

## مدل‌سازی فرونشست دشت ابرکوه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و هوش مصنوعی

- ❖ زهرا خسروانی؛ دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- ❖ محمد اخوان قالی‌باف\*؛ استادیار، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- ❖ مریم دهقانی؛ دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
- ❖ ولی درهمی؛ استاد، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- ❖ مصطفی بولکا؛ استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اژه، ازمیر، ترکیه.

### چکیده

روش تداخل‌سنجی راداری، یکی از بهترین روش‌های آشکارسازی تغییرات پوسته زمین از نظر دقت و پوشش پیوسته مکانی است. هدف از پژوهش حاضر، مدل‌سازی فرونشست دشت ابرکوه با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و هوش مصنوعی بود. در ابتدا با استفاده از ۴۶ تصویر راداری Sentinel-1 بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری، نقشه فرونشست منطقه تهیه شد. در ادامه جهت مدل‌سازی فرونشست، از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی پیش‌رونده استفاده شد. در این الگوریتم از پنج پارامتر تغییرات سطح آب زیرزمینی (۲۰۱۴-۲۰۱۸)، سطح آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، ضخامت لایه رس در آبخوان و همچنین ضخامت لایه رس در محدوده تغییرات سطح آب زیرزمینی (۲۰۱۴-۲۰۱۸) به عنوان ورودی مدل و مقدار فرونشست حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری به عنوان خروجی جهت آموزش مدل به شبکه معرفی شد. ورودی‌های مدل از مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده ۳۴ چاه پیزومتری و ۷۷ لاگ حفاری موجود در آرشو آب منطقه‌ای استان یزد بدست آمد که پس از بررسی صحت داده‌های اخذ شده و آنالیزهای اولیه، پارامترهای پنجانگانه با استفاده از میانبایی به روش کریجینگ، به کل منطقه تعمیم داده شد و لایه رستری آن‌ها تهیه گردید. نتایج روش تداخل‌سنجی راداری نشان داد که فرونشست در مناطقی از شرق، شمال شرق و شمال به ترتیب با نرخ متوسط فرونشست ۶، ۲/۷ و ۱/۶ سانتی‌متر در سال بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده است. همچنین جهت تایید صحت مدل، از معیارهای ارزیابی نظیر ناش‌ساتکلیف (NS)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE) استفاده گردید که به ترتیب مقادیر ۰/۹۵۲۴، ۰/۰۰۱۸، ۰/۰۰۱۲ و ۰/۱۵۴۵ بدست آمد. بنابراین شبکه عصبی مصنوعی در پیدا کردن ارتباط بین پارامترهای ورودی و مقادیر فرونشست عملکرد بسیار خوبی دارد.

کلید واژگان: آب زیرزمینی، تصاویر راداری سنتینل، رسوبات ریزدانه، شبکه عصبی مصنوعی، فرونشست.

## ۱. مقدمه

فرونشست زمین یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی در سراسر جهان است که سالانه باعث خسارات زیادی می‌شود [۲]. بر اساس تعریف موسسه زمین‌شناسی آمریکا، رخداد فرونشست زمین، شامل نشست یا ریزش رو به پائین سطح زمین است که وسعت، مقدار و شدت آن متفاوت بوده و می‌تواند به صورت تدریجی یا ناگهانی در مقیاس‌های بزرگ یا کوچک اتفاق افتد [۲۵]. این پدیده می‌تواند بر اثر رخدادهای طبیعی مانند خروج گدازه از پوسته جامد زمین، زلزله، آب شدن یخچال‌ها، انحلال، تراکم رسوبات و همچنین فعالیت‌های انسان‌ساخت مانند استخراج نفت، برداشت آب‌های زیرزمینی، معدن‌کاری و... ایجاد شود [۵]. در یک سیستم آبخوان، حضور رسوبات ریزدانه لای و رس به همراه افت سطح آب ناشی از استخراج نامتعارف آب‌های زیرزمینی، از عوامل اصلی به وجود آوردنده فرونشست زمین هستند [۱۱]. این رسوبات ریزدانه، ویژگی خاصی دارند و از دانه‌هایی پهن تشکیل شده‌اند. هنگامی که این رسوبات ته‌نشین می‌شوند، تمایل به قرار گرفتن به صورت تصادفی و در جهات مختلف دارند. این نوع قرار گرفتن رسوبات موجب به وجود آمدن روزه‌هایی در بین ذرات می‌شود که مکانی برای ذخیره آب‌های زیرزمینی می‌باشد. با این حال زمانی که سطح آب‌های زیرزمینی به سطوح پایین‌تر کاهش می‌یابد، ذرات با جهت‌گیری تصادفی، دوباره به صورت مرتب و افقی بر روی هم قرار می‌گیرند. این نوع روی هم قرار گرفتن ذرات ریزدانه، موجب کاهش حجم فضای خاک و بروز فرونشست می‌گردد [۲۵]. بنابراین پارامترهای ژئولوژیکی و هیدروژئولوژیکی خاک منطقه ارتباط تنگاتنگی با نرخ فرونشست آن منطقه دارند.

امروزه استفاده از تکنیک‌های پیشرفته سنجش از دور راداری، به عنوان روشی قدرتمند برای شناسایی تغییرات آهسته سطح زمین، مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱۴]. در این میان، تکنیک تداخل‌سنجی راداری با بهره‌گیری از پتانسیل تصاویر ماهواره‌ای، توانایی لازم برای

مطالعه و اندازه‌گیری دقیق تغییر شکل زمین در یک گستره وسیع، همراه با قدرت تفکیک مکانی بالا را دارد [۱۷]. در این روش با اعمال تکنیک‌های پردازش تداخل‌سنجی راداری چند زمانه بر روی سری زمانی تصاویر راداری که از منطقه مورد نظر اخذ شده‌اند، امکان تشخیص جابه‌جایی‌های افقی و عمودی و برآورد نرخ حرکت آن‌ها، با دقتی کوچک‌تر از میلی‌متر، فراهم می‌شود [۲۴].

یکی دیگر از رویکردهای مهم در فرآیند مدل‌سازی، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی است. شبکه‌های عصبی مصنوعی با الهام از شبکه‌های عصبی انسان، یکی از ابزارهای توانمند در مدل‌سازی است که می‌بایست به شکل صحیح و منطقی آموزش داده شود. مهم‌ترین چالش در شبکه عصبی، استفاده از حجم زیاد داده‌ها جهت آموزش شبکه است. بی شک دقت مدل ایجاد شده در این رویکرد، با دقت و کفایت داده‌های مورد استفاده در فرآیند آموزش شبکه، ارتباط نزدیکی دارد.

در زمینه مدل‌سازی فرونشست با استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری و شبکه‌های عصبی مصنوعی مطالعاتی در مناطق مختلف دنیا انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

ژو و همکاران (۲۰۱۳) رابطه مکانی بین فرونشست و سه عامل تغییر سطح آب زیرزمینی، ضخامت رسوبات تراکم‌پذیر و سطح مناطق مسکونی را در دشت آبرفتی چاوبی پکن مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، مدلی از ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک برای شبیه‌سازی توزیع مکانی فرونشست ارائه شد. نتایج مدل نشان داد مقدار خطای مطلق این مدل در یک بازه زمانی ۵۰ ساله، در حدود ۳۲ میلی‌متر است که از دقت قابل قبولی برخوردار است [۲۷].

دهقانی و همکاران (۲۰۱۳) در مدل‌سازی فرونشست دشت جنوب غربی تهران، از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و هوش مصنوعی استفاده کردند. ایشان در این مطالعه، از تکنیک پراکنش‌کننده‌های پایدار بر دو مجموعه داده ENVISAT ASAR که در حالات بالاگذر و پایین‌گذر از

و دشت شهریار از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند. برای این منظور از تصاویر راداری Sentinel-1 بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ استفاده شد. پارامترهایی مانند افت سطح آب زیرزمینی، نرخ بارش سالانه، شیب زمین، فاصله از چاه‌ها و فاصله از گسل، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار تجمعی فرونشست در جنوب غرب تهران و دشت شهریار به ترتیب ۵۶۱/۷۸ میلی‌متر و ۶۳۸/۵ میلی‌متر در طول دوره مطالعه بود. همچنین ارزیابی مدل ایجاد شده توسط شبکه عصبی مصنوعی، دقت بالای این روش را در برآورد فرونشست زمین تایید کرد [۳].

نشانه‌های فرونشست زمین به عنوان یکی از مهمترین مخاطرات محیطی، همواره پیش از وقوع قابل مشاهده نمی‌باشد و گاهی به یکباره رخ می‌دهد. بنابراین با توجه به پیامدهای مخرب فرونشست، پیش‌آگاهی از مناطق مستعد فرونشست، ضروری به نظر می‌رسد. وجود مراکز جمعیتی شهری و روستایی، اراضی کشاورزی، خطوط انتقال نیرو و همچنین شبکه ریلی در محدوده فرونشست و خطرات احتمالی ناشی از این پدیده، سبب شد تا این محدوده به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شود. لذا هدف از پژوهش حاضر، استفاده از هوش مصنوعی و روش تداخل‌سنجی راداری به منظور مدل‌سازی فرونشست زمین در دشت ابرکوه است.

## ۲. روش شناسی

### ۱.۲. معرفی منطقه مطالعاتی

دشت ابرکوه با وسعت حدود ۱۳۹۰ کیلومتر مربع، بخشی از حوزه آبخیز ابرکوه - سیرجان است که موقعیت جغرافیایی آن بین طول ۶۹۰۴۴۴ تا ۷۲۸۰۳۹ متر شرقی و عرض ۳۴۱۸۱۲۱ تا ۳۴۵۵۰۱۸ متر شمالی قرار دارد. این منطقه شامل مخروط‌افکنه و دشتی است که از غرب، جنوب و جنوب غربی به ارتفاعات و از شرق به کفه نمکی کویر ابرکوه منتهی شده است (شکل ۱). وضعیت

منطقه مورد مطالعه اخذ شده بودند، استفاده کردند. ورودی شبکه، پارامترهای هیدروژئولوژی و ژئولوژی آبخوان بودند و خروجی شبکه نرخ فرونشست منطقه در نظر گرفته شد. در این مطالعه عملکرد شبکه آموزش دیده توسط پیکسل‌های پراکنش کننده پایدار بر روی یک مجموعه داده جداگانه ارزیابی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که شبکه آموزش دیده قادر به پیش‌بینی نرخ فرونشست با دقتی کمتر از ۵ میلی‌متر بر سال می‌باشد [۹].

