

بررسی اثر ویژگی‌های خاک و سطح زمین در پیش‌بینی فرونشست با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: دشت میناب هرمزگان)

محمد کاظمی*: استادیار مرکز مطالعات و تحقیقات (پژوهشکده) هرمز، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

علیرضا نفرزادگان: استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

ایوب کرمی: شرکت دانش‌بنیان پوشش‌گران فروغ فرداد، پارک علم و فناوری یزد، یزد

محسن ابراهیمی خوسفی: استادیار گروه جغرافیا، پردیس علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۲۸

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۱۱)



20.1001.1.22517812.1401.12.2.1.8

چکیده

از فرونشست، به زلزله خاموش یاد می‌شود و منشأ طبیعی - انسانی دارد. هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثر ویژگی‌های خاک و سطح زمین بر پیش‌بینی میزان فرونشست دشت میناب بود. ابتدا متغیرهای بافت خاک، پوشش گیاهی، درصد شن، سیلت و رس، دمای سطح زمین، وزن ظاهری خاک، نوع پوشش اراضی و شوری خاک با استفاده از سامانه Google Earth Engine و نرم‌افزار TerrSet2020 برای سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ تهیه شد. در مرحله بعد اینترفروگرام اولیه منطقه با استفاده از تصاویر رادار سنتینل-۱ استخراج شد. برای اصلاح اینترفروگرام از فیلتر گلدشتاین استفاده شد. پس از حذف تأثیر توپوگرافی، فازها به نقشه جابه‌جایی تبدیل شد. در گام بعدی با توجه به متغیر وابسته (میزان فرونشست) و متغیرهای مستقل (ویژگی‌های سطح زمین و خاک)، برای مدل‌سازی مکانی از روش‌های داده‌کاوی بیز ساده (NB)، درخت تصمیم (DT) و k- نزدیک‌ترین همسایه (kNN) در نرم‌افزار RapidMiner و Eureka Formulize استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان فرونشست در مقیاس نسی ماهیانه در سال به ترتیب برابر با ۳/۶۱، ۰/۹۲ و ۵/۶۹ سانتی‌متر بود. عمده تغییرات مکانی فرونشست نشان داد، از مرکز دشت به سمت حاشیه‌های دشت گسترش یافته‌است. از بین متغیرهای مستقل، پوشش گیاهی، بافت سنگین خاک و شوری خاک تأثیر منظم‌تری بر طبقات مختلف فرونشست داشت و متغیرهای دمای سطح زمین، پوشش اراضی، درصد رس و تبخیر و تعرق واقعی خاک در فرایند مدل‌سازی حساس‌تر تشخیص داده شد. در بین مدل‌های پیش‌بینی میزان فرونشست، روش درخت تصمیم با دقت ۶۳/۱۵، خطای طبقه‌بندی ۳۶/۸۵، کاپا ۲۹/۷، خطای مطلق و خطای نسبی ۰/۵، خطای مطلق نرمال‌شده ۰/۴۵ و مجموع مربعات باقیمانده خطا ۰/۵۶ عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر داشت.

واژگان کلیدی: پیش‌بینی مکانی، پردازش تصاویر رادار، داده‌کاوی، گوگل‌ارت انجین، سنتینل-۱.

