

تهیه نقشه آسیب‌پذیری فرونشست زمین با استفاده از مدل WALPSRFT و روش تحلیل سلسله مراتبی-فازی (مطالعه موردی: دشت دامنه-داران در غرب استان اصفهان)

غلامرضا رحمانی^۱، منوچهر چیت‌سازان^{۲*}، حمیدرضا غفوری^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

*نویسنده مسئول: chitsazan_m@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۳۰

چکیده

پدیده فرونشست زمین که متأثر از فعالیت‌های انسانی و پارامترهای متعدد زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی است در مناطقی از ایران در درجات مختلف در حال بروز است. تهیه نقشه حساسیت فرونشست زمین یک پیش‌نیاز اساسی برای مدیریت فرونشست زمین است. ارزیابی مناسب فرونشست زمین مستلزم تعیین پارامترهای مؤثر فرونشست زمین برای کشف روابط مکانی بین آن‌ها و فرونشست زمین است. به همین منظور در ابتدا با توجه به مکان‌های فرونشست زمین هشت پارامتر مؤثر بر فرونشست در دشت دامنه-داران دو مدل تهیه گردید. در مدل اول هشت پارامتر شامل افت سالانه سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، کاربری اراضی، مقدار تخلیه، ضخامت آبخوان، تغذیه خالص، فاصله از گسل و توپوگرافی به نام WALPSRFT بر اساس وزن‌دهی به پارامترها و مدل دوم بر اساس بهینه‌سازی و سازگاری هشت لایه مؤثر در فرونشست، به روش AHP-Fuzzy تهیه و نقشه نهایی آسیب‌پذیری فرونشست زمین با تلفیق لایه‌ها در ArcGIS به دست آمد. برای اعتبارسنجی مدل نهایی از تصاویر راداری و روش تداخل‌سنج راداری (InSAR) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که هر دو نقشه تهیه‌شده همبستگی خوبی با داده‌های راداری نشان می‌دهند و نقشه تهیه‌شده به روش سلسله مراتبی-فازی بالاترین همبستگی را با داده‌های راداری و فرونشست واقعی در دشت دامنه-داران نشان می‌دهد و آسیب‌پذیری فرونشست در آبخوان را با جزئیات بیشتری در کل سطح دشت تفکیک می‌نماید. بر اساس این مدل، اکثر مناطق دشت خصوصاً بخش شرقی در معرض فرونشست می‌باشند و برای کنترل فرونشست باید برنامه‌های مدیریتی در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: آبخوان دشت دامنه-داران، تحلیل سلسله مراتبی-فازی، تداخل‌سنج راداری، فرونشست زمین، مدل WALPSRFT.

مقدمه

پدیده فرونشست زمین متأثر از خصوصیات هندسی، زمین‌شناسی و تکتونیکی آبخوان آبرفتی و همچنین فعالیت‌های انسانی مانند توسعه بیش از حد کشاورزی هر منطقه در درجات مختلف در بسیاری از مناطق جهان در حال بروز است. به همین لحاظ بررسی این پدیده از اهمیت خاصی برخوردار است. فرونشست مشکل بسیاری از مناطق خشک و

طبق تعاریف بین‌المللی، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست تدریجی رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابجایی افقی اندک باشد. به عبارتی فرونشست زمین جابجایی رو به پایین سطح زمین به دلیل تغییرات تنش در خاک می‌باشد (Adiyaman, 2012).

روش منحنی مشخصات (ROC) ارزیابی گردید. همچنین شبیه‌سازی مکانی و تهیه نقشه حساسیت فرونشست زمین با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی در شهرستان‌های عنبرآباد توسط عبداللهی و همکاران (۱۳۹۸) انجام گرفته است.

طی سال‌های اخیر آبخوان آبرفتی دشت دامنه-داران که از زیرحوضه‌های حوضه تالاب گاوخونی است با معضلات متعددی از جمله فرونشست مواجه است. مشکل فرونشست زمین در محدوده شهر دامنه در بخش میانی این دشت بشدت نمایان یافته و موجب ایجاد درز و شکاف‌های متعددی در منازل مسکونی گردیده است.

از این رو در این مقاله با هدف بررسی آسیب‌پذیری فرونشست در دشت دامنه-داران هشت عامل مؤثر به‌عنوان مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فرونشست زمین شامل افت سالانه سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، کاربری اراضی، مقدار تخلیه، ضخامت آبخوان، تغذیه خالص، فاصله از گسل و توپوگرافی شناسایی و در مدلی به نام WALPSRFT^۱ مورد بررسی قرار گرفت. سپس با ترکیب این پارامترها در محیط ArcGIS، نقشه آسیب‌پذیری فرونشست تهیه شد. سپس برای بهینه‌سازی و سازگاری هشت لایه مؤثر در فرونشست، مدل دوم با روش AHP-Fuzzy^۲ تهیه و نقشه نهایی آسیب‌پذیری فرونشست زمین با تلفیق لایه‌ها در ArcGIS به‌دست آمد. برای اعتبارسنجی مدل نهایی از تصاویر راداری و روش تداخل‌سنج راداری (InSAR^۳) استفاده شد.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

دشت دامنه-داران در غرب استان اصفهان و در حوزه آبریز باتلاق گاوخونی و سرشاخه‌های زاینده‌رود واقع است. این محدوده در فاصله حدود ۱۴۰ تا ۱۸۰ کیلومتری غرب شهر اصفهان واقع شده است (شکل ۱). سازندهای زمین‌شناسی رخنمون یافته در اطراف این دشت (به ترتیب درصد مساحت رخنمون آنها) شامل سنگ‌های آهکی و آهک مارنی کرتاسه، سنگ‌های شیلی ژوراسیک، سنگ‌های دگرگونی تفکیک نشده و آهک‌ها و شیل‌های پرمین است. آبخوان آبرفتی با مساحت

نیمه‌خشک است (Buckley et al., 2003; Budhu and Adiyaman, 2010; Motagh et al., 2008) و می‌تواند منجر به تخریب سازه‌های مهندسی، سیستم‌های آبیاری، خاک‌های حاصلخیز کشاورزی و مرگ تدریجی آبخوان‌های آبرفتی شود (Yin et al., 2015; Chen et al., 2016; Niekerk and Walt, 2006; Galloway and Burbey, 2011; Martínez et al., 2013; Chaussard et al., 2014).

فرونشست زمین در نتیجه برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی در بخش‌های مختلفی از جهان گزارش شده است. ایالات آریزونا و کالیفرنیا در آمریکا، توکیو و اوساکا ژاپن، بانکوک در تایلند، جاکارتا در اندونزی، هانوی در ویتنام و مکزیکو در مکزیک از جمله مناطق مهم دنیا هستند که با پدیده فرونشست زمین مواجه هستند (Trinh and Fredlund, 2000). برای مثال همبستگی بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست در شهر سمارانگ اندونزی به میزان قابل توجه ۴۷/۵۸ درصد به‌دست آمده است (Firdaus et al., 2018). در مناطقی از ایران نیز پدیده فرونشست زمین در درجات مختلف در حال بروز است. گروه بلایای طبیعی و مدیریت بحران پایگاه ملی داده‌های علوم زمین در سال ۱۳۸۵، بانک اطلاعات فرونشست زمین در ایران را تهیه کرد (مهندسین، ۱۳۸۵). طی سالیان اخیر مدل‌ها و چارچوب‌های متعدد در جهت تحلیل عوامل مؤثر در فرونشست طراحی شده است برای مثال نادری و همکاران در سال ۱۳۹۴ از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناختی شامل افت سالانه سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه خالص، مقدار تخلیه یا پمپاژ، کاربری اراضی، فاصله از گسل و ضخامت آبخوان در محیط GIS برای شناسایی و تعیین مناطق در معرض خطر فرونشست در آبخوان سلماس استفاده نموده و شاخصی تحت عنوان GARDLIF را معرفی کرده‌اند. همچنین مدلی تحت عنوان ALPRIFT با بکارگیری هفت پارامتر فوق و اندکی تغییرات در محدوده رتبه‌های اختصاص داده شده به هر پارامتر، توسط Firdaus et al. (2018) طراحی و جهت ارزیابی آسیب‌پذیری دشت شبستر استفاده و به کمک نتایج تصاویر راداری کنترل شد. سپس آسیب‌پذیری فرونشست به کمک روش منطق فازی ارزیابی و نهایتاً نتایج این دو مدل توسط

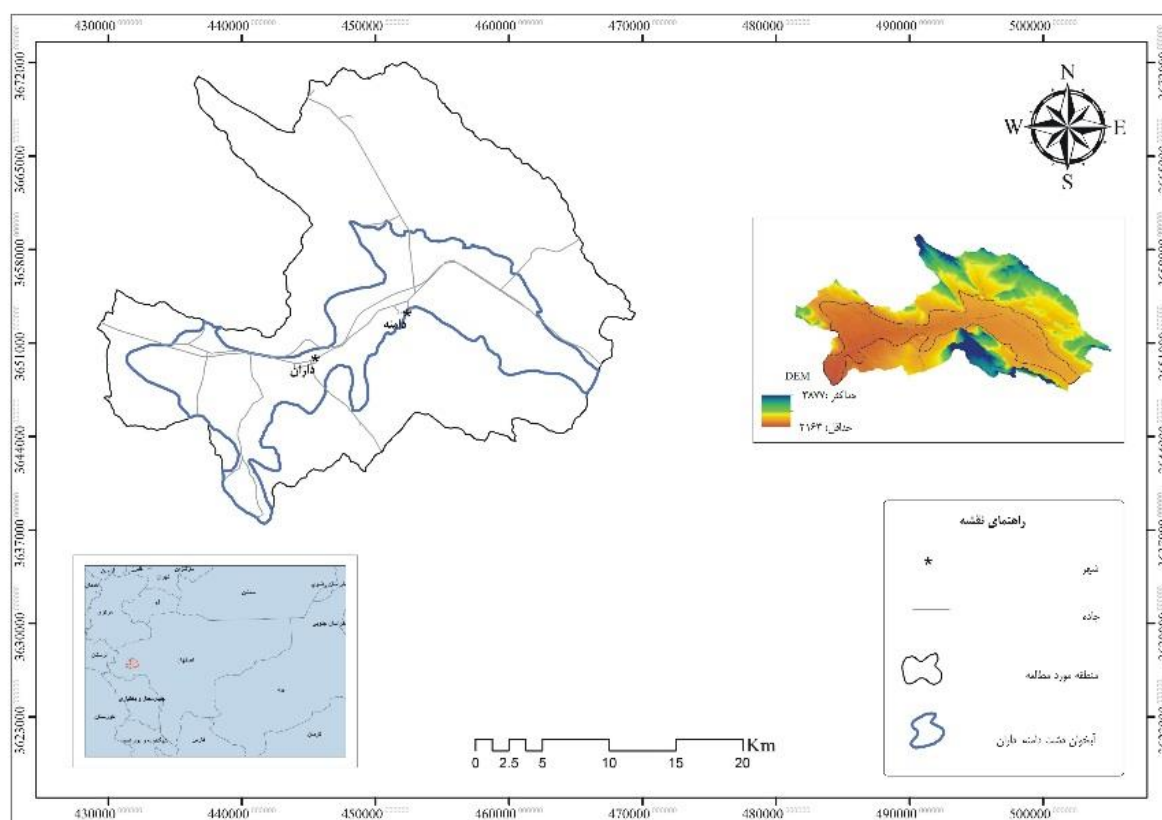
² Analytic Hierarchy Process

³ Interferometry Synthetic Aperture Radar

¹ Water Drawdown, Aquifer Medium, Land use, Pumping of aquifer, Saturated Thickness, Recharge, Fault Proximity, Topography = WALPSRFT

