





# ارزیابی تأخیر زمانی افت تراز آب زیرزمینی نسبت به وقوع فرونشست با استفاده از تحلیل آسیبپذیری در آبخوان دشت تسوج

مرجان معظم نیا<sup>1\*</sup>، سینا صادق فام<sup>۲</sup>

۱ – استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، آذربایجان شرقی، ایران.
 ۲ – دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، آذربایجان شرقی، ایران.
 \* نویسنده مسئول: m.moazamnia@ubonab.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸

## چکیدہ

فرونشست دشتها در اثر بهرهبرداری بیشازحد از منابع آب زیرزمینی یکی از مسائل پیش روی بیشتر دشتهای کشور است. افت تراز ایستابی آبخوانها عامل محرک برای وقوع فرونشست بوده، این در حالی است که بهدلیل پیچیدگی ماهیت مسئله، وقوع فرونشست میتواند بلافاصله پس افت تراز ایستابی آغاز نگردد. در این مطالعه گامی در راستای شناخت تأخیر زمانی افت تراز ایستابی در وقوع فرونشست برداشته شده است. آبخوان دشت تسوج بهعنوان منطقه مورد مطالعاتی، در شمال دریاچه ارومیه و در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. در سالهای اخیر، شواهد فرونشست در این آبخوان بهدلیل برداشت بیشازحد از منابع آب زیرزمینی مشاهده شده است. در سالهای اخیر، شواهد فرونشست در این آبخوان بهدلیل برداشت بیشازحد از کمی سازی شده است. نتایج تحقیق، به شناسایی نواحی آسیب پذیری این آبخوان در برابر فرونشست نیز میپردازد. بهدلیل پویا مودن افت تراز ایستابی که منجر به پویایی نتایج آسیب پذیری این آبخوان در برابر فرونشست نیز میپردازد. بهدلیل پویا محاسبه و با نتایج تداخل سنجی راداری با استفاده از نمودار ROC مقایسه شده است. نتایج آسیب پذیری در سالیان مختلف محاسبه و با نتایج تداخل سنجی راداری با استفاده از نمودار ROC مقایسه شده است. نتایج آسیب پذیری در سالیان مختلف مربوط به افت تراز ایستابی دو سال قبل بوده و فرونشست در این در برابر فرونشست نیز میپردازد. بهدلیل پویا

واژههای کلیدی: آبخوان، دشت تسوج، تراز ایستابی، دریاچه ارومیه.

#### مقدمه

پدیده فرونشست زمین شامل حرکت رو به پایین سطح زمین بوده که میتواند با مقدار اندکی جابجایی افقی نیز همراه باشد. فرونشست در اثر برداشت از آب زیرزمینی و در نتیجه تغییر تنشهای وارد بر خاک پدید میآید و میزان نشست زمین در اثر این پدیده نیز بسته به جنس خاک، متفاوت است. رابطه بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فشردگی سیستم آبخوان بر اساس اصل تنش مؤثر استوار است. زمانی که سطح آب زیرزمینی کاهش مییابد، بار تحمل شده توسط فشار آب

منفذی به ساختار اسکلت آبخوان منتقل شده و باعث فشردگی آن می شود. نتیجه این فشردگی، کاهش دائمی خلل و فرج بهعنوان فضای نگهدارنده سیال است. فرونشست زمین می تواند اثرات جبران ناپذیری در آبخوان ها داشته باشد. این اثرات می تواند شامل کاهش ظرفیت ذخیره سازی لایه های زیرزمینی، می تواند شامل کاهش ظرفیت دخیره سازی لایه های زیرزمینی، کاهش کیفیت آب های زیرزمینی، ایجاد محدودیت در پمپاژ آب های زیرزمینی، تشدید حرکت شکاف زمین، تخریب زهکش های طبیعی و به طبع آن مساعد شدن زمینه برای ایجاد سیل و ایجاد تغییرات در کانال رودخانه باشند

(Balogun et al., 2011). علاوه بر اینها، این پدیده می تواند موجب آسیبهای سازهای در بزرگراهها، ساختمانها و غیره شود. دولتها و مؤسسات تحقیقاتی در سراسر جهان سالیان سال در تلاش هستند تا ریسک و خطرات فرونشست زمین را ارزیابی کرده و از وقوع این فاجعه جلوگیری بهعمل آورند. در سالهای اخیر، اکثر مناطق کشور ازجمله دشتهای حاشیه دریاچه ارومیه با این تهدید جدی مواجه هستند. در ایران اولین فرونشست زمین در دشت رفسنجان در سال ۱۳۴۶ با پدیده لولهزایی در چاههای کشاورزی گزارش شده است (حسینی میلانی، ۱۳۷۳). در ادامه مطالعات زیادی در سطح داخلی و جهانی برای شناخت این پدیده انجام شده است که در ادامه به بررسی برخی از این مطالعات پرداخته می شود.

در تحقیقات داخلی، امیراحمدی و همکاران (۱۳۹۲)، با استفاده از تلفیق لایههایی نظیر لیتولوژی، هیدرولوژی، ژئومورفولوژی در سیستم اطلاعات جغرافیایی، پدیده فرونشست را در دشت اردبیل پیشبینی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که در آینده احتمال وقوع فرونشست در جنوب شرقی و غرب در این دشت وجود دارد. عفیفی (۱۳۹۵) با استفاده از رابطه تجربی لامب-ویتمن به ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین و عوامل مؤثر بر آن در دشت فاروق در مرودشت پرداخت. نتایج نشاندهنده این بود که مؤثرترین عوامل فرونشست زمین، عوامل تراکم و فشردگی میان لایههای رسی و برداشت بیرویه آبهای زیرزمینی هستند. نادری و همکاران (۱۳۹۷) از چهارچوبی جامع (GARDLIF) بهمنظور شناسایی مناطق محتمل فرونشست در آبخوان دشت سلماس استفاده کردند. آنها در چهارچوب مذکور از هفت لایه اطلاعاتی پمپاژ، کاربری اراضی، محیط آبخوان، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل، تغذیه خالص آبخوان و افت سطح آب زیرزمینی استفاده کردند و با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تصاویر InSAR به ارزیابی مناطق محتمل فرونشست پرداختند. نتایج آنها کارایی زیاد این روش در يتانسيليابي مناطق مختلف ازنظر احتمال وقوع فرونشست زمین را نشان میدهد. اسدی و همکاران (۱۴۰۰) به ارزیابی میزان فرونشست در دشت ایوانکی استان سمنان با استفاده از

روش تداخلسنجی راداری و روش سری زمانیSBAS پرداختهاند. روش کار به اینصورت است که ابتدا وضعیت ژئومورفولوژی، کاربری اراضی و وضعیت افت آبهای زیرزمینی ارزیابی شده و سپس با استفاده ۲۲ تصویر راداری سنتینل و روش سری زمانیSBAS میزان فرونشست منطقه محاسبه شده است. نتایج بیانگر این است که عوامل طبیعی شامل روند و جهت ناهمواریها در شکل گیری وضعیت اقلیمی و محدودیت منابع آبی نقش اصلی را داشته و محدودیت دسترسی به منابع آبی سبب بهرهبرداری بیشاز حد از آبهای زیرزمینی و افت شدید سطح آن شده است.

