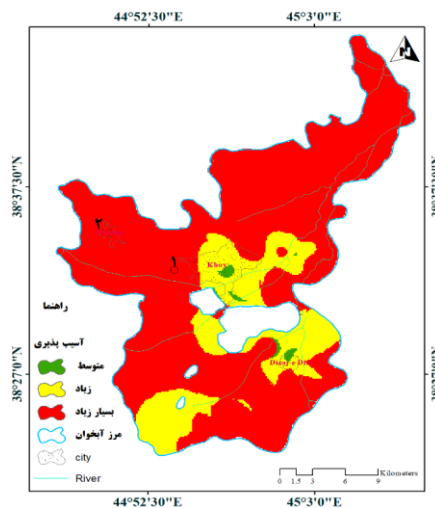




شکل ۵. رتبه‌بندی پارامترهای الف) افت سطح آب زیرزمینی، ب) محیط آبخوان، ج) تغذیه خالص، د) تخلیه از آبخوان، ه) فاصله از گسل، و) کاربری اراضی، ی) ضخامت آبخوان در آبخوان دشت خوی

### ۱.۳ اجرای مدل و محاسبه اندیس آسیب پذیری GARDLIF در آبخوان خوی

در این مرحله چهارچوب GARDLIF با توجه به وزن‌های ارائه شده در جدول ۱ اجرا شد و تلفیق لایه‌های با استفاده از تابع هم‌پوشانی وزنی از طریق منوی Raster calculator در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام شد و نقشه آسیب‌پذیری فرونشست منطقه تهیه شد. این شاخص برای آبخوان دشت خوی بین ۹۱ تا ۱۶۷ به دست آمد. براساس شاخص به دست آمده آبخوان از نظر آسیب‌پذیری فرونشست به سه ناحیه با آسیب‌پذیری متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم گردید (شکل ۷). مناطق با آسیب‌پذیری بسیار زیاد دارای بیشترین مساحت آبخوان را به خود اختصاص می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد در اطراف شهر خوی (مرکز دشت خوی) امکان وقوع پدیده فرونشست بسیار زیاد است. نتایج مطالعات انجام شده در دشت خوی نشان داده است که در اطراف پیژومترهای فیرورق، سراب، سیوان و ینگجه منطقه پدیده فرونشست خیلی زیاد است که در تصویر شماره (۸) برای پیژومتر واقع در دشت خوی مشاهده می‌شود. حاجی حسینلو در سال ۱۳۹۷ نیز در بررسی افت سطح آب زیرزمینی در دشت خوی نشان داد که میزان افت سطح آب زیرزمینی در فیرورق طی ۱۲ سال گذشته ۵ متر است.



شکل ۹. نقشه آسیب‌پذیری ذاتی فرونشست در آبخوان دشت خوی با استفاده از مدل GARDLIF





شکل ۸- شواهد میدانی پدیده فرورانشست در پیزومتر و وجود فروچاله‌ها در زمین‌های دشت خوی

### ۲.۳ تحلیل حساسیت چهارچوب GARDLIF

اثر داده‌های ورودی چهارچوب در نقشه نهایی به‌دست آمده از هم‌پوشانی به فاکتورهای زیادی مانند نوع هم‌پوشانی انجام شده، مقدار وزن‌ها، تعداد پارامترها و همچنین عدم قطعیت وابسته به هر نقشه بستگی دارد (روسن، ۱۹۹۴). در این پژوهش میزان تأثیرپذیری هر یک از پارامترهای GARDLIF برای ارزیابی آسیب‌پذیری فرورانشست آبخوان دشت سلماس با استفاده از تحلیل حساسیت حذف نقشه بررسی شد. ابتدا پارامترهای رتبه‌بندی شده GARDLIF از نظر همبستگی ارزیابی شدند چرا که عدم همبستگی بین پارامترهای چهارچوب احتمال خطا را کاهش می‌دهد (بابکر و همکاران، ۲۰۰۵). در این مرحله، با استفاده از نرم‌افزار SPSS همبستگی بین پارامترها به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که بین پارامترها همبستگی وجود ندارد لذا احتمال خطا در نقشه خروجی چهارچوب را کاهش می‌دهد. در تحلیل حساسیت حذف نقشه، در هر مرحله یکی از پارامترهای چهارچوب حذف شده و شاخص آسیب‌پذیری برای کدام به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. در محیط GIS میزان حساسیت (%S) برای کمترین حد، بیشترین حد، میانگین و انحراف معیار با استفاده از مقایسه دو نقشه با حذف و بدون حذف پارامتر بدست آمد. نتایج تحلیل حساسیت نقشه چهارچوب GARDLIF برای آبخوان دشت خوی در جدول ۵ آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد بیشترین تغییر در شاخص GARDLIF با حذف پارامتر تخلیه از آبخوان (D) با میانگین تغییرات ۱/۷۲ اتفاق می‌افتد. این موضوع به علت وسعت زیاد در تخلیه آبخوان با رتبه بالا بوده است. همچنین بعد از این پارامتر لایه‌ی کاربری اراضی (L) با میانگین تغییرات ۱/۶۱ بیشترین تغییر در شاخص GARDLIF با حذف پارامتر مشاهده گردید. این موضوع علاوه بر وزن زیاد این پارامتر، بیشتر سطح منطقه کشاورزی بوده است. این امر نیز در شواهد میدانی مشاهده شده که در مناطق کشاورزی به علت افزایش برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی باعث پدیده فرورانشست و پدیدار شدن شکاف در ساختمان‌ها و زمین‌ها کشاورزی شده است. کم اثرترین پارامتر در آسیب‌پذیری فرورانشست، پارامتر F با میانگین شاخص ۰/۰۸ درصد است.