آبرفت در بخش‌های شرقی شهر دامنه حداکثر حدود ۱۱۰ متر و در بخش‌های غربی و به‌ویژه نواحی شرقی دشت به بیش از ۱۵۰ متر هم می‌رسد؛ اما در بخش‌های مرکزی (حوالی بخش‌های شمالی شهر دامنه) به دلیل بالاآمدگی سنگ کف ضخامت آبرفت در برخی از بخش‌ها به کمتر از ۹۰ متر می‌رسد و در کل دشت به سمت حاشیه‌ها، از ضخامت آبرفت کاسته می‌شود.

۲۲۰/۳ کیلومترمربع ۷۵ درصد از مساحت کل دشت (۲۹۳/۷ کیلومترمربع) را شامل شده است. با توجه مطالعات گذشته نوع آبخوان در حالت کلی آزاد است و در بخش‌های متعدد به‌ویژه بخش‌های شرقی به‌علت تنوع میان لایه‌های رسی، آبخوان در مقیاس محلی به‌صورت آبخوان تحت‌فشار و نیمه تحت‌فشار عمل می‌کند. جهت اصلی جریان آب زیرزمینی از شرق، شمال شرق و شمال غربی دشت به سمت جنوب‌غربی است. بر اساس مطالعات گذشته ضخامت



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

آبخوان، کاربری اراضی، مقدار تخلیه، ضخامت آبخوان، تغذیه خالص، فاصله از گسل و توپوگرافی به‌صورت تلفیقی تجزیه و تحلیل شده و سپس توسط سیستم اطلاعات جغرافیایی پردازش گردید. در مدل WALPSRFT به هر پارامتر یک رتبه و یک وزن برحسب اهمیت پارامتر اختصاص داده می‌شود که رتبه پارامترهای WALPSRFT بین یک تا ده متغیر است. به‌طوری‌که یک به معنای کمترین و ده بیشترین خطر برای فرونشست زمین در نظر گرفته می‌شود. با توجه به بازدیدهای صحرایی متعدد از منطقه مورد مطالعه و شناخت کلی از

مدل WALPSRFT

به‌منظور تهیه نقشه آسیب‌پذیری فرونشست در دشت دامنه-داران، ابتدا مکان‌های فرونشست زمین با بررسی مطالعات گذشته و بازدیدهای صحرایی مشخص و علل احتمالی رخداد فرونشست در آبخوان آبرفتی دشت دامنه-داران تعیین شد.

سپس بر اساس بررسی عوامل مؤثر در مناطق فرونشست شده، مدل جدیدی تحت عنوان WALPSRFT طراحی و اطلاعات مربوط به هشت پارامتر افت سالانه سطح آب زیرزمینی، محیط

در رابطه فوق، WI شاخص آسیب‌پذیری، حروف بزرگ نشان‌دهنده پارامترهای مدل، r رتبه و W وزنی است که به هر پارامتر اختصاص داده می‌شود. با محاسبه شاخص WI، نواحی مستعد فرونشست آبخوان قابل‌تشخیص است. هرچه این شاخص بزرگ‌تر باشد، بیان‌کننده آن است که خطر فرونشست احتمالی بیشتر است. باید توجه داشت که شاخص به‌دست‌آمده فقط یک ارزیابی نسبی را ارائه می‌دهد و نواحی به‌شدت محتمل فرونشست را از مناطق کمتر محتمل جدا می‌سازد.

وضعیت آبخوان دشت دامنه-داران از نظر فرونشست و درنهایت کسب قضاوت کارشناسی در خصوص اهمیت عوامل مؤثر بر فرونشست در آبخوان نسب به یکدیگر نیز وزن‌های یک تا پنج برای هشت پارامتر مدل WALPSRFT اختصاص داده شده است. به مؤثرترین پارامتر در آسیب‌پذیری فرونشست، وزن پنج و به کم‌اثرترین آن وزن یک اختصاص می‌یابد (جدول ۱). شاخص مدل WALPSRFT براساس وزن‌دهی به مجموع پارامترها محاسبه می‌شود (رابطه ۱).

$$WI = W_r W_w + A_r A_w + L_r L_w + P_r P_w + S_r S_w + R_r R_w + F_r F_w + T_r T_w \quad (1)$$

جدول ۱- وزن‌های اختصاص‌یافته به پارامترهای مدل WALPSRFT

وزن نسبی	پارامترهای WALPSRFT
۵	افت سالانه سطح آب زیرزمینی (W)
۴	محیط آبخوان (A)
۵	کاربری اراضی (L)
۴	مقدار تخلیه یا پمپاژ (P)
۳	ضخامت آبخوان (S)
۲	تغذیه خالص (R)
۱	فاصله از گسل (F)
۲	توپوگرافی (T)

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 (Bouwer, 1993). 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 شده است.

کاربری اراضی (L)

فرونشست زمین می‌تواند نتیجه‌ی 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 که پمپاژ آب زیرزمینی بیشتر 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 بعداً اینکه تحت تأثیر بار قرار می‌گیرند

پارامترهای مدل WALPSRFT

افت سطح آب زیرزمینی (W)

کاهش سطح آب در آبخوان‌های آزاد سبب خارج شدن ضخامتی از خاک از حالت شناوری می‌شود و وزن بیشتری به لایه‌های پایینی وارد می‌آورد و سبب تراکم خاک و فرونشست زمین می‌شود (حافظی مقدس و همکاران، ۱۳۸۸). فرونشست در مواقعی می‌تواند شدید باشد که دبی پمپاژ از دبی قابل‌اطمینان آبخوان زیادتر باشد و سطح آزاد آب یا سطح پیژومتریک افت کرده باشد (Bouwer, 1993). رتبه‌های اختصاص داده شده برای مقادیر مختلف افت سطح آب زیرزمینی و دیگر پارامترها در جدول ۲ آورده شده است.

محیط آبخوان (A)

وجود لایه‌های قابل تراکم در سیستم آبخوان و ضخامت آنها یک عامل بسیار مهم است که فرآیندهای فرونشست مربوط به بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی را کنترل می‌کند (Zhu, 2015).

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 WALPSRFT در جدول ۲ ارائه شده است.

پمپاژ آبخوان (P)

تغییر در سطح آب زیرزمینی و یا شرایط رطوبت زیر سطح زمین می‌تواند تأثیرات محیطی نامطلوبی برجا بگذارد. در بیشتر مناطق دنیا استخراج مایعات مانند نفت و گاز و یا پمپاژ بیش از حد آب از آبخوان با فرونشست قابل توجه زمین همراه بوده است (Scanlon et al., 2002). مقدار پمپاژ از آبخوان کارکردی عکس تغذیه آبخوان را دارد و انتظار می‌رود در مناطقی با مقدار پمپاژ بیشتر، فرونشست بیشتری رخ دهد؛ بنابراین برای مناطقی با تخلیه بیشتر، رتبه بیشتر و برای مناطقی با تخلیه کمتر، رتبه‌ی کمتری اختصاص می‌یابد.

ضخامت بخش اشباع آبخوان (S)

این پارامتر اثرات ناشی از ضخامت بخش اشباع آبخوان را نشان می‌دهد و با استفاده از آن توانایی ذاتی محیط خاک برای فرونشست موردنظر قرار می‌گیرد؛ بنابراین، هرچه ضخامت بخش اشباع در مکانی بیشتر باشد، حساسیت آن نسبت به فرونشست بیشتر است و رتبه بیشتری نسبت به مناطقی با ضخامت کم خواهد گرفت.

تغذیه خالص (R)

به مقدار کل آبی که به سطح ایستابی می‌رسد تغذیه خالص اطلاق می‌شود. تغذیه خالص را می‌توان از نفوذ باران، آب برگشتی آبیاری، تبخیر و تعرق و چاه‌های جذبی در منطقه مورد مطالعه برآورد نمود. هرچه تغذیه خالص بیشتر باشد احتمال فرونشست کمتر است. در رتبه‌بندی این پارامتر، به مناطقی با تغذیه بیشتر، رتبه‌ی کمتری اختصاص می‌یابد زیرا در چنین مناطقی امکان وقوع فرونشست کمتر است. در این تحقیق برای محاسبه تغذیه خالص، میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی بین دوره ترسالی و خشک‌سالی محاسبه می‌شود.

فاصله از گسل (F)

در اجرای مدل WALPSRFT مناطق مختلف برحسب فاصله از گسل رتبه‌بندی شده و به مناطقی 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.