Kim et al. (2009) از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تهیه نقشه خطریذیری فرونشست زمین در معادن ذغالسنگ شهر در کره استفاده کردند. در این مطالعه با تحلیل احتمالات فرونشستهای قبلی موجود در منطقه، هفت عامل مؤثر در رخداد فرونشست زمین تعیین شده که این عوامل عبارتاند از: ۱- عمق رانش از نقشه تونل معدن؛ ۲- مدل رقومی ارتفاعی؛ ۳- شیب بهدست آمده از نقشه توپوگرافی؛ ۴- تراز آب زیرزمینی؛ ۵- نفوذپذیری از دادههای گمانه؛ ۶- زمینشناسی منطقه؛ ۷- کاربری اراضی. این عوامل با استفاده از شبکههای عصبی مصنوعی برای تحلیل خطرپذیری فرونشست زمین مورداستفاده قرار گرفته و وزن هر عامل با روش آموزش پس انتشار <sup>۱</sup> تعیین گردید. درنهایت شاخصهای خطرپذیری فرونشست زمین با استفاده از وزن-های تعیین شده محاسبه شده و نقشه خطر پذیری فرونشست زمین با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. Hu et al. (2009) ريسک فرونشست زمين در منطقه ساحلي در چین را بر اساس شاخص ریسک فاجعه<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار دادند. برای تهیه نقشه خطرپذیری در منطقه، پارامترهای حجم فرونشست تجمعی، سرعت فرونشست زمین و میزان برداشت از آبهای زیرزمینی، جمعآوری و تحلیل شدند. پارامترهای تراکم جمعیت، تولید ناخالص داخلی در هر كيلومترمربع و نسبت ساختوساز زمين نيز بهعنوان شاخص-های لازم برای ایجاد نقشه آسیبپذیری در نظر گرفته شدند. برای وزندهی به پارامترهای فوق از تحلیل سلسلهمراتبی<sup>۳</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Analytical Hierarchy Process (AHP)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> back-propagation training

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Disaster Risk Index

استفاده شده است. درنهایت، نقشه ریسک فرونشست زمین با ترکیب خطرپذیری، آسیبپذیری و تأثیر پیشگیری و تقلیل فرونشست زمین ایجاد شد. قابلیت فرونشست زمین در معدن ذغال سنگ در کره توسط (Choi et al. (2010) با ترکیب اندازه-گیریهای باند L تصاویر SAR و مدل خطرپذیری فرونشست در سیستم اطلاعات جغرافیایی تخمین زده شده است. در این پژوهش چهار عامل تاثیرگذار در فرونشست معدن در نظر گرفته شده است که این عوامل عبارتاند از: زمین شناسی سطح زمین، ریزشهای زیرزمین، فاصله از گسلها و شیب زمین. در ادامه از یک تحلیل عاملی قطعیت<sup>۴</sup> برای تخمین وزنهای نسبی عوامل ذکرشده مورد استفاده قرار گرفت. برای ایجاد شاخص Hazard فرونشست <sup>۵</sup>(SHI)، آنها وزن نسبی هر عامل را با استفاده از یک عملگر ترکیبی فازی یکپارچه کردند. نتایج مطالعه نشان میدهد، نقشههایی که از ادغام InSAR و GIS تولیدشده، می تواند برای پیش بینی و کنترل خطر پذیری فرونشست معادن ذغال سنگ مورداستفاده قرار بگیرد.

Huang et al. (2012) با استفاده از مشاهدات میدانی و مدل-سازی مکانی به بررسی ریسک خطرپذیری فرونشست در چین پرداختند. بهمنظور ارزیابی ریسک خطرپذیری، شاخصهای ارزیابی از روش تحلیل سلسله مراتبی AHP و وزن هر شاخص با روش ارزیابی جامع فازی<sup>2</sup> برآورد شده است. برای تعیین شاخصهای ارزیابی از مشاهدات میدانی بهوسیله اکستنسومترها<sup>۷</sup> بهعنوان یک روش قابل اعتماد برای اندازه-گیری تغییرات عمودی متداوم زمین، استفاده شده و برای اطلاعات جغرافیایی به کار گرفته شد. سه پارامتر ضخامت لایه دوم آبخوان محصور، ضخامت رس نرم و نرخ بازیابی سالانه تراز آب زیرزمینی در سیستم شاخص ارزیابی ریسک و خطرپذیری منطقه مورد بررسی مشارکت داده شدند.

Dehghani et al. (2014) با استفاده ترکیبی از تحلیل تداخل-سنجی راداری تصاویر و سیستم اطلاعات جغرافیایی، فرونشست دشت رفسنجان در کرمان مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش مدلسازی فرونشست زمین با استفاده از اطلاعات تراز آب در چاههای مشاهداتی در منطقه مطالعاتی،

پوشش گیاهی و نوع خاک دشت صورت گرفته است. وزن هر یک از پارامترها با استفاده از مدل تصمیم گیری چند معیاره بر اساس میزان تأثیر هر پارامتر در فرونشست اختصاصیافته و سپس این پارامترها بهصورت لایههای اطلاعاتی در سیستم اطلاعات جغرافیایی ایجاد شدند. به منظور ارزیابی نتایج مدل-سازی از تحلیل تداخل سنجی راداری به عنوان یک روش ابزار قدر تمند برای اندازه گیری تغییر شکل سطح زمین، جابه جایی، توپوگرافی و غیره استفاده شده است. سازگاری بالای مدل تعریف شده و نقشه جابجایی به دست آمده از InSAR نشان می دهد که وزن دهی عوامل تأثیر گذار در فرونشست به درستی صورت گرفته است.

Shrestha et al. (2017) از سیستم اطلاعات جغرافیایی و با مدل SHETRAN به بررسی فرونشست در نپال پرداختند. مدل هیدرولوژیکی SHETRAN یک سیستم مدلسازی یکپارچه سطحی و زیرسطحی فیزیکی و گسترده است که برای شبیه سازی جریان آب، انتقال رسوبات و آلودگی طراحی شده است. این مدل قادر به پیشبینی پیامدهای تغییرات آبوهوا و کاربری اراضی است. در این مطالعه پیشبینی شد که فرونشست بهدلیل فشردگی در اعماق پایین آبخوان در اثر برداشت بیرویه آب زیرزمینی رخ داده است. در ادامه بهمنظور ارزیابی میزان فرونشست و استخراج سناریوهای آینده، ویژگی-های فیزیکی، آبوهوای منطقه، میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی، وضعیت کاربری اراضی و ضخامت آبخوان موردبررسی قرار گرفتند. بهمنظور تخمین میزان فرونشست زمین، از یک رویکرد غیرمستقیم استفاده شد که در این رویکرد، میزان فرونشست زمین از ترکیب جریان آب زیرزمینی مدل شده از SHETRAN با یک راه حل ساده شده تحلیلی، بهدست آمد. در غیاب اندازه گیریهای فرونشست زمین، این پژوهش به نشان دادن موقعیت و میزان خطرپذیری بالقوه فرونشست پرداخته که می تواند در زمینه مدیریت پیشگیری از خطر مفيد واقع گردد.

