

## روشی جدید برای شناسایی و تعیین مناطق در معرض خطر فرونشست (مطالعه موردی: آبخوان دشت سلماس)

کیوان نادری<sup>۱</sup>، عطاالله ندیری<sup>۲\*</sup>، اصغر اصغری مقدم<sup>۳</sup>، مهدی کرد<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲. دانشیار، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۳. استاد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۴. استادیار، دانشکده علوم، دانشگاه کردستان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۲۳؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۴/۰۲)

### چکیده

فرونشست زمین پدیده‌ای به وجود آمده از عوامل هیدرولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیکی است که در بیشتر دشت‌های ایران مشهود است. در این پژوهش، چارچوبی جامع (GARDLIF) برای شناسایی مناطق فرونشست احتمالی در یک آبخوان معرفی شده است. برای ارزیابی روش ارائه شده، آبخوان دشت سلماس انتخاب شد که با بحران فرونشست زمین مواجه است. پس از تهیه لایه‌های رستری پارامترهای GARDLIF و رتبه‌بندی آنها، مدل‌سازی آسیب‌پذیری فرونشست در آبخوان دشت سلماس انجام شد و نقشه آسیب‌پذیری فرونشست به دست آمد. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی کارایی زیاد روش جدید پیشنهادی را در پتانسیل یابی مناطق مختلف از نظر وقوع فرونشست زمین نشان می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده بیشترین امکان وقوع فرونشست مربوط به مناطق اطراف قره‌قشلاق (شمال شرق دشت سلماس) است که با نتایج مطالعات قبلی انجام شده مطابقت دارد. برای بررسی میزان تأثیرپذیری هر یک از پارامترهای مدل GARDLIF، تحلیل حساسیت حذف نقشه اجرا شد. بیشترین تغییر در شاخص آسیب‌پذیری با حذف پارامترهای پمپاژ (D) و کاربری اراضی (L) با میانگین تغییرات به ترتیب ۱/۶۲ و ۱/۵ درصد اتفاق می‌افتد. پارامترهای محیط آبخوان (G) و ضخامت آبخوان (I) نیز به علت رتبه‌های زیاد آنها در قسمت بزرگ آبخوان حساسیت و تغییرپذیری زیادی دارند. کم‌اثرترین پارامتر، فاصله از گسل (F) با میانگین شاخص تغییرپذیری ۰/۴ درصد است. با به‌کارگیری روش پیشنهادی در این تحقیق، می‌توان مناطق مستعدتر از نظر فرونشست زمین را شناسایی کرد تا با مدیریت صحیح از وقوع فرونشست زمین و تأثیرات مخرب آن جلوگیری شود.

**کلیدواژگان:** آبخوان، دشت سلماس، فرونشست زمین، GARDLIF.

## مقدمه

برنامه‌ریزی‌های مدیریتی آبخوان و جلوگیری از وقوع فرونشست و به حداقل رساندن تأثیرات آن کارکرد بسزایی داشته باشد.

دشت سلماس به‌عنوان بخشی از حوضه دریاچه ارومیه با مشکلات متعددی از جمله فرونشست زمین مواجه است. بحران فرونشست زمین در بسیاری از نقاط دشت سلماس به‌ویژه منطقه قره‌قشلاق مشکلات فراوانی را برای سازه‌های احداث‌شده ایجاد کرده است. براساس مطالعات قبلی انجام‌شده فرونشست زمین در این منطقه ۱۲ سانتی‌متر در سال است و شناسایی عوامل تشدیدکننده و کنترل آن نیاز به مطالعات دقیق دارد [۷ و ۸]. در این تحقیق روش جدیدی برای پیش‌بینی و مدل‌سازی مناطق فرونشست احتمالی معرفی شده است و برای ارزیابی بهتر نتایج، آبخوان دشت سلماس به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. با اعمال این مدل و اجرای روش‌های مدیریتی مناسب، این امکان وجود دارد که مناطق در معرض خطر فرونشست با دقت زیادی شناسایی و برنامه‌های لازم برای جلوگیری از وقوع این پدیده و به حداقل رساندن تأثیرات آن ایجاد شود. به‌علاوه چارچوب عملی پیشنهادی در دیگر آبخوان‌های کشورمان نیز قابل اجراست.

## مواد و روش‌ها

## معرفی مدل GARDLIF

در یک آبخوان فاکتورهای مختلفی می‌تواند روی فرونشست زمین تأثیر بگذارد. به‌طور کلی، فرونشست متأثر از فعالیت‌های انسانی و پارامترهای زمین‌شناسی است. در مدل پیشنهادی GARDLIF از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی استفاده شده است (اسم روش پیشنهادی از حروف اول پارامترهای آن گرفته شده است) که شامل افت سالانه سطح آب زیرزمینی<sup>۵</sup>، محیط آبخوان<sup>۶</sup>، تغذیه خالص<sup>۷</sup>، مقدار تخلیه یا پمپاژ<sup>۸</sup>، کاربری اراضی<sup>۹</sup>، ضخامت آبخوان<sup>۱۰</sup> و فاصله از گسل<sup>۱۱</sup> است. اطلاعات مربوط به این پارامترها به‌صورت تلفیقی تجزیه و تحلیل شده و سپس توسط سیستم اطلاعات

فرونشست<sup>۱</sup> به حرکت قائم رو به پایین سطح زمین، که می‌تواند با بردار اندک افقی همراه باشد، گفته می‌شود. فرونشست زمین می‌تواند بر اثر فرایندهای طبیعی یا فعالیت‌های انسانی مانند معدن‌کاری، زهکشی خاک‌های ارگانیک و افت سطح آب زیرزمینی بر اثر برداشت بی‌رویه صورت گیرد [۱]. پژوهش‌های علمی درباره فرونشست زمین نخستین بار در سال ۱۷۲۵ در بلژیک انجام شد [۲]. ایالات آریزونا و کالیفرنیا در آمریکا، توکیو و اوساکا در ژاپن، بانکوک در تایلند، جاکارتا در اندونزی، هانوی در ویتنام و مکزیکو در مکزیک از جمله مناطق مهم در دنیا هستند که با پدیده فرونشست زمین مواجه‌اند [۳]. در مناطق مختلفی از ایران نیز پدیده فرونشست زمین با درجات مختلف در حال بروز است. بنا به نظر کارشناسان بیشتر فرونشست‌های ایران به دلیل تراکم آبخوان بر اثر پمپاژ بی‌رویه است [۴]. یکی از مشکلات مهم در زمینه برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، افت ممتد سطح آب، تراکم‌شدن لایه‌ها و رسوبات آبخوان است. تراکم آبخوان<sup>۲</sup> بر خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان تأثیر می‌گذارد و سبب کاهش نفوذپذیری و افت ضریب ذخیره<sup>۳</sup> آن می‌شود. معمولاً، فرونشست زمین بلافاصله با خروج سیال رخ نمی‌دهد بلکه در زمان طولانی‌تری از برداشت اتفاق می‌افتد. میزان فرونشست زمین برای هر ۱۰ متر افت سطح آب زیرزمینی، از یک تا ۵۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند. دامنه این تغییرات تابعی از درجه و نوع تنش واردشده، ضخامت و تراکم‌پذیری لایه‌ها و مدت زمان افزایش تنش است [۵]. مطالعات درباره پدیده فرونشست در دشت‌های کشور منسجم و فراگیر نیست و فقط در بخشی از دشت‌ها، که شرایط حاد و بحرانی داشته‌اند، مطالعاتی انجام شده است. بیشتر مطالعات انجام‌شده به بررسی علل فرونشست و پیامدهای آن پس از وقوع پرداخته‌اند [۶-۸]. با توجه به اینکه فرونشست تهدیدی جدی برای بسیاری از مناطق دنیا و به‌خصوص دشت‌های کشورمان محسوب می‌شود، نیاز به ارائه روشی جامع و قابل اعتماد برای شناسایی نقاط مستعد فرونشست احساس می‌شود. شناسایی عوامل مؤثر بر فرونشست زمین و ارائه یک چهارچوب<sup>۴</sup> عملی برای بررسی و تعیین نقاط محتمل فرونشست، می‌تواند در