توپوگرافی (T)

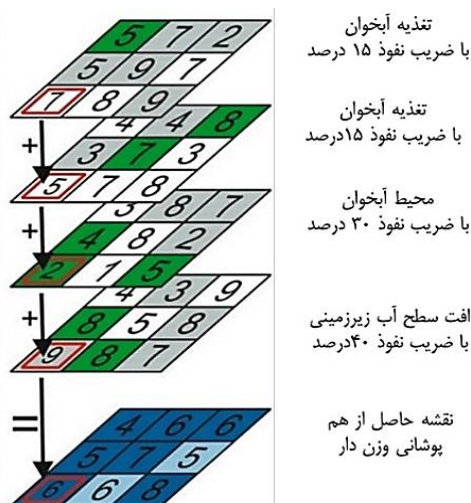
عوامل توپوگرافی از جمله طبقات ارتفاعی، انحنای شیب و درصد شیب در میزان نفوذ آب به زمین تأثیر مستقیم دارد. در طبقات ارتفاعی پست و انحنای مقعر و درصد شیب کم میزان نفوذ آب به زمین و در واقع تغذیه به آبخوان بیشتر خواهد بود. بدین ترتیب به‌طور غیرمستقیم در استعداد فرونشست آبخوان تأثیر بسزایی دارد. همچنین در شرایطی که تنوع جنس مواد تشکیل‌دهنده آبرفت زیاد است، در شرایط توپوگرافی سطحی متفاوت و به تبع آن شرایط رطوبتی متفاوت آبرفت، رفتار فرونشست سطحی نیز متفاوت خواهد بود. این تفاوت‌ها بر تفاوت مؤلفه‌های افقی و عمودی فرونشست زمین تأثیرگذار خواهد بود. بدین ترتیب نقشه طبقات ارتفاعی، انحنای و درصد شیب در سطح آبخوان تهیه شد. سپس ضمن رتبه‌بندی و وزن‌دهی به عوامل فوق، نقشه رتبه‌بندی توپوگرافی سطح آبخوان تهیه شد. رتبه‌های مربوط به عوامل توپوگرافی در جدول ۲ آمده است.

مدل هم‌پوشانی وزن‌دار

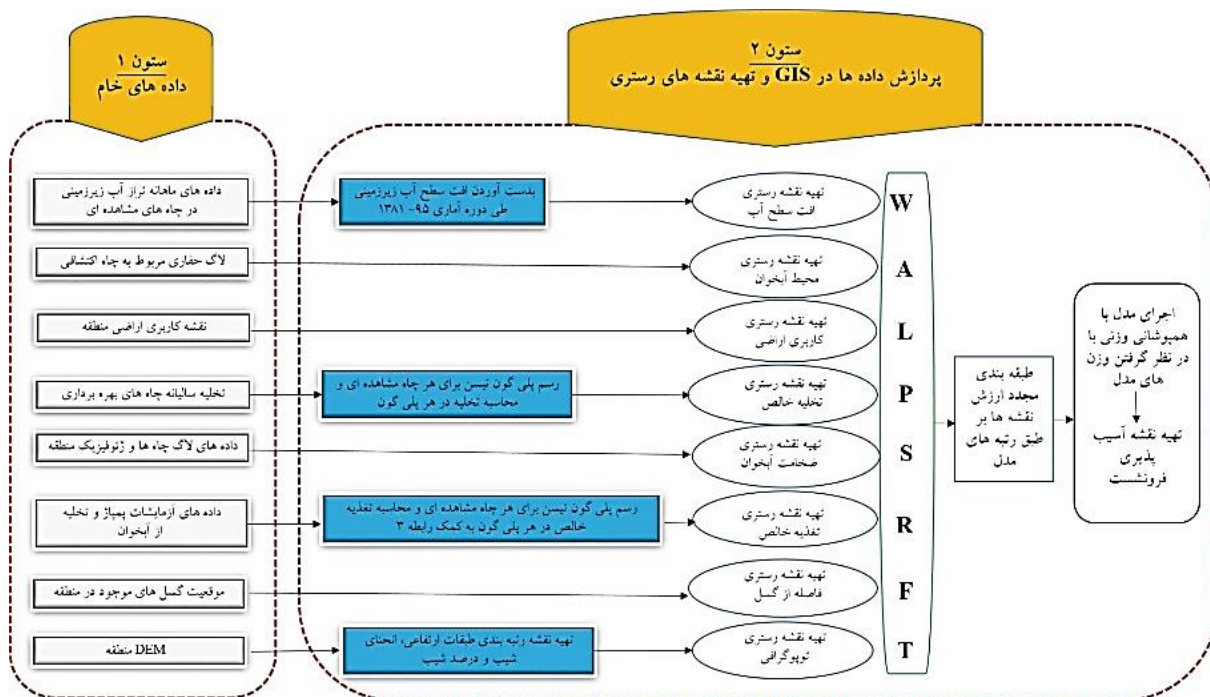
هم‌پوشانی وزن‌دار، تکنیکی برای تبدیل ارزش داده‌ها در مقیاس و اندازه‌های مختلف به مقیاس واحد برای تحلیل‌های ترکیبی است. به‌طور مثال چهار نقشه رستری افت سطح آب،

لایه‌ها در بخش بحث و نتایج به‌طور کامل شرح داده شده است. برای انجام عملیات هم‌پوشانی و آماده کردن نقشه‌ها برای مدل‌سازی، نقشه‌ها باید دوباره طبقه‌بندی شوند. طبقه‌بندی مجدد نقشه‌ها با استفاده از مقادیر داده شده در جدول ۲ در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.4 انجام شد و با اجرای مدل هم‌پوشانی وزن‌دار، نقشه پیش‌بینی نقاط احتمالی فرونشست در آبخوان دشت دامنه-داران به‌دست آمد. شکل ۳ چگونگی تهیه مدل WALPSRFT و مراحل اجرای آن را نشان می‌دهد.

محیط آبخوان و تغذیه و تخلیه آبخوان که در مقیاس یک تا نه طبقه‌بندی مجدد شده‌اند را در نظر بگیرید (شکل ۲). 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 باهم جمع می‌شود. در این مطالعه ابتدا لایه‌های رستری مربوط به پارامترهای مختلف مدل WALPSRFT تهیه شد. نحوه تولید هر یک از



شکل ۲- چگونگی عملکرد مدل هم‌پوشانی وزن دار



شکل ۳- فلوچارت مراحل اجرای مدل WALPSRFT.

جدول ۲- بازه‌ها و رتبه‌های مربوط به پارامترهای مختلف در مدل WALPSRFT (ندیری و همکاران، ۲۰۱۸ با کمی تغییرات).

افت سطح آب زیرزمینی (متر در سال)		تغذیه خالص (سانتی‌متر در سال)		محیط آبخوان		رتبه		
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	۲	
۰/۰۱-۰/۰۰۵	۳	۱۴-۹	۷	ماسه با اندکی سیلت و رس	۸-۶	۰/۱-۰/۰۲	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	سنگ‌آهک کارستی	۹-۷	۰/۶-۰/۳	۵	
۵-۱	۶	۲۴<	۱	سنگ آذرین یا 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 تورب دار)	۱۰-۸	۱/۵-۱/۲	۸	
۶۵-۴۰	۹					۲-۱/۵	۹	
۶۵<	۱۰					۲<	۱۰	
عوامل توپوگرافی		ضخامت بخش اشباع آبخوان (متر)		کاربری اراضی		فاصله از گسل (کیلومتر)		
درصد شیب		طبقات ارتفاعی		محدوده		رتبه		
محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	
۱>	۵	کوهستانی	۱	۲۵>	۱	مناطق آبیاری (کشت محصولات سالانه)	۱>	۱۰
۲-۱۰	۴	کوهپایه‌ای	۲	۵۵-۲۵	۲	مزارع برنج و چغندرقد	۱۰-۸	۸
۱۰-۲۰	۳	دشت	۳	۹۰-۵۵	۳	کشت محصولات دائمی (باغ‌ها، مزارع انگور)	۸-۶	۶
۲۰-۳۰	۲			۱۳۰-۹۰	۴	مناطق کشاورزی دیم	۳-۱	۴
۳۰<	۱			۱۷۵-۱۳۰	۵	مراتع و مناطق جنگلی	۳-۱	۲
				۲۲۵-۱۷۵	۶	زمین‌های بایر و مناطق طبیعی	۳-۱	۱
				۲۸۰-۲۲۵	۷	مناطق شهری، محل احداث سد، فرودگاه، بندر و مناطق صنعتی و تجاری فعال	۸-۴	
				۳۴۰-۲۸۰	۸			
				۴۰۵-۳۴۰	۹	میادین نفتی و محل استخراج نفت و گاز	۱۰-۸	
				۴۰۵<	۱۰	معدن کاری و استخراج مواد معدنی مانند زغال‌سنگ	۹-۵	

روش تحلیل سلسله مراتبی- فازی

رتبه‌بندی شده هشت پارامتر مدل WALPSRFT استفاده شده است. مقایسه و ارزش‌گذاری پارامترها با نظر کارشناسان مجرب (بر اساس میزان تأثیرگذاری هر پارامتر بر فرونشست در منطقه مورد مطالعه)، مطالعات گذشته در دشت‌های دیگر کشور که دارای شرایط هیدروژئولوژیکی مشابه هستند و طبق جدول ۳ انجام شده است.

به‌منظور ارزیابی مدل WALPSRFT و بهینه‌سازی وزن‌های بکار رفته در این مدل (باهداف ارزش‌گذاری پارامترهای تأثیرگذار بر آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان)، از روش ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی-فازی برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری فرونشست در دشت استفاده شده است. برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری فرونشست در آبخوان به روش ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی-فازی از همان نقشه‌های

جدول ۳ - نحوه ارزش گذاری ارجحیت در ماتریس زوجی (قدوسی پور، ۱۳۹۸).

مقدار ارزش (امتیاز)	درجه اهمیت در مقایسه زوجی
۱	با اهمیت و ارجحیت یکسان
۳	کمی مرجح یا کمی مهم تر
۵	ارجحیت زیاد
۷	ارجحیت خیلی زیاد
۹	کاملاً مرجح یا کاملاً مهم تر

وزن دهی به پارامترها (معیارها)

می توان توابع گوسین^۴، سیگموئید^۵، ز شکل و خطی^۶ نام برد. در این تحقیق از تابع خطی استفاده و مقادیر حداکثر و حداقل برای هر پارامتر بر اساس مقادیر حداقل و حداکثر رتبه های بکار گرفته شده طبق جدول ۲، قرار داده شده است. در این مقیاس ها اعداد بزرگ تر مطلوبیت بیش تری خواهند داشت. به این معنی عدد یک از بالاترین مطلوبیت و عدد صفر فاقد مطلوبیت است (Lin et al., 1996).

بعد از تهیه نقشه های استاندارد هر پارامتر، به منظور ارزش دهی به پارامترها برای تهیه نقشه آسیب پذیری فرونشست در سطح دشت، ابتدا هریک از نقشه ها در وزنی که به وسیله روش AHP به دست آمده، ضرب شده است.