۱- مقدمه

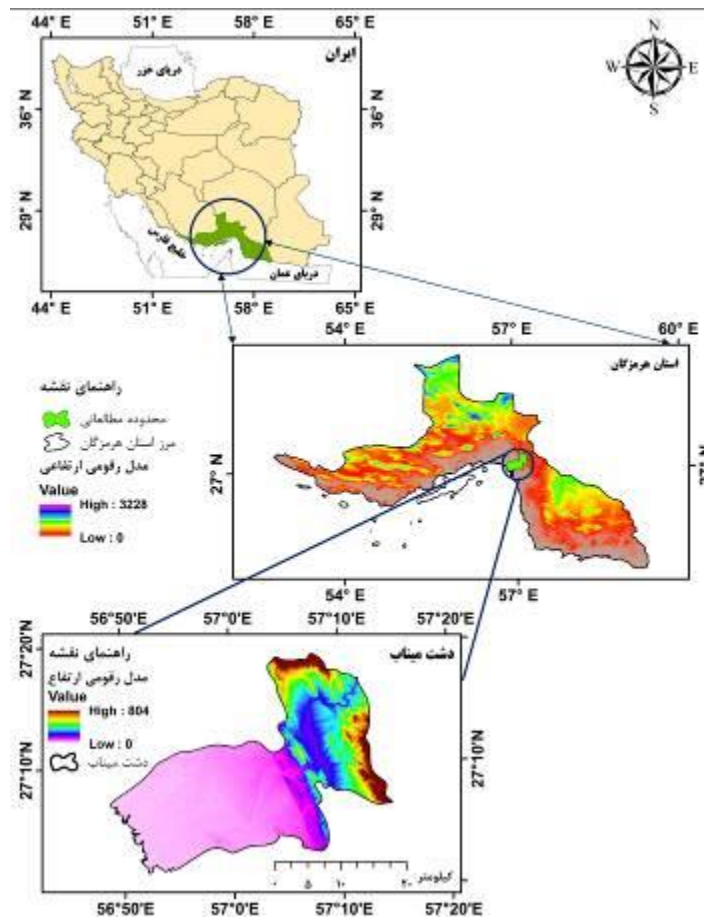
فرونشست زمین نسبت به دیگر مخاطرات سابقه کمتری دارد، ولی نام زلزله خاموش را به آن نسبت داده‌اند. عوامل متنوعی در شکل‌گیری فرونشست زمین نقش دارد؛ مانند برداشت بی‌رویه از مخازن آب‌زیرزمینی، معدن‌کاوی، زلزله، فعالیت‌های آتشفشانی، کارست و سیلاب (Abdollahi et al, 2014 & Gutierrez et al, 2019). خطر فرونشست در بسیاری از نقاط جهان اتفاق می‌افتد و بر زندگی اجتماعی، اقتصادی، ساخت و سازهای شهری و تخریب محیط زیست اثرات جبران‌ناپذیری دارد. با توجه به خسارت‌های ناشی از فرونشست زمین به تأسیسات زیربنایی، ساختمان‌ها و زمین‌های کشاورزی، شناخت این پدیده، شناسایی مناطق حساس به آن و بررسی عوامل مؤثر بر ایجاد آن مهم است و می‌تواند در پیش‌بینی فرونشست و پیشگیری از خسارت‌های ناشی از آن نقش مؤثری داشته باشد (Ustun et al, 2015). در مقیاس جهانی، خطر این پدیده بر اثر افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های ۱۹۵۰-۱۹۷۰ همزمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی به اوج خود رسید (Behrangi et al, 2021). به دلیل اهمیت این خطر، یونسکو در سال ۱۹۶۵ تحقیقات ویژه‌ای در زمینه فرونشست زمین برنامه‌ریزی و دستورالعمل‌های مطالعاتی را در کارگروه‌های ویژه تهیه کرد. این تحقیقات همچنان ادامه دارد و رخداد این خطر به خصوص در مناطق خشک و کم باران جهان (Behrangi et al, 2021) و در بیش از ۱۵۰ شهر گزارش شده است (ArabAmeri et al, 2019 & Boni et al, 2018)؛ به طور مثال، ۴۵ ایالت آمریکا و بیش از ۹۵ شهر در کشور چین از این خطر رنج می‌برند. همچنین احتمال می‌رود که بیش از نیمی از ششصد دشت ایران در معرض فرونشست باشد، اما فقط در تعدادی از آنها پژوهش‌هایی انجام و منتشر شده است (Sharifikia, 2012). پایش و اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف این پدیده از دیرباز با ابزارهای مختلف نقشه‌برداری، GPS و فن سنجش از دور انجام می‌شود. در این بین به کارگیری فنون تداخل‌سنجی راداری (InSAR) - که با پردازش تصاویر ماهواره‌ای قابل انجام است - از روش‌های نوین، دقیق و کم‌هزینه است و کارآمدی آن در پژوهش‌های مختلف، شناسایی و اندازه‌گیری میزان فرونشست زمین گزارش شده است (Gutierrez et al, 2019 & Foroughnia et al, 2018).

سنجش از دور راداری، امکان آشکارسازی و تشخیص اختلاف ارتفاع‌های ایجادشده در سطح زمین را در کوتاه‌ترین زمان و برای مناطق بزرگ فراهم می‌سازد (Arvin et al, 2019 & Ustun et al, 2015). در ایران نیز مطالعات انجام شده با روش InSAR در دشت‌های مختلف از جمله نوق - بهرمان (Sharifi kia, 2012)، تهران (Foroughnia et al, 2017 & Zarekamali et al, 2018)، مهیار (Arab ameri et al, 2019) و پاکدشت (Ebrahimi et al, 2020) با استفاده از داده‌های ماهواره‌های Sentinel-1 Polsar، ENVISAT، کارآمدی این روش و داده‌ها را در پایش و سنجش فرونشست تأیید کرده‌اند. Ebrahimi و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از نرم‌افزار SNAP و تصاویر راداری Sentinel-1 به بررسی میزان فرونشست سالانه پاکدشت پرداختند. نامبردگان، میزان فرونشست را از ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ بین ۱/۵ تا ۸/۵ سانتی‌متر ذکر و این میزان را در مناطق غربی دشت به عنوان بیشترین مقدار فرونشست اعلام کردند. Hakim و همکاران (۲۰۲۰) نیز با استفاده از داده‌های کاوی و سری زمانی تصاویر رادار Sentinel-1 به مطالعه فرونشست در منطقه شهری جاکارتا پرداختند (Hakim et al, 2020).