5. Groundwater declination (G)  
6. Aquifer media (A)  
7. (Net) Recharge (R)  
8. Discharge (D)  
9. Land use (L)  
10. Impact of aquifer thickness (I)  
11. (Distance of) Fault (F)

1. Subsidence  
2. Aquifer compaction  
3. Storage coefficient  
4. Framework

ضخامتی از خاک از حالت شناوری می‌شود و وزن بیشتری به لایه‌های پایینی وارد می‌آورد و سبب تراکم خاک و فرونشست زمین می‌شود. در آبخوان‌های تحت فشار نیز پایین‌رفتن سطح پیژومتریک به کاهش فشار بالا آورنده آب و افزایش فشار مؤثر خاک بالای آبخوان و در نهایت تراکم و فرونشست زمین منجر می‌شود [۹]. فرونشست در مواقعی می‌تواند شدید باشد که دبی پمپاژ از دبی قابل اطمینان آبخوان زیاده‌تر باشد و سطح آزاد آب یا سطح پیژومتریک افت کرده باشد [۱۰]. رتبه‌های اختصاص داده‌شده برای مقادیر مختلف افت سطح آب زیرزمینی و دیگر پارامترها در جدول ۲ آورده شده است. رتبه‌های اختصاص داده‌شده به پارامترها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که چهارچوب ارائه‌شده در شرایط مختلف و در مناطق مختلف قابل اجرا باشد، یعنی با در نظر گرفتن رتبه‌های ارائه‌شده در جدول ۲، می‌توان لایه‌های مرتبط با پارامترهای GARDLIF را با توجه شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی آبخوان مد نظر تهیه کرد و با اجرای مدل، پتانسیل‌یابی فرونشست زمین را در منطقه به‌دست آورد.

#### محیط آبخوان (A)

محیط آبخوان شامل فضای خالی و شکستگی‌هایی است که آب را در خود نگه می‌دارد و عبور می‌دهد. بنابراین، مواد تشکیل‌دهنده آبخوان بر جریان درون آن تأثیر می‌گذارد [۹]. خاک‌های ریزدانه بسیار بیشتر از ماسه‌ها و سنگ‌ریزه‌ها قابلیت تراکم دارند. به این ترتیب، فرونشستگی شدید فقط در جاهایی اتفاق می‌افتد که رسوبات رسی ضخیمی وجود داشته و یا در لایه‌های آبدار، میان لایه‌های رس و سیلت وجود داشته باشند [۱۰]. در خاک‌های ریزدانه به‌علت نفوذپذیری کم، نشست زمین به تدریج صورت می‌گیرد و ممکن است سال‌ها ادامه داشته باشد. فرونشست زمین در خاک‌های آلی به‌علت ضریب تراکم‌پذیری زیاد این نوع مصالح بیشترین مقدار را دارد. افت سطح آب زیرزمینی و مواد تشکیل‌دهنده آبخوان دو پارامتر بسیار مهم در فرونشست زمین محسوب می‌شوند، بنابراین بیشترین وزن به این دو پارامتر اختصاص داده شد.

#### مقدار تغذیه خالص (R)

بخشی از نزولات جوئی پس از رسیدن به سطح زمین به داخل خاک نفوذ<sup>۲</sup> می‌کند، این آب ممکن است در داخل

جغرافیایی<sup>۱</sup> پردازش می‌شوند. روش ارائه‌شده در این پژوهش به‌اختصار GARDLIF نامیده می‌شود. در روش GARDLIF به هر پارامتر یک رتبه و یک وزن برحسب اهمیت پارامتر اختصاص داده می‌شود. رتبه پارامترهای GARDLIF بین یک تا ۱۰ متغیر است، به طوری که یک به معنای کمترین و ۱۰ بیشترین خطر برای فرونشست 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. به مؤثرترین پارامتر در آسیب‌پذیری فرونشست، وزن پنج و به کم‌اثرترین آن وزن یک اختصاص می‌یابد (جدول ۱). 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 یادشده، GI شاخص آسیب‌پذیری، حروف بزرگ نشان‌دهنده پارامترهای مدل، r رتبه و w وزنی است که به هر پارامتر اختصاص داده می‌شود. با محاسبه شاخص GI، نواحی مستعد فرونشست آبخوان قابل تشخیص است. هرچه این شاخص بزرگ‌تر باشد، بیان می‌کند که خطر فرونشست احتمالی بیشتر است. باید توجه داشت که شاخص به‌دست‌آمده فقط یک ارزیابی نسبی را ارائه می‌کند و نواحی به‌شدت محتمل فرونشست را از مناطق کمتر محتمل جدا می‌سازد و قابلیت ارزیابی مطلق را ندارد.

جدول ۱. وزن‌های اختصاص‌یافته به پارامترهای مدل GARDLIF

وزن نسبی	پارامترهای GARDLIF
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 غسل

#### پارامترهای مدل GARDLIF

##### افت سطح آب زیرزمینی (G)

کاهش سطح آب در آبخوان‌های آزاد سبب خارج‌شدن

**ضخامت آبخوان (I)**

وقتی کاهش سطح آزاد آب بیشتر و لایه‌های آبدار و لایه‌های ریزدانه ضخامت بیشتری داشته باشند، فرونشستگی زمین بیشتر خواهد بود [۹]. بنابراین، در جایی که ضخامت لایه آبدار بیشتر است، امکان وقوع فرونشست نیز زیادتر است و رتبه بیشتری نسبت به مناطقی با ضخامت کم خواهد گرفت.

**فاصله از گسل (F)**

در اجرای مدل GARDLIF، مناطق مختلف برحسب فاصله از گسل رتبه‌بندی شده و به مناطقی که در فاصله بیشتر از پنج کیلومتر از گسل قرار دارند، رتبه ۱ داده شده است، چون در فواصل زیاد، گسل نمی‌تواند در وقوع پدیده فرونشست تأثیر زیادی داشته باشد. بازه‌ها و رتبه‌های مربوط به پارامتر فاصله از گسل در جدول ۲ آورده شده است. در این مطالعه، برای پارامترهای محیط آبخوان و کاربری اراضی بازه‌ای از رتبه‌ها را در نظر گرفته شد، به این ترتیب کاربر می‌تواند با استفاده از دانش خود درباره منطقه مد نظر، رتبه مناسب را در بازه تعیین شده انتخاب کند.

**مدل هم‌پوشانی وزن دار<sup>۲</sup>**

تحلیل فضایی مکانی، شناسایی مناطق مستعدی است که با معیارهایی از ارزش‌های هر پیکسل نقشه رستری، استخراج می‌شود. هم‌پوشانی وزن دار، تکنیکی برای تبدیل ارزش داده‌ها در مقیاس و اندازه‌های مختلف به مقیاس واحد برای تحلیل‌های ترکیبی است. به طور مثال، دو نقشه رستری که در مقیاس یک تا چهار طبقه‌بندی مجدد شده‌اند، در نظر بگیرید (شکل ۱). هر نقشه رستری درصدی از نفوذ را برای نتیجه نقشه رستری خروجی اعمال می‌کند. در این روش ارزش پیکسل‌ها در دو نقشه ورودی به ضرب نفوذ آن ضرب شده و نتایج آن برای تولید نقشه خروجی با هم جمع می‌شود. در شکل ۱، با دقت در سلول سمت چپ بالا ارزش ۲ پیکسل ورودی می‌شود  $1/6 = (4 \times 0/40)$  و  $1/2 = (2 \times 0/60)$  و مجموع آنها برابر  $2/8$  است و با توجه به اینکه نقشه رستری حاصل از مدل هم‌پوشانی وزن دار عددی صحیح است، به عدد ۳ گرد می‌شود.