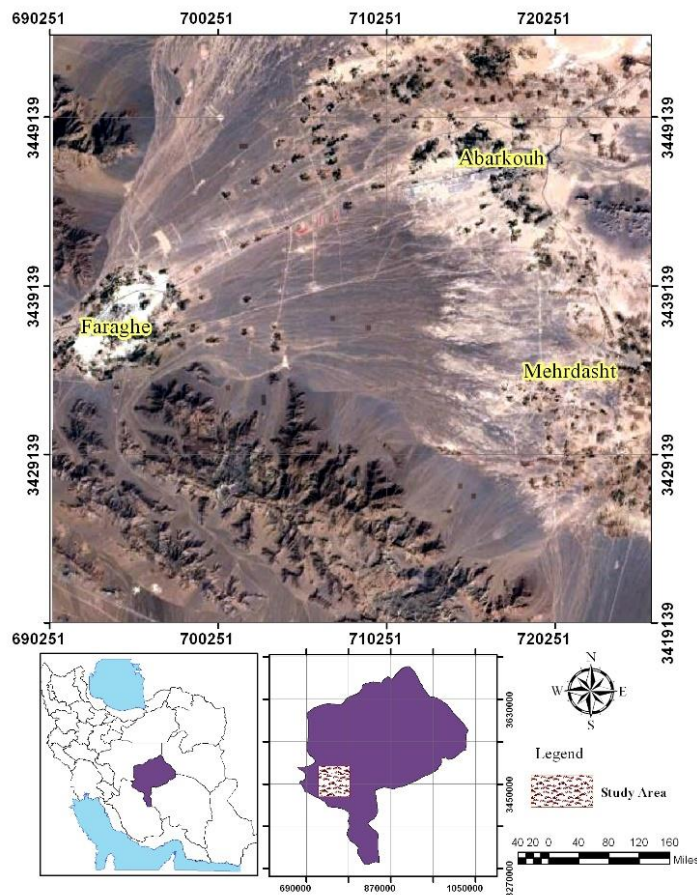
باقری و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی، نقشه خطر فرونشست زمین در دشت رفسنجان را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و تکنیک تداخل‌سنجی راداری تهیه کردند. پارامترهای قابلیت انتقال هیدرولیکی، میزان افت سطح آب زیرزمینی، عمق متوسط آب، کاربری اراضی و زمین شناسی به عنوان عوامل تاثیرگذار در پدیده فرونشست، در آنالیز شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفتند. آن‌ها در این مطالعه اذعان داشتند که یکی از مسائل تعیین‌کننده در دقت مدل، وجود اطلاعات دقیق و کافی جهت آموزش صحیح شبکه عصبی می‌باشد [۴].

چوپانی (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای با تلفیق تصاویر دو سنجنده ENVISAT ASAR و Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۷، به تهیه سری زمانی فرونشست دشت سیرجان پرداخت. در این تحقیق برای تهیه نقشه نرخ فرونشست منطقه در فاصله سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ از تصاویر سنجنده ENVISAT ASAR و در سال ۲۰۱۷ از تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری سنجنده Sentinel-1 استفاده شد. نرخ فرونشست سالانه در دوره ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰، حدود ۲۸ سانتی‌متر در سال و نرخ فرونشست در سال ۲۰۱۷ حدود ۱۷ سانتی‌متر در سال برآورد گردید. در ادامه با استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، مدلی برای برآورد فرونشست ناشی از استخراج آب زمینی در نقاط فاقد اطلاعات مطلوب راداری ارائه گردید [۶].

آذرخش و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی با هدف مدل‌سازی و پیش‌بینی نرخ فرونشست جنوب غرب تهران

تا ۱۴۷۰ متر در نزدیکی دشت متغیر است [۲۰].

فیزیوگرافی منطقه نشان می‌دهد که شیب عمومی دشت از غرب به شرق بوده و ارتفاع آن از ۲۴۵۰ متر در ارتفاعات



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

پردازش‌های اولیه بر روی آن‌ها انجام گرفته و به تصاویر تک‌منظر تبدیل شده‌اند و اطلاعات آن‌ها به هیچ عنوان مخدوش نگردیده است. در جدول ۱، به برخی از ویژگی‌های تصاویر ماهواره Sentinel-1A استفاده شده در پژوهش حاضر اشاره شده است.

در این روش با مقایسه فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه، در دو زمان مختلف اخذ شده‌اند، تغییرات سطح زمین در آن بازه زمانی مورد نظر تعیین می‌شود. فاز اخذ شده از یک عارضه بر روی سطح زمین متناسب با

## ۲.۲. تداخل‌سنجی راداری

یکی از ابزارهای توانمند برای پایش پدیده فرونشست، روش تداخل‌سنجی راداری است. برای این منظور از ۴۶ تصویر راداری با روزه مجازی (SAR<sup>۱</sup>)، مربوط به دوره زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ استفاده شد (۹۷-۱۳۹۳). این تصاویر، مربوط به ماهواره Sentinel-1A بود که از سازمان فضایی اروپا با فرمت (SLC<sup>۲</sup>) با پلاریزاسیون VV<sup>۳</sup> اخذ شد. این نوع داده‌ها، داده‌های خامی هستند که تنها

1 Synthetic Aperture Radar

2 Single Look Complex

3 Vertical transmit and Vertical receive

اینترفروگرام<sup>۱</sup> ساخته می‌شود. یک اینترفروگرام تصویری است که حاوی اختلاف فاز دو تصویر راداری است که با دقت نسبت به هم ثبت هندسی شده‌اند [۷].

فاصله آن تا سنجنده راداری است. بنابراین ایجاد تغییر در این فاصله بر روی فاز اندازه‌گیری شده اثر می‌گذارد. به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری، تصویری به نام

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های تصاویر ماهواره Sentinel-1A استفاده شده در این پژوهش

Platform	Sensor	Beam Mode	Beam Mode Description	Processing Level	Polarization	Ascending or Descending	Doppler
Sentinel-1A	C-SAR	IW	Interferometric Wide. 250 km swath, 5 m x 20 m spatial resolution	SLC	VV	Descending	0

کار می‌توان سری زمانی در هر پیکسل را به ازای هر اپک تصویربرداری ترسیم نمود. در ادامه به هر سری زمانی، خطی برازش داده شد که از روی آن سرعت متوسط جابجایی در هر پیکسل در بازه زمانی مورد نظر به دست آمد. بدین صورت نرخ متوسط جابجایی به دست آمد [۲۳]. تمام مراحل پردازش تداخل‌سنجی راداری در نرم‌افزار GMTSAR<sup>۴</sup> تحت سیستم عامل لینوکس و کلیه مراحل برنامه‌نویسی مربوط به تحلیل سری زمانی و برآورد سرعت متوسط جابجایی در محیط Matlab انجام شد.

### ۳.۲. مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

در این مطالعه از شبکه عصبی مصنوعی پیش‌رونده، شامل یک لایه ورودی، دو لایه پنهان و یک لایه خروجی استفاده شد. اولین لایه پنهان از ۲۰ نرون و دومین لایه پنهان از پنج نرون تشکیل شده بود. توابع انتقال مورد استفاده در لایه‌های پنهان از نوع تابع سیگموئید و تابع انتقال لایه خروجی، از نوع تابع خطی است. جهت آموزش شبکه از ۵ پارامتر به عنوان ورودی و نرخ متوسط فرونشست سالانه منتج از روش تداخل‌سنجی راداری به عنوان خروجی مدل استفاده شد. پارامترهای ورودی به شرح زیر است:

برای حذف اثر توپوگرافی از اینترفروگرام‌های پردازش شده، مدل ارتفاعی رقومی<sup>۲</sup> SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تحلیل سری زمانی جابجایی، از الگوریتم مبنی بر خط مبنای کوتاه (SBAS<sup>۳</sup>) استفاده شد [۱۰]. به منظور تحلیل سری زمانی، در ابتدا باید اثر خطای مداری از اینترفروگرام‌ها حذف شود. بدین منظور صفحه‌ای را به کمک نقاط خارج از محدوده فرونشست و حتی‌الامکان دور از آن، بر روی منطقه برازش داده و آن را از اینترفروگرام‌ها کم کردیم. همچنین یک نقطه در منطقه به‌عنوان نقطه مرجع انتخاب شده و جابجایی‌ها نسبت به آن محاسبه شدند. در میان تصاویر، یک تاریخ به‌عنوان مبدأ زمانی انتخاب شد تا تغییرات تصاویر، همگی نسبت به آن مبدأ زمانی سنجیده شوند. اینترفروگرام‌ها نقش مشاهدات را دارا بوده و مجهولات، فاز مربوط به جابجایی در هر اپک تصویربرداری است [۲۳]. مجهولات به کمک حل کمترین مربعات و با دخالت دادن شرط نرم‌کنندگی به منظور کاهش نوسانات ناشی از اتمسفر، از سری زمانی برآورد شدند.

پس از برآورد فاز جابجایی در هر اپک زمانی، میزان جابجایی برای هر پیکسل از اینترفروگرام‌ها، با ضرب ضریب  $\lambda/4\pi$  در فاز برآورد شده، به دست می‌آید. با این

1 Interferogram

2 Shuttle Radar Topography Mission

3 Small Baseline Subset

۴ GMTSAR یک سیستم پردازش تداخل‌سنجی راداری منبع باز است که توسط موسسه اقیانوس‌شناسی و دانشگاه سن دیگو آمریکا تهیه شده است.

استفاده شد (شکل ۲). در هر یک از پیزومترها حداکثر فاصله سطح آب تا سطح زمین محاسبه و سپس با استفاده از روش کریجینگ، لایه رستری سطح آب زیرزمینی بدست آمد.