در مناطق خشک و نیمه خشک مانند کشور ایران رخداد تغییرات اقلیمی، بروز خشکسالی‌های متعدد و افزایش جمعیت به کاهش پیوسته سطح آب‌های زیرزمینی و گسترش پدیده فرونشست در اغلب دشت‌ها منجر شده‌است (Behrangi et al, 2021). در همین زمینه طی سال‌های اخیر دشت میناب، از مهم‌ترین دشت‌های کشاورزی جنوب کشور، فرونشست‌های متعددی را تجربه کرده‌است. همچنین بررسی وضعیت تراز آب زیرزمینی دشت میناب در یک دوره سی ساله نشان داد که از سال ۱۳۸۰، افت سطح آب آبخوان شدت یافت و به طور متوسط سالانه ۴۲ سانتی‌متر افت در سطح آب مشاهده شد. این میزان افت، تراز منفی سطح آب آبخوان را نسبت به سطح آب دریا در پی داشت؛ به گونه‌ای که آب از سمت دریا به سمت آبخوان حرکت کرد. همچنین سابقه مطالعه ژئوتکتونیکی منطقه نشان داد که علاوه بر افت سطح آب، وجود رسوبات تورم‌پذیر و انحلال‌پذیر در منطقه به افزایش شدت بروز فرونشست در دشت میناب منجر شده‌است (Jamour et al, 2019). شواهد مطالعاتی و آسیب‌های وارد شده از سوی این عامل مخرب به زمین‌های کشاورزی، مناطق مسکونی و اثرات نامطلوب آن بر اقتصاد و زندگی ساکنان دشت میناب به ویژه کشاورزان (Arvin et al, 2019)، بیانگر اهمیت بالای مطالعه این پدیده و بررسی عوامل مؤثر بر آن است. Arvin و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از داده‌های راداری کوپرنیکوس، فرونشست دشت میناب را برای دوره چهار ساله در (۱۳۹۳-۱۳۹۷) بررسی کردند. در این تحقیق از دو تصویر Sentinel-1(S-1A&B) برای ابتدا و انتهای دوره استفاده شد. از آنجا که برای مدیریت این دشت، آگاهی از وضعیت فرونشست‌ها و چگونگی تغییر و گسترش آن، جزء پیش شرط‌های اساسی است، هدف از پژوهش حاضر ابتدا تحلیل تصاویر رادار برای شناسایی محل فرونشست، بررسی گسترش و تهیه نقشه مناطق حساس به فرونشست، بررسی ویژگی‌های خاک و سطح زمین در محل فرونشست‌ها و یافتن متغیرهای مؤثر سطحی در این رابطه است. در این تحقیق برای نخستین هدف با به کارگیری داده‌های سری زمانی سنجنده S-1A&B، میانگین درصد سالیانه فرونشست برآورد شد. در این زمینه با استفاده از مجموعه داده‌های تصاویر S-1 در بازه زمانی اواخر ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹، سری زمانی تحلیل شد. علاوه بر آن پس از محاسبه جابه‌جایی عمودی، مدل‌سازی مکانی و تهیه نقشه خطر فرونشست دشت میناب از روی نقشه فرونشست و با روش‌های نوین داده‌کاوی انجام شد. در این تحقیق بر خلاف دیگر تحقیقات فرونشست که بیشتر بر آب زیرزمینی، کاهش سطح آب و سازندها تأکید داشت، به ویژگی‌های خاک و سطح زمین در میزان تبیین پدیده فرونشست توجه شد.

۲- منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دشت میناب با وسعت ۶/۶۵۳ کیلومترمربع بین طول‌های ۵۶ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و عرض‌های ۲۷ درجه و ۱ دقیقه تا ۲۷ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی واقع شده‌است. محدوده مطالعاتی دشت میناب، در زون چین‌خورده مکران و در جنوب فرورفتگی جازموریان قرار دارد. از شرق و شمال شرق به گسل میناب و زندان و از جنوب غربی به گسل عمان منتهی می‌شود. سطح آب در آبخوان میناب از ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ به‌طور متوسط ۱۳/۸ متر افت داشته‌است و با حرکت به سمت شرق محدوده مطالعاتی علاوه بر کاهش عمق آب آبخوان، شوری و ریزدانه شدن رسوبات نیز مشاهده می‌شود (Jamour et al, 2019). در شکل ۱، محدوده مطالعاتی نشان داده شده‌است.



شکل ۱: موقعیت دشت میناب در استان هرمزگان و کشور ایران

۳- مواد و روش

مرحله تداخل‌سنجی (محاسبه فرونشست)

در تحقیق حاضر برای اجرای تداخل‌سنجی راداری، از تصاویر راداری سنتینل ۱ سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ و نرم‌افزار SNAP استفاده شد. این نرم‌افزار برای پردازش تصاویر سری سنتینل طراحی شده‌است. برای تسریع در فرایند پردازش، ابتدا محدوده مطالعاتی از تصاویر اصلی جداسازی شد. در این مرحله، Subswath (۳ قسمت)، Bursts و Polarisation (۹ قسمت) برای هر تصویر اصلی تعیین شد. پس از اجرای عملیات برش تصاویر (Tops Split) به منظور تصحیح مداری تصاویر، فرایند Apply-orbit-file بر روی هر زوج تصویر انجام و تصاویر زوجی Stack^۱ شد. در گام بعدی، از عملگر Back Geocoding استفاده شد. در این گام، مدل رقومی ارتفاعی SRTM 1SecHGT برای منطقه مورد نظر به‌شکل اتوماتیک دانلود و اعمال شد. این عملگر، دو تصویر جداشده منطقه مطالعاتی از دو بازه زمانی مختلف با زیر نوار یکسان را با استفاده از بردارهای دو فرآورده و یک مدل رقومی ارتفاعی (DEM) هم‌ثابت می‌کند. در ادامه به‌منظور استفاده از یک آزمون و برد ثابت برای کل تصویر، از عملگر Enhanced Spectral Diversity استفاده شد.^۲ در گام بعدی، دستور Interferogram Formation اجرا شد. بنابراین، در این گام