(ALPRIFT) با معرفی چهارچوب جامع (ALPRIFT) به تهیه شاخصهای آسیبپذیری فرونشست دشت شبستر پرداختند و نقاط مستعد فرونشست در این دشت را شناسایی

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Fuzzy comprehensive assessment (FCA)

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Extensometers

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Certainty Factor Analysis

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Subsidence Hazard Index

کردند. به این منظور آنها از هفت پارامتر که سهم عمدهای در فرونشست زمین دارند، استفاده کردند که این پارامترها عبارت بودند از: محیط آبخوان (A)، کاربری اراضی (L)، مقدار تخلیه یا پمپاژ آب زیرزمینی (P)، تغذیه (R)، ضخامت آبخوان (I)، فاصله از گسل (F) و افت تراز ایستابی (T). در این پژوهش نرخهای تغییرات محلی و وزنهای هر پارامتر بر اساس اهمیت نرخهای تغییرات محلی و وزنهای هر پارامتر بر اساس اهمیت فرونشست با دادههای اندازه گیری شده فرونشست محاسبه شد. همچنین در این پژوهش برای صحتسنجی چهارچوب پیشنهادی، تصاویر InSAR از ماهواره 1-sentinel مورداستفاده قرار گرفت. آنها برای بهبود نتایج بهدست آمده از منطق فازی مدل<sup>۸</sup> استفاده کردند.

در ادامه این تحقیق مطالعات زیادی برای افزایش کارایی روش ALPRIFT در ارزیابی آسیبپذیری و ریسک فرونشست انجام شده است. (Sadeghfam et al. (2020a) با استفاده از طرح کاتاستروف فازی و اعمال آن بر روی روش ALPRIFT به ارزیابی آسیب پذیری و ریسک آبخوان دشت مرند پرداختند. روش مورد استفاده شده منجر به افزایش دقت و کاهش تأثیر نظریات کارشناسی شد. داداشی و همکاران (۱۳۹۹) نیز به یهنهبندی آسیب یذیری دشت مرند پرداخته و نواحی مستعد فرونشست را تحت استراتژیهای مختلف محاسبه افت تراز ايستابي شناسايي نمودند. (Sadeghfam et al. (2020b) به پهنهبندی آسیبپذیری آبخوان دشت تسوج با استفاده از تکنیک مدلسازی هوش مصنوعی مبتنی بر مدلهای چندگانه یرداختند. در بررسی آنان مشخص گردید استفاده از مدلهای هوش مصنوعی با رویکرد مدلهای چندگانه با افزایش دقت پیش بینی می گردد. (Gharekhani et al. (2021) از یک مدل پویای زمانی مبتنی بر مدلهای هوش مصنوعی چندگانه برای پهنهبندی آسیبپذیری آبخوان دشت سلماس پرداختند. Nadiri et al. (2021) با ترکیب رویکرد مبتنی بر مدلسازی هوش مصنوعی و تکنیکهای تصمیم گیری با معیارهای چندگانه به بررسی آسیبپذیری آبخوان دشت تسوج پرداختند. آنها در بررسیشان به این نتیجه رسیدند که پارامترهای محرک ریسک فرونشست نظیر افت تراز ایستابی و یمیاژ بیشتر از سایر یارامترهای ALPRIFT بر وقوع فرونشست

تأثیر دارد. در این تحقیق به بررسی تأخیر زمانی افت تراز ایستابی بر وقوع فرونشست پرداخته می شود. وجود این تأخیر زمانی اهمیت زیادی در مسئله مورد بررسی داشته و بر اساس دانش نویسندگان، کمتر در تحقیقات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است.

# مواد و روشها منطقه مطالعاتی

دشت تسوج که در فاصله ۱۱۰ کیلومتری شمال غرب شهر تبریز قرار گرفته است و مطابق شکل ۱ یکی از دشتهای استان آذربایجان شرقی و بخشی از یک واحد بزرگتر به نام دشت صوفیان تسوج است. سیستم مختصات این شکل بر اساس سیستم مختصات <sup>۹</sup> UTM واقع در ناحیه ۳۸ ترسیم شده است. دشت تسوج از شرق و غرب به ترتیب در محاصره دشت-های شبستر و سلماس قرار گرفته است. همچنین از ناحیه شمال به كوهستان ميشو و از ناحيه جنوب به درياچه اروميه منتهی می شود و بخشی از بارش های کوهستان میشو را به سمت دریاچه ارومیه زهکشی میکند. این دشت دارای مساحتی در حدود ۲۹۵ کیلومترمربع است. بلندترین نقاط دشت در نواحی منتهی به شمال و شمال شرقی با ارتفاع بیشینه ۱۸۵۵ متر و پست ترین نقاط در نوار جنوبی منتهی به دریاچه ارومیه با ارتفاع کمینه ۱۲۸۷ متر است. ازنظر ژئومورفولوژی تنوع سازنده در منطقه بسیار زیاد است و هر سه گروه سنگهای آذرین، دگرگونی و رسوبی در منطقه بهچشم می خورد. از مهم ترین گسل های دشت نیز می توان به گسل های تسوج، گزلجه و انگشتجان در نوار شمالی دشت و گسل شرفخانه در بخش جنوب شرقی دشت اشاره کرد. بخش عمده مصارف شرب و کشاورزی ساکنین شهرها و روستاهای دشت از آبخوان آزاد موجود در این دشت بهره می گیرد. از مهم ترین رودخانههای منطقه می توان به رودخانه فصلی تسوج چای با روند شمال شرق به جنوب غرب و رودخانههای فصلی انگشتجان و امستجان هر دو با روند شمال به جنوب اشاره کرد. به منظور اندازه گیری میزان تخلیه سالانه در بین ماههای چهارم تا هشتم سال ۱۳۸۷ از تعداد ۱۴۴ حلقه چاه عمیق و نیمهعمیق، ۶۹ رشته قنات و ۴۱ چشمه نمونهبرداری بهعمل

9 Universal Transverse Mercator

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Sugeno Fuzzy Logic (SFL)

درجه سانتی گراد اندازه گیری شده است. بارش متوسط سالیانه برداشتشده از ایستگاههای توپچی و تسوج نیز برای دوره ۱۵ ساله بین سالهای ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۴، حدود ۲۹۰ میلیمتر اندازه گیری شده است

آمد. براساس این نمونهبرداری، میزان تخلیه سالانه برای دشت حدوداً برابر با ۱۶ میلیونمترمکعب اندازهگیری شده است(نیکبخت و همکاران، ۱۳۹۵). این دشت از نظر اقلیم شناسی جزو مناطق نیمهخشک و سرد قرار گرفته است و دمای بیشینه و کمینه برای دشت به ترتیب برابر با ۳۳ و ۱۱–



شکل ۱– نقشه موقعیت مکانی و چاههای دشت تسوج در شمال غرب ایران. Figure 1- Location map and observation wells of Tasuj plain in northwest of Iran.