### ۳.۳.۲. لایه ضخامت آبخوان

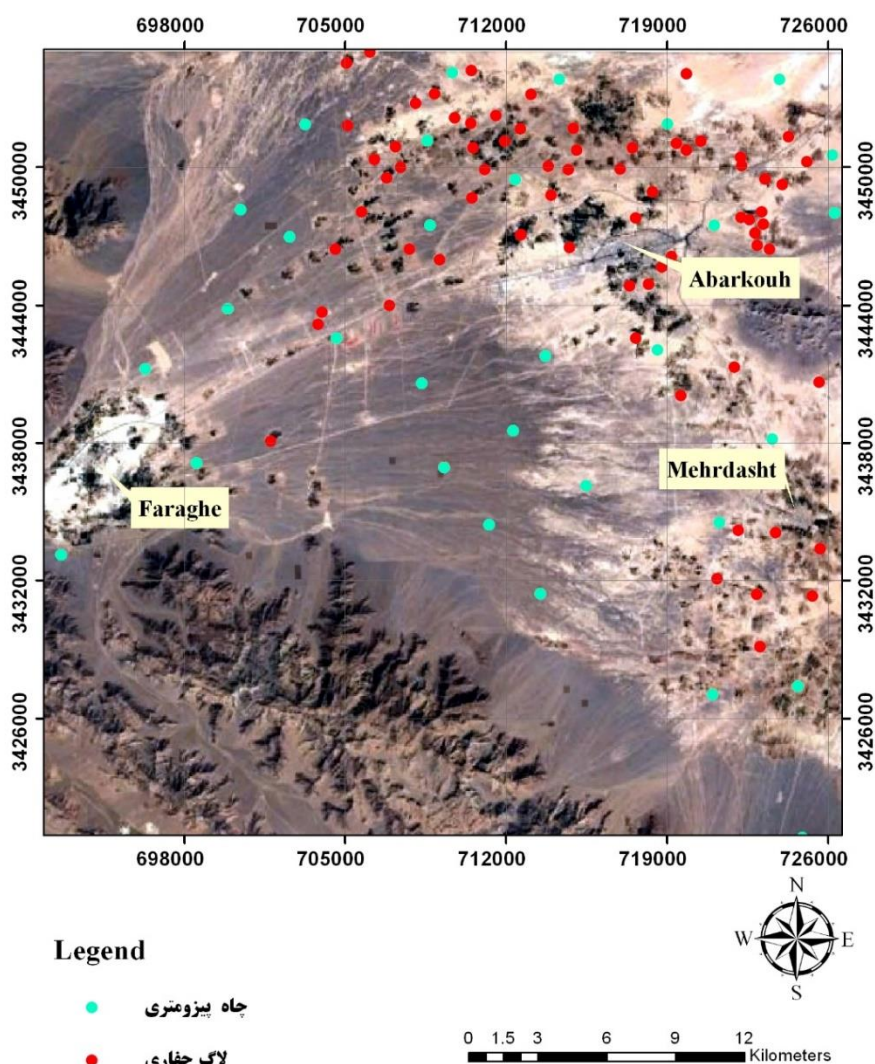
با استفاده از داده‌های بیش از ۱۵۰ سونداژ ژئوالکتریک، ضخامت آبرفت (فاصله سطح زمین تا سنگ کف) در مناطق مختلف محدوده مورد مطالعه محاسبه گردید. سپس با استفاده از روش کریجینگ، درون‌یابی شده و نقشه رستری آن به عنوان یکی از ورودی‌های مدل تهیه شد.

### ۱.۳.۲. لایه تغییرات سطح آب زیرزمینی (۲۰۱۴-۲۰۱۸)

به منظور آماده‌سازی لایه تغییرات سطح آب زیرزمینی، از داده‌های سطح آب ۳۴ چاه پیزومتری اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای استان یزد، در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ استفاده شد (شکل ۲). پس از محاسبه تغییرات سطح آب در هر یک از پیزومترها، لایه رستری میزان تغییرات سطح آب منطقه در طول دوره آماری مورد نظر، با استفاده از روش کریجینگ تهیه شد.

### ۲.۳.۲. لایه سطح آب زیرزمینی

برای تهیه این لایه، از داده‌های سطح آب ۳۴ چاه پیزومتری اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای استان یزد



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی پیزومترها و لاگ‌های حفاری در منطقه مورد مطالعه

## ۴.۳.۲. لایه ضخامت لایه رس در آبخوان

با توجه به اهمیت بالای رسوبات ریز دانه، خصوصاً رس، ضخامت رسوبات رسی در هر یک از لاگ‌های حفاری (فاصله سطح زمین تا سنگ کف) تعیین شدند. برای این منظور، از اطلاعات ۷۷ لاگ حفاری موجود در منطقه استفاده و ضخامت رسوبات رسی محاسبه گردید (شکل ۲). در ادامه با استفاده از میانبایی به روش کریجینگ، نقشه رستری آن ترسیم شد.

## ۵.۳.۲. لایه ضخامت لایه رس در محدوده تغییرات

## سطح آب زیرزمینی (۲۰۱۸-۲۰۱۴)

با استفاده از داده‌های سطح آب ۳۴ چاه پیژومتری و اطلاعات ۷۷ لاگ حفاری منطقه مورد مطالعه، ضخامت لایه رسی در محدوده تغییرات سطح آب زیرزمینی، در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ بدست آمد. سپس با استفاده از روش کریجینگ، لایه رستری پارامتر مورد نظر تهیه شد.

پس از طراحی شبکه عصبی، فرآیند آموزش شبکه، یعنی تخمین وزن هر کدام از لایه‌ها اجرا شد. برای این منظور داده‌های موجود، به طور تصادفی به سه گروه داده‌های آموزشی (۶۰ درصد داده‌ها)، داده‌های ارزیابی (۲۰ درصد داده‌ها) و داده‌های تست (۲۰ درصد داده‌ها) تقسیم‌بندی گردید. در هر دوره (Epoch)، داده‌های آموزشی به شبکه عصبی اعمال و خروجی شبکه با خروجی‌های نظیر آن مقایسه گردید و میزان اختلاف روی وزن‌های شبکه با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا، سرشکن گشت. سپس میزان متوسط خطای مربع مدل ( $MSE^1$ )، در هر دوره، توسط داده‌های ارزیابی محاسبه شد. بهینه‌سازی وزن‌های شبکه در هر دوره تا جایی که میزان  $MSE$  آن برای داده‌های ارزیابی روند نزولی داشت، ادامه یافت.

## ۴.۲. ارزیابی کارایی مدل

اعتبار سنجی مدل به عنوان فرآیند تعیین مقدار درجه‌ای که یک مدل، نمایش دقیقی از دنیای واقعی خود دارد، تعریف می‌شود. به بیان دیگر، هرچه انطباق داده‌های شبیه‌سازی شده مدل با داده‌های واقعی و مشاهداتی بیشتر باشد، مدل از دقت و اعتبار بالایی برخوردار است. روش‌های بسیار زیادی برای ارزیابی کارایی مدل وجود دارد که به برخی از این روش‌ها که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت [۲۶، ۲۲، ۱۶، ۱۵]، اشاره می‌شود:

ابتدا مقادیر پیکسل‌های نقشه نرخ فرونشست شبیه‌سازی شده توسط شبکه عصبی را نظیر به نظیر از نقشه فرونشست بدست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری کسر نمودیم تا مقادیر اختلافات که در واقع بیانگر میزان انحراف از مقادیر واقعی است، مشخص شود. هر چه مقادیر به دست آمده به صفر نزدیک باشد، مدل‌سازی از دقت بالایی برخوردار است. در ادامه با استفاده از برخی معیارهای ارزیابی (معادلات ۱ تا ۴)، کارایی مدل مورد ارزیابی قرار گرفت:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_{Si} - S_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^n (S_{Oi} - \bar{S}_{Oi})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_{Si} - S_{Oi})^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |S_{Si} - S_{Oi}|}{n} \quad (3)$$

$$MARE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|S_{Si} - S_{Oi}|}{S_{Oi}}}{n} \quad (4)$$

در این روابط  $NS^2$ : معیار ناش-ساتکلیف،  $RMSE^3$ : معیار جذر میانگین مربعات خطا،  $MAE^4$ : معیار میانگین خطای مطلق،  $MARE^5$ : معیار میانگین قدرمطلق خطای نسبی،  $S_{Si}$ : مقدار فرونشست شبیه‌سازی شده پیکسل،  $S_{Oi}$ : مقدار فرونشست حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری هر پیکسل،  $\bar{S}_{Oi}$ : مقدار متوسط

1 Mean Square Error

2 Nash - Sutcliffe

3 Root Mean Square Error

4 Mean Absolute Error

5 Mean Absolute Relative Error

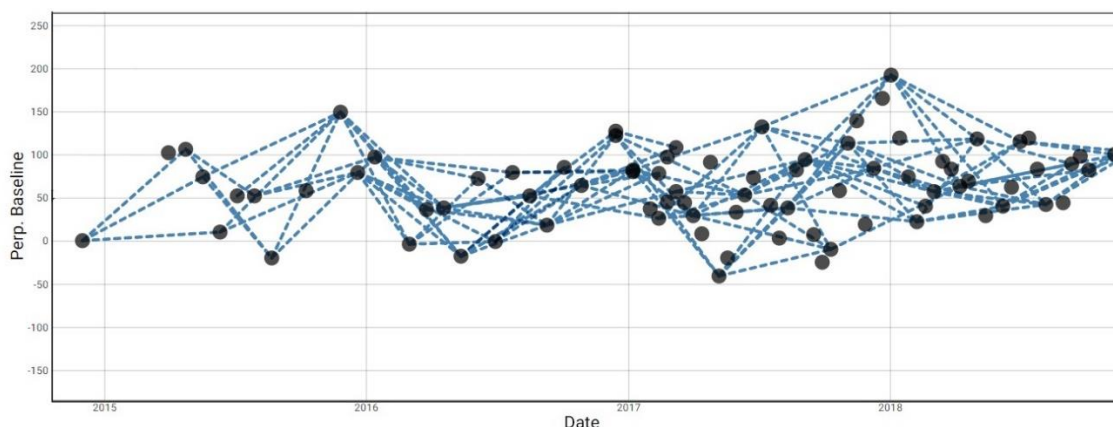


متعددی که تهیه شدند، تعداد ۱۳۶ اینترفروگرام که وضعیت مناسبی از نقطه نظر طول خط مبنای مکانی و زمانی داشتند، انتخاب و در فرآیند تداخل سنجی و تهیه نقشه فرونشست، مورد پردازش قرار گرفتند. زنجیره اینترفروگرام‌های استفاده شده و همچنین نمونه‌ای از تصاویر اینترفروگرام، به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. پس از بدست آوردن سری زمانی فرونشست هر کدام از پیکسل‌های تصویر، نرخ متوسط فرونشست سالیانه به صورت نقشه ترسیم شد (شکل ۵).