^۱ Split_Orb_Stack

^۲ Split_Orb_Stack_esd

با استفاده از اختلاف فازها اینترفروگرام^۱ منطقه به دست آمد (اینترفروگرام اولیه بدون حذف نویز توپوگرافیک). در گام قبلی، اعمال Subtract topographic phase برای حذف نویز توپوگرافیک از اینترفروگرام اولیه، از دستور Topographic Phase Removal برای کاهش فرینچ‌های ناشی از توپوگرافی استفاده شد. اینجاست که Baseline های کوچک‌تر، فرینچ‌های ناشی از توپوگرافی کمتری را نشان می‌دهند و برای فرایند تداخل‌سنجی و محاسبه فرونشست مناسب‌تر هستند. ذکر این نکته ضروری است که قبل از دستور حذف نویز توپوگرافیک، با توجه به اینکه در حدفاصل براست‌ها کمی فضای سیاه‌رنگ وجود دارد، از عملگر Tops Debrust به منظور ادغام ابتدا و انتهای هر کدام از براست‌ها و حذف فضای خالی استفاده شد^۲. در گام بعدی برای حذف حاشیه‌های تصویر و ناسازگاری‌های مکانی ناشی از عملگر قبلی، فایل رستر از اطراف تصویر کمی برش خورد^۳ (Subset). اکنون خروجی مرحله قبل برای حذف اثر توپوگرافی با دستور Topographic Phase Removal، با مدل رقومی ارتفاع SRTM 1Sec HGT قابل اجرا خواهد بود^۴ (تعداد فرینچ‌ها نسبت به اینترفروگرام اولیه، کمتر و نامحسوس‌تر شده‌است). در گام بعدی برای افزایش کیفیت تصویر، از عملگر Goldstein Phase Removal استفاده شد^۵. در مرحله بعد فرایند Multilooking انجام شد^۶. در این گام تعداد لوک‌ها (Number of Range Looks) روی ۴ تنظیم و ابعاد پیکسل (Mean GR Square Looks) به طور میانگین ۱۴ متر در نظر گرفته شد. بعد از اجرای مراحل تداخل‌سنجی، برای تبدیل اختلاف فازها به جابه‌جایی عمودی از یک نرم‌افزار واسط تحت عنوان Snaphu برای باز کردن فازها استفاده شد. در این مرحله پس از اجرای مراحل تداخل‌سنجی راداری، از اینترفروگرام اصلاح‌شده با استفاده از عملگر Snaphu Export خروجی گرفته شد. سپس فایل خروجی مرحله قبل (فایل تصویر با فرمت img اینترفروگرام فاز یا Phase_ifg_VV_snaphu.img) انتخاب شد. Unwrapping باز کردن فاز دو بعدی فرایند بازیابی داده‌های فاز یکنواخت از یک آرایه دوبعدی مقادیر فاز شناخته شده، تنها قسمت رادیان π است^۷. در مرحله بعد فازهای باز شده به نرم‌افزار Snap وارد و اختلاف فاز به جابه‌جایی عمودی در سیستم متریک تبدیل شد (دستور Phase to Displacement)^۸. در این فرایند، جابه‌جایی عمودی با استفاده از فاز باز شده در طول موج تصویر تقسیم بر منفی چهار در عدد پی در کسینوس زاویه تابش تصویر به دست می‌آید (ArabAmeri et al, 2019 & Ebrahimi et al, 2020). ذکر این امر لازم است که در گام آخر برای اجرای تصحیح هندسی روی تصویر خروجی جابه‌جایی، از دستور Range Doppler Terrain Correction و همان مدل رقومی ارتفاعی مراحل قبل استفاده شد^۹. شکل ۲، زیر روندنمای تهیه نقشه‌های فرونشست را نشان می‌دهد.