تلفیق نقشه معیار

حال به منظور ترکیب هشت نقشه به دست آمده از روش منطق فازی استفاده شده و به وسیله گزینه Fuzzy Overlay نقشه نهایی آسیب پذیری فرونشست در آبخوان به دست آمده است. با در دست داشتن دو یا چند نقشه با توابع عضویت فازی برای مجموعه مشابه عملگرهای متنوعی را می توان برای ترکیب مقادیر عضویت با یکدیگر به کار گرفت (Malczewski et al., 1999; یوسفی و همکاران، ۱۳۹۵) که شامل موارد زیر می شود:

- ۱- عملگر عطفی فازی (AND) زمانی که دو یا چند معیار با هم می توانند حل یک مسئله کمک کنند،
- ۲- عملگر فصلی فازی (OR) وقتی که معیارهای مثبت کافی در منطقه مطالعاتی وجود داشته باشد،
- ۳- عملگر ضربی فازی (Product) زمانی که نقشه معیار اثر کاهشی بر روی هم داشته باشند،
- ۴- عملگر جمعی فازی (Sum) وقتی که نقشه های معیار اثر افزایشی بر

به منظور وزن دهی به پارامترها، ابتدا پارامترها با توجه مقادیر ارزش گذاری هریک از آنها، از بزرگ به کوچک مرتب و سپس با بکار گیری نرم افزار Expert Choice 11 و استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) مقایسه بین پارامترها صورت گرفته و میزان تأثیر هریک در فرونشست بررسی شده است.

در این راستا در قدم بعد، معیارهای اصلی (هشت پارامتر فوق الذکر) مؤثر بر هدف (فرونشست) به صورت زیرشاخه هدف در نمودار درختی تکمیل و وزن دهی بین معیارها انجام می شود (مقدم و همکاران، ۱۳۹۹). این کار را می توان به چند صورت نظیر مقایسه زوجی عددی، گرافیکی و محاوره ای و مقایسه کلی در نرم افزار انجام داد. در این تحقیق، از روش مقایسه ی زوجی عددی استفاده شده است. در اثنای مقایسه زوجی برای هر مجموعه، تجزیه و تحلیل معیار سازگاری که به وسیله نرم افزار صورت می پذیرد باید کمتر از ۰/۱ باشد (Tzeng and Teng, 2002).

در این مطالعه هشت نقشه هم مقدار رتبه بندی شده (نقشه معیار) دارای محدوده و مقیاس اندازه گیری متفاوتی هستند. برای تحلیل و ارزیابی چند معیاری باید مقیاس اندازه گیری پارامترها همخوان و متناسب با یکدیگر باشند. برای این منظور از فرآیند استانداردسازی معیارها (شامل روش های قطعی، احتمالاتی و فازی) استفاده می شود. در این تحقیق از روش فازی و به کمک گزینه Fuzzy Membership در نرم افزار Arc GIS 10.4 استفاده و تمامی مقادیر در محدوده بین صفر تا یک قرار داده شده است. در روش استانداردسازی فازی از توابع مختلفی برای باز قالب بندی استفاده می شود که از جمله

⁶ Linear

⁴ Gaussian

⁵ Linear

نتایج و بحث

تهیه مدل WALPSRFT

مدل WALPSRFT طی مراحل زیر تهیه شد:

ابتدا برای تهیه نقشه افت سطح آب زیرزمینی، از آمار سطح آب زیرزمینی ۱۰ حلقه چاه مشاهده‌ای در دوره ۱۴ ساله (۱۳۸۱-۱۳۹۵) استفاده شد.

مقدار افت متوسط سالانه در هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای طی این مدت محاسبه شد. سپس برای تبدیل داده‌های افت نقطه‌ای در هر چاه به سطح، درون‌یابی بین داده‌ها انجام گرفت. برای این منظور از روش معکوس وزنی فاصله (IDW)، کریجینگ^۹ معمولی و ساده استفاده شد که از این بین روش IDW که به‌عنوان روشی با کمترین خطای محاسباتی برای درون‌یابی داده‌های افت سطح آب زیرزمینی انتخاب شد. پس از تهیه لایه‌ی افت متوسط سالانه سطح آب زیرزمینی، بر طبق جدول ۴ کلاس‌بندی و رتبه‌دهی انجام شد و نقشه رتبه‌بندی افت متوسط سالانه سطح آب زیرزمینی به‌دست آمد (شکل ۵). به‌منظور محاسبه مقدار تغذیه آبخوان از روش تغییرات حجم آب زیرزمینی آبخوان (رابطه ۲) استفاده شد و با توجه به این که آبخوان دشت دامنه-داران دارای چاه‌های پمپاژ است، برای محاسبه میزان تغذیه این رابطه با اندکی تغییر و در واقع با در نظر گرفتن حجم آب پمپاژ انجام شده، مورد استفاده قرار گرفت. تغییرات سالانه سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای منطقه برای سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ (اختلاف سطح آب مهر سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵) محاسبه و با ضرب در ضریب ذخیره آبخوان، تغییرات حجم مخزن به‌دست آمد. برای هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه شبکه‌بندی تیسن رسم شد (شکل ۴) و مجموع پمپاژ از چاه‌های واقع در هر پلی گون محاسبه شد.

سپس با محاسبه مساحت هر پلی گون و تغییرات سطح آب زیرزمینی برای هر چاه مشاهده‌ای و به کمک رابطه ۳ میزان تغذیه خالص برای هر پلی گون محاسبه شد. میزان تغذیه سالانه و مجموع پمپاژ سالانه در هر پلی گون به چاه مشاهده‌ای مربوط به آن تعمیم داده شد و با استفاده از روش کریجینگ معمولی درون‌یابی شد و نقشه تغذیه خالص و مقدار پمپاژ به‌دست آمد.

روی هم داشته باشند و ۵- عملگر گاما (Gama) زمانی که تأثیرات کاهشی و افزایشی در تعامل معیارها وجود داشته باشد، استفاده می‌شود. در این تحقیق نیز به دلیل اثر توأمان پارامترها در فرونشست در آبخوان، عملگر عطفی فازی به‌عنوان مدل منتخب جهت ارزیابی و تعیین مدل‌های تلفیقی مناسب، انتخاب شده است.

روش تداخل سنج راداری

اصطلاح تداخل سنجی برگرفته از واژه تداخل به معنی تداخل دو موج روی سطح زمین می‌باشد. در روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) از تصاویر متوالی، از یک سمت دید راداری که بر روی ماهواره نصب شده، استفاده می‌شود تا جابجایی‌های قائم سطح زمین تخمین زده شود. تداخل‌سنج حاصل تفاضل فازی بین دو تصویر راداری با دقت بالا که از یک منطقه گرفته شده است، جهت تخمین جابجایی‌های قائم سطح زمین استفاده می‌گردد (Galloway and Hoffmann, 2007; Raucoules et al., 2007).

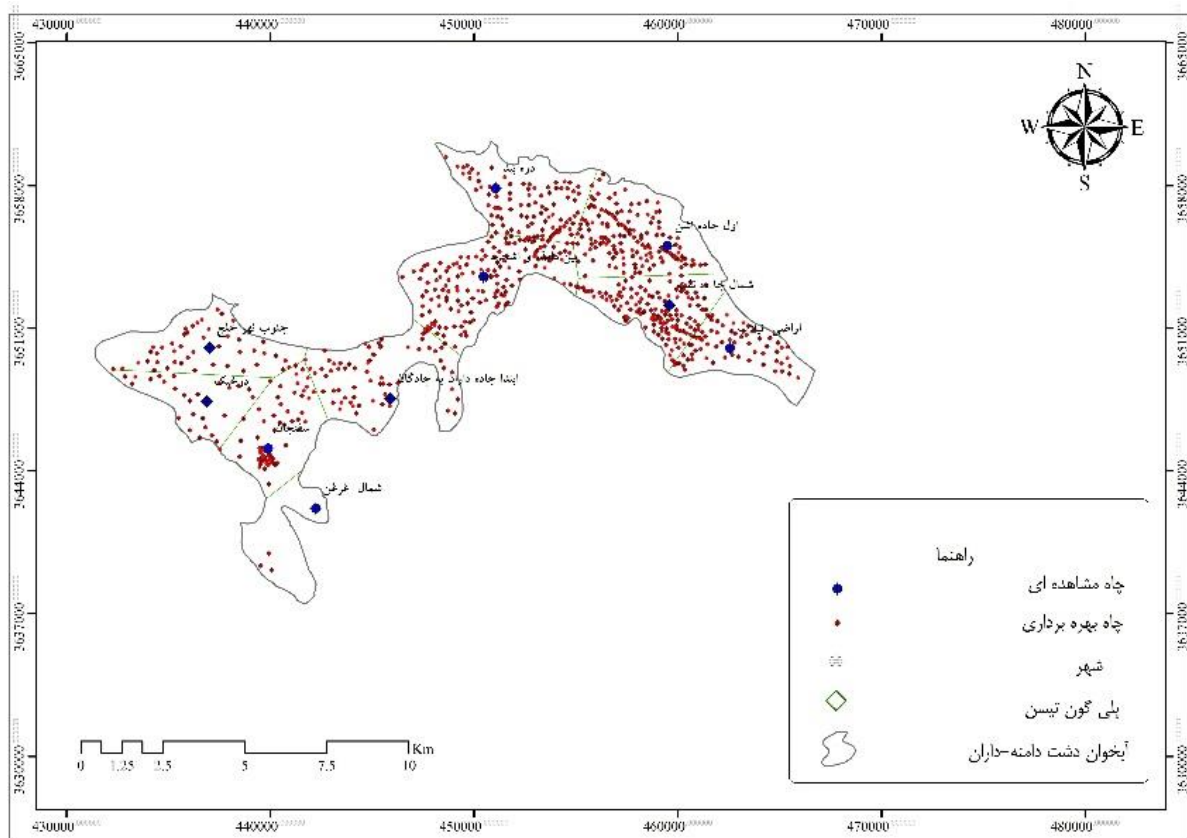
تصاویر راداری ممکن است از موقعیت‌های تصویربرداری مختلف و یا در زمان‌های مختلف اخذ شده باشند؛ بنابراین به‌منظور به‌دست آوردن اختلاف فاز، پیکسل‌های متناظر در دو تصویر راداری با بازه زمانی معین شناسایی شده و معادلات مربوط به هر کدام در هم ضرب می‌شود. اختلاف فاز به‌دست آمده از پیکسل‌های متناظر در دو تصویر راداری از یک منطقه، تشکیل یک اینترفروگرام را می‌دهد. تصویر اینترفروگرام که عملیات فیلتر، تصحیح فاز و سایر اصلاحات (اثر باقی‌مانده توپوگرافی) روی آن صورت گرفته می‌تواند محدوده فرونشست را به‌خوبی نشان دهد. جهت به‌دست آوردن نرخ فرونشست باید تغییر فاز به جابجایی صورت گیرد (اکبری، ۱۳۹۱).