جدول ۴. ماتریس همبستگی پارامترهای مدل GARDLIF

| لایه‌ها | G     | A     | R | D | L | I | F |
|---------|-------|-------|---|---|---|---|---|
| G       | 1     |       |   |   |   |   |   |
| A       | 0.316 | 1     |   |   |   |   |   |
| R       | 0.303 | 0.163 | 1 |   |   |   |   |



|   |        |        |        |        |       |        |   |
|---|--------|--------|--------|--------|-------|--------|---|
| D | 0.219  | 0.175  | 0.017  | 1      |       |        |   |
| L | 0.209  | -0.054 | -0.118 | 0.011  | 1     |        |   |
| I | 0.534  | 0.281  | 0.327  | 0.062  | 0.128 | 1      |   |
| F | -0.592 | -0.185 | -0.169 | -0.047 | -0.27 | -0.569 | 1 |

جدول ۵. نتایج آماری تحلیل حساسیت حذف نقشه

| Std dev | میزان حساسیت (S) |      |      | پارامتر حذف شده |
|---------|------------------|------|------|-----------------|
|         | Mean             | Min  | Max  |                 |
| 5.1     | 1.07             | 2.19 | 1.61 | G               |
| 0.67    | 1.19             | 1.28 | 0.81 | A               |
| 2.09    | 0.65             | 0.18 | 0.98 | R               |
| 3.32    | 1.72             | 1.64 | 0.58 | D               |
| 4.91    | 1.61             | 0    | 1.61 | L               |
| 2.38    | 1.22             | 1.28 | 2.08 | I               |
| 2.57    | 0.08             | 0.73 | 0.58 | F               |

#### ۴. نتیجه‌گیری و بحث

تحقیق حاضر برای تعیین و شناسایی مناطق فرورانشست در آبخوان دشت خوی از چهارچوب GARDLIF که توسط نادری و همکاران (۱۳۹۷) ارائه شد با هفت پارامتر عمق سطح ایستایی، تغذیه خالص، کاربری اراضی، محیط آبخوان، مقادیر تخلیه از آبخوان، ضخامت آبخوان و فاصله از گسل استفاده شد. برای مقایسه نتایج آن از شواهد میدانی که در دشت به صورت فروچاله و شکاف بوده استفاده گردید. مطابق مطالعات گذشته بیشترین فرورانشست در قسمت غرب دشت (محدوده فیوروق) گزارش کرده‌اند که با نتایج بدست آمده از اجرای چهارچوب GARDLIF مطابقت دارد. بررسی تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر در میزان فرورانشست در دشت خوی نشان داد که بین پارامترهای ورودی به چهارچوب GARDLIF همبستگی خاصی وجود ندارد و این عدم همبستگی احتمال خطا در نقشه خروجی چهارچوب را کاهش می‌دهد. همچنین تحلیل حساسیت نشان داد که مؤثرترین پارامترها در وقوع پدیده فرورانشست زمین به ترتیب پمپاژ از آبخوان (D)، کاربری اراضی (L)، ضخامت آبخوان (I) و محیط آبخوان (A) (جنس رسوبات آبخوان) هستند. از بین پارامترها، پارامتر فاصله از گسل (F) به دلیل رتبه کم آن در بیشتر قسمت‌های آبخوان، کمترین تغییر در شاخص آسیب‌پذیری دشت خوی اتفاق می‌افتد.

#### منابع

- [1] فرزین کیا ر، امیراحمدی ا، زنگنه‌اسدی م.ع، زندی ر. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی خطر فرورانشست زمین در دشت جوبین با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای- فازی. فصلنامه‌ی علمی فضای جغرافیایی، ۲۱(۷۴): ۵۱-۷۱.
- [2] نادری ک، ندیری ع، اصغری مقدم ا. و کرد م. ۱۳۹۷. روشی جدید برای شناسایی و تعیین مناطق در معرض خطر فرورانشست (مطالعه موردی: آبخوان دشت سلماس). مجله آکو هیدرولوژی، ۱۵(۱): ۸۵-۹۷.
- [3] Chatsrimab 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.
- [4] Kuehn F, Albiol D, Cooksley G, Duro J, Granda J, Haas S, et al. (2010). Detection of land subsidence in Semarang, Indonesia, using stable points network (SPN) technique. Environ Earth Sci. 60(5):909-21.



- [5] Hazbavi Z, Sadeghi SH. (2017). Watershed health characterization using reliability-resilience-vulnerability conceptual framework based on hydrological responses. Land Degrad Dev. 28(5):1528-37.
- [6] Bhattarai R, Alifu H, Maitiniyazi A, Kondoh A. (2017). Detection of land subsidence in Kathmandu Valley, Nepal, using DInSAR technique. Land. 6(2):39.
- [7] Fulton A. (2006). Land subsidence: What is it and why is it an important aspects of groundwater management? Sacramento: California Department of Water Resources.
- [8] Najafi Z, Pourghasemi H.R., Ghanbarian Gh, Shamsi S.R.F. (2020). Land-Subsidence susceptibility Zonation using remote sensing, GIS, and probability models in a Google Earth Engine platform. Environment Earth Sciences. 79(21):491.
- [9] Mohebbi Tafreshi Gh, Nakhaei M, Lak R. (2021). Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. Geo Journal, 86: 1203-1223.