¹ Split_Orb_Stack_esd-ifg

² Split_Orb_Stack_esd-ifg-deb

³ Split_Orb_Stack_esd-ifg-deb-sub-dim

⁴ Split_Orb_Stack_esd-ifg-deb-sub-dim-dinsar

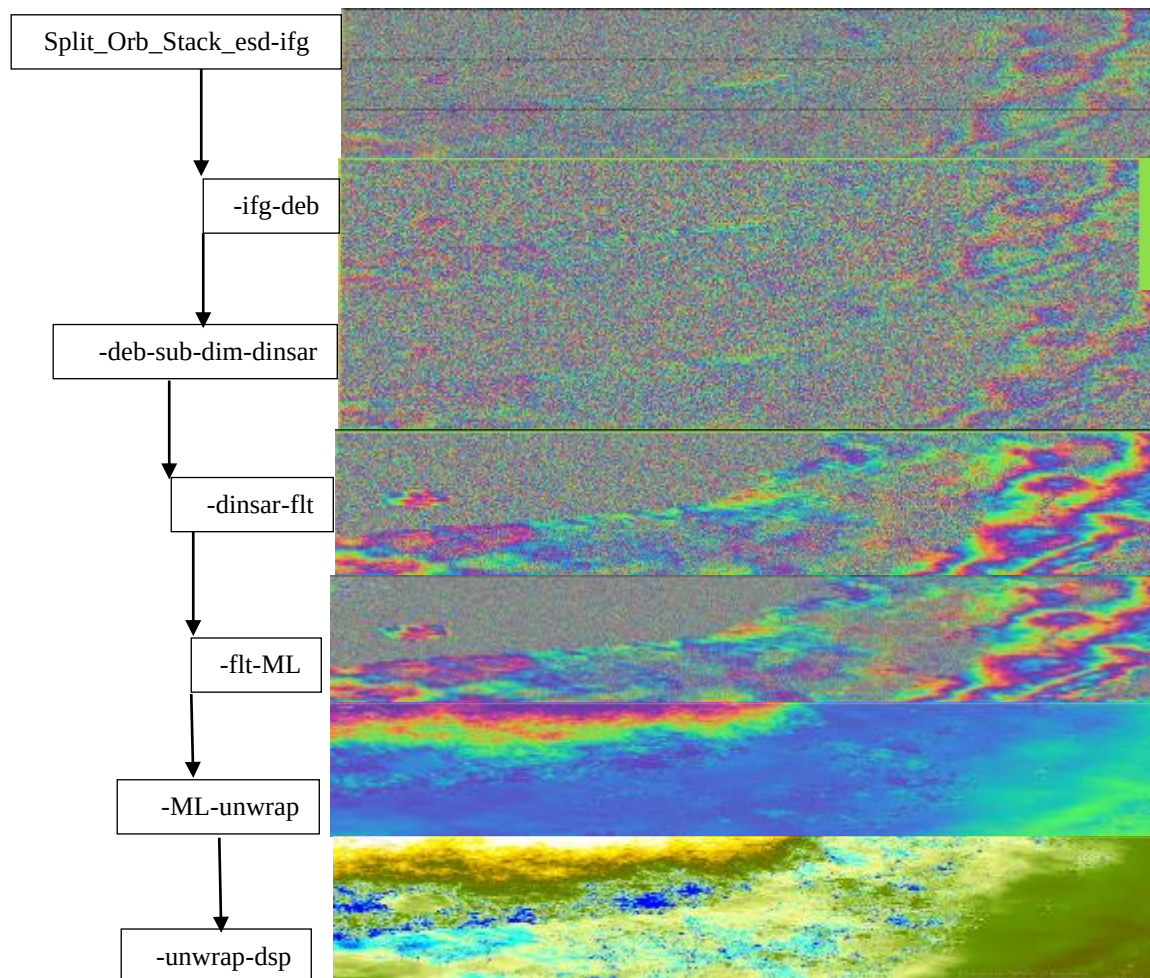
⁵ Split_Orb_Stack_esd-ifg-deb-sub-dim-dinsar-flt