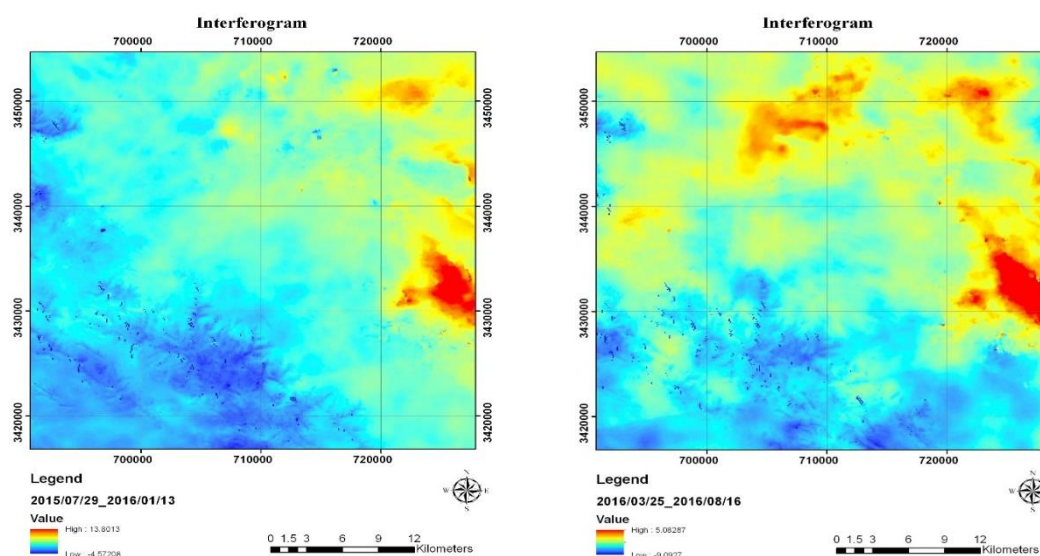
فرونشست حاصل از روش تداخل سنجی راداری پیکسل‌ها و  $n$ : تعداد پیکسل‌ها

### ۳. نتایج

به منظور تهیه نقشه فرونشست دشت ابرکوه، از روش تداخل سنجی راداری و روش SBAS استفاده شد. برای این کار از ۴۶ فریم تصویر راداری باند C ماهواره Sentinel-1A با فرمت SLC و مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ میلادی استفاده شد. از میان اینترفروگرام‌های

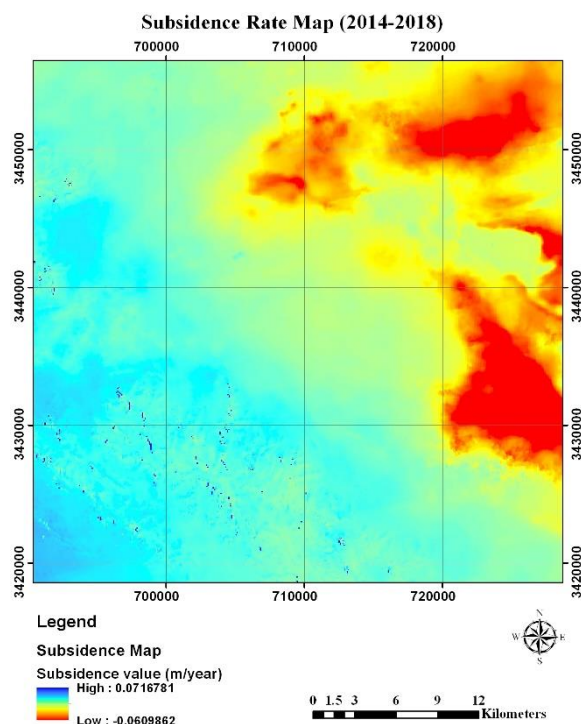


شکل ۳. زنجیره اینترفروگرام‌های استفاده شده جهت محاسبه فرونشست زمین در دشت ابرکوه



شکل ۴. اینترفروگرام تولید شده برای بازه زمانی ۱۴۴ روزه در فاصله زمانی 25 Msrch 2016 و 16 August 2016 (شکل سمت راست) و اینترفروگرام تولید شده برای بازه زمانی ۱۹۸ روزه در فاصله زمانی 29 July 2015 و 13 January 2016 (شکل سمت چپ)





شکل ۵. نقشه متوسط نرخ فرونشست سالانه دشت ابرکوه در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸

بود. این کمیت برای نقشه متوسط نرخ فرونشست در حدود  $0.03/0$  میلی‌متر برآورد شد که نشان‌دهنده دقت بالای نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری است. این مقدار که معیاری است از عدم اطمینان نتایج، می‌تواند ناشی از خطای باقی‌مانده مداری و خطای اتمسفر باشد. شایان ذکر است در تعداد بسیار معدودی از پیکسل‌های منطقه مورد مطالعه، خطای بازیابی فاز وجود داشت که باعث ایجاد جهش فاز در نتایج شد. این پیکسل‌ها شناسایی و از نقشه متوسط نرخ حذف شدند.

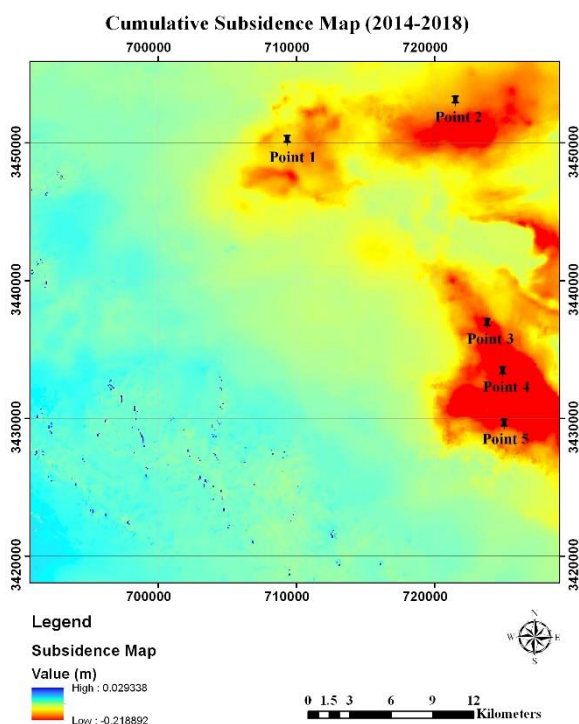
برای درک بهتر روند تغییرات فرونشست، پنج نقطه (پیکسل) به صورت تصادفی در مناطق تحت تاثیر فرونشست انتخاب و مقادیر فرونشست تجمعی متناظر با تاریخ تصاویر راداری، به صورت سری زمانی ترسیم شد. موقعیت مکانی نقاط انتخاب شده در شکل ۶ نشان داده شده است. آهنگ تغییرات فرونشست زمین نسبت به گذشت زمان در نقاط انتخاب شده، در شکل ۷ به تصویر کشیده شده است. با توجه به شکل، بیشترین مقدار

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، فرونشست زمین در ۳ ناحیه بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده است. ناحیه اول در سمت شرق منطقه مورد مطالعه قرار دارد. نرخ متوسط فرونشست سالانه در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸، حدود ۶ سانتی‌متر در سال است. ناحیه دوم با نرخ فرونشست  $2/7$  سانتی‌متر در سال در شمال شرق منطقه قرار گرفته است. ناحیه سوم نیز در شمال منطقه قرار دارد که نرخ فرونشست سالانه آن در بازه زمانی مذکور،  $1/6$  سانتی‌متر در سال بود. همانطور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، محدوده‌های تحت تاثیر فرونشست بیشتر در نیمه شرقی منطقه قرار دارد.

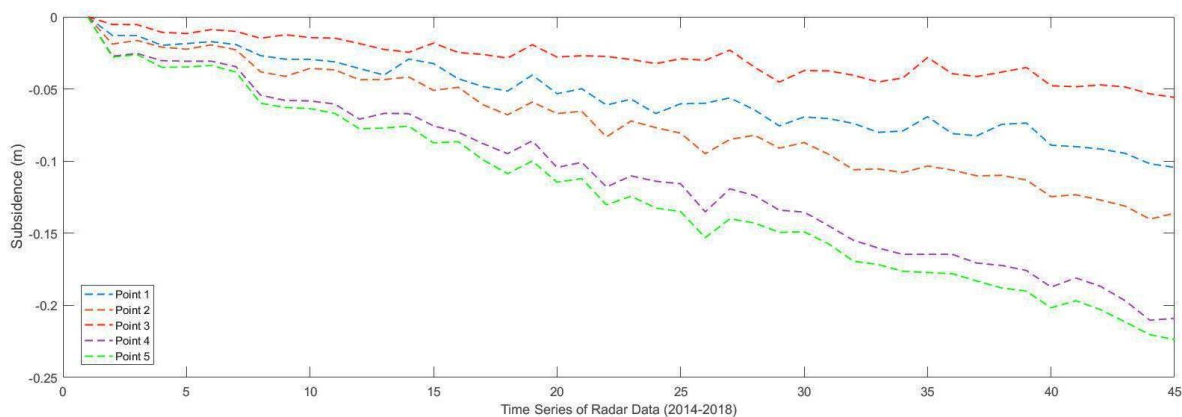
در محدوده خارج از فرونشست، فاز موجود در نقشه متوسط نرخ فرونشست باید بسیار کوچک و نزدیک به صفر باشد. برای بررسی این موضوع، آنالیز دقت صورت پذیرفت. به این صورت که پیکسل‌هایی که خارج از منطقه فرونشست بودند، انتخاب و مقدار انحراف معیار آنها از عدد صفر محاسبه شد. تعداد این پیکسل‌ها ۱۸۹۰۰۰ پیکسل

تصاویر راداری که در مدارات بالاگذر و پایین گذر نسبت به یک منطقه اخذ گردیده است، بود و علاوه بر آن محاسبات مختص به خود را می‌طلبد. در این پژوهش تمامی نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری در راستای خط دید رادار می‌باشند.