زمین نیز نفوذ عمقی<sup>۱</sup> خود را ادامه دهد تا سرانجام وارد لایه‌های آبدار زیرزمینی شود و جزء منابع آب زیرزمینی به حساب آید. تغذیه خالص مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ می‌کند و به سطح ایستابی می‌رسد [۱۱]. هرچه مقدار تغذیه آبخوان بیشتر باشد، احتمال وقوع فرونشست کمتر خواهد بود. در رتبه‌بندی این پارامتر، به مناطقی با تغذیه بیشتر، رتبه کمتری اختصاص می‌یابد زیرا در چنین مناطقی امکان وقوع فرونشست کمتر است.

**مقدار تخلیه از آبخوان (D)**

تغییر در سطح آب زیرزمینی و یا شرایط رطوبت زیر سطح زمین می‌تواند تأثیرات محیطی نامطلوبی بر جا بگذارد. در بیشتر مناطق دنیا استخراج مایعات مانند نفت و گاز و یا پمپاژ بیش از حد از آبخوان با فرونشست درخور توجه زمین همراه بوده است [۱۲]. مقدار پمپاژ از آبخوان کارکرد عکس تغذیه آبخوان را دارد و انتظار می‌رود در مناطقی با مقدار پمپاژ بیشتر، فرونشست بیشتری رخ بدهد. بنابراین، برای مناطقی با تخلیه بیشتر، رتبه بیشتر و برای مناطقی با تخلیه کمتر، رتبه کمتری اختصاص می‌یابد.

**کاربری اراضی (L)**

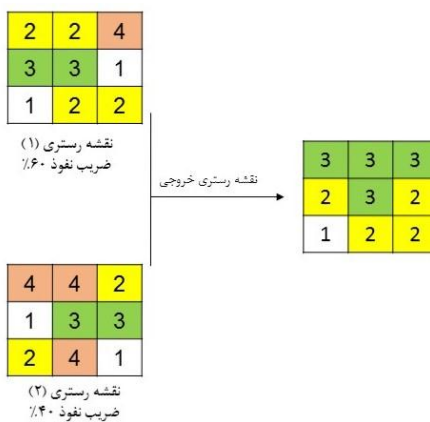
فرونشست زمین می‌تواند نتیجه فعالیت‌های انسانی مانند معدن‌کاری، فعالیت‌های کشاورزی و استخراج منابع آب زیرزمینی باشد. بنابراین، نوع کاربری اراضی نیز در وقوع پدیده فرونشست مؤثر خواهد بود. برای مثال، در مناطقی که کشاورزی آبی و پمپاژ آب زیرزمینی انجام می‌گیرد، نسبت به مناطقی که کشاورزی دیم رواج دارد، امکان وقوع فرونشست بیشتر است و رتبه بیشتری به آن اختصاص می‌یابد. خاک‌های با تراکم‌پذیری زیاد بعد از اینکه تحت تأثیر بار قرار می‌گیرند به تدریج متراکم می‌شوند و سطح زمین نشست می‌کند. بارگذاری روی نهشته‌های رسی اشباع به خروج آب و نشست طولانی‌مدت زمین منجر خواهد شد، بنابراین در مناطق مسکونی و یا محل احداث یک فرودگاه نسبت به یک زمین بایر احتمال وقوع فرونشست بیشتر است. رتبه‌های مربوط به کاربری‌های مختلف زمین برای اجرای مدل GARDLIF در جدول ۲ ارائه شده است.

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

تخلیه از آبخوان (سانتی‌متر در سال)		تغذیه خالص (سانتی‌متر در سال)		محیط آبخوان		افت سطح آب زیرزمینی (متر در سال)	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۱	۰/۰۰۰۴-۰	۱۰	۴-۰	۳-۶	رسوبات آبرفتی دانه‌درشت	۱	۰/۰۲-۰
۲	۰/۰۰۰۴-۰/۰۰۰۵	۹	۹-۴	۹-۱۰	رس و سیلت	۲	۰/۰۵-۰/۰۲
۳	۰/۰۱-۰/۰۰۵	۷	۱۴-۹	۶-۸	ماسه با اندکی سیلت و رس	۳	۰/۱-۰/۰۵
۴	۰/۵-۰/۰۱	۵	۱۹-۱۴	۳-۵	ماسه‌سنگ و کنگلومرا	۴	۰/۳-۰/۱
۵	۱-۰/۵	۳	۲۴-۱۹	۷-۹	سنگ آهک کارستی	۵	۰/۶-۰/۳
۶	۵-۱	۱	۲۴<	۱-۴	سنگ آذرین یا دگرگونی	۶	۰/۹-۰/۶
۷	۲۰-۵			۷-۹	ماسه و گراول با سیلت و رس زیاد	۷	۱/۲-۰/۹
۸	۴۰-۲۰			۸-۱۰	خاک‌های آلی (پیت و مواد تورب‌دار)	۸	۱/۵-۱/۲
۹	۶۵-۴۰					۹	۲-۱/۵
۱۰	۶۵<					۱۰	۲<

ضخامت آبخوان (متر)		کاربری اراضی		فاصله از گسل (کیلومتر)	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۱	۲۵>	۸-۱۰	مناطق آبیاری (کشت محصولات سالانه)، مزارع برنج و چغندرقد	۱۰	۱>
۲	۵۵-۲۵	۶-۸	کشت محصولات دائمی (باغ‌ها، مزارع انگور)	۸	۲-۱
۳	۹۰-۵۵	۱-۳	مناطق کشاورزی دیم	۶	۳-۲
۴	۱۳۰-۹۰	۱-۳	مراتع و مناطق جنگلی	۴	۴-۳
۵	۱۷۵-۱۳۰	۱-۳	زمین‌های بایر و مناطق طبیعی	۲	۵-۴
۶	۲۲۵-۱۷۵	۴-۸	مناطق شهری، محل احداث سد، فرودگاه‌ها، بنادر و مناطق صنعتی و تجاری فعال	۱	۵<
۷	۲۸۰-۲۲۵	۸-۱۰	میادین نفتی و محل استخراج نفت و گاز		
۸	۳۴۰-۲۸۰	۵-۹	معدن‌کاری و استخراج مواد معدنی مانند زغال سنگ		
۹	۴۰۵-۳۴۰				
۱۰	۴۰۵<				



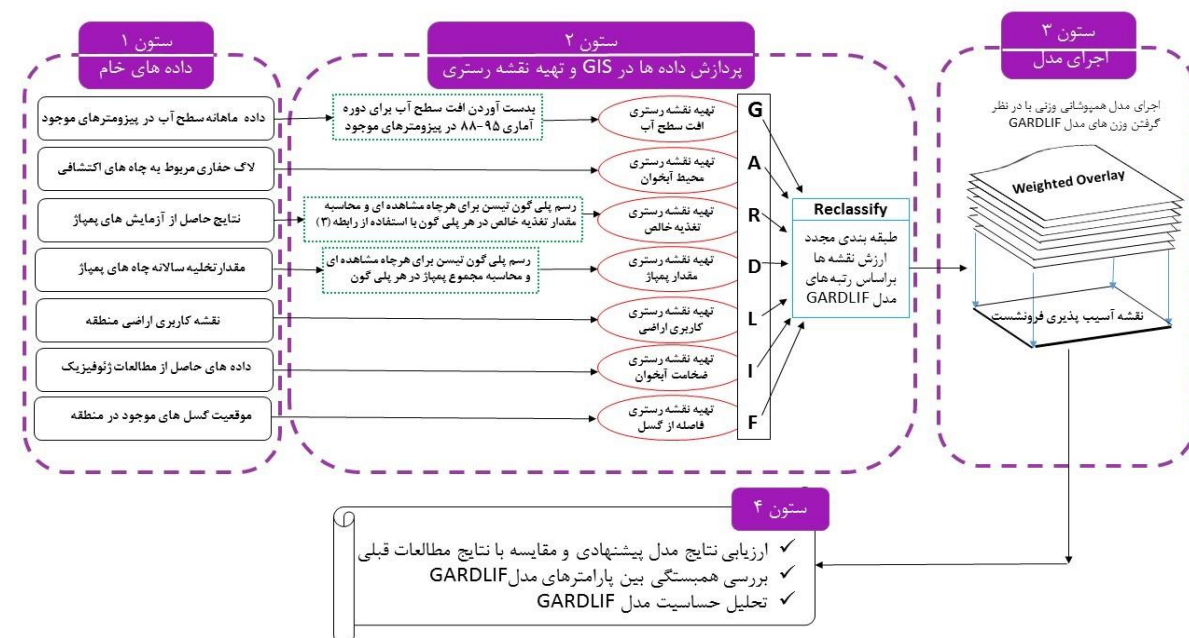
شکل ۱. چگونگی عملکرد مدل هم‌پوشانی وزن‌دار