در این مطالعه برای به‌کارگیری روش تداخل‌سنج راداری در تهیه میزان و روند فرونشست آبخوان دشت دامنه-داران و با هدف صحت‌سنجی نتایج روش‌های منتخب در این تحقیق، از داده‌های راداری نوع SLC^۷ با سیستم تصویربرداری iw^۸ ماهواره Sentinel-1 استفاده شده است. پردازش تصاویر راداری نیز در محیط نرم‌افزار Snap انجام شده است.

^۹ Kriging

^۷ Single Look Complex

^۸ Interferometry Wide Swat



شکل ۴- پلی گون های تیسن چاه های مشاهده ای در آبخوان دشت دامنه-داران.

در نهایت بر اساس جدول ۴ نقشه هر دو پارامتر رتبه بندی شد و لایه تغذیه خالص و تخلیه مدل WALPSRFT به دست آمد (شکل ۵).

$$R = S_y * \frac{\Delta h}{\Delta t} + \text{Pumping} \quad (3)$$

برای تهیه نقشه محیط آبخوان دشت دامنه-داران از لاگ چاه های مشاهده ای، اکتشافی و بهره برداری منطقه استفاده شده است. جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان دشت دامنه-داران بیشتر ترکیبی از گراول، ماسه، رس و سیلت است. بر اساس نسبت جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان در هر چاه و طبق جدول ۴، یک رتبه بین سه تا نه به آن چاه اختصاص داده شد و بر اساس مختصات جغرافیایی هر چاه و ساخت یک لایه نقطه ای در محیط نرم افزار Arc GIS 10.4 به روش کریجینگ معمولی درون یابی انجام و لایه محیط آبخوان تهیه شد. در دشت دامنه-داران تنوع لیتولوژی آبرفت تشکیل دهنده آبخوان بسیار زیاد بوده و از الگوی خاصی پیروی نمی کند (شکل ۵). ضخامت آبرفت در بخش های شرقی شهر دامنه حداکثر تا حدود ۱۱۰ متر و در بخش های غربی و به ویژه نواحی شرقی دشت حدفاصل روستای نماگرد تا غرغن تا بالای ۱۵۰ متر هم

به منظور تهیه لایه ضخامت آبخوان از اطلاعات عمق ۲۲۵ چاه شامل ۷ چاه اکتشافی و ۲۱۸ چاه بهره برداری که به سنگ کف برخورد کرده اند استفاده شده و با نتایج مطالعاتی ژئوفیزیکی دشت که قبلاً انجام شده صحت سنجی شده است. سپس بر اساس جدول ۴ رتبه بندی شده و لایه نهایی ضخامت آبخوان تهیه شد. برای تهیه نقشه توپوگرافی نیز به کمک DEM منطقه و رتبه بندی و وزن دهی طبقات ارتفاعی، انحنا و درصد شیب در سطح آبخوان، لایه نهایی توپوگرافی تهیه شد. لایه خطی موقعیت گسل های اصلی منطقه نیز به کمک نقشه های ۱/۱۰۰۰۰۰ زمین شناسی منطقه و مطالعات قبلی در منطقه در محیط نرم افزار Arc GIS 10.4 تهیه شد. سپس به کمک روش فاصله اقلیدسی نقشه فاصله از گسل و بر اساس جدول ۴، لایه رتبه بندی شده فاصله از گسل به دست آمد (شکل ۵).

اجرای مدل و محاسبه اندیس آسیب پذیری WALPSRFT در آبخوان دشت دامنه-داران

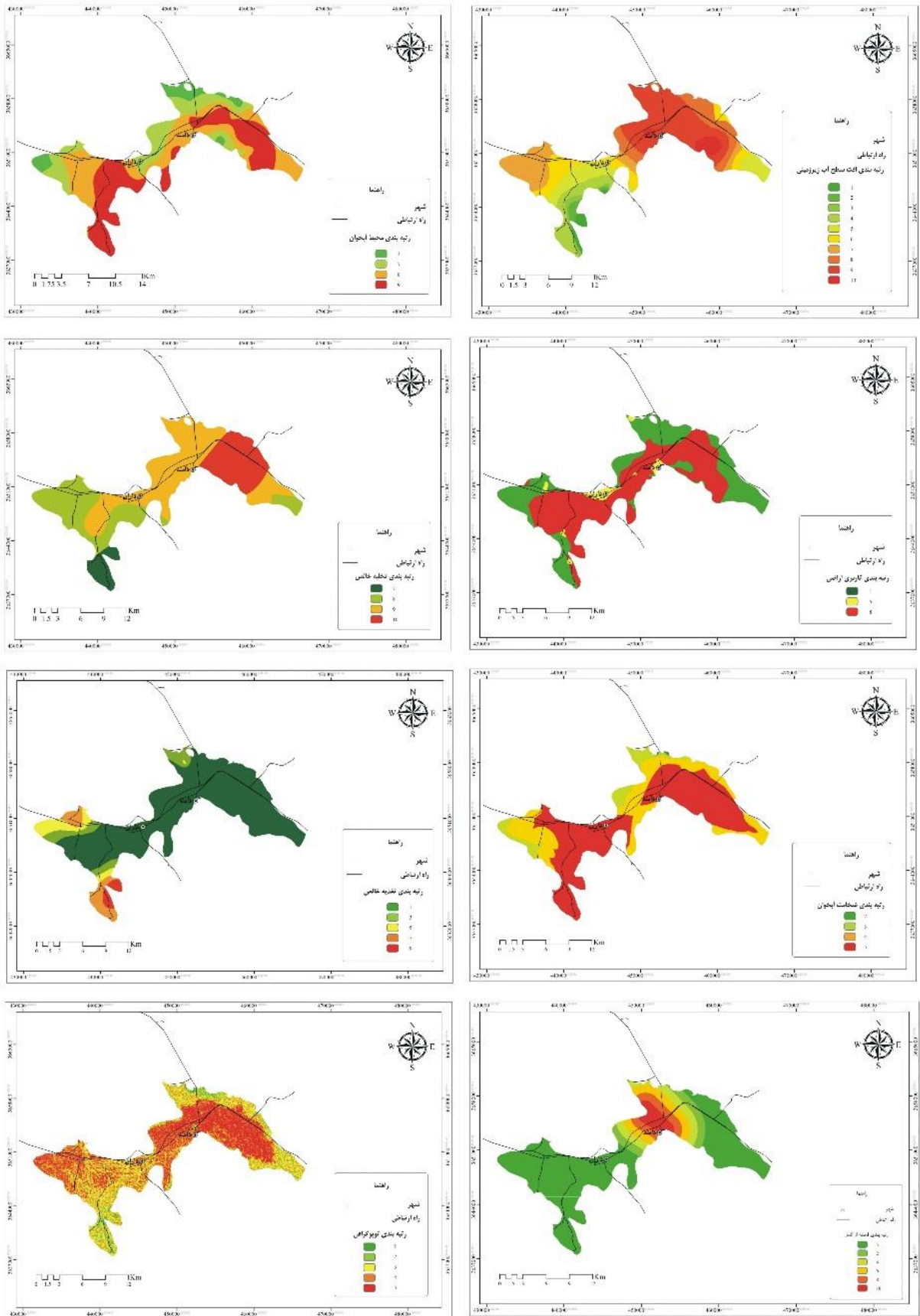
در این مرحله از مدل WALPSRFT، نقشه های رتبه بندی شده هر لایه، با توجه به وزن های ارائه شده در جدول ۱ و به

۱۰۳ تا ۱۸۹ به دست آمد. سپس بر اساس مقادیر شاخص فوق، آبخوان از نظر آسیب پذیری فرونشست به چهار ناحیه با آسیب پذیری کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم شد (شکل ۶). بر این اساس حدود یک سوم از مساحت آبخوان دارای آسیب پذیری زیاد را به خود اختصاص می دهد (جدول ۵).

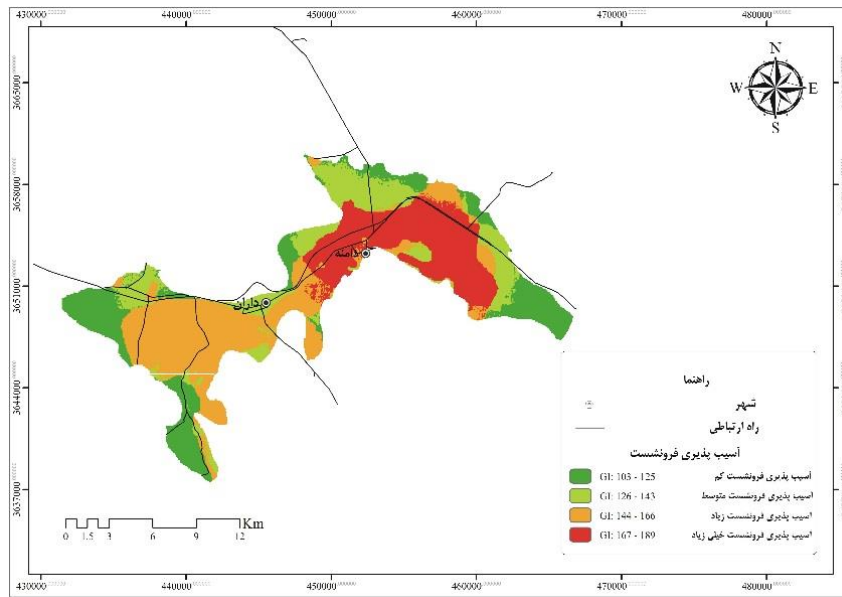
کمک ابزار Raster calculator در محیط نرم افزار GIS10.4 وزن دهی و سپس برای تلفیق لایه ها از تابع هم پوشانی وزنی نیز از ابزار Raster calculator استفاده شد. بدین ترتیب نقشه نهایی مدل WALPSRFT به دست آمد. شاخص آسیب پذیری فرونشست در آبخوان دشت دامنه داران بین

جدول ۴- بازه ها و رتبه های مربوط به پارامترهای مختلف در مدل WALPSRFT در منطقه مورد مطالعه.