فرونشست تجمعی در بین نقاط انتخابی، مربوط به نقطه پنج و با مقدار حدودی ۲۱ سانتی‌متر در بازه زمانی مورد مطالعه بود. لازم به ذکر است که با توجه به هندسه تصویر برداری راداری، تمامی مقادیر فرونشست زمین در راستای خط دید رادار محاسبه شده‌اند. جهت دستیابی به اطلاعات دقیق فرونشست زمین در راستای قائم، نیاز به



شکل ۶. موقعیت مکانی نقاط انتخاب شده جهت بررسی سری زمانی فرونشست



شکل ۷. بررسی سری زمانی فرونشست در پنج نقطه انتخاب شده

پس از اجرای دوره‌های متوالی، MSE هم تغییر کرده و به یک مقدار ثابت نزدیک می‌شود. اگر MSE شروع به روند صعودی نماید و این فرآیند ادامه داشته باشد، آموزش شبکه متوقف می‌گردد. در نهایت میزان MSE مدل بوسیله داده‌های تست آزمایش شد، که مقدار آن  $0/89$  میلی‌متر بر سال در  $100$  دوره بود (شکل ۹).

به منظور ارزیابی فرایند مدل‌سازی، میزان همبستگی خروجی حاصل از شبکه عصبی با خروجی هدف (خروجی حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری) مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی برای داده‌های آموزشی، ارزیابی و تست به طور جداگانه انجام شد. برای این منظور خروجی هدف (T) در مقابل خروجی شبکه (Y) ترسیم گردید و معادله خط رگرسیون مربوط به هر یک از مراحل آموزش (خط آبی)، اعتبارسنجی (خط سبز) و تست (خط قرمز) محاسبه و ترسیم شد (شکل ۱۰).

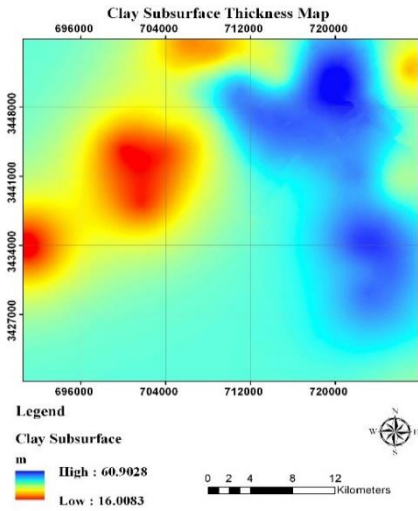
پس از آموزش شبکه و ارزیابی آن، فرآیند شبیه‌سازی آغاز گردید که نتایج آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بررسی ظاهری و مقایسه چشمی نقشه نرخ فرونشست از روش شبکه عصبی مصنوعی با نقشه نرخ فرونشست بدست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری، حکایت از دقت بالای شبیه‌سازی با استفاده از شبکه عصبی دارد.

جهت ارزیابی صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی، چندین روش ارزیابی، مورد استفاده قرار گرفت که در اولین گام نقشه نرخ فرونشست مدل‌سازی شده توسط شبکه عصبی را از نقشه نرخ فرونشست بدست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری کسر نموده تا مقادیر اختلاف که نشان دهنده انحراف از مقدار واقعی است مشخص شود. این نقشه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل، مقادیر خطای موجود در مناطق فرونشست به ندرت از  $0/01$  متر در سال تجاوز می‌کند. این در حالی است که در مناطقی که فرونشست حادث نشده است (غرب منطقه)، محدوده‌های بسیار کم و سعتی مشاهده می‌شود که خطای تا  $0/04$  متر در سال را نیز تجربه می‌کند.

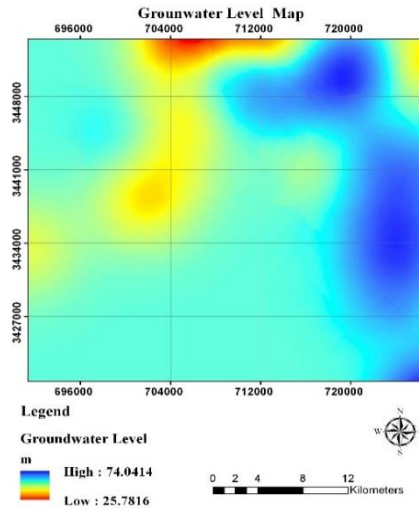
در ادامه جهت مدل‌سازی فرونشست دشت ابرکوه، از شبکه عصبی مصنوعی پیش‌رونده استفاده شد. طراحی شبکه از لحاظ تعداد لایه‌ها، تعداد نرون‌های هر لایه و همچنین نوع تابع انتقال، به صورت تجربی و با توجه به خطای حاصل از شبکه صورت گرفت. همانطور که قبلاً گفته شد در این مطالعه از یک شبکه پیش‌رونده متشکل از پنج پارامتر ورودی، دو لایه میانی و یک لایه خروجی استفاده شد. نوع تابع انتقال نرون‌های لایه میانی تابع سیگموئید بود. خروجی نرون با تابع انتقال سیگموئید، مقادیر بین  $1$  و  $-1$  دارد. لایه خروجی تنها دارای یک نرون و تابع انتقال آن خطی بود. در واقع هر سیگنال ورودی که این لایه دریافت می‌کند، همان را در خروجی شبکه تحویل می‌دهد.

پس از بررسی صحت و کیفیت داده‌ها، پارامترهای ورودی مدل برای هر یک از نقاط موجود استخراج شد. سپس با استفاده از میانبایی به روش کریجینگ، مقادیر هر یک از پارامترها به کل منطقه تعمیم داده شد و لایه رستری آنها تهیه گردید. لایه تغییرات سطح آب زیرزمینی ( $2018-2014$ )، لایه سطح آب زیرزمینی، لایه ضخامت آبخوان، لایه ضخامت لایه رس در آبخوان و لایه ضخامت لایه رس در محدوده تغییرات سطح آب زیرزمینی ( $2018-2014$ ) به عنوان پنج لایه ورودی مدل معرفی شد (شکل ۸).

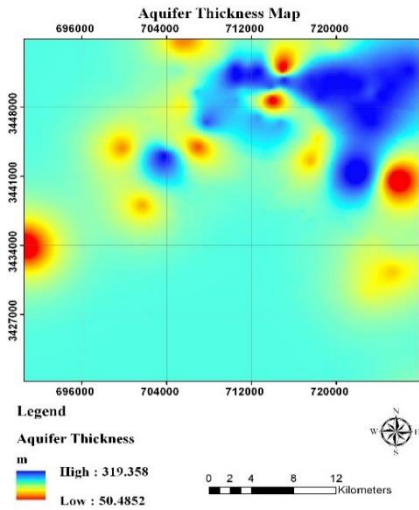
پس از طراحی شبکه عصبی، فرآیند آموزش شبکه، یعنی تخمین و بهینه‌سازی وزن‌ها تا جایی که میزان MSE برای داده‌های ارزیابی، روند نزولی داشت، ادامه یافت. برای توقف آموزش شبکه، چندین شرط و محدودیت وجود دارد که به موازات هم اجرا شده و هر کدام از شرط‌ها که زودتر حاصل شود، آموزش شبکه متوقف می‌شود. مدت زمان آموزش شبکه، مقدار خطای شبکه و تعداد دوره‌ها از متداول‌ترین شرط‌ها و محدودیت‌هایی هستند که در توقف آموزش شبکه عصبی نقش ایفا می‌کنند. در پژوهش حاضر تعداد دوره‌ها با رسیدن به محدودیت از پیش تعیین شده، یعنی تعداد  $100$  دوره، آموزش شبکه را متوقف کرد. به عبارت دیگر این شرط و محدودیت زودتر از شروط دیگر اتفاق افتاد.



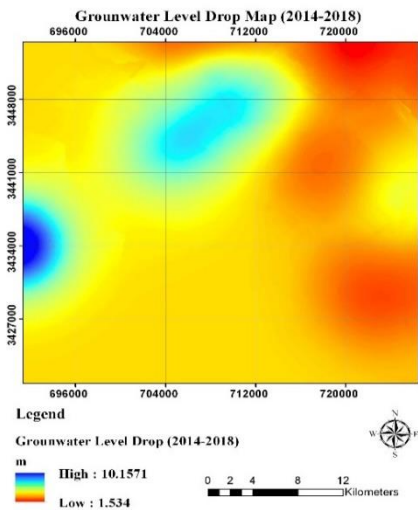
(ب)



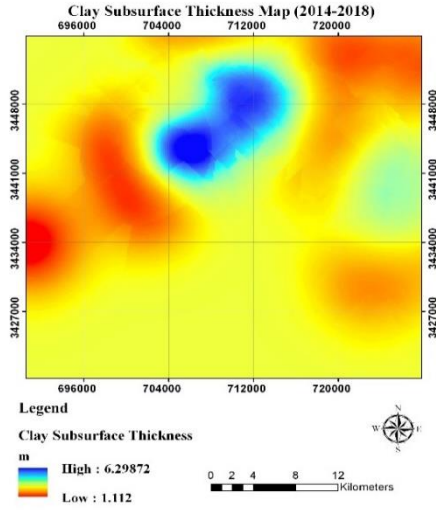
(الف)



(ج)