#### چهارچوب ALPRIFT

چهارچوب ALPRIFT روشی است که برای تحلیل آسیب پذیری فرونشست در دشتها در اثر بهرهبرداری بی رویه از منابع آب زیرزمینی توسط (2018) Nadiri et al ارائه شده است. در این روش هفت پارامتر که سهم عمدهای در فرونشست زمین دارند، مشارکت داده شده است. این پارامترها که به ویژگیهای فیزیکی، هیدرولوژیکی، زمین شناسی و به-ویژه ساختمان و بافت خاک تقسیم شده و به صورت هفت لایه مستقل از هم به صورت مکانی تهیه می شوند، عبارت اند از:

# لایههای مشارکت داده شده در روش ALPRIFT محیط آنخوان (A)

لایه محیط آبخوان شامل اطلاعاتی همچون بافت و ساختمان خاک میباشد. این لایه که بهصورت کیفی میباشد در چهار مرحله به ترتیب زیر ارزیابی میشود: (۱) با استفاده

<sup>12</sup> Pumpage of groundwater

محیط آبخوان (A)<sup>۱</sup>٬ کاربری اراضی (L)<sup>۱</sup>٬ مقدار تخلیه یا پمپاژ آب زیرزمینی (P)<sup>۱</sup>٬ تغذیه (R)<sup>۱</sup>٬ ضخامت آبخوان (I)<sup>۱</sup>٬ فاصله از گسل (F)<sup>۵</sup>٬ و افت تراز ایستابی (T)<sup>۱</sup>٬ در ادامه به تفصیل به بررسی این داده لایهها پرداخته می شود.

<sup>14</sup> Impact of aquifer thickness

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Fault distance

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Water table decline

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Aquifer media

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Land use

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Recharge

از اطلاعات لاگهای حفاری موجود در محدوده مطالعاتی، ارزیابی کیفی از ترکیبات خاک شامل شن، ماسه، سیلت و رس و غیره انجام میشود. (۲) نرخهای توصیه شده توسط Nadiri (2018) et al. (2018 به هر یک از مشخصات خاک اختصاص مییابد. (۳) نرخ محیط آبخوان برای هر لاگ توسط اختصاص مییابد. (۳) نرخ محیط آبخوان برای هر لاگ توسط نرخ لایه ها متوسط گیری می گردد. (۴) درنهایت مقادیر محاسبه شده برای کل منطقه به صورت مکانی درونیابی می-گردد.

#### کاربری اراضی (L)

نقشه کاربری اراضی در این مطالعه از پردازش تصاویر ماهوارهای تهیهشده از طریق سنجنده Sentinel2 با پردازش-های سنجش ازدور<sup>۱۷</sup> بهدست آمده است. نقشه منطقه مطالعاتی پس از انجام اصلاحات هندسی، اتمسفریک و رادیومتریک و با اعمال یک شاخص طیفی متناسب با محدوده مورد مطالعه ایجاد میشود. سپس طبقهبندی این نقشه با یکی از الگوریتم-های طبقهبندی تصاویر صورت گرفته و بهصورت مکانی در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)<sup>۸۱</sup> بر اساس نرخهای موجود در جدول ۱ تعریف میشود.

# تخلیه آب زیرزمینی (P)

بهمنظور تهیه لایه رستری تخلیه (پمپاژ) آب زیرزمینی، از مقادیر دبی تخلیه سالانه چاههای موجود در محدوده مطالعاتی استفاده میشود. روند تنظیم این لایه رستری بهاینترتیب است که ابتدا در سیستم اطلاعات جغرافیایی بر اساس چاههای مشاهداتی موجود در منطقه مطالعاتی، پلیگونهای تیسن<sup>۱۹</sup> ترسیم میشوند. سپس از مجموع تخلیه آب زیرزمینی از چاههای موجود در هر پلیگون و مساحت هر پلیگون نسبت گرفته میشود. نسبت این دو پارامتر به چاه مشاهداتی متناظر همان پلیگون تعلق میگیرد و سپس مقادیر تخلیه سالانه برای هر پیکسل درونیابی میشود. درنهایت لایه تخلیه سالانه بر اساس نرخهای جدول ۱ کلاسهبندی میشوند.

#### تغذيه (R)

برای آمادهسازی لایه تغذیه، روش (2001) Piscopo مورد استفاده قرار می گیرد. برای محاسبه مقادیر تغذیه، سه لایه

17 Remote Sensing

<sup>18</sup> Geographic Information System

<sup>19</sup> Thiessen Polygons

رستری بهترتیب زیر در سیستم اطلاعات جغرافیایی ایجاد می-شود: (۱) بارش باران که مقادیر آن از ایستگاههای بارانسنجی استخراج میشود؛ (۲) شیب منطقه که از طریق مدل ارتفاعی رقومی (DEM)<sup>۲۰</sup> یا نقشههای توپوگرافی قابل محاسبه است؛ (۳) نفوذپذیری خاک که میتواند با استفاده از دادههای لاگ-های حفاری موجود در محدوده مطالعاتی محاسبه شود. درنهایت لایه تغذیه با همپوشانی این سه لایه رستری و ایجاد شاخص تغذیه برای هر پیکسل تشکیل شده و مطابق با نرخ-های چهارچوب ALPRIFT در جدول ۱ کلاسهبندی میشود.

## ضخامت آبخوان (I)

رسوبات آبرفتی در محدوده دشت ضخامتهای متفاوتی دارند که با استفاده از پروفیلهای ژئوالکتریک اندازه گیری می-شوند. سپس مقادیر بهدست آمده از این آزمایش درونیابی می گردد. درنهایت نقشه ضخامت آبخوان مطابق با نرخهای جدول ۱ کلاسهبندی می شود.

# فاصله از گسل (F)

فاصله از گسل برای هریک از پیکسلهای در منطقه مطالعاتی با استفاده از ابزار محاسبه فاصله اقلیدسی<sup>۲۱</sup> در سیستم اطلاعات جغرافیایی محاسبه میشود. با استفاده از نرخهای چهارچوب ALPRIFT در جدول ۱، نقشه فاصله از گسل کلاسهبندی میشود.

## افت تراز ایستابی (T)

محاسبه افت تراز آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه بهاین ترتیب است که میزان افت تراز آب از روی چاههای مشاهداتی در یک بازه زمانی مشخص اندازه گیری می شود. اختلاف بین تراز آب زیرزمینی در این بازه، به عنوان یک لایه رستری در سیستم اطلاعات جغرافیایی برای هر چاه مشاهداتی تعریف شده و مقادیر به دست آمده درون یابی می شوند. درنهایت نقشه افت تراز ایستابی مطابق با نرخهای چهار چوب ALPRIFT در جدول ۱ کلاسه بندی می شود.