روش اسکالن<sup>۱</sup> برای محاسبه مقدار تغذیه خالص براساس روش اسکالن و همکارانش برای محاسبه میزان تغذیه، میزان تغییرات سطح آب بین دوره ترسالی و خشکسالی محاسبه می‌شود [۱۳] و سپس با استفاده از ضریب ذخیره آبخوان و براساس رابطه ۲ میزان تغذیه محاسبه می‌شود.

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

در این رابطه R میزان تغذیه،  $S_y$  آبدهی ویژه (ضریب ذخیره)،  $\Delta h$  تغییرات سطح آب و  $\Delta t$  تغییرات زمان است. روش یادشده بر این فرض استوار است که تغییرات در تراز آب زیرزمینی در آبخوان‌های آزاد ناشی از تغذیه از سطح است و همچنین هیچ پمپاژی از آبخوان صورت نمی‌گیرد [۱۳].

در این مطالعه ابتدا لایه‌های رستری مربوط به پارامترهای مختلف مدل GARDLIF تهیه شد. چگونگی تولید هریک از لایه‌ها در بخش بحث و نتایج به‌صورت کامل توضیح داده شده است. برای انجام عملیات هم‌پوشانی و آماده کردن نقشه‌ها برای مدل‌سازی ارزش نقشه‌ها باید دوباره طبقه‌بندی شود. با استفاده از مقادیر داده‌شده در جدول ۲ طبقه‌بندی مجدد نقشه‌ها در محیط نرم‌افزار Arc GIS انجام شد و با اجرای مدل هم‌پوشانی وزن دار نقشه پیش‌بینی نقاط محتمل فرونشست در آبخوان دشت سلماس به‌دست آمد. شکل ۲ چگونگی انجام تحقیق و مراحل مختلف اجرای مدل پیشنهادی GARDLIF را نشان می‌دهد.



شکل ۲. فلوچارت مراحل اجرای مدل GARDLIF

و تحت فشار در دشت سلماس وجود دارد که روی همدیگر قرار گرفته‌اند. جهت غالب جریان آب زیرزمینی از شمال غرب و غرب منطقه به سمت دریاچه ارومیه (شرق) است و بیشترین گرادیان هیدرولیکی در قسمت غرب دشت در حدود ۱۲ در هزار است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از بررسی‌های ژئوفیزیکی، بیشترین عمق سنگ کف در مرکز دشت (بیشتر از ۱۸۰ متر) و کمترین آن در قسمت شمال دشت به مقدار ۲۵ متر است.

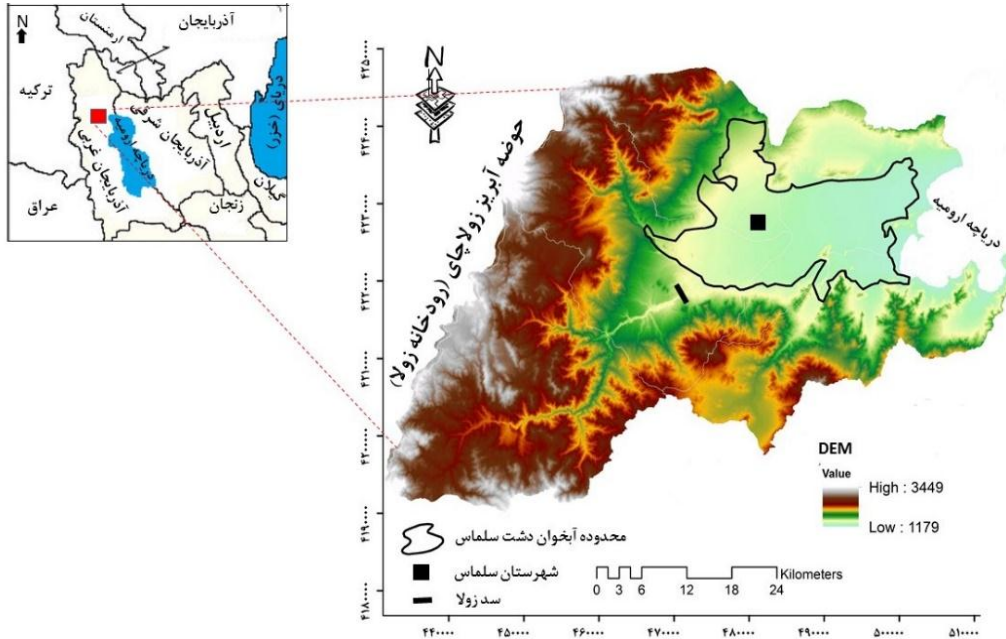
### منطقه مطالعاتی

دشت سلماس با ۵۳۸/۴ کیلومترمربع مساحت، در قسمت شمال غرب ایران و شمال استان آذربایجان غربی قرار گرفته است (شکل ۳). این دشت با تراس‌ها و تپه‌های بلند کوهستانی احاطه شده است و شوره‌زارهای دریاچه ارومیه در قسمت شرقی آن قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین منبع آب سطحی دشت سلماس رودخانه زولاچای است که در نهایت به دریاچه ارومیه ختم می‌شود. براساس نتایج به‌دست‌آمده از لوگ چاه‌های اکتشافی، دو نوع آبخوان آزاد

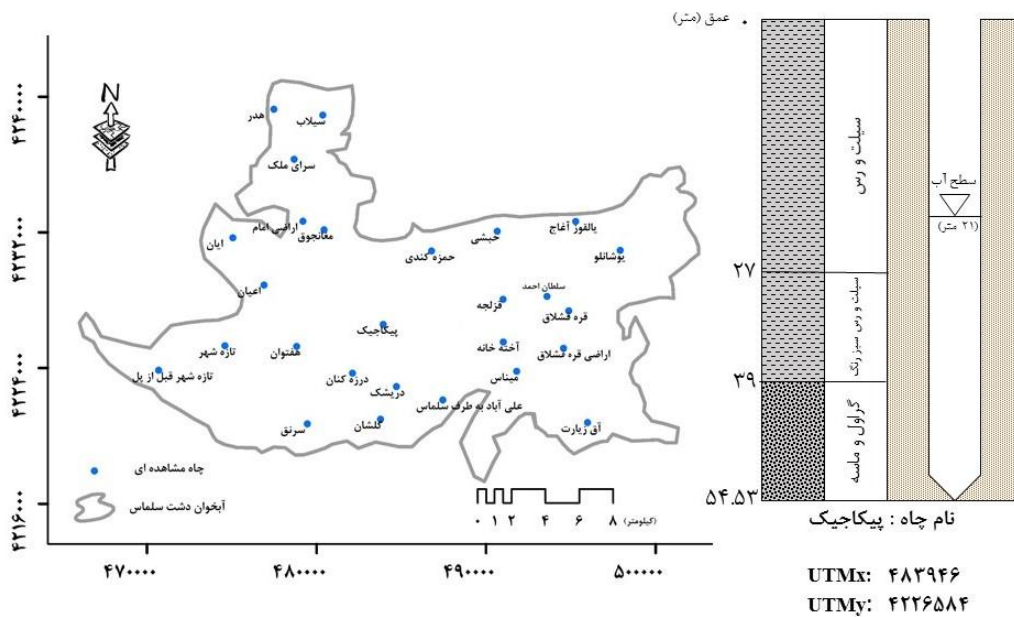
جمع‌آوری شده است، تهیه شد. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در شکل ۴ نشان داده شده است. لایه‌ی مربوط به نوع مواد آبخوان به‌وسیله‌ی لاگ حفاری مربوط به چاه مشاهده‌ای حاصل شده است. در شکل ۴ لاگ مربوط به یکی از چاه‌ها برای نمونه نشان داده شده است.