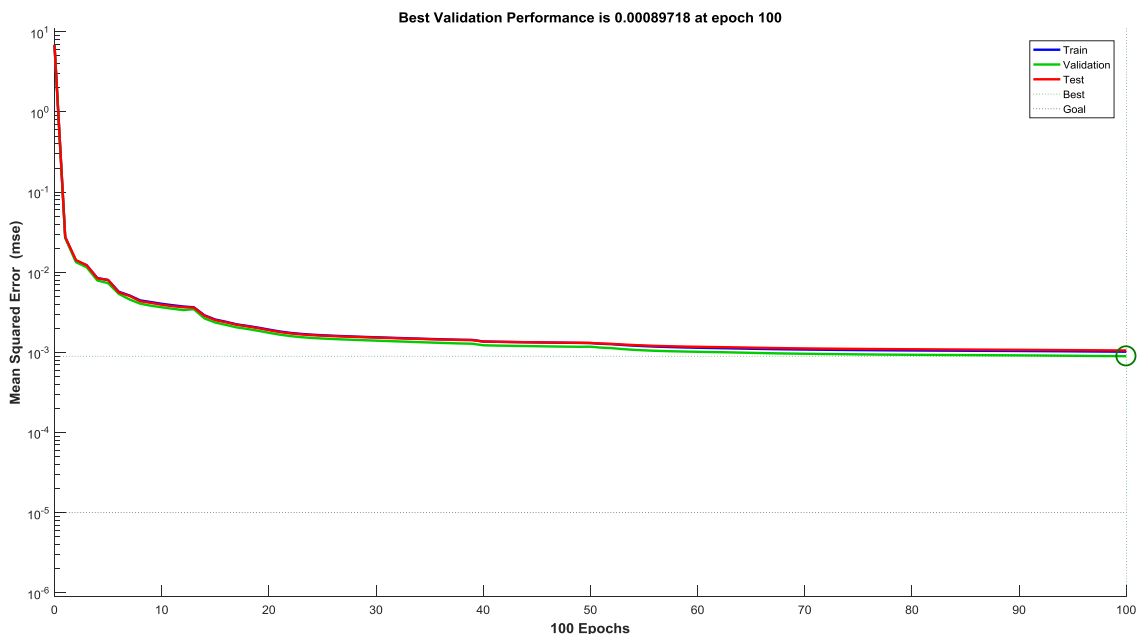


(هـ)

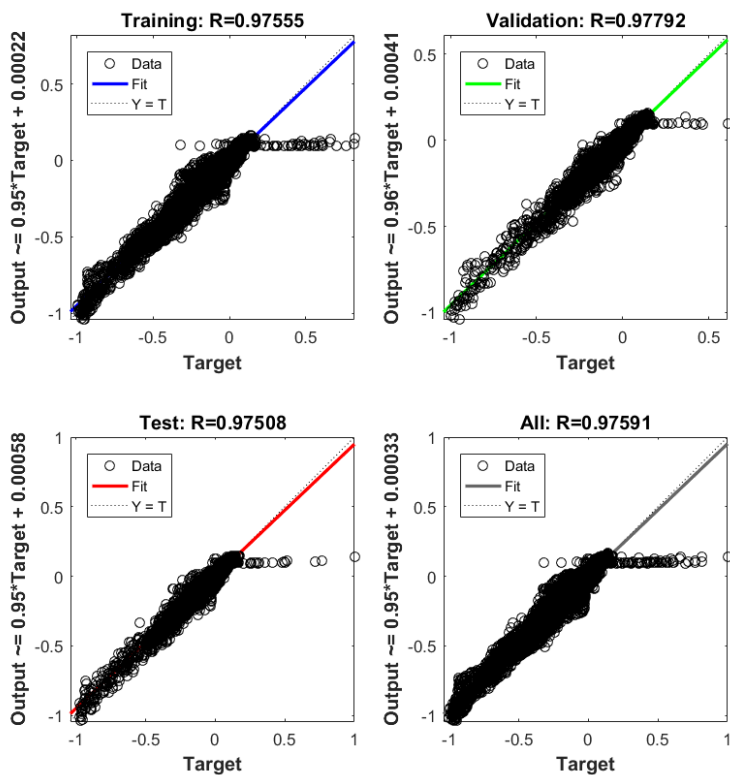


(د)

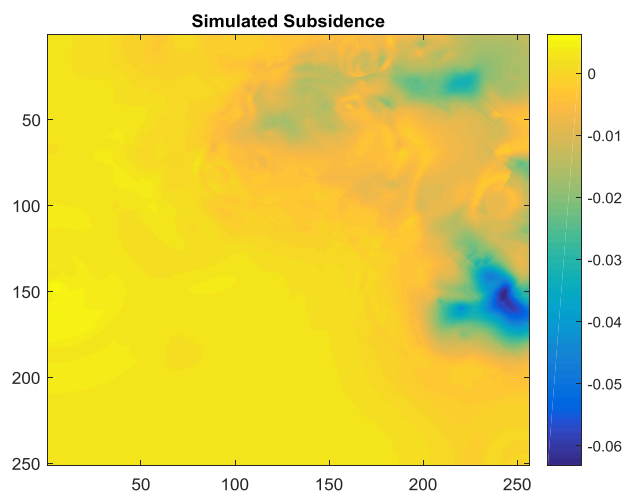
شکل ۸. الف: لایه سطح آب زیرزمینی، ب: لایه ضخامت لایه رس در آبخوان ج: لایه ضخامت آبخوان، د: لایه ضخامت لایه رس در محدوده تغییرات سطح آب زیرزمینی (۲۰۱۴-۲۰۱۸) ه: لایه تغییرات سطح آب زیرزمینی (۲۰۱۴-۲۰۱۸)



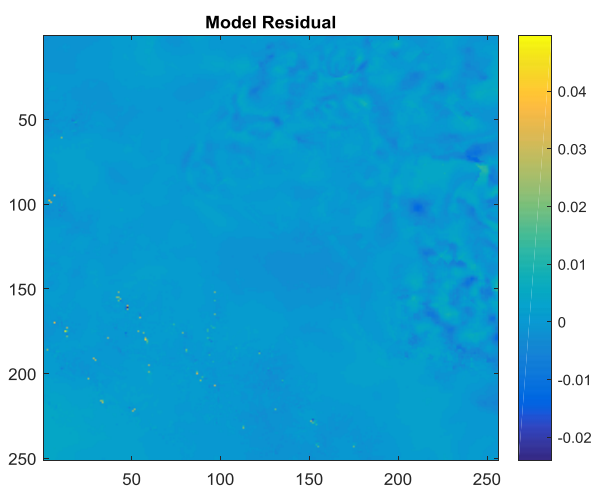
شکل ۹. تابع عملکرد آموزش شبکه عصبی طراحی شده برای داده‌های آموزشی، ارزیابی و تست



شکل ۱۰. همبستگی خروجی شبکه با خروجی هدف برای داده‌های آموزشی، ارزیابی و تست. محور x، معرف داده‌های خروجی روش تداخل سنجی راداری و محور y معرف خروجی محاسبه شده توسط شبکه عصبی است.



شکل ۱۱. نرخ فرونشست محاسبه شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۱۲. نقشه اختلاف مقادیر فرونشست مدل شده توسط شبکه عصبی و فرونشست محاسبه شده توسط روش تداخل سنجی راداری

فرونشست دقیقاً صفر نبوده که این امر، آموزش شبکه را با خطا مواجه می‌کند.

از دیگر روش‌های ارزیابی نتایج مدل، استفاده از معیارهای ارزیابی کارایی مدل بود. معیارهای ارزیابی بکار رفته در این پژوهش شامل ناش - ساتکلیف (NS)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE) بود. نتایج حاصل از این معیارها در جدول ۲ نشان داده

به نظر می‌رسد وجود اطلاعات ناصحیح در داده‌های آموزشی شبکه عصبی، سبب بروز این خطاها شده است. شبکه عصبی جهت آموزش صحیح، کاملاً به داده‌های ورودی وابسته است و وجود اطلاعات غیر دقیق، سبب برآورد ناصحیح وزن‌ها می‌گردد. در نواحی که فرونشست وجود ندارد انتظار می‌رود میزان نرخ فرونشست زمین صفر باشد، اما وجود خطا در مرحله بازیابی فاز، نویز و خطای اتمسفری باعث می‌گردد در این مناطق مقدار



شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقادیر ارزیابی، دقت بالای مدل‌سازی با استفاده از شبکه

عصبی را تأیید می‌کند.

جدول ۲. مقادیر معیارهای ارزیابی مدل در هر یک از انواع معیارها

نوع معیار ارزیابی کارایی مدل مورد استفاده	مقدار معیار ارزیابی کارایی مدل	حالت بهینه معیار ارزیابی
ناش - ساتکلیف (NS)	۰/۹۵۳۴	۱
جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)	۰/۰۰۱۸	۰
میانگین خطای مطلق (MAE)	۰/۰۰۱۲	۰
میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE)	۰/۱۵۴۵	۰

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور پایش فرونشست دشت ابرکوه، رفتار سطح زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری مورد ارزیابی قرار گرفت که نتیجه آن تولید نقشه نرخ متوسط فرونشست سالانه بود. این تکنیک راداری، اندازه‌گیری دقیق و سریع تغییرات سطح زمین را در گستره مکانی وسیع فراهم می‌سازد.

نقشه فرونشست منطقه نشان داد که پدیده فرونشست در ۳ ناحیه از دشت ابرکوه به صورت فعال‌تر حادث شده است. شرق منطقه دارای بیشترین مقدار فرونشست بود. این منطقه جزء اراضی کشاورزی منطقه مهردشت است. نواحی شمال شرق و شمالی منطقه مورد مطالعه، در واقع اراضی کشاورزی پیرامون شهر ابرکوه هستند. مقدار فرونشست در دیگر قسمت‌ها کمتر بوده و میزان آن در برخی مناطق بسیار ناچیز و حتی نزدیک به صفر است. به طور کلی نیمه شرقی منطقه نسبت به نیمه غربی آن از پتانسیل بیشتری برای فرونشست برخوردار است.