⁶ Split_Orb_Stack_esd-ifg-deb-sub-dim-dinsar-flt-ML

⁷ Split_Orb_Stack_esd-ifg-deb-sub-dim-dinsar-flt-ML-unwrap

⁸ Split_Orb_Stack_esd-ifg-deb-sub-dim-dinsar-flt-ML-unwrap-dsp

⁹ Split_Orb_Stack_esd-ifg-deb-sub-dim-dinsar-flt-ML-unwrap-dsp-TC

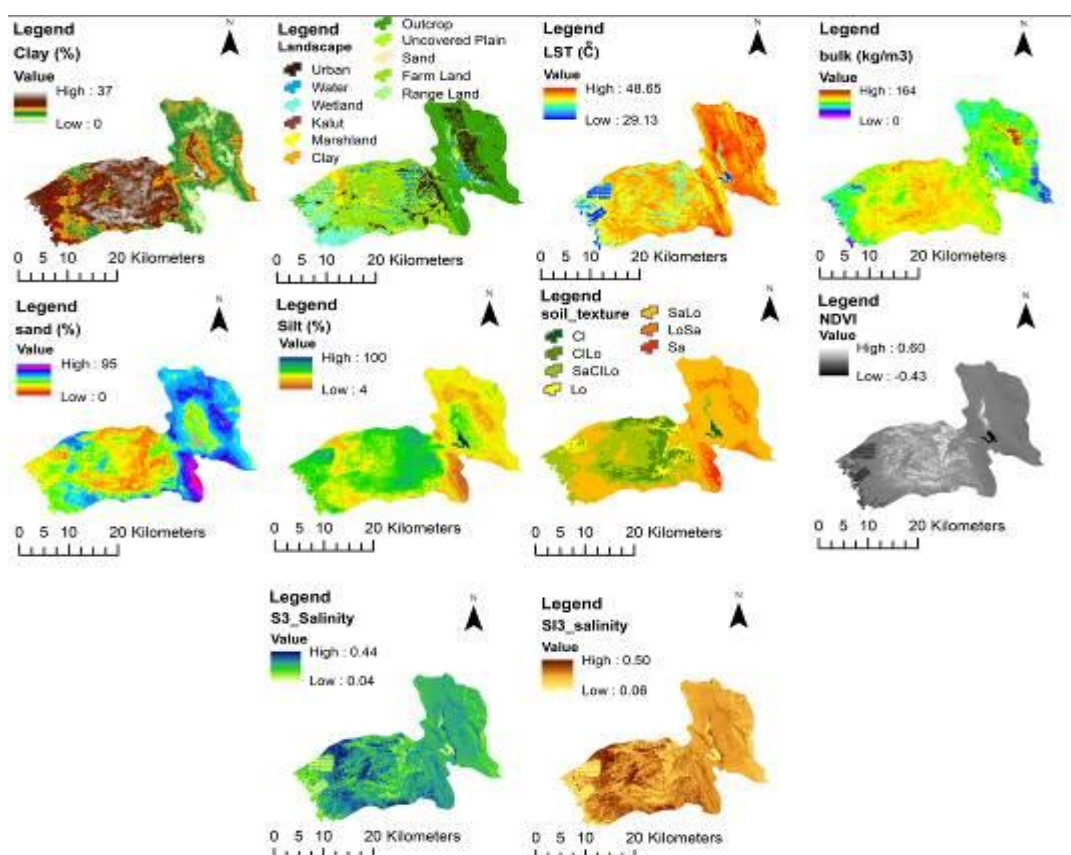


شکل ۲: تصاویر مراحل تبدیل فاز به تداخل سنج و محاسبه فرونشست زمین

در گام بعدی تحقیق با استفاده از سامانه آنلاین Google Earth Engine (GEE)، داده‌ها مطابق با جدول ۱ و شرح زیر کد نویسی و استخراج شد. داده پوشش زمین از تصاویر سنتینل ۱ و سنتینل ۲ تهیه شد که این تصاویر توسط دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی در سامانه گوگل ارت انجین (GEE) برای کشور ایران تهیه شده و دارای پیکسل ده متر و سیزده کلاس کاربری است (Ghorbanian et al, 2020). شاخص نرمال شده پوشش گیاهی و دمای سطح زمین، از روی تصاویر سری زمانی لندست و مطابق بازه زمانی تحقیق محاسبه و میانگین گیری شد. ویژگی‌های خاک سطحی شامل بافت، درصد شن - رس - سیلت، چگالی ظاهری و بافت خاک سطحی از نقشه‌های پایگاه OpenLandMap در سامانه GEE استخراج شد. لایه شوری خاک نیز به صورت شاخص‌های مختلف سنجش از دور (شاخص‌های شوری S3 و SI3) و از روی تصاویر لندست هشت به دست آمد (Kumar and Allbed, 2013). تبخیر و تعرق واقعی نیز از پایگاه داده FAO و با کد نویسی در سامانه GEE و مطابق بازه زمانی مطالعاتی فرونشست استخراج و استفاده شد. دمای سطح زمین (با استفاده از الگوریتم جسم سیاه) نیز از تصاویر لندست منطقه و با استفاده از نرم‌افزار Terrset2020 استخراج شد (شکل ۲).

جدول ۱: داده‌های مورد استفاده در بررسی تبیین فرونشست دشت میناب با داده‌های سطح زمین و خاک

	Dataset	Pixel size (m)	Temporal resolution	Source	Time series / Date
inputs	Sentinel_1 SLC	5*20	6 or 12 days	ESA	2015-2019
	NDVI	30*30	Monthly	Landsat_OLI	2015-2019
	S ₃ & SI ₃	30*30	Monthly	Landsat_OLI	2015-2019
	LST(C)	100	Monthly	Landsat-OLI	2015-2019
	Soil properties (Sand, Silt & Clay %)	250	Annual	Open Land Map	2018
	Land cover	10	Annual	Iran-wide land cover map	2017-2018
	Soil texture class	250	Annual	Open Land Map	2018
	Soil bulk density (kg/m ³)	250	Annual	Open Land Map	2018
	actual evapotranspiration (mm)	200-250	Annual	FAO	2015-2019
target	GPS-Subsidence (cm)	14.58	Monthly	Sentinel_1 (SLC)	2015-2019



شکل ۳: متغیرها به ترتیب از بالا سمت چپ شامل درصد رس، پوشش اراضی، دمای سطح زمین، وزن ظاهری خاک، درصد شن، درصد سیلت، رطوبت

خاک، شاخص پوشش گیاهی، بافت خاک (طبقه‌بندی USDA) و شاخص‌های شوری S₃ و SI₃

در ادامه برای یادگیری ماشینی و ارتباط بین میزان فرونشست (متغیر وابسته) و متغیرهای خاک - مشخصات سطح زمین (متغیرهای مستقل)، از سه روش داده کاوی بیز ساده، k -نزدیک‌ترین همسایه و درخت تصمیم استفاده شد. برای تهیه نقشه پتانسیل خطر، فرونشست‌های احتمالی نقشه حاصل از پردازش رادار به عنوان نقشه پایه و متغیر خروجی مدل - ها قرار گرفت (Hakim et al, 2020). مقادیر این نقشه به صورت پیوسته است. متغیرهای ورودی استخراج شده در هر نقطه از منطقه، در کنار مقدار فرونشست حاصل از رادار در یک ساختار دوبعدی به نرم افزار داده کاوی وارد شد. از هفتاد درصد این داده‌ها برای آموزش مدل‌ها و از سی درصد باقی مانده نیز برای آزمایش و صحت‌سنجی استفاده شد.