بررسی داده‌ها

در آبخوان دشت سلماس ۲۷ حلقه چاه مشاهده‌ای حفر شده است. لایه‌ی افت سطح آب زیرزمینی به‌وسیله‌ی آمار ماهانه‌ی تراز سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای، که توسط سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی



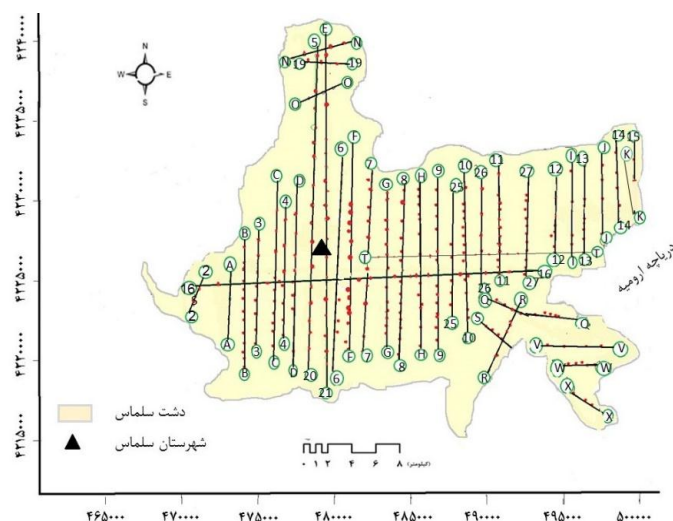
شکل ۳. موقعیت منطقه مطالعه‌شده



شکل ۴. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان دشت سلماس

می‌توان پارامترهایی نظیر ضخامت، خصوصیات هیدرولیکی آبخوان، عمق و جنس سنگ کف و لایه‌های مختلف آبخوان را به دست آورد. مطالعات ژئوالکتریکی دشت سلماس شامل ۲۴۰ سونداژ ژئوالکتریکی با طول AB/2، ۵۰۰ متر و ۶۵ سونداژ با طول AB/2، ۱۰۰۰ متر در طول ۲۸ پروفیل انجام شده است. شکل ۵ موقعیت سونداژهای ژئوالکتریک دشت سلماس را نشان می‌دهد. لایه ضخامت آبخوان با استفاده از اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوفیزیک حاصل شده است. موقعیت گسل‌های موجود در منطقه از روی نقشه زمین‌شناسی منطقه سلماس با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده است، تعیین شد و به این ترتیب لایه فاصله از گسل ایجاد شد.

براساس آمار سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی (۱۳۹۳) تعداد چاه‌های بهره‌برداری (پمپاژ) ثبت‌شده در این آبخوان ۹۲۵ حلقه چاه عمیق و نیمه‌عمیق است. تخلیه سالانه این چاه‌ها حدود ۱۶۷/۶۶ میلیون مترمکعب در سال است که ۹۱/۸۱ درصد آن به بخش کشاورزی اختصاص دارد و فقط ۰/۳۷ درصد در بخش صنعت مصرف می‌شود و قسمت دیگر نیز مربوط به مصارف شرب است. همچنین، دو چشمه و ۱۰ رشته قنات نیز با تخلیه سالانه به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۴۱ میلیون مترمکعب وجود دارند. برای ایجاد لایه‌های مقدار پمپاژ و تغذیه خالص از آمار مربوط چاه‌های بهره‌برداری (پمپاژ) استفاده شده است. در بخش بحث و نتایج چگونگی به‌دست‌آوردن این لایه‌ها توضیح داده شده است. از جمله روش‌های سطحی برای مطالعه آب‌های زیرزمینی، روش‌های ژئوفیزیک هستند، از این راه



شکل ۵. موقعیت خطوط برداشت سونداژهای ژئوالکتریک دشت سلماس

برای انجام درون‌یابی، روش‌های معکوس وزنی فاصله (IDW)، کریجینگ معمولی<sup>۱</sup> و کریجینگ ساده<sup>۲</sup> به کار گرفته شد. در نهایت، روش IDW که خطای محاسباتی کمتری نسبت به سایر روش‌ها 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 ۳ کلاس‌بندی و رتبه‌دهی انجام شد و نقشه رتبه‌بندی افت متوسط سالانه آب زیرزمینی به‌دست آمد (شکل ۶).

## بحث و نتایج

### تهیه نقشه پارامترهای مدل GARDLIF

در این بخش روش اجرای مدل GARDLIF، گام‌به‌گام توضیح داده می‌شود. برای تهیه نقشه افت سطح آب آبخوان دشت سلماس، آمار سطح آب زیرزمینی ۲۷ حلقه چاه مشاهده‌ای (شکل ۴) در دوره هشت‌ساله (۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵) 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 یادشده به سطح، از روش درون‌یابی استفاده شد.

1. Ordinary kriging  
2. Simple kriging



جدول ۳. کلاس‌بندی و رتبه‌های مربوط به پارامترهای مدل GARDLIF در منطقه مطالعه‌شده

افت سطح آب (متر در سال)		محیط آبخوان		تغذیه خالص (سانتی‌متر در سال)		تخلیه از آبخوان (سانتی‌متر در سال)	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۱	۰/۰۲ - ۰/۰۷	۳	رسوبات آبرفتی دانه‌درشت	۱	< ۲۴	۷	۵ - ۲۰
۲	۰/۰۵ - ۰/۰۲	۵	ماسه و کنگلومرا	۳	۱۸ - ۲۴	۸	۲۰ - ۴۰
۳	۰/۱ - ۰/۰۵	۷	ماسه با سیلت و رس زیاد	۶	۱۲ - ۱۸	۹	۴۰ - ۶۵
۴	۰/۳ - ۰/۱	۹	سیلت و رس	۸	۸ - ۱۲	۱۰	< ۶۵
۵	۰/۶ - ۰/۳			۹	۴ - ۸		
۶	۰/۹ - ۰/۶						
۷	۱/۱۳ - ۰/۹						

فاصله از غسل (کیلومتر)		کاربری اراضی		ضخامت آبخوان (متر)	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۹	۲ - ۰	۸	مناطق کشاورزی آبی	۱	> ۲۵
۶	۳ - ۲	۵	مناطق شهری و مسکونی	۲	۵۵ - ۲۵
۳	۵ - ۳	۱	مناطق کشاورزی دیم و مراتع	۳	۹۰ - ۵۵
۱	< ۵			۴	۱۳۰ - ۹۰
				۵	< ۱۳۰

به دست آمد. سپس، با استفاده از جدول ۳ کلاس‌بندی و رتبه‌بندی انجام شد و لایه تغذیه خالص و مقدار پمپاژ مدل GARDLIF تهیه شد (شکل ۶).