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Digital Elevation Model

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Euclidean Distance

|                             |      |                        |         | · F · · · · · · · · · · · ·             |    |                        |            | ,   |      |                                 |      |   |            |
|-----------------------------|------|------------------------|---------|---|----|------------------------|------------|---|------|---------------------------------|------|---|------------|
| Aquifer media<br>weight = 5 |      | Land use<br>weight = 4 |         | Pumping of<br>groundwater<br>weight = 4 |    | Recharge<br>weight = 3 |            | Impacts of<br>aquifer thickness<br>weight = 2 |      | Fault<br>distance<br>weight = 1 |      | Decline of water<br>table<br>weight = 5 |            |
| Range                       | Rate | Range                  | Rate    | Range Ra                                | te | Range<br>(cm/yer       | Rate<br>a) | Range (m)                                     | Rate | Range<br>(kn                    | Rate | Range<br>(m/yea                         | Rate<br>r) |
| Clay                        | 8-10 | Irrigated fa           | armin 9 | <0/001                                  | 1  | $0 \le r \le 4$        | 10         | $0 \le r < 25$                                | 1    | $0 \le r < 1$                   | 10   | $0 \le r < 0.2$                         | 1          |
| Silt                        | 8-9  | Built-up               | 5       | $0/0001 \le r < 0/00$                   | 52 | $4 \le r < 9$          | 9          | $25 \le r < 55$                               | 2    | $1 \le r \le 2$                 | 8    | $0.2 \le r < 0.5$                       | 2          |
| Sand                        | 3-5  | soil cover             | 2       | $0/005 \le r < 0/01$                    | 3  | $9 \le r < 14$         | 7          | $55 \le r < 90$                               | 2    | $2 \le r < 3$                   | 6    | $0.5 \le r < 0.9$                       | 3          |
| Gravel                      | 2-3  |                        |         | $0/01 \le r < 0/5$                      | 4  | 14≤r< 19               | ) 5        | $90 \le r < 130$                              | 4    | $3 \le r < 4$                   | 4 4  | $0.9 \le r < 1.4$                       | 4 4        |
| Rock types                  | 1-3  |                        |         | $0/5 \le r < 1$                         | 5  | $19 \le r \le 24$      | 3          | $130 \le r < 175$                             | 5 5  | $4 \le r < 5$                   | 2    | $1.4 \le r \le 2$                       | 5          |
|                             |      |                        |         | $1 \le r < 5$                           | 6  | > 24                   | 1          | 175≤r <225                                    | 56   | > 5                             | 1    | $2 \le r < 2.7$                         | 6          |
|                             |      |                        |         | $5 \le r < 20$                          | 7  |                        |            | $225 \le r < 280$                             | ) 7  |                                 |      | 2.7≤ r <3.5                             | ; 7        |
|                             |      |                        |         | $20 \le r \le 40$                       | 8  |                        |            | $280 \le r < 340$                             | ) 8  |                                 |      | $3.5 \le r < 4$                         | .4 8       |
|                             |      |                        |         | $40 \le r < 65$                         | 9  |                        |            | $240 \le r < 405$                             | 59   |                                 |      | $4.4 \le r < 5.4$                       | 9          |
|                             |      |                        |         | >65                                     | 10 |                        |            | >405  | 10   |                                 |      | > 5.4                                   | 10         |

#### جدول ۱- محدوده و نرخها برای لایههای چهارچوب ALPRIFT. Table 1– The prescribed rates for ALPRIFT framework layers.

#### نحوه اجرا ALPRIFT

شکل ۲ نحوه اجرای روش ALPRIFT را نشان میدهد که شامل مراحل زیر است:

(۱) محدوده مطالعاتی در سیستم اطلاعات جغرافیایی مشخص مے شود.

(۲) با استفاده از دادههای خام مربوط به هر پارامتر (ستون ۱ در شکل ۲)، لایه رستری توسط پیشیردازشهایی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه می گردد (ستون ۲ در شکل ۲). لازم به ذکر است از میان لایههای مشارکت داده شده لایهی A و L داده لایه توصیفی هستند و برای کمی سازی آنها از جدول ۱ استفاده شده است. سایر داده لایهها کمی بوده و نیازی به کمی سازی ندارند.

(۳) بهدلیل متفاوت بودن بازه تغییرات و واحد لایههای کمی، نرخهای از پیش تعریف شده مطابق با جدول ۱ به هریک از داده لایه ا تخصیص یافته و لایه های F، I، R و T بر اساس نرخ-های جدید طبقهبندی می شوند.

(۴) درنهایت مقدار شاخص آسیب پذیری فرونشست برای هر پیکسل از رابطه (۱) با استفاده از وزنهای نشان داده شده در جدول ۱ و رابطه ۱ محاسبه می شود:

$$SVI = A_r A_w + L_r L_w + P_r P_w + R_r R_w + I_r I_w + F_r F_w + T_r T_w A$$
(1)

<sup>22</sup> Interferometric Synthetic Aperture Radar

<sup>23</sup> Interferometric Wide

که در رابطه فوق، SVI شاخص آسیب پذیری فرونشست، اندیس r نرخ هر لایه و اندیس w وزن هر لایه را نشان می دهد. با توجه به محدوده نرخها و میزان وزن هر لایه، حداقل مقدار ممکن SVI برابر با ۲۴ و حداکثر مقدار آن ۲۴۰ است. محدوده بین کمینه و بیشینه مقدار SVI در نمایش توزیع مکانی را مى توان به بازەھاى دلخواه تقسيمبندى نمود.

# تحليل تداخلسنجي راداري

برای ارزیابی نتایج روش ALPRIFT، میتوان از مقادیر فرونشست بهدست آمده از تکنیک تداخلسنجی راداری<sup>۲۲</sup> (InSAR) استفاده نمود. اساس كار اين روش، تلفيق اطلاعات مربوط به سطح زمین با استفاده از اختلاف فاز بین تصاویر تکراری بهدست آمده از ماهواره Sentinel-1A است. لازم به ذکر است که این فاز، همبستگی خوبی با تویوگرافی زمین دارد که با بررسی این اختلاف فاز، تغییرات سطح زمین قابل کمی سازی است. در این مطالعه از محصولات تداخل سنجی گسترده<sup>۲۳</sup> (IW) در گستره (نوار) ۲۵۰ کیلومتری با وضوح تصویر (تفکیکپذیری) ۲۰×۵ متر استفاده شده است. این محصولات دارای ۳ بخش هستند که با استفاده از مشاهدات زمین با اسکن پیشرفته<sup>۲۴</sup> SAR بهدست میآیند.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Terrain Observation with Progressive Scans



شکل ۲- فلوچارت محاسبه شاخص آسیب پذیری فرونشست بر اساس چهارچوب APLRIFT Figure 2- Flowchart for calculating the subsidence vulnerability Index based on the APLRIFT framework

در این روش، کیفیت تصویر همگن با استفاده از نسبت سیگنال شکل سطح زمین، فاز اتمسفر و فاز نویز ۳۰. در سایر مراحل به نویز<sup>۲۵</sup> (SNR) و نسبت توزیع مبهم هدف<sup>۲۶</sup> (DTAR) ایجاد باقی مانده برای پردازش InSAR همه فازها بهغیراز تغییر شکل میشود. پردازشهای انجام شده در روش تداخلسنجی راداری د, ادامه موردبحث قرار می گیرند.