روش‌های داده کاوی

الگوریتم دسته‌بند بیز ساده^۱، یکی از طبقه‌بندهای ساده بر پایه تئوری بیزی با شیوه یادگیری از نوع نظارت شده است. این تکنیک جزء طبقه‌بندهای بر مبنای احتمال^۲ است و به کمک حداکثرسازی تابع درست‌نمایی^۳، برآوردهای پارامترهای مدل میسر می‌شود. یکی از مزایای دسته‌بند بیز ساده، امکان برآورد پارامترهای مدل با استفاده از اندازه نمونه کوچک به عنوان داده‌های آموزشی است (Jyothi and Bhargavi, 2009). بیز ساده، مدلی بر مبنای احتمال شرطی است. اگر برای نشان دادن احتمال اولیه فرضیه h احتمال، قبل از مشاهده داده‌های آموزشی از $p(h)$ استفاده شود، به $P(h)$ احتمال اولیه^۴ می‌گویند. به طور مشابه از $P(D)$ برای نمایش احتمال اولیه مشاهده نمونه‌های آموزشی D استفاده می‌شود. برای نشان دادن احتمال مشاهده D در جایی که فرضیه h درست است، از $P(D|h)$ استفاده می‌شود. به $P(h|D)$ احتمال ثانویه^۵ h نیز می‌گویند (اطمینان به فرضیه h بعد از مشاهده نمونه آموزشی D). قضیه بیز اساس روش‌های یادگیری بیز است؛ زیرا راهی برای محاسبه احتمال ثانویه $P(h|D)$ از $p(h)$ ، $P(D)$ و $P(D|h)$ است.

$$P(h|D) = \frac{P(D|h)P(h)}{P(D)} \quad \text{رابطه ۱}$$

در بسیاری از مسائل یادگیری، یادگیرنده مجموعه فرضیه‌هایی مثل H را در نظر می‌گیرد و در بین آنها به دنبال محتمل‌ترین فرضیه $h \in H$ با توجه به نمونه‌های آموزشی D می‌شود. $P(D|h)$ محتمل بودن داده‌های D برای h نامیده می‌شود و هر فرضیه‌ای که $P(D|h)$ را ماکزیمم کند، h_{ML} یا حداکثر درست‌نمایی^۶ نامیده می‌شود (Godarzi and Jannatbabaei, 1395).

$$h_{ML} \equiv \arg \max_{h \in H} P(D|h) \quad \text{رابطه ۲}$$

¹ Naive Bayes Classifiers

² Probabilistic Classifiers

³ Likelihood maximization

⁴ Prior Probability

⁵ Posterior Probability

⁶ Maximum Likelihood

درخت تصمیم، یک ابزار پیش‌بینی و نمایشی نموداری از نتایج ممکن با استفاده از مشاهدات است. پیش‌بینی‌ها به وسیله برگ‌ها و شاخه‌ها به ویژگی‌های مورد بررسی وصل می‌شود. درواقع، یک مجموعه از گره‌های تصمیم با شاخه‌ها به هم متصل می‌شوند، از ریشه گره گسترش پیدا می‌کنند و تا برگ و گره‌های نهایی ادامه می‌یابند. این الگوریتم، حالت باینری را برای انشاق‌ها در نظر می‌گیرد. برای هر گره دو شاخه وجود دارد. درخت تصمیم حاصل از این الگوریتم، برای هر تصمیم یک کاوش کامل از تمام متغیرهای موجود و انشعاب مقادیر فراهم و براساس معیار زیر با خرد کردن‌های بهینه، انتخاب می‌شود. اگر $\phi(s|t)$ معیار مناسب این خرد کردن برای متغیر s در گره t باشد:

$$\phi(s|t) \equiv 2P_L P_R \sum_{j=1}^{\#class} |P(j|t_L) - P(j|t_R)| \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه t_L شاخه چپ گره t ، t_R شاخه راست گره t ، P_L از نسبت تعداد مشاهدات در t_L به کل تعداد مشاهدات در داده‌های آموزشی، P_R از نسبت تعداد مشاهدات در t_R به کل تعداد مشاهدات در داده‌های آموزشی، $P(j|t_L)$ نیز از نسبت تعداد رده j در t_L به تعداد مشاهده در گره t و $P(j|t_R)$ از نسبت تعداد رده j در t_R به تعداد مشاهده در گره t است. نقطه بهینه زمانی به دست می‌آید که معیار فوق برای تمام حالت‌های ممکن خرد کردن در گره مشخص، حداکثر شود (Godarzi and Jannatbabeai, 2016).

الگوریتم k -نزدیک‌ترین همسایه (kNN)^۱ در حالت کلی برای تخمین تابع چگالی توزیع داده‌های آموزشی و برای طبقه‌بندی داده‌های تست براساس الگوهای آموزشی است (Poursalehi et al, 2019). هدف کلی این روش داده‌کاوی، طبقه‌بندی و تخمین ویژگی‌های یک سری داده‌های مجهول با توجه به بیشترین شباهت این داده‌ها با داده‌های معلوم است (Ghannadpour et al, 2016). در این روش یک نمونه با رأی اکثریت از همسایه‌های دسته‌بندی می‌شود و این کار براساس نزدیک‌ترین خصوصیات سایر اعضای موجود در مجموعه (نمونه‌های آموزش‌دهنده) صورت می‌گیرد (Zolfaghari et al, 1392). در این تکنیک (شبیه‌ترین ویژگی‌ها به نمونه هدف)، K یک مقدار مثبت صحیح و عموماً کوچک است. اگر k برابر یک باشد، نمونه به سادگی در کلاس همسایگان نزدیکش تعیین می‌شود. فرد بودن مقدار k مفید است و با این کار، آراء برابر تکرار نمی‌شود. در این مدل، داده‌های هدف مورد جستجو با توجه به نزدیک‌ترین فاصله نسبت به داده‌های آموزشی (بانک داده مرجع) طبقه‌بندی می‌شود که در آن برای یافتن رابطه بین داده‌های مورد آزمایش و داده‌های آموزشی، معمولاً از فاصله اقلیدسی مطابق با رابطه زیر استفاده می‌شود:

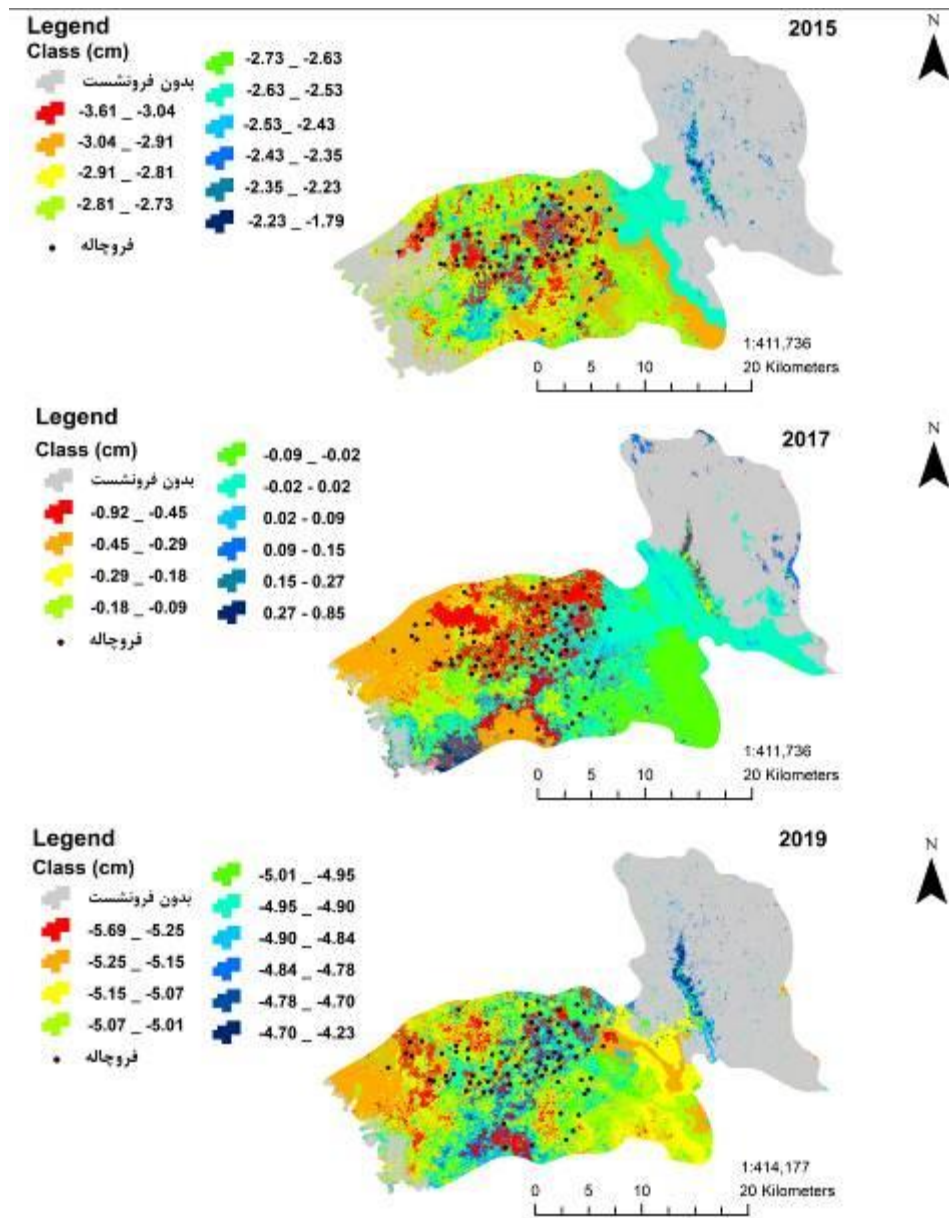
$$d(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه بالا X نماینده داده‌های تعلیم با پارامترهای مشخص (x_1 تا x_n) و Y نماینده داده‌های آموزش با همان تعداد پارامترهای مشخص (y_1 تا y_n) است. پس از تعیین فاصله اقلیدسی بین داده‌ها، نمونه‌های بانک داده به ترتیب صعودی از کمترین فاصله (حداکثر تشابه) به بیشترین فاصله (کمترین تشابه) از نمونه مورد نظر ارزش‌گذاری و طبقه‌بندی می‌شود. قدم بعد در این مدل، یافتن تعداد نقاط (K) از داده‌های آزمایش برای تخمین ویژگی‌های بانک داده مورد نظر است (Poursalehi et al, 2019).

¹ k-Nearest Neighbors

۴- یافته‌ها (نتایج)