$$R = \left( S_y \times \frac{\Delta h}{\Delta t} \right) + Pumping \quad (3)$$

برای تهیه لایه محیط آبخوان دشت سلماس از لاگ چاه‌های اکتشافی منطقه استفاده شده است. جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان دشت سلماس بیشتر از شن، ماسه، سیلت و رس و یا ترکیبی از این‌هاست. برحسب نسبت جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان در هر یک از چاه‌ها، مطابق با معیارهای مدل GARDLIF و با توجه به جدول ۳ 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 شد و سپس با استفاده از روش کریجینگ معمولی درون‌یابی شد و کل منطقه تعمیم داده شد و به این ترتیب لایه محیط آبخوان تهیه شد. بخش شرقی آبخوان رتبه بیشتری را نسبت به بخش غربی گرفته است چراکه در آبخوان دشت سلماس هرچه به سمت شرق می‌رویم، جنس رسوبات ریزتر و بیشتر از نوع سیلت و رس هستند (شکل ۶). اطلاعات مربوط به ضخامت رسوبات آبخوان از بررسی مقاطع ژئوالکتریک (شکل ۵) به دست آمده است. در نواحی جنوب شهرستان سلماس ضخامت رسوبات آبرفتی به بیشتر از ۱۵۰

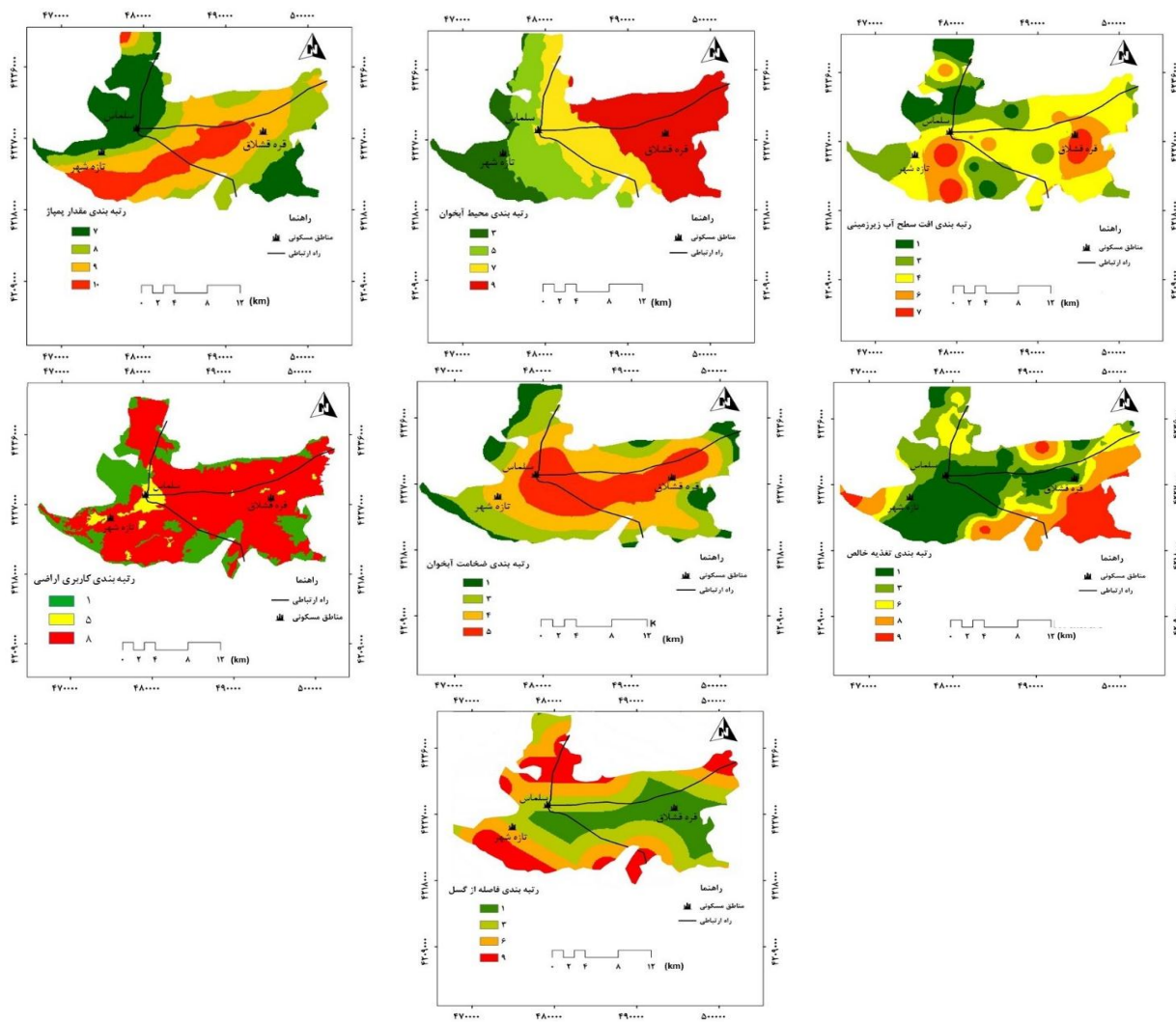
در این پژوهش برای محاسبه مقدار تغذیه آبخوان، از روش تغییرات حجم آب زیرزمینی آبخوان استفاده شده است، بنابراین با توجه به اینکه از آبخوان دشت سلماس پمپاژ انجام می‌گیرد، برای محاسبه میزان تغذیه، رابطه ۲ با اعمال تغییراتی و با در نظر گرفتن میزان حجم آب پمپاژ یافته به کار گرفته شد. تغییرات سالانه سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای منطقه برای سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ (اختلاف سطح آب مهر ۱۳۹۴ و مهر ۱۳۹۵) محاسبه شد. با ضرب کردن این تغییرات در ضریب ذخیره آبخوان، تغییرات حجم مخزن به دست می‌آید. برای هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه شبکه‌بندی تیسس<sup>۱</sup> رسم شد (شکل ۷) و مجموع پمپاژ از چاه‌های واقع در هر پلی‌گون<sup>۲</sup> محاسبه شد (آمار چاه‌های پمپاژ از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی اخذ شده است).

سپس، با محاسبه مساحت هر پلی‌گون و تغییرات سطح آب زیرزمینی برای هر چاه مشاهده‌ای با استفاده از رابطه ۳ میزان تغذیه خالص برای هر پلی‌گون محاسبه شد. میزان تغذیه سالانه و مجموع پمپاژ سالانه در هر پلی‌گون، به چاه مشاهده‌ای که براساس آن پلی‌گون ترسیم شده است، تعمیم داده شد و با استفاده از روش کریجینگ معمولی (به دلیل خطای محاسباتی کمتر نسبت به سایر روش‌ها) درون‌یابی شد و نقشه تغذیه خالص و مقدار پمپاژ

1. Theissen  
2. Polygon

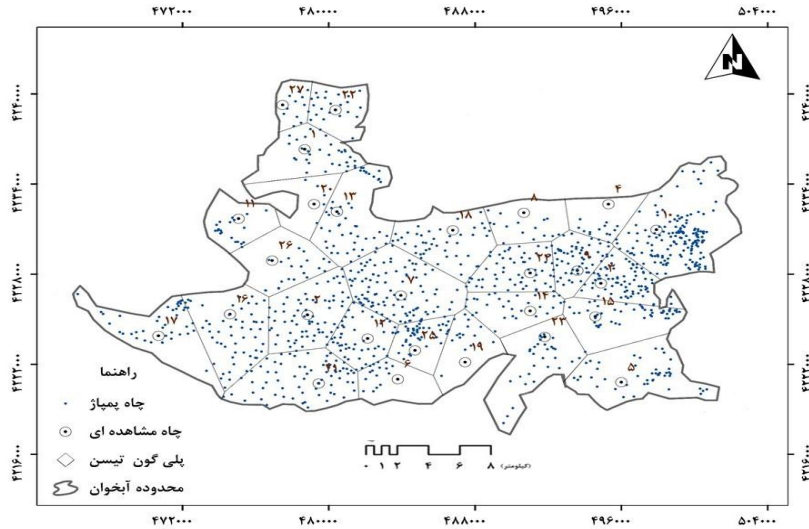
(جدول ۳) انجام شد. موقعیت گسل‌های موجود در منطقه از روی نقشه زمین‌شناسی منطقه سلماس با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده است به‌دست آمد و در محیط نرم‌افزار ArcGIS، با استفاده از روش فاصله اقلیدسی<sup>۲</sup> نقشه فاصله از گسل به‌دست آمد و نقشه براساس معیار مدل GARDLIF (جدول ۳)، رتبه‌دهی شد. در نقشه فاصله از گسل به مناطق نزدیک به گسل رتبه بیشتری اختصاص داده شده است و مناطقی که در فاصله بیشتر از پنج کیلومتر از گسل قرار دارند، رتبه ۱ داده شد. نقشه‌های مربوط به رتبه‌بندی پارامترهای مختلف آبخوان دشت سلماس براساس مدل GARDLIF در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