(۱) ثبت دو تصویر<sup>۲۷</sup>: در این مرحله دو تصویر SAR با یکدیگر این سازگاری، شباهت پیکسل های تصاویر اصلی و فرعی را ادغامشده و یک تصویر بهعنوان تصویر اصلی و تصویر دوم به- نشان می دهد. عنوان تصویر فرعی نامگذاری میشوند. برای ثبت دو تصویر، پیکسلهای تصویر فرعی مطابق با پیکسلهای تصویر اصلی هماهنگ و تنظیم میشوند.

> (۲) تشکیل تداخلسنجی۲۸ و برآوردسازگاری۲۹: در این مرحله، تداخل سنجی با ضرب متناظر دامنه و محاسبه اختلاف فاز بین تصاویر اصلی و فرعی ایجاد میشود. برای محاسبه اختلاف فاز، ينج منبع مختلف مشاركت داده می شوند كه این فازها عبارتاند از: فاز زمین مسطح، فاز توپوگرافی، فاز تغییر

سطح زمین حذف می شوند. همچنین، ساز گاری بین دو تصویر

با انجام پردازشهای بیشتر بر روی طولموج ایجاد می شود.

(۳) حذف فاز توپوگرافی: در این مرحله، فاز توپوگرافی، با کم

کردن یک مدل ارتفاع رقومی (DEM) مرجع از تداخلنگاشت

(۴) فیلتر کردن فاز: در این قدم، نسبت سیگنال به اغتشاش با

(۵) باز کردن فاز<sup>۳۱</sup>: این مرحله با ادغام اختلافات فاز بین

ییکسلهای مجاور، بین فاز تداخلنگاشت و ارتفاع توپوگرافی

پردازششده، حذف می شود.

فيلتر كردن فاز افزايش مي يابد.

ارتباط ایجاد می شود.

<sup>28</sup> Interferogram

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Coherence Estimation

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> Noise

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup>- Phase unwrapping

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Signal-to-Noise Ratio

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Distributed Target Ambiguity Ratio

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Coregistration

(۶) تصحیح زمین: در این قدم اصلاح زمین برای تولید محصول باز نشده صورت می گیرد.

(۷) تبدیل خط دید<sup>۳۲</sup> (LOS) به جابجایی عمودی: نتیجه مرحله تصحیح زمین، تصویری است که جابجایی زمین در جهت خط دید را نشان میدهد. برای بهدست آوردن جابجایی عمودی، تصویر باید با توجه به زاویه برداشت تصویر سطح، تجزیه شود.

(۸) تبدیل جابجایی نسبی به جابجایی مطلق: با تصویر InSAR بهدستآمده از مرحله قبلی، جابجایی نسبی سطح زمین در جهت دید سنسور بهدست میآید. سپس یک نقطه مرجع با احتمال جابجایی کم با در نظر گرفتن سازگاری برآورد شده و اطلاعات موجود از منطقه موردنظر برای تبدیل مقادیر نسبی جابجایی به مقادیر مطلق، انتخاب میشود. پس از تنظیم منطقه بدون جابجایی، جابجایی مطلق یا عمودی محاسبه می-شود.

# معیارهای ارزیابی منحنی مشخصه عملکرد ROC

منحنی مشخصه گیرنده عملیاتی<sup>۳۳</sup> (ROC) و مساحت زیر منحنی (AUC) بهعنوان یکی از ابزارهای ارزیابی عملکرد سیستم بهشمار میرود. این منحنی که یک ابزار مدل سازی قوی است، توسط (Swets (1988) برای اندازه گیری دقت یک سیستم تشخیصی توسعه داده شده است. پروسه عملکرد منحنی ROC به این ترتیب است که نتایج را به ۴ بخش تقسیم-بندی می کند: (۱) تشخیص درست رخداد (TP)؛ (۲) تشخیص درست عدم رخداد (TN)؛ (۳) تشخیص نادرست رخداد (FP)؛ (۴) تشخیص نادرست عدم رخداد (FN). در این پژوهش آسیب پذیری فرونشست زمین به عنوان رخداد و جابجایی زمین (۴) میشود. در منحنی ROC نسبت FP در مقابل نسبت که می شود. در منحنی ROC نسبت FP در مقابل نسبت که میشود. در منحنی ROC نسبت FP در مقابل نسبت که منحنی دارای انحراف به گوشه بالا، سمت چپ داشته باشد. در این حالت مقدار AUC به حداکثر مقدار خود می رسد. مساحت

زیر منحنی را بدینصورت میتوان تعریف کرد که AUC نسبت مساحت زیر منحنی ROC به مساحت کل است و مقدار دقیق منحنی ROC به این ترتیب به دست میآید. بدین ترتیب می-توان گفت محدوده تغییرات مقدار AUC بین ۰/۵ تا ۱ است؛ بهطوریکه مقدار ۰/۵ نشان دهنده عدم وجود ارتباط مناسب بین نسبتهای FP و TT است و مقدار ۱ نشان دهنده ارتباط کاملاً مطلوب است و منحنی ROC آن مماس با محورهای بالا و چپ نمودار ترسیم میشود.

# نتايج

خروجی لایههای مشارکت داده شده در روش ALPRIFT که از روی دادههای خام مورد پردازش قرار گرفته و در شکل ۳ و ۴ نمایش داده شده است. در این مطالعه محدوده مطالعاتی در سیستم اطلاعات جغرافیایی به پیکسلهای ۲۰ متری تقسیمبندی شده و سپس لایههای رستری بر اساس پیش-پردازشهای موجود در شکل ۱ تهیه شده است. شکل ۳ (الف) نقشه درونیابی شده لایه محیط آبخوان با استفاده از روش

لایه رستری کاربری اراضی، از تصویر اخذ شده در تاریخ دهم تیرماه سال ۱۳۹۶ (اول جولای ۲۰۱۷) با استفاده از شاخص <sup>۳۵</sup>NDVI ایجاد و با تکنیک نظارتشده بیشینه شباهت<sup>۳۶</sup> طبقهبندیشده است. بر این اساس، طبق جدول ۱ برای پوششهای گیاهی، نرخ ۹، برای مناطق شهری نرخ ۵ و برای پوششهای خاکی در محدوده دشت نرخ ۲ اختصاصیافته که در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است.

دادههای خام برای تهیه لایه تخلیه آب زیرزمینی، از اداره آب منطقهای استان آذربایجان شرقی با نمونهبرداری از ۱۴۴ حلقه چاه موجود در دشت بین ماههای تیر تا آبان سال ۱۳۸۷ تهیه شده است. مقدار تخلیه آب زیرزمینی در دشت، تا ۲۴ سانتیمتر در سال متغیر است. درونیابی این لایه با استفاده از روش IDW صورت گرفته است. برای مشاهده نقشه لایه رستری تخلیه آب زیرزمینی به شکل ۳ (ج) و لایه رستری تغذیه به شکل ۳ (د) مراجعه شود.