در گام بعدی پژوهش، مدل‌سازی فرونشست با استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی صورت پذیرفت. بی‌شک هر یک از روش‌های مختلف ارزیابی فرونشست، دارای نقاط قوت و ضعف هستند و استفاده از چند روش، به دریافت اطلاعات بیشتر منجر خواهد شد. با وجود اینکه استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری یکی از دقیق‌ترین و پرکاربردترین روش‌های مطالعه فرونشست است، اما به

دلیل پیچیدگی و فرآیند خاص محاسباتی، مورد استفاده همه ذینفعان نخواهد بود. علاوه بر این، در روش تداخل‌سنجی راداری اگرچه نرخ فرونشست در بازه‌های زمانی مورد نظر به صورت دقیق محاسبه می‌شود، اما هیچ تحلیلی در خصوص عوامل مؤثر بر رخداد فرونشست ارائه نمی‌شود. همچنین در نقاطی که تکنیک تداخل‌سنجی راداری به دلیل برخی محدودیت‌ها (نقاط نویزی و پرش فاز) قادر به محاسبه مقادیر فرونشست نیست، استفاده از روش‌های دیگر به عنوان روش مکمل، می‌تواند راهکار مناسبی باشد. لذا مدل‌سازی با استفاده از شبکه‌های عصبی، به عنوان روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در دستور کار قرار گرفت.

نتایج مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی به صورت یک نقشه فرونشست مجزا ارائه شد. مقایسه نقشه بدست آمده از روش مدل‌سازی شبکه عصبی (داده‌های پیش‌بینی) با نقشه بدست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری (داده واقعی)، گواه دقت بالای روش مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بود. همبستگی بالای مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی در مراحل آموزش، تست و اعتبار سنجی مدل (مقادیر  $r$  بالای ۰/۹۵)، ارائه نقشه مقادیر تفاضل مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده و معیارهای ارزیابی خطا، همگی مؤید کیفیت بالای مدل‌سازی به روش شبکه عصبی مصنوعی بود. در ادامه به منظور بررسی عوامل مؤثر بر پدیده فرونشست و واکاوی این مسئله، مواردی بیان خواهد شد:

نتایج مشابهی دست یافتند.

معمولاً کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش موثر، یک پدیده تدریجی و وابسته به زمان است. بنابراین به دنبال کاهش سطح پیژومتری، فرونشست با تأخیر زمانی رخ خواهد داد. تعیین تأخیر زمانی بین افت سطح آب و فرونشست به راحتی امکان‌پذیر نیست. همچنین این فاز تأخیر در هر نقطه‌ای متفاوت از نقطه دیگر عمل کرده و به عوامل مختلفی بستگی دارد. لذا این احتمال وجود دارد که فرونشست حاضر، متأثر از شرایط هیدرولیکی قبل از این بازه باشد که طبق بررسی‌های انجام شده، نقشه پتانسیل فرونشست با الگوی تغییرات سطح آب در سال‌های قبل هم‌خوانی دارد. دهقانی در پایش فرونشست سطح زمین در دشت مشهد، قابلیت هدایت هیدرولیکی را یکی از عوامل تأخیر زمانی بین افت سطح آب و نشست زمین عنوان می‌کند [۸].

از طرف دیگر می‌توان این‌گونه استنباط کرد که در فرونشست‌های با منشأ افت سطح آب زیرزمینی، اگرچه افت سطح آب ضروری است، اما کافی نبوده و عوامل موثر دیگری مانند ضخامت لایه‌های ریزدانه، این پدیده را کنترل می‌کنند. نتایج مطالعات حقیقت مهر و همکاران در بررسی فرونشست هشترگرد نیز حاکی از آن بود که در برخی مناطق به علت ضخامت رسوبات ریزدانه و قابلیت هدایت هیدرولیکی اندک این رسوبات، گاه ممکن است تأخیر زمانی بین کاهش سطح آب زیرزمینی و رخداد فرونشست وجود داشته باشد. بنابراین همواره نمی‌توان رابطه خطی بین کاهش سطح آب زیرزمینی و رخداد فرونشست سطح زمین متصور شد [۱۳].

تطابق نقشه فرونشست با نقشه جنس رسوبات آبخوان نشان می‌دهد مناطقی که از پتانسیل بیشتر فرونشست برخوردار هستند، در مکان‌هایی قرار دارند که بیشتر رسوبات، ریزدانه و از جنس رس و ترکیبات رس‌دار هستند. اما مناطق غربی که پتانسیل فرونشست کمتری دارند، بیشتر از ماسه و قلوه‌سنگ تشکیل شده‌اند. مختاری و همکاران پس از بررسی فرونشست دشت تسوج بیان

هیچ منبع علمی را نمی‌توان یافت که بر نقش مؤثر و اصلی افت سطح آب در پدیده فرونشست اشاره نکرده باشد. تغییرات سطح آب زیرزمینی به موقعیت محل نسبت به مناطق تغذیه و برداشت و همچنین مقادیر هر یک از آن‌ها بستگی دارد. به همین دلیل روند تغییرات سطح آب، در بخش‌های مختلف آبخوان با یکدیگر متفاوت است. مقایسه موقعیت مکانی مناطقی که با افزایش و یا کاهش سطح آب مواجه بودند با موقعیت مشابه بر روی تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که افت سطح آب در مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی که در آن تمرکز چاه‌های بهره‌برداری بیشتر است و عموماً برداشت از منابع آب زیرزمینی با شدت بیشتری صورت می‌گیرد، اتفاق افتاده و به تبع آن میزان فرونشست نیز در این مناطق بیشتر است. بررسی مناطق با کاهش افت سطح آب و یا افزایش سطح آب نشان داد که آبخوان این مناطق با کاربری مرتع و اراضی بایر توسط مناطق کوهستانی و مخروط‌افکنه‌های موجود در منطقه تغذیه می‌شوند. بررسی نقشه فرونشست نیز حکایت از بالا آمدگی این مناطق را دارد که احتمال می‌رود به علت افزایش ضخامت رسوبات سطح مخروط‌افکنه و یا بالا آمدگی ارتفاعات باشد. حداد و خراسانی (۲۰۱۹) در بررسی فرونشست دشت سمنان به بالا آمدگی برخی مناطق در نقشه فرونشست اشاره کرده‌اند [۱۲].

مقایسه نقشه افت سطح آب زیرزمینی منطقه با نقشه فرونشست نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه میزان افت سطح آب در نواحی غربی بیشتر است، اما پتانسیل فرونشست در نیمه شرقی به صورت مشهودی نمود پیدا کرده است. این مسأله را می‌توان به جنس لایه‌های آبخوان نواحی غربی نسبت داد که عمدتاً شامل رسوبات ماسه (متوسط تا درشت) و قلوه‌سنگ هستند. به‌طور کلی رسوبات درشت‌دانه، درجه تراکم‌پذیری پایینی دارند و با افزایش تنش بین ذره‌ای به دلیل خروج آب از بین آن‌ها، به میزان قابل توجهی متراکم نمی‌شوند. به بیان دیگر بافت درشت و گراولی آن‌ها می‌تواند از خطر وقوع فرونشست بکاهد. دهقانی [۸] و ملکی و رضایی [۱۸] در تحقیقات خود به

شد. به عبارت دیگر مقدار فرونشست به ضخامت و تراکم پذیری لایه‌ها بستگی دارد. حضور رسوبات رسی ضخیم در مناطق با پتانسیل بالای فرونشست، صحت این مطالب را تایید می‌کند. عیفی در تحقیق خود به نقش تراکم و فشردگی میان لایه‌های رسی بر اثر برداشت بی‌رویه آب در پدیده فرونشست اشاره کرده است [۱].

یکی از مزایای استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری در پایش فرونشست، بررسی نقش گسل در رخداد فرونشست است. اگر شکل فرونشست در منطقه دارای کشیدگی باشد و این کشیدگی در امتداد گسل‌های منطقه باشد، می‌توان با احتمال زیاد گسل فعال را به‌عنوان عامل اصلی و طبیعی فرونشست معرفی کرد. اما اگر شکل فرونشست به شکل تقریباً دایره باشد، نقش گسل در ایجاد فرونشست ناچیز است. به‌عبارت دیگر در پدیده فرونشست، گسل نقش ندارد و فرونشست متأثر از دیگر عوامل است [۲۱]. بنابراین با توجه به اینکه شکل فرونشست در منطقه مورد مطالعه به صورت خطی نیست، به نظر می‌رسد فرونشست منطقه منشاء غیر گسلی داشته باشد.

در پایان یادآور می‌شود استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری به جهت دقت مکانی و زمانی بالا و پوشش محدوده وسیعی از سطح زمین، به عنوان یکی از بهترین روش‌های پایش فرونشست محسوب می‌شود. در شرایطی که این تکنیک به دلیل برخی محدودیت‌ها (نقاط نویزی و پرش فاز) قادر به محاسبه مقادیر فرونشست نباشد، استفاده از روش‌های دیگر از جمله هوش مصنوعی به عنوان روش مکمل، می‌تواند راهکار مناسبی باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی در پیدا کردن ارتباط بین پارامترهای ورودی و مقادیر فرونشست عملکرد بسیار خوبی دارد. اگرچه افت سطح آب زیرزمینی در رخداد پدیده فرونشست لازم است، اما کافی نیست. بنابراین افت سطح آب زیرزمینی و وجود لایه‌های زیرسطحی ریزدانه خصوصاً رس، علی‌رغم وجود احتمالی علت‌های مختلف دیگر، سبب رخداد فرونشست در مناطقی از دشت ابرکوه شده است.

داشت که افت سطح سفره آب زیرزمینی به همراه ریزدانه بودن رسوبات این دشت، از دلایل اصلی فرونشست این منطقه است [۱۹].

یکی از عوامل تشدید کننده در فرونشست زمین، وجود لایه‌های متعدد رسی با استعداد واگرایی متفاوت است که به صورت نامنظم و تصادفی در کنار یکدیگر قرار دارند. افت و نوسانات سطح آب زیرزمینی علاوه بر افزایش تنش موثر و کاهش فشار منفذی، سبب شده است تا با توالی‌های آگیری و آماس رس و خروج از آب و کاهش حجم آن، نقش تشدیدکنندگی را در نشست زمین داشته باشد. در نهایت به علت ناهمگن بودن آبخوان، شرایط برای ایجاد فرونشست و شکاف‌های فرونشستی در امتداد سطوح ضعیف فراهم شود.