متر می‌رسد. ضخامت رسوبات آبرفتی در جنوب روستای یالقوزآغاچ و شمال غرب قره‌قشلاق و در راستای رودخانه از ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر متغیر است و در قسمت حاشیه دریاچه ارومیه ضخامت آبرفت به کمترین حد می‌رسد. در مرکز دشت جنس سنگ کف عمدتاً رسوبات دانه‌ریز از قبیل مارن و رس بوده و در غرب منطقه سازندهای آذرین و مارن‌های میوسن جنس سنگ کف را تشکیل می‌دهد. با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از مقاطع ژئوالکتریک نقشه هم‌ضخامت آبخوان دشت سلماس تهیه شد و به‌وسیله جدول ۳ و معیارهای مدل GARDLIF، ارزش نقشه رستری ضخامت آبخوان طبقه‌بندی مجدد<sup>۱</sup> شد (شکل ۶). برای تهیه نقشه کاربری اراضی از نقشه کاربری محدوده مطالعاتی سلماس استفاده شد و رتبه‌دهی



شکل ۶. رتبه‌بندی پارامترهای مختلف GARDLIF در آبخوان دشت سلماس

1. Reclassify
2. Euclidean distance

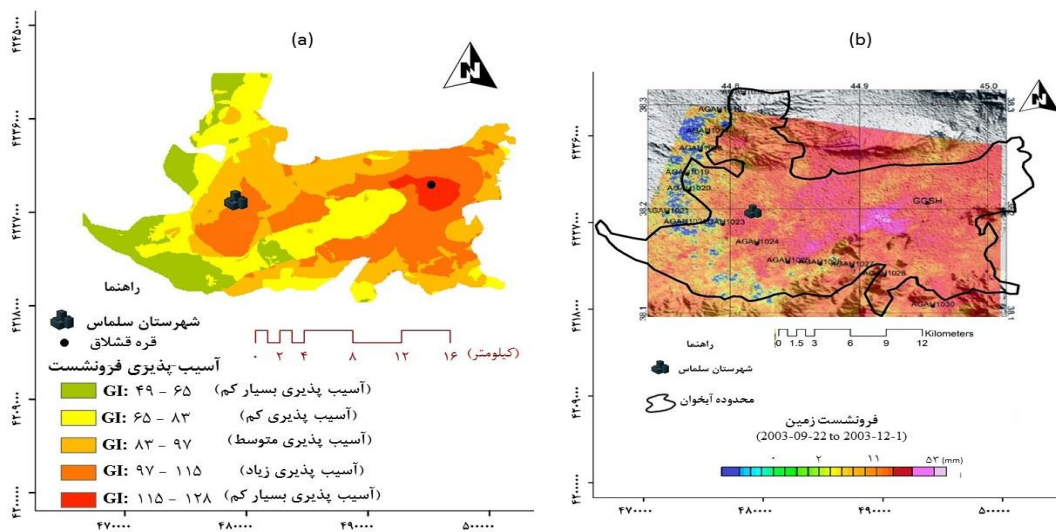


شکل ۷. پلی گون بندی چاه های مشاهده ای منطقه مطالعه شده

بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم کرده ایم (شکل ۸). مناطق با آسیب پذیری متوسط بیشترین مساحت آبخوان را به خود اختصاص می دهند (جدول ۴). نتایج نشان می دهد در اطراف روستای قره قشلاق (شمال شرق دشت سلماس) امکان وقوع پدیده فرونشست بسیار زیاد است (شکل ۸). نتایج مطالعات انجام شده در دشت سلماس نشان می دهد که میزان فرونشست زمین در اطراف روستای قره قشلاق حدود ۱۲ سانتی متر در سال است [۷]. مدل پیشنهادی در این تحقیق نیز بیشترین مقدار آسیب پذیری فرونشست را در این منطقه نشان می دهد.

**اجرای مدل و محاسبه اندیس آسیب پذیری GARDLIF در آبخوان دشت سلماس**

در این مرحله مدل GARDLIF با توجه به وزن های ارائه شده در جدول ۱ اجرا شد و از تلفیق لایه ها، نقشه آسیب پذیری فرونشست منطقه تهیه شد. با توجه به اینکه لایه های مورد نیاز در مدل GARDLIF هر یک وزن خاصی دارند، برای تلفیق داده ها از تابع هم پوشانی وزنی از طریق منوی Raster calculator در محیط نرم افزار ArcGIS استفاده شد. شاخص آسیب پذیری مدل برای آبخوان دشت سلماس بین ۴۹ تا ۱۲۸ به دست آمد. ما براساس شاخص به دست آمده آبخوان را از نظر آسیب پذیری فرونشست به پنج ناحیه با آسیب پذیری



شکل ۸. (a) نقشه آسیب پذیری ذاتی فرونشست در آبخوان دشت سلماس با استفاده از مدل پیشنهادی (GARDLIF). (b) تعیین مقدار فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری [۸]

جدول ۴. اندیس GARDLIF در آبخوان دشت سلماس

درصد مساحت	مساحت (Km <sup>2</sup> )	محدوده GI	وضعیت آبخوان
۱۳/۴۷	۴۹/۲۵	۶۵-۴۹	آسیب پذیری بسیار کم
۲۴/۵۷	۸۹/۸۴	۸۳-۶۵	آسیب پذیری کم
۳۰/۲۸	۱۱۰/۷۲	۹۷-۸۳	آسیب پذیری متوسط
۲۷/۳۰	۹۹/۸۳	۱۱۵-۹۷	آسیب پذیری زیاد
۴/۳۸	۱۶/۰۴	۱۲۸-۱۱۵	آسیب پذیری بسیار زیاد
جمع: ۱۰۰	جمع: ۳۶۵/۶۸		

به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. سپس، با استفاده از رابطه ۴ میزان حساسیت مدل به دست می‌آید [۱۵]. با به کارگیری این روش می‌توان مؤثرترین پارامتر در پیش‌بینی مناطق محتمل فرونشست را شناسایی کرد.

$$S = \left( \left| \frac{\left( \frac{V}{N} \right) - \left( \frac{V'}{n} \right)}{V} \right| \right) \times 100 \quad (4)$$

S میزان حساسیت یا به بیانی اندیس تغییرپذیری را نشان می‌دهد. V و V' به ترتیب شاخص‌های آسیب‌پذیری بدون حذف نقشه و با حذف نقشه، N و n به ترتیب تعداد لایه‌های استفاده شده در محاسبه V و V' هستند. نتایج تحلیل حساسیت حذف نقشه مدل GARDLIF در آبخوان دشت سلماس در جدول ۶ آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد بیشترین تغییر در GI با حذف پارامتر D با میانگین تغییرات ۱/۶۲ اتفاق می‌افتد. این موضوع می‌تواند به علت وزن زیاد این پارامتر و همچنین وسعت زیاد مناطق با رتبه بالا باشد. پارامترهای A و L هم به علت رتبه‌های زیاد این پارامترها در قسمت اعظم آبخوان دشت سلماس حساسیت و تغییرپذیری زیادی دارند. کم‌اثرترین پارامتر در آسیب‌پذیری فرونشست، پارامتر F با میانگین اندیس تغییرپذیری ۰/۲ درصد است.