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup>- Normalized Difference Vegetation Index

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup>- Maximum Likelihood

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup>- Line-Of-Sight

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup>- Receiver Operating Characteristic

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup>- Inverse Distance Weighted



شکل ۳- لایههای رستری چهارچوب A ،ALPRIFT) محیط آبخوان، B) کاربری اراضی، C) پمپاژ، D) تغذیه، E) ضخامت آبخوان، F) فاصله از گسل، G) افت تراز ایستابی.

Figure 3 - Raster Layers of APLRIFT framework, A) aquifer media, B) land use, C) pumpage of groundwater, D) recharge, E) aquifer thickness, F) fault distance, G) trends in decline of water table.

سازمان زمینشناسی استخراج شده است. در شکل ۳ (ز) نیز لایه افت تراز ایستابی در بازه زمانی بین اردیبهشت ۹۶ تا فروردین ۹۷ ارائه شده است. بر اساس رویکرد ارائه شده توسط Nadiri et al. (2018)، این بازه زمانی منطبق با محدوده زمانی

برای استخراج مقادیر ضخامت آبخوان در تهیه لایه مربوطه از است که موقعیت گسل ها توسط نقشه زمین شناسی بر گرفته از دادههای آزمایش ژئوفیزیک استفاده شده و نتایج آن در شکل ۳ (ه) نشان داده شده است. با توجه به این شکل میتوان دریافت ضخامت آبخوان در بازه ۱۶ تا ۱۹۰ متر متغیر است. نقشه لایه فاصله از گسل که طبق جدول ۱ در ۶ کلاس طبقه-بندی شده است، در شکل ۳ (و) قابلمشاهده است. لازم به ذکر

تهیه تصاویر بهدست آمده از تکنیک تداخلسنجی راداری تعیین میشود. با توجه به اهمیت لایه افت تراز ایستابی در آسیبپذیری فرونشست، مقادیر اختلاف تراز ایستابی در طول چندین سال

برای تهیه این لایه استفاده شده است. مقادیر این اختلاف برای ماههای اردیبهشت و فروردین طی سالهای ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ (۷ سال) استخراج و توسط تکنیک IDW درونیابی شده و در شکل ۴-الف تا ۴-ز نشان داده شده است.



شکل ۴– نقشههای لایه رستری افت تراز ایستابی بر اساس استراتژیهای تعریف شده، A) از اردیبهشت ۹۶ تا فروردین ۹۷، B) از اردیبهشت ۹۵ تا فروردین ۹۶، C) از اردیبهشت ۹۴ تا فروردین ۹۵، D) از اردیبهشت ۹۳ تا فروردین ۹۴، E) از اردیبهشت ۹۲ تا

فروردین ۹۱، F) از اردیبهشت ۹۱ تا فروردین ۹۲، G) از اردیبهشت ۹۰ تا فروردین ۹۱.

Figure 4- Raster layer maps of decline of water table based on the defined strategies, A) from April 2017 to March 2018, B) from April 2016 to March 2017, C) from April 2015 to March 2016, D) from April 2014 to March 2015, E) from April 2013 to March 2014, F) from April 2012 to March 2013, G) from April 2011 to March 2012.

کلاسهبندی شده است. با توجه به این شکلها میتوان دریافت لایهی افت تراز ایستابی در تهیه لایه آسیب پذیری بسیار مؤثر بوده و استراتژیهای تعریفشده نتایج متفاوتی را ارائه می کند.

بر اساس استراتژیهای تعریفشده برای تهیه لایه افت تراز ایستابی و با استفاده از رابطه (۱)، شکل ۵ نقشه توزیع مکانی شاخص آسیبپذیری فرونشست را نشان میدهد. نتایج هریک از استراتژیهای در ۵ کلاس بر اساس روش بهینهسازی Jenks



شکل ۵- نقشههای آسیب پذیری فرونشست دشت بر اساس استراتژیهای تعریف شده در محاسبه لایه افت تراز ایستابی، A) از اردیبهشت ۹۶ تا فروردین ۹۷، B) از اردیبهشت ۹۵ تا فروردین ۹۶، C) از اردیبهشت ۹۴ تا فروردین ۵۹، D) از اردیبهشت ۹۳ تا

فروردین ۹۴، E) از اردیبهشت ۹۲ تا فروردین ۹۱، F) از اردیبهشت ۹۱ تا فروردین ۹۲، G) از اردیبهشت ۹۰ تا فروردین ۹۱. Figure 5 - Vulnerability maps of the subsidence based on the defined strategies in the calculation of decline of water table, A) from April 2017 to March 2018, B) from April 2016 to March 2017, C) from April 2015 to March 2016, D) from April 2014 to March 2015, E) from April 2013 to March 2014, F) from April 2012 to March 2013, G) from April 2011 to March 2012.

زمانی انجام شده، توجیه پذیر است. از میان نتایج حاصله از استراتژی اول، شاخص آسیب پذیری حاصل از افت تراز ایستابی سال ۹۴–۹۵ بیشترین مقدار AUC را دارد. بنابراین می توان اظهار داشت، مقدار فرونشست حاصل از افت تراز ایستایی در سال ۹۴–۹۵، ۲ سال دیگر آشکار شده است. این تأخیر زمانی در وقوع يديده فرونشست به عوامل مختلفي مي تواند وابسته باشد که مربوط به ویژگیهای محلی است.

در شکل ۶ منحنیهای ROC و مقادیر AUC برای مقایسه استراتژیها با توجه به اینکه تحلیل تداخل سنجی در این بازه نتایج آسیبپذیری فرونشست حاصل از استراتژیهای تعریفشده برای محاسبه افت تراز ایستابی ارائه شده است. با توجه به این منحنیها، مقدار AUC برای بازه زمانی اردیبهشت ۹۶ تا فروردین ۹۷ کمترین مقدار خود را دارد. لازم به ذکر است یدیده فرونشست با یسماند همراه است. بهعبارتدیگر یس از افت تراز سطح ایستابی مدت زمانی طول می کشد تا نتایج آن نمایان گردد. لذا مقدار کم AUC نسبت به سایر



شکل ۶- منحنی های ROC و مقادیر AUC برای شاخص های آسیب پذیری فرونشست. Figure 6 - ROC curves and AUC values for subsidence vulnerability indices.