ضخامت آبخوان از دیگر عواملی است که مورد بررسی قرار گرفت. در حالت کلی مشاهده می‌شود که فرونشست، بیشتر در مکان‌هایی اتفاق می‌افتد که ضخامت آبخوان بیشتر باشد. زیرا احتمال برداشت آب در آبخوان‌های ضخیم بیشتر بوده و این امر، زمینه را برای رخداد پدیده فرونشست مساعد می‌کند. از طرف دیگر ضخامت بیشتر، دارای وزن بیشتری بوده و به سبب افزایش فشار بر لایه‌های پایین‌تر، پدیده تحکیم و فرونشست را افزایش می‌دهد. نقشه ضخامت آبرفت منطقه نیز نشان می‌دهد که بیشترین ضخامت آبرفت در شمال و شمال شرق منطقه قرار دارد و گستره‌ای از آن تا نواحی شرقی ادامه دارد که انطباق خوبی با مناطق با پتانسیل بالا در نقشه فرونشست دارد.

سفره آب زیرزمینی معمولاً از میان لایه‌های ریزدانه که قابلیت تراکم بالایی دارند تشکیل شده است. پایه نظری تراکم میان لایه‌ها بر اساس اصل ترزاقی (Terzaghi) در مورد فشار موثر می‌باشد. این اصل بیان می‌دارد هنگامی که آب از سفره خارج شود، این میان لایه‌ها که اغلب از رس و سیلت تشکیل شده‌اند، متراکم می‌گردند. بنابراین سفره به دلیل تغییر در میزان فشار، دچار تغییر شکل یا جابجایی می‌شود. هر چقدر که ضخامت این رسوبات بیشتر باشد، احتمال فشردگی و فرونشست آبخوان نیز بیشتر خواهد

## References

- [1] Afifi, M. A. (2017). Assess the potential of land subsidence and its related factors (Case study: Plain Saidan Farouk Marvdasht). *Quantitative Geomorphological Research*, 5(3), 121- 132.
- [2] Al-Halbouni, D., Holohan, E., Saberi, L., Alrshdan, H., Sawarieh, A., Closson, D., Walter, T. R. and Dahm, T. (2017). Sinkholes, subsidence and subrosion on the eastern shore of the Dead Sea as revealed by a close-range photogrammetric survey. *Geomorphology*, 285, 305-324.
- [3] Azarakhsh, Z., Azadbakht, M. and Matkan, A. (2022). Estimation, modeling, and prediction of land subsidence using Sentinel-1 time series in Tehran-Shahriar plain: A machine learning-based investigation. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25,1-17.
- [4] Bagheri, M., Dehghani, M., Ali Esmaeily, A. and Akbari, V. (2019). Assessment of land subsidence using interferometric synthetic aperture radar time series analysis and artificial neural network in a geospatial information system: case study of Rafsanjan Plain. *Journal of Applied Remote Sensing* 13(4), 21-42.
- [5] Castellazzi, P., Arroyo-Domínguez, N., Martel, R., Calderhead, A. I., Normand, J. C., Gárfias, J. and Rivera, A. (2016). Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47, 102-111.
- [6] Choopani, A., Dehghani, M. and Nikoo, M. R. (2020). Determining hydrogeological parameters of an aquifer in Sirjan Basin using Envisat ASAR interferometry and groundwater modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 41(2), 655-682.
- [7] Daniel, R., Maisons, C., Carnec, S., Le Mouelic, C., King, C. and Hosford, S. (2003). Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement. *Remote Sensing of Environment*, 88(4), 468-478.
- [8] Dehghani, M. (2014). An Enhanced Algorithm based on Radar Interferometry for Monitoring Land Subsidence Caused by Over-Exploitation of groundwater. *Journal of Geospatial Information Technology* 2(2), 61-73.
- [9] Dehghani, M., Valadanoej, M. J., Hooper, A., Hanssen, R. F., Entezam, I. and Saatchi, S. (2013). Hybrid conventional and persistent scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin, Iran. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79, 157-170.
- [10] Dehghani, M., Valadanoej, M. J., Entezam, I., Saatchi, S. and Shemshaki, A. (2011). Interferometric measurements of ground surface subsidence induced by overexploitation of groundwater. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4(1), 56-73.
- [11] Galloway, D. L., Erkens, G., Kuniansky, E. I. and Rowland, J. C. (2016). Preface: Land subsidence processes. *Hydrogeology Journal*, 24 (3), 547-550.
- [12] Haddad, A. and Khorasani, E. (2019). Groundwater level changes effect on the subsidence in Semnan plain *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 28(112), 181-190.
- [13] Haghightmehr, P., Valadanoej, M. J., Tajik, R., Jabari, S., Sahebi, M. R., Eslami, R., Ganjiyan, M. and Dehghani, M. (2012). Time Series Analysis of Hashtgerd Subsidence Using Radar Interferometry and Global Positioning System. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 22(85), 105-114.
- [14] Herrera, G., Tomas, R., Monells, D., Centolanza, G., Mallorqui, J., Vicente, F., Navarro, V., Lopez Sanchez, J., Sanabria, M., Cano, M. and Mulas, J. (2010). Analysis of subsidence using TerraSAR-X data: Murcia case study. *Engineering Geology*, 116(3-4), 284-295.
- [15] Karunasingha, D. S. K. (2022). Root mean square error or mean absolute error? Use their ratio as well. *Information Sciences*, 585, 609-629.

- [16] Knoben, W. J., Freer, J. E. and Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323–4331.
- [17] Kumar, V., Venkataramana, G. and Høgda, K. (2011). Glacier surface velocity estimation using SAR interferometry technique applying ascending and descending passes in Himalayas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(4), 545–551.
- [18] Maleki, A. and Rezaee, P. (2016). Forecast locations at risk of subsidence plain Kermanshah. *The Journal of Spatial Planning*, 20(1), 235–251.
- [19] Mokhtari, D., Ebrahimi, H. and Salmani, S. (2019). Land subsidence susceptibility modeling using random forest approach (Case study: Tasuj plane catchment). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(3), 93–105.
- [20] Pourab Consulting Engineers, (2012). *Geology and Hydrogeology Report (Abarkouh)*, Regional Water Company of Yazd. 173 Pp.
- [21] Pourkhosravani, M. (2014). Geoduality Theory. *Geography and Environmental Planning*, 25(1), 25–36.
- [22] Reich, N. G., Lessler, J., Sakrejda, K., Lauer, S. A., Iamsirithaworn, S. and Cummings, D. A. (2016). Case study in evaluating time series prediction models using the relative mean absolute error. *The American Statistician*, 70(3), 285–292.
- [23] Saffari, A., Jafari, F., and Tavakoli Sabour, S. M. (2016). Monitoring its land subsidence and its relation to groundwater harvesting case study: Karaj Plain – Shahriar. *Quantitative Geomorphological Research*, 5(2), 82–93.
- [24] Sousa, J.J., Ruiz, A.M., Bakon, M., Lazecky, M., Hlavacova, I., Patrício, G., Delgado, J.M. and Perissin, D., (2016). Potential of C-Band SAR interferometry for dam monitoring. *Procedia Computer Science*, 100, 1103–1114.
- [25] USGS. (2017). [https://ca.water.usgs.gov/land\\_subsidence/](https://ca.water.usgs.gov/land_subsidence/)
- [26] Wang, W. and Lu, Y. (2018). Analysis of the mean absolute error (MAE) and the root mean square error (RMSE) in assessing rounding model. In *IOP conference series: materials science and engineering*, 324(1), 1–10.
- [27] Zhu, L., Gong, H., Li, X., Li, Y., Su, X. and Guo, G. (2013). Comprehensive analysis and artificial intelligent simulation of land subsidence of Beijing, China. *Chinese Geographical Science*, 23(2), 237–248.

## Modeling of land subsidence in Abarkouh plain using Synthetic aperture radar method and artificial intelligence

- ❖ **Zahra Khosravani**; Ph.D. Student of Combat Desertification, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.
- ❖ **Mohammad Akhavan Ghalibaf\***; Assistant Professor, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.
- ❖ **Maryam Dehghani**; Associated Professor, Faculty of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.
- ❖ **Vali Derhami**; Professor, Faculty of Computer Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
- ❖ **Mustafa Bolca**; Professor, Faculty of Agriculture, Ege University, Izmir, Turkey.

### Abstract

Synthetic aperture radar (inSAR) is one of the best methods for detection of earth crust changes in terms of accuracy and continuous spatial coverage. The aim of this study was to model the subsidence of Abarkouh plain using inSAR and artificial intelligence techniques. At first, the subsidence map was prepared using the 46 Sentinel - 1 radar images (2014 – 2018) and radar interferometry techniques. Then, the Feedforward artificial neural network (ANN) algorithm was used to model the subsidence. In this algorithm, groundwater level changes (2014-2018), groundwater level, aquifer thickness, clay thickness in the aquifer and the clay thickness in the range of groundwater level changes (2014 - 2018) were introduced as input layers and the subsidence layer obtained from the radar interferometry method was introduced as an output layer to model training. These five parameters were obtained from the measured data set of 34 piezometer wells and 77 logs available in the archive of Regional Water Company of Yazd province. After initial checking of the data accuracy, the Kriging interpolation method was used to extend the five parameters to the whole region and the raster layers were prepared. The results of inSAR showed that maximum subsidence in parts of the studied area, i.e., in east, north - east and north, were 6, 2.7 and 1.6 cm/year respectively. Also, in order to verify the accuracy of the map resulting from using a neural network model, it was compared with the map with the radar imaging method. For this purpose, model evaluation criteria such as Nash-Sutcliffe (NS), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and mean absolute relative error (MARE) were used, which 0.9524, 0.0018, 0.0012 and 0.1545 were obtained respectively. Therefore, the artificial neural network for subsidence modeling is very good.

**Keywords:** groundwater, fine-grained sediments, artificial neural network, Sentinel-1 radar images, subsidence