تخلیه از آبخوان (سانتی متر در سال)		تغذیه خالص (سانتی متر در سال)		محیط آبخوان		افت سطح آب زیرزمینی (متر در سال)			
محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه		
۲۰-۵	۷	۹-۴	۹	رسوبات آبرفتی دانه درشت	۳	۰/۰۲-۰	۱		
۴۰-۲۰	۸	۱۴-۹	۷	رس و سیلت	۹	۰/۰۵-	۲		
۶۵-۴۰	۹	۱۹-۱۴	۵	ماسه با اندکی سیلت و رس	۸	۰/۱-۰/۰۵	۳		
۶۵<	۱۰	۲۴-۱۹	۳	ماسه و گراول با سیلت و رس زیاد	۷	۰/۳-۰/۱	۴		
		۲۴<	۱			۰/۶-۰/۳	۵		
						۰/۹-۰/۰۶	۶		
						۱/۲-۰/۱۹	۷		
						۱/۵-۱/۲	۸		
						۲-۱/۵	۹		
						۲<	۱۰		
عوامل توپوگرافی				ضخامت بخش اشباع آبخوان (متر)		کاربری اراضی		فاصله از گسل (کیلومتر)	
درصد شیب		انحنای شیب		طبقات ارتفاعی		محدوده		رتبه	
محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه
۱>	۵	۱(محدب)	۱	کوهستانی	۱	مناطق کشاورزی آبی	۸	۱>	۱۰
۲-۱۰		۰(هموار)	۲	کوهپایه ای	۲	مناطق شهری و مسکونی	۵	۲-۱	۸
۱۰-۲۰	۴	۱-(مقعر)	۳	دشت	۳	مناطق کشاورزی دیم و مراتع	۱	۳-۲	۶
۲۰-۳۰	۳							۴-۳	۴
۳۰<								۵-۴	۲
								۵<	۱



شکل ۵- رتبه بندی پارامترهای مدل WALPSRFT آبخوان دشت دامنه-داران.



شکل ۶- نقشه آسیب پذیری ذاتی فرونشست در آبخوان دشت دامنه-داران با استفاده از مدل WALPSRFT.

جدول ۵- اندیس WI در آبخوان دشت دامنه-داران.

درصد مساحت	مساحت (Km ²)	محدوده WI	وضعیت آبخوان
۲۳	۵۱	۱۰۳-۱۲۵	آسیب پذیری کم
۲۰	۴۴/۱	۱۴۳-۱۲۶	آسیب پذیری متوسط
۳۳	۷۳	۱۶۶-۱۴۴	آسیب پذیری زیاد
۲۴	۵۲/۲	۱۸۹-۱۶۷	آسیب پذیری بسیار زیاد

از کارشناسان شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در خصوص ارزش‌گذاری پارامترهای مؤثر بر فرونشست در آبخوان دشت دامنه-داران و مطالعات قبلی انجام‌شده در خصوص ارزیابی آسیب‌پذیری فرونشست دشت‌های دیگر کشور که دارای شرایط هیدروژئولوژیکی مشابه هستند، اولویت‌بندی تأثیر پارامترهای مذکور بر رخداد فرونشست در دشت دامنه-داران تعیین شد (جدول ۶).

روش تحلیل سلسله مراتبی- فازی

باهدف بهینه‌سازی وزن‌های اختصاص داده‌شده در تهیه مدل WALPSRFT و به‌منظور ارزیابی این مدل در تهیه نقشه آسیب‌پذیری فرونشست در دشت دامنه-داران از روش ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی- فازی استفاده‌شده است. بدین ترتیب از نقشه تغییرات مکانی رتبه‌بندی شده هشت پارامتر بکار رفته در مدل WALPSRFT استفاده شده است. بر این اساس در مرحله اول با طراحی پرسش‌نامه و کسب نظرات از چندین تن

جدول ۶- ارزش‌گذاری پارامترهای مؤثر بر فرونشست در دشت دامنه-داران.

ارزش	پارامترها
۹	افت سالانه سطح آب زیرزمینی
۹	محیط آبخوان
۸	مقدار تخلیه یا پمپاژ
۷	کاربری اراضی
۵	تغذیه خالص
۳	ضخامت آبخوان
۳	توپوگرافی
۱	فاصله از گسل

وزنی را برای هر پارامتر اختصاص می‌دهد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد معیار ارزیابی صحت درجه اهمیت در نظر گرفته شده و پایداری آن، با ضریب ناسازگاری معین می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود میزان این ضریب 0.00003 به دست آمد که حاکی انتخاب مناسب درجات اهمیت بین پارامترها و سازگاری مناسب بین آن‌ها می‌باشد.

بدین ترتیب پارامترها بر اساس میزان ارزش هر پارامتر، از مقدار بیشتر به کمتر مرتب شدند و در نرم‌افزار Expert Choice 11 به عنوان معیارهای اصلی هدف تعریف شدند و نمودار درختی توسط نرم‌افزار تشکیل شد. اکنون به منظور مقایسه دودویی هر یک از پارامترها نسبت به هم با توجه ارزش هر دو پارامتر نسبت به هم، یک نسبتی برای آنها در نظر گرفته شد که در جدول ۷ آورده شده است. براین اساس، نرم‌افزار

جدول ۷- مقایسه دودویی بین پارامترهای مؤثر بر فرونشست آبخوان.

پارامتر	W	A	P	L	R	S	T	F	وزن
W	۱	۱/۱۲	۱/۲۸	۱/۸	۳	۳	۹	۰/۲	
A		۱/۱۲	۱/۲۸	۱/۸	۳	۳	۹	۰/۲	
P			۱/۱۲	۱/۶	۲/۶	۲/۶	۸	۰/۱۷۷	
L				۱/۴	۳/۲	۲/۳	۷	۰/۱۵۶	
R					۱/۶	۱/۶	۵	۰/۱۱	
S						۱	۳	۰/۰۶۷	
T							۳	۰/۰۶۷	
F								۰/۰۲۲	

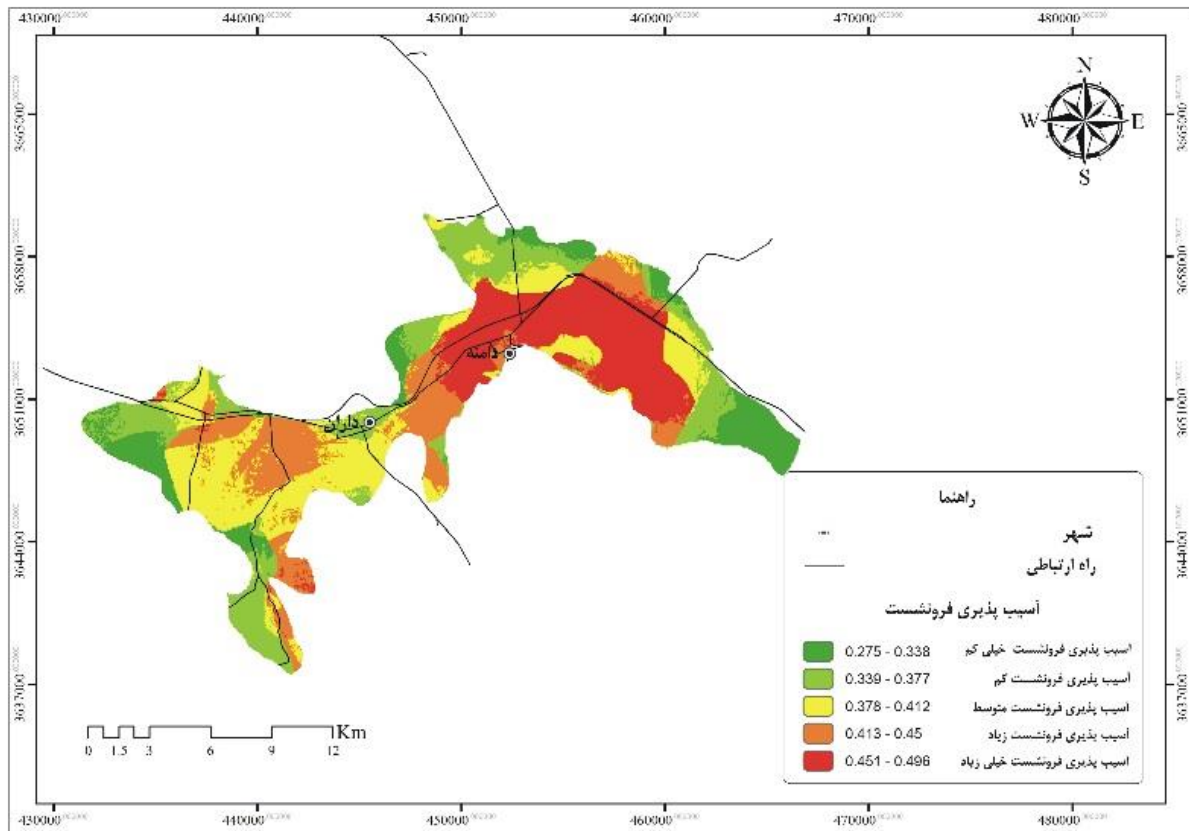
Priorities with respect to:
Goal: Subsidence



شکل ۷- اولویت‌بندی و وزن‌دهی به هشت پارامتر مؤثر بر فرونشست.

رتبه‌ای که هر پارامتر می‌تواند به خود اختصاص دهد، در نظر گرفته شده است. سپس هر یک از نقشه‌های استاندارد شده پارامترها در وزن به دست آمده به روش AHP ضرب و در واقع بر اساس درجه اهمیت آنها در فرونشست ارزش‌دهی شده‌اند. در مرحله بعد بر اساس روش فازی با یکدیگر ترکیب شده و نقشه نهایی آسیب‌پذیری فرونشست در سطح دشت دامنه-داران به دست آمده است (شکل ۸).

بعد از تعیین ضرایب اهمیت (وزن) هر یک از پارامترها، باهدف تهیه نقشه آسیب‌پذیری فرونشست و ارزش‌دهی به آن‌ها، نقشه‌های مربوط پارامترهای مذکور تهیه و هم مقیاس شدند. بدین منظور فرآیند استانداردسازی پارامترها به روش فازی انجام گرفت. برای باز قالب‌سازی پارامترها به مقیاس یکسان بین صفر و یک، تابع خطی استفاده و مقادیر حداکثر و حداقل برای هر پارامتر نیز بر اساس طبقه‌بندی حداقل و حداکثر



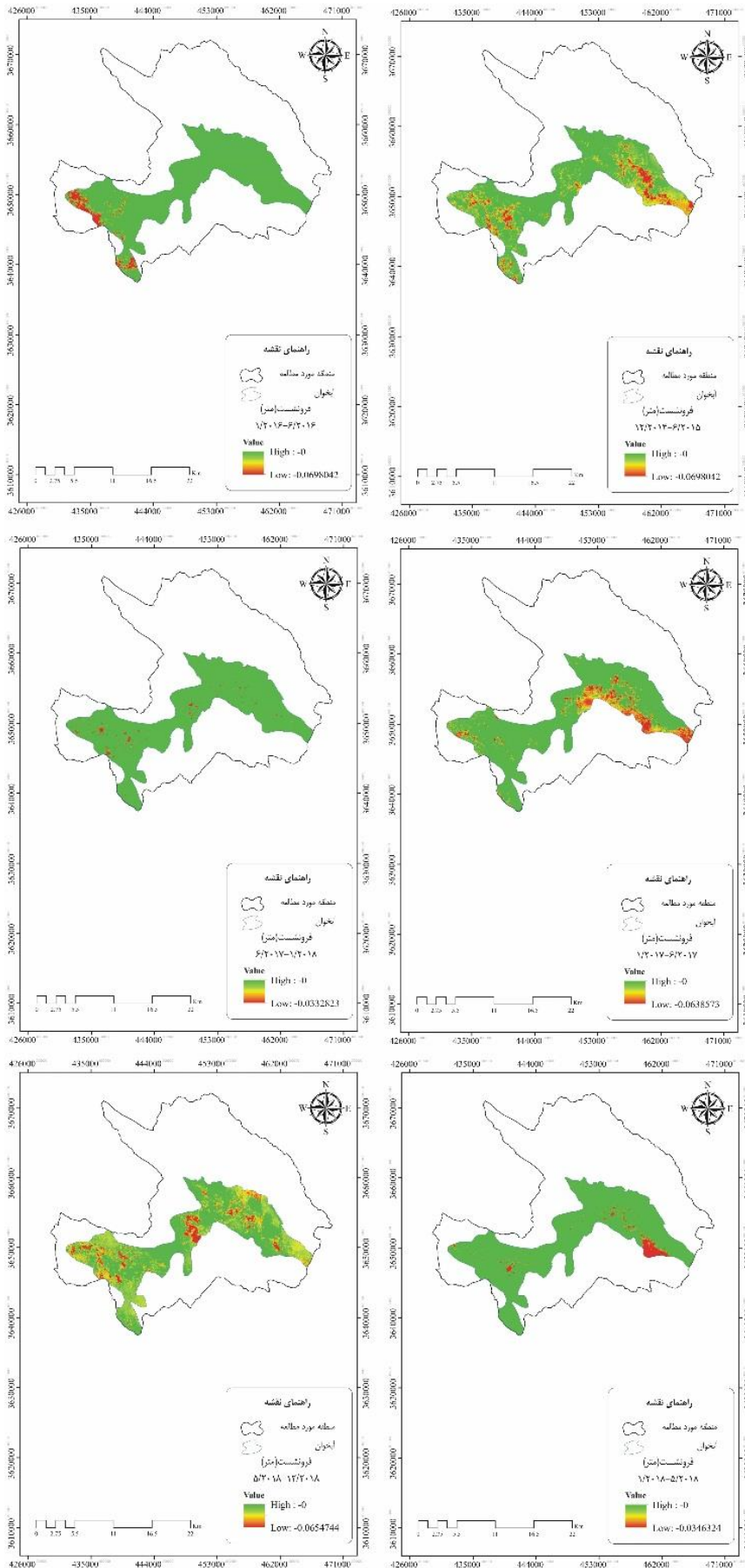
شکل ۸- نقشه آسیب پذیری ذاتی فرونشست در آبخوان دشت دامنه - داران با استفاده از روش ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی-فازی

مقایسه شده است. در تهیه میزان و روند فرونشست آبخوان دشت دامنه-داران به روش مذکور، از داده‌های راداری نوع SLC با سیستم تصویربرداری iw ماهواره Sentinel-1 استفاده گردید. پردازش تصاویر راداری نیز در محیط نرم‌افزار Snap انجام شد. بازه‌های زمانی انتخابی ۶ ماهه بوده و مابین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ میزان فرونشست در آبخوان برآورد شده است. جدول ۸ میزان فرونشست به صورت مقادیر حداقل و حداکثر در هر بازه زمانی آورده شده و در شکل ۹ به صورت نقشه ارائه شده است. تصاویر از سایت Sentinel Scientific Data Hub دانلود شده است. این داده‌ها در دو حالت VH و VV تهیه شده است و از آنجایی که داده در سطح ۱ (SLC) قرار دارد، در نتیجه به پیش پردازش‌های اولیه‌ای تقریباً زیادی نیاز دارد تا به حالت مناسب جهت انجام پردازش‌های بعدی تبدیل شوند.

بدین ترتیب نقشه آسیب‌پذیری فرونشست در آبخوان سطح آبخوان به پنج ناحیه با آسیب‌پذیری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم می‌شود. مقایسه نقشه حاصل از این روش با مدل WALPSRFT نشان‌دهنده آن است که روش سلسله مراتبی-فازی با توجه اختصاص وزن‌های بهینه و بر اساس اصول تصمیم‌گیری صحیح در اولویت دادن و وزن‌دهی به پارامترها، استعداد فرونشست در آبخوان را در بخش‌های مختلف آن را با جزئیات بیشتری در کل سطح دشت تفکیک می‌کند.

تعیین نرخ فرونشست در آبخوان به روش تداخل‌سنج راداری

به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از تحلیل آسیب‌پذیری آبخوان، نرخ فرونشست در دشت دامنه-داران به کمک روش تداخل‌سنج راداری تعیین و با نتایج دو مدل فوق



شکل ۹- مقادیر فرونشست در آبخوان آبرفتی دامنه-داران در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۳۹۷.

جدول ۸- نتایج نرخ فرونشست در آبخوان در بازه‌های زمانی ۱۳۹۷-۱۳۹۳.

بازه زمانی	حداقل (Cm)	حداکثر (cm)
۱۳۹۴/۳ تا ۱۳۹۳/۹	۰	۹/۱
۱۳۹۶/۳ تا ۱۳۹۵/۱۰	۰	۶/۹۸
۱۳۹۷/۳ تا ۱۳۹۶/۱۰	۰	۷
۱۳۹۶/۱۰ تا ۱۳۹۶/۳	۰	۳/۳
۱۳۹۷/۲ تا ۱۳۹۶/۱۰	۰	۳/۴
۱۳۹۷/۹ تا ۱۳۹۷/۲	۰	۶/۵

از آبخوان که طی دوره چهارساله فوق دچار فرونشست شده با نقشه آسیب‌پذیری آبخوان که به روش تحلیل سلسله مراتبی- فازی به‌دست‌آمده، انطباق بیشتری داشته و کارایی بالاتر این روش را در تحلیل استعداد فرونشست در آبخوان نشان می‌دهد. به‌منظور اطمینان بیشتر نتایج حاصله، ضریب همبستگی بین نقشه‌های هشت پارامترهای مورد استفاده در هر دو روش با نقشه‌های آسیب‌پذیری به‌دست‌آمده به کمک جعبه‌ابزار SDM Toolbox در نرم‌افزار Arc GIS10.4 به‌دست آمد (جدول ۹ و ۱۰).

با توجه به نتایج به‌دست از روش InSAR، تقریباً تمام مساحت آبخوان آبرفتی دشت دامنه-داران درگیر پدیده فرونشست است. طی بازه زمانی چهارساله که نرخ فرونشست در آبخوان برآورد شده طی بازه ۱۳۹۳/۹ تا ۱۳۹۴/۳ و ۱۳۹۵/۱۰ تا ۱۳۹۶/۳ بیشترین توسعه فرونشست را نشان داده و به لحاظ مکانی هم با شواهد فرونشست واقعی در سطح منطقه انطباق دارد. تکرار این پدیده و حداکثر میزان آن در بخش جنوب‌شرقی و شرقی دشت به‌ویژه حوالی شهر دامنه رخ داده است. مقایسه نتایج حاصله با نقشه‌های آسیب‌پذیری به‌دست‌آمده از دو روش مؤید آن است نحوه پراکندگی مناطقی

جدول ۹- ماتریس همبستگی بین نقشه‌های هشت پارامترهای مؤثر بر فرونشست با آسیب‌پذیری فرونشست به روش WALPSRFT

پارامتر	V.I (WARPSLFT)	W	A	L	P	S	R	F	T
V.I (WARPSLFT)	۱								
W	۰/۴۴	۱							
A	۰/۳۵	-۰/۴۲	۱						
L	۰/۷۸	-۰/۰۲	۰/۳۹	۱					
P	۰/۴۸	۰/۸	-۰/۱۴	۰/۱۹	۱				
S	۰/۳۵	۰/۶۲	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۸۴	۱			
R	۰/۳۷	۰/۳۱	۰/۶۵	۰/۳۶	-۰/۰۳	۰/۰۱	۱		
F	۰/۲۳	۰/۷۷	۰/۲۳	-۰/۱۳	-۰/۷۶	-۰/۶۵	۰/۰۸	۱	
T	۰/۴۵	-۰/۴۳	-۰/۰۴	۰/۲	۰/۴	۰/۳	۰/۰۲	-۰/۲۷	۱

جدول ۱۰- ماتریس همبستگی بین نقشه‌های هشت پارامترهای مؤثر بر فرونشست با آسیب‌پذیری فرونشست به روش AHP-Fuzzy

پارامتر	V.I (AHP-Fuzzy)	W	A	L	P	S	R	F	T
V.I (AHP-Fuzzy)	۱								
W	۰/۴۹	۱							
A	۰/۲۹	۰/۴۲	۱						
L	۰/۸۲	-۰/۰۲	۰/۳۹	۱					
P	۰/۵۷	۰/۸	-۰/۱۴	۰/۱۹	۱				
S	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۶۵	۰/۳۶	-۰/۰۳	۱			
R	۰/۴۳	۰/۶۲	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۸۴	۰/۰۱	۱		
F	۰/۲۵	-۰/۷	۰/۲۳	-۰/۱۳	-۰/۷۷	۰/۰۷۹	-۰/۶۵	۱	
T	۰/۴۵	-۰/۴۳	-۰/۰۴	۰/۲	۰/۴	۰/۰۲	۰/۳	-۰/۲۷	۱

بررسی شرایط واقعی منطقه یعنی نواحی که بیشتر درگیر فرونشست شده و به صورت درز و شکاف در مناطق مسکونی و لوله‌زایی چاه‌ها ظاهر شده نیز نتایج حاصله را تأیید می‌کند (شکل ۱۰).

نتایج به دست آمده نیز مؤید این است تمامی هشت پارامتر مؤثر بر فرونشست در دشت دامنه-داران همبستگی متفاوت و معنی‌داری با نقشه‌های آسیب‌پذیری دو روش مذکور نشان می‌دهد و از طرفی ضرایب همبستگی این پارامترها با نقشه حاصل از روش سلسله مراتبی-فازی همبستگی بیشتری دارد.



شکل ۱۰- تصاویری از شواهد واقعی فرونشست در مناطق مسکونی شهر دامنه و شرق دشت دامنه داران.

روش سلسله مراتبی-فازی با توجه اختصاص وزن‌های بهینه و بر اساس اصول تصمیم‌گیری صحیح در اولویت دادن و وزن‌دهی به پارامترها، با جزئیات بیشتری در کل سطح دشت، استعداد فرونشست در آبخوان را در بخش‌های مختلف آن تفکیک می‌نماید.

در نهایت به منظور صحت سنجی مدل‌های مذکور، نرخ فرونشست در آبخوان در بازه‌های زمانی شش ماه طی چهار سال (۱۳۹۳-۱۳۹۷) و به کمک روش تداخل‌سنج راداری (با استفاده از داده‌های راداری نوع SLC با سیستم تصویربرداری iw ماهواره Sentinel-1) تعیین گردید. پردازش تصاویر راداری نیز در محیط نرم‌افزار Snap صورت گرفت. همان‌طوری که در متن اشاره شد تقریباً کل آبخوان درگیر فرونشست بوده و حداکثر میزان آن طی بازه ۱۳۹۳/۹ تا ۱۳۹۴/۳ و ۱۳۹۵/۱۰ تا ۱۳۹۶/۳ رخ داده و میزان آن بین ۶ تا ۹ سانتی‌متر بوده و بیشتر بخش‌های جنوب‌شرقی دشت و حوالی شهر دامنه را درگیر کرده است.

نتیجه‌گیری

پژوهش فوق باهدف تحلیل پدیده فرونشست در یک آبخوان آبرفتی و شناخت عوامل مؤثر بر آن انجام شد. ابتدا به منظور شناخت عوامل مؤثر بر پدیده فرونشست مدل تحلیلی تحت عنوان مدل WALPSRFT بکار گرفته شد. این مدل یک روش جامع در بررسی آسیب‌پذیری نواحی مختلف یک آبخوان نسبت به پدیده فرونشست است که هشت پارامتر بنیادی و تأثیرگذار در آن را در برمی‌گیرد. نتایج مدل WALPSRFT نشان می‌دهد که مناطق مسکونی شهر دامنه و حوالی آن و همچنین بخش‌های اعظمی از شرق و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه که به دشت قهیز معروف است، آسیب‌پذیری زیادی از نظر فرونشست نشان می‌دهند.

سپس باهدف بهینه‌سازی وزن‌های اختصاص داده‌شده در تهیه مدل WALPSRFT و به منظور ارزیابی این مدل در تهیه نقشه آسیب‌پذیری فرونشست در دشت دامنه-داران از روش ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی-فازی استفاده شد. مقایسه نقشه حاصل از این روش با مدل WALPSRFT نشان‌دهنده آن است که

مقدم، س. احمدی، ح. زینال زاده، ک. حصاری، ب.، ۱۳۹۹. مکان‌یابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی تجدیدشونده حوضه آبریز دریاچه ارومیه با تحلیل AHP و تکنیک فازی فضایی (مطالعه موردی: دشت ارومیه). هیدروژئولوژی، ۵(۲): ۱۴۲-۱۵۴.

مهشیدنیا، ف.، ۱۳۸۵. بانک اطلاعات فرونشست زمین در ایران. مرحله اول: الگوی اطلاعاتی و تدوین پایگاه داده، گروه بلايای طبیعی و مدیریت بحران، پایگاه ملی داده-های علوم زمین. ۱۵۸ ص.

نادری، ک. ندیری، ع. اصغری مقدم، ا. کرد، م.، ۱۳۹۴. روشی جدید برای شناسایی و تعیین مناطق در معرض خطر فرونشست (مطالعه موردی: آبخوان دشت سلماس). مجله اکوهیدرولوژی، ۵(۱): ۸۵-۹۷.

یوسفی، ح. نوراللهی، ی. صادقی، س.، ۱۳۹۵. مدل‌سازی حساسیت به زمین‌لغزش با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و روش فازی در حوزه آبخیز طالقان. هیدروژئولوژی، ۱(۲): ۶۶-۸۲.

- Adiyaman, I. B., 2012. Land subsidence and earth fissure due to groundwater pumping. PhD thesis. University of Arizona, USA, 199p.
- Bouwer H., 1993. Groundwater Hydrology. Translated by: Lotfi-Sadigh A. 13. Tabriz: Sahand University of Technology Press; (Persian):601p.
- Buckley, F., O'Sullivan, K., Mee, J. F., Evans, R. D., Dillon, P. 2003. Relationships among milk yield, body condition, cow weight, and reproduction in spring-calved Holstein-Friesians. *J. Dairy Sci*, 86: 2308-231.
- Budhu, M., Adiyaman, I. B. 2010. Mechanics of land subsidence due to groundwater pumping. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 34(14): 1459-1478.
- Chaussard, E., Wdowinski, Sh., Cano, E, C., Amelunga, F. 2014. Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140: 94-106.
- Chen, B., Gong, H., Li, X., Lei, K., Ke, Y., Duan, G., Zhou, Ch. 2014. Spatial correlation between land subsidence and urbanization in Beijing, China. *Natural Hazards*, 75: 2637-2652.
- Firdaus. H. S., Prasetyo, Y., Diyanah, D. 2018. Spatial Correlation Analysis of Land Subsidence and the Water Table Changes in Unconfined Aquifers Using Sentinel1-SAR Image and Geographic Information Systems (Case Study: Semarang City

مقایسه نتایج روش تداخل‌سنج راداری با نقشه‌های آسیب‌پذیری به‌دست‌آمده از دو روش مدل WALPSRFT و تحلیل سلسله‌مراتبی- فازی مؤید آن است نحوه پراکندگی مناطقی از آبخوان که طی دوره چهارساله فوق دچار فرونشست شده با نقشه آسیب‌پذیری آبخوان حاصل از روش تحلیل سلسله‌مراتبی- فازی انطباق بیشتری داشته و کارایی بالاتر این روش را در تحلیل استعداد فرونشست در آبخوان نشان می‌دهد. محاسبه ضریب همبستگی مابین هشت پارامتر مؤثر بر فرونشست در دشت دامنه-داران با نقشه‌های آسیب‌پذیری حاصل همبستگی متفاوت و معنی‌داری را نشان می‌دهد و از طرفی ضرایب همبستگی این پارامترها با نقشه حاصل از روش سلسله‌مراتبی- فازی همبستگی بیشتری دارد. بررسی شرایط واقعی منطقه یعنی نواحی که بیشتر درگیر فرونشست شده و به‌صورت درز و شکاف در مناطق مسکونی و لوله‌زایی‌چاه‌ها ظاهر شده نیز نتایج حاصله را تأیید می‌کند. بر اساس این مدل، اکثر مناطق دشت دامنه-داران خصوصاً بخش شرقی در معرض فرونشست می‌باشند و برای کنترل فرونشست باید برنامه‌های مدیریتی در نظر گرفته شود بنابراین با بکارگیری روش تحلیل سلسله‌مراتبی- فازی می‌توان نواحی محتمل‌تر آبخوان را از نظر فرونشست زمین را با دقت بیشتری شناسایی کرد و با مدیریت صحیح آبخوان از تداوم وقوع این پدیده مخرب جلوگیری نمود.

منابع

- اکبری، ا.، ۱۳۹۱. بررسی علل ایجاد فرونشست زمین در دشت دامنه و ارائه راهکارهای مناسب جهت جلوگیری از آن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، ۱۶۳ ص.
- حافظی مقدس، ن. غفوری، م.، ۱۳۸۸. زمین‌شناسی زیست‌محیطی. دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۷۲ ص.
- قدوسی پور، ح.، ۱۳۹۸. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP). دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۲۲۲ ص.
- عبداللهی، س.، پورقاسمی، ح.، قنبریان، غ.، صفائیان، ر.، ۱۳۹۸. شبیه‌سازی مکانی و تهیه نقشه حساسیت فرونشست زمین با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۰(۲۰): ۱۳۳-۱۴۴.

- case study of downtown Shanghai, China. *Science of the total environment*, 544: 744-753.
- Zhu, L., Gong, H., Teatini, P., Xiaojuan, L., Wang, R., Chen, B., Dai, Z. 2015. Land Subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Engineering Geology*, 193: 243-255.
- Indonesia). *E3S Web of Conferences*, 73:03022, 1-5.
- Galloway, D. L., Hoffmann, J. r. 2007. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 15: 133-154.
- Lin, H., Kao, J., Li, K., and H. Hwang. 1996. Fuzzy GIS assisted landfill silting analysis proceedings of international conference on Solid waste technology and management.
- Malczewski, J. 1999. *GIS AND Multi Criteria Decision Analysis*. John Wiley and so as Inc, 408p.
- María, J., Jimenez, M., Joven, J. A., Pirla, A. R., Lanuza, A. T. 2005. A spreadsheet module for consistent consensus building in AHP-group decision making, *Group Decision and Negotiation*, 14:89–108.
- Marín, M. H., Burbey, J. T., Cervantes, N.L., José, Á. O., De-Leon, M. E., Pintoc, A. S. 2013. Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley. México. *Engineering Geology*, 164: 172-186.
- Motagh, M., Thomas, R. W., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Andersson, J., Zschau, J. 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35: L16403.
- Nadiri, A., Taheri, Z., Khatibi, R., Barzegari, Gh., Dideban, K.h 2018. Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT. *Science of the Total Environment*, 628–629: 1043–1057.
- Niekerk, V., Walt, V. D. 2006. Dewatering of the Far West Rand dolomitic area by gold mining activities and subsequent ground instability. *Land Degradation and Development*, 17(4):441-452.
- Raucoules, D., Colesanti, C., Carnec, C., 2007. Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence. *C. R. Geoscience*, 339: 289-302.
- Scanlon, B., Healy, R., Cook, P., 2002. Choosing Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge. *Journal of Hydrology*, 10(1): 18-39.
- Trinh, M.T., Fredlund, D.G. 2000. Modeling subsidence due to ground water extraction in the Hanoi city area. *Journal of geology technology*; 37: 621-637.
- Tzeng, G.H., Teng, M.H. 2002. Multicriteria selection for a restaurant location in Taipei, *International Journal of Hospitality Management*, 21: 171–187.
- Yin, J., Yu, D., Wilby, R. 2016. Modelling the impact of land subsidence on urban pluvial flooding: A