اساس روش ALPRIFT محاسبه شده که از هفت لایه یمحیط آبخوان، كاربرى اراضى، مقدار تخليه يا يمياژ آب زيرزمينى، تغذيه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل و افت تراز ايستابي بهره میبرد. لایهها پس از پردازشهای سیستم اطلاعات جغرافیایی

در این مطالعه به پهنهبندی آسیب پذیری فرونشست آبخوان دشت تسوج واقع در شمال درياچه اروميه و استان آذربایجان شرقی پرداخته شده است. شاخص آسیبپذیری بر

نتيجهگيري

تهیه شده و بر اساس توصیههای مقالات پیشین نرخ دهی و وزندهی شدهاند. در ارزیابی نتایج شاخص آسیبپذیری مشخص گردید، این شاخص حساسیت بسیار بالایی به لایه افت تراز ایستابی دارد. بر این اساس شاخص آسیبپذیری با مشارکت لایههای مختلف افت تراز ایستابی در مهر و مومهای مختلف تهیه گردید. در این مطالعه همچنین مقدار فرونشست از طریق تحلیل تداخلسنجی راداری کمیسازی شد. مقایسه شاخصهای آسیبپذیری در مهر و مومهای مختلف با مقدار فرونشست به دست آمده از تداخلسنجی توسط منحنی ROC فرونشست به دست آمده از تداخلسنجی توسط منحنی مقدار فرونشست فرونشست به می از ایستابی در سال ۹۴–۹۵، ۲ سال دیگر آشکار شده است. این تأخیر زمانی در وقوع پدیده فرونشست به عوامل شده است. این تأخیر زمانی در وقوع پدیده فرونشست به عوامل

نتایج این تحقیق گامی در راستای شناسایی تأثیر تأخیر زمانی افت تراز ایستابی در وقوع فرونشست میتوان محسوب نمود. محدودیتهای تحقیق حاضر را میتوان در موارد زیر دستهبندی نمود: (الف) عدم در نظرگیری عدم قطعیت دادهها و لایهها ALPRIFT؛ (ب) وابستگی نتایج مربوط به تأخیر زمانی به ویژگیهای منطقه مطالعاتی؛ (ج) عدم بررسی آبخوان تحتفشار بهدلیل قابلیت اطمینان دادههای مربوط به این آبخوان. هر کدام از این موارد میتواند در تحقیقات آینده بررسی گردد. در کنار این موارد استفاده از سایر تکنیکها تداخلسنجی به مورت سری زمانی و استفاده از مدلهای ریاضی پیشبینی کننده فرونشست در ارزیابی آسیبپذیری و ریسک نیز جزو پیشنهادات نویسندگان برای محققین در آینده ریست.

#### منابع

- اسدی، م، گنجائیان، ح، جاودانی، م، قادری حسب، م، ۱۴۰۰. ارزیابی ارتباط بین عوامل طبیعی و میزان فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از تصاویر رادار. هیدروژئولوژی, ۶(۱): ۱۳–۲۲.
- امیراحمدی، ۱.، معالی اهری، ن.، احمدی، ط.، ۱۳۹۲. تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از

GIS. نشریه علمی و پژوهشی جغرافیا و برنامهریزی، (۴۶)۲۲.

- حسینی میلانی، م.، ۱۳۷۳. اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی و اثرات آن. مجموعه مقالات کنفرانس ملی منابع آب زیرزمینی، دانشگاه سیرجان، سیرجان، ۹۱-۹۸.
- داداشی، ث.، صادق فام، س.، ندیری، ع.، محبی، ی.، ۱۳۹۹. تحلیل آسیبپذیری فرونشست آبخوان دشت مرند با استفاده از روش ALPRIFT بر اثر بهرهبرداری بیشازحد از منابع آب زیرزمینی. مهندسی عمران، ۳۶(۳٫۱)، ۸۵-۹۶.
- عفیفی، م.۱.، ۱۳۹۵. ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین و عوامل مؤثر بر آن (مطالعه موردی: دشت سیدان فاروق مرودشت). پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۵(۳): ۱۳۱–۱۳۲۱.

نادری، ک.، ندیری، ع.ا.، اصغری مقدم، ا.، کرد، م.، ۱۳۹۷. روشی جدید برای شناسایی و تعیین مناطق در معرض خطر فرونشست (مطالعه موردی: آبخوان دشت سلماس). اکو هیدرولوژی، ۵(۱): ۸۵–۹۷. نیکبخت، ج.، ذوالفقاری, ن.، ۱۳۹۵. پیش بینی سطح آب

یاب عرب ایند اور مساری، کی سیام ۲۰۰۰ پیش بیدی سطی ۲ب زیرزمینی دشت تسوج-آذربایجان شرقی با کمک شبکه های عصبی مصنوعی. هیدروژئولوژی, ۱(۲): ۹۹-۱۱۵.

- Balogun, W. O., Anifowose, M., Shogo, M., Salaudeen, F., 2011. Trends and mechanisms of land subsidence of a coastal plain in the delta of Yangtze River-China. Researcher, 3: 76-81.
- Choi, J. K., Won, J. S., Kim, S. W., Kim, K. D., Ryu, J. H., Yoo, H. R., 2010, July. Integration of InSAR and GIS for an estimation of ground subsidence susceptibility. In 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 4588-4591. IEEE.
- Dehghani, M., Rastegarfar, M., Ashrafi, R. A., Ghazipour, N., Khorramrooz, H. R., 2014. Interferometric SAR and geospatial techniques used for subsidence study in the Rafsanjan plain. Am J Environ Eng, 4(2): 32-40.

Kathmandu Valley, Nepal. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8(2): 974-996.

- Swets, J. A., 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 240(4857): 1285-1293.
- Gharekhani, M., Nadiri, A. A., Khatibi, R., & Sadeghfam, S., 2021. An investigation into timevariant subsidence potentials using inclusive multiple modelling strategies. Journal of Environmental Management, 294, 112949.
- Hu, B., Zhou, J., Wang, J., Chen, Z., Wang, D., Xu, S., 2009. Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China. Environmental Earth Sciences, 59(2): 269.
- Huang, B., Shu, L., Yang, Y. S., 2012. Groundwater overexploitation causing land subsidence: hazard risk assessment using field observation and spatial modelling. Water resources management, 26(14): 4225-4239.
- Kim, K. D., Lee, S., Oh, H. J., 2009. Prediction of ground subsidence in Samcheok City, Korea using artificial neural networks and GIS. Environmental Geology, 58(1): 61-70.
- Nadiri, A. A., Taheri, Z., Khatibi, R., Barzegari, G., Dideban, K., 2018. Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT. Science of the Total Environment, 628: 1043-1057.
- Nadiri, A. A., Moazamnia, M., Sadeghfam, S., & Barzegar, R., 2021. Mapping risk to land subsidence: Developing a two-level modeling strategy by combining multi-criteria decisionmaking and artificial intelligence techniques. Water, 13(19), 2622.
- Piscopo, G., 2001. Groundwater Vulnerability Map.
  Ex planatory Notes, Castlereagh Catchment, NSW; Department of Land andWater Conservation: Parramatta, Australia.
- Sadeghfam, S., Khatibi, R., Dadashi, S., & Nadiri, A. A., 2020a. Transforming subsidence vulnerability indexing based on ALPRIFT into risk indexing using a new fuzzy-catastrophe scheme. Environmental Impact Assessment Review, 82, 106352.
- Sadeghfam, S., Nourbakhsh Khiyabani, F., Khatibi, R., & Daneshfaraz, R., 2020b. A study of land subsidence problems by ALPRIFT for vulnerability indexing and risk indexing and treating subjectivity by strategy at two levels. Journal of Hydroinformatics, 22(6), 1640-1662.
- Shrestha, P. K., Shakya, N. M., Pandey, V. P., Birkinshaw, S. J., Shrestha, S., 2017. Modelbased estimation of land subsidence in