جدول ۶. نتایج آماری تحلیل حساسیت حذف نقشه

انحراف معیار	اندیس تغییرپذیری (S%)			پارامتر حذف شده
	میانگین	بیشترین حد	کمترین حد	
۰/۴۱	۰/۹۷	۲/۱۵	۰	G
۰/۲۳	۱/۴۵	۲/۰۶	۰/۴۲	A
۰/۱۳	۰/۶۷	۱/۷۲	۰	R
۰/۵۸	۱/۶۲	۳/۷۳	۰	D
۰/۶۷	۱/۵	۲/۹۸	۰/۱۴	L
۰/۱۷	۱/۰۴	۲/۲۵	۰/۳۲	I
۰/۳۴	۰/۴	۱/۱۸	۰	F

### تحلیل حساسیت مدل GARDLIF

اثر داده‌های ورودی مدل در نقشه نهایی به دست 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. در این پژوهش میزان تأثیرپذیری هر یک از پارامترهای GARDLIF برای ارزیابی آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت سلماس با استفاده از تحلیل حساسیت حذف نقشه<sup>۱</sup> بررسی شد. ابتدا پارامترهای رتبه‌بندی شده GARDLIF از نظر همبستگی ارزیابی شدند چراکه عدم همبستگی بین پارامترهای مدل احتمال خطا را کاهش می‌دهد [۱۴]. در این مرحله، با استفاده از نرم‌افزار SPSS<sup>۲</sup> همبستگی بین پارامترهای GARDLIF به دست آمد (جدول ۵). نتایج نشان می‌دهد بین پارامترهای GARDLIF همبستگی مهمی مشاهده نمی‌شود. این عدم همبستگی بین پارامترهای ورودی مدل، احتمال خطا در نقشه خروجی مدل را کاهش می‌دهد.

جدول ۵. ماتریس همبستگی پارامترهای مدل GARDLIF

لایه	G	A	R	D	L	I	F
G	۱						
A	-۰/۲۴	۱					
R	-۰/۰۰۵	۰/۲۷	۱				
D	۰/۱۷	۰/۰۲	۰/۶۴	۱			
L	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۲۳	۰/۳۶	۱		
I	-۰/۰۰۲	۰/۱۷	-۰/۰۳	-۰/۱۱	۰/۱	۱	
F	-۰/۳۶	-۰/۰۹	۰/۰۰۸	۰/۰۶	-۰/۰۲	-۰/۰۹	۱

در تحلیل حساسیت حذف نقشه، ارزیابی ضرورت داشتن یا نداشتن استفاده از هر یک از پارامترهای مدل مطرح است. در این روش در هر مرحله یکی از پارامترهای مدل حذف شده و اندیس آسیب‌پذیری برای هر یک

1. Map removal sensitivity analysis
2. Statistical package for social sciences (SPSS)

- [4]. Pacheco J, Arzate J, Rojas E, Arroyo M, Yutsis V, Ochoa G, Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Queretaro valley, Mexico. *Journal of engineering geology*. 2006;16: 143-160.
- [5]. Larson KJ, Basagaoglu H, Marino MA. prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman city area, California, using a calibrated numerical simulation model. *Journal of hydrology*. 2001; 242: 79-102.
- [6]. Lashkaripour GR, Ghafoori M, Rostami Barani HR. An investigation on the mechanism of earth-fissure and land subsidence in the western part of Kashmar plain. *Geological Studies*. 2009; 1(1): 95-111.
- [7]. Moghtased-Azar K, Mirzaei A, Nankali HR, Tavakoli F. Investigation of correlation of the variations in land subsidence (detected by continuous GPS measurement) and methodological data in the surrounding areas of Lake Urmia. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2012; 19:675-683.
- [8]. Sedighi M, Arabi S, Nankali HR, Amighpey M, Tavakoli F, Soltanpour A, et al. Subsidence detection using In-SAR and Geodetic measurement in the Nourth-west of Iran. *Fringe 2009 Workshop, ESA communication, ESRIN, Frascati, Italy*.
- [9]. Hafezimoghadas N. Ghafoori M. *Environmental Geology*. 1<sup>st</sup> ed. Shahrood: Shahrood University of Technology Press, Iran; 2007 (Persian).
- [10]. Bouwer H. *Groundwater Hydrology*. translated by: Lotfi-Sadigh A. 13. Tabriz: Sahand University of Technology Press; 1993 (Persian).
- [11]. Alizadeh A. *Principles of applied hydrology*. 9<sup>nd</sup> ed. 35. Mashhad, Iran: Imam Reza university Press; 1996 (Persian).
- [12]. Poland JF, Davis GH. Land subsidence due to withdrawn of fluids. *Engineering Geology*. 1969; 2:187-269
- [13]. Scanlon B, Healy R, Cook P. Choosing Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge. *Journal of Hydrology*. 2002; 10(1): 18-39.
- [14]. Rosen L. A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. *Ground Water*. 1994;32(2):278.
- [15]. Babiker IS, Mohamed MA, Hiyama T, Kato K. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*. 2005; 345(1):127-40.

## نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به‌منظور ارائه یک چهارچوب عملی برای تعیین و شناسایی مناطق احتمالی فرونشست در یک آبخوان انجام شد. GARDLIF، یک چهارچوب کلی و جامع برای بررسی آسیب‌پذیری مناطق مختلف آبخوان نسبت به فرونشست زمین است که هفت پارامتر مؤثر در وقوع فرونشست را شامل می‌شود. برای بررسی نتایج روش پیشنهادی، آبخوان دشت سلماس به‌عنوان یک مطالعه موردی انتخاب شد. نتایج مطالعات قبلی بیشترین مقدار فرونشست زمین را در قسمت شمال غرب دشت (منطقه قره‌قشلاق) گزارش کرده‌اند [۷] و [۸] که با نتایج به‌دست‌آمده از اجرای مدل GARDLIF مطابقت دارند. بین پارامترهای ورودی مدل GARDLIF همبستگی خاصی مشاهده نمی‌شود. این عدم همبستگی بین پارامترهای ورودی مدل GARDLIF، احتمال خطا در نقشه خروجی مدل را کاهش می‌دهد. نتایج تحلیل حساسیت حذف نقشه نشان می‌دهد مؤثرترین پارامترها در وقوع پدیده فرونشست زمین به‌ترتیب پمپاژ (D)، کاربری اراضی (L) و محیط آبخوان (A) (جنس رسوبات آبخوان) هستند. براساس نتایج به‌دست‌آمده (جدول ۶) با حذف پارامتر فاصله از گسل (F) به‌دلیل رتبه کم آن در بیشتر قسمت‌های آبخوان، کمترین تغییر در شاخص آسیب‌پذیری اتفاق می‌افتد. بنابراین، فاصله از گسل کم‌اثرترین پارامتر در مدل‌سازی آسیب‌پذیری آبخوان دشت سلماس بوده است. با به‌کارگیری روش پیشنهادی در این پژوهش (GARDLIF) می‌توان نقاط محتمل‌تر از نظر فرونشست زمین را شناسایی کرد و با مدیریت صحیح آبخوان، از وقوع فرونشست زمین جلوگیری کرد، به‌علاوه روش GARDLIF، روشی جامع است و این قابلیت را دارد که در دیگر آبخوان‌ها نیز اجرا شود.

## منابع

- [1]. Alkhamis R, Kariminasab S, Aryana F. Investigating the effect of land subsidence due to groundwater discharge on well casing damage. *Journal of water*. 2006; 60: 77-87 (Persian).
- [2]. Handbook SE. Subsidence engineering. National Coal Board. Production department. London; 1975.
- [3]. Trinh MT, Fredlund DG. Modeling subsidence due to ground water extraction in the Hanoi city area. *journal of geology technology*. 2000; 37: 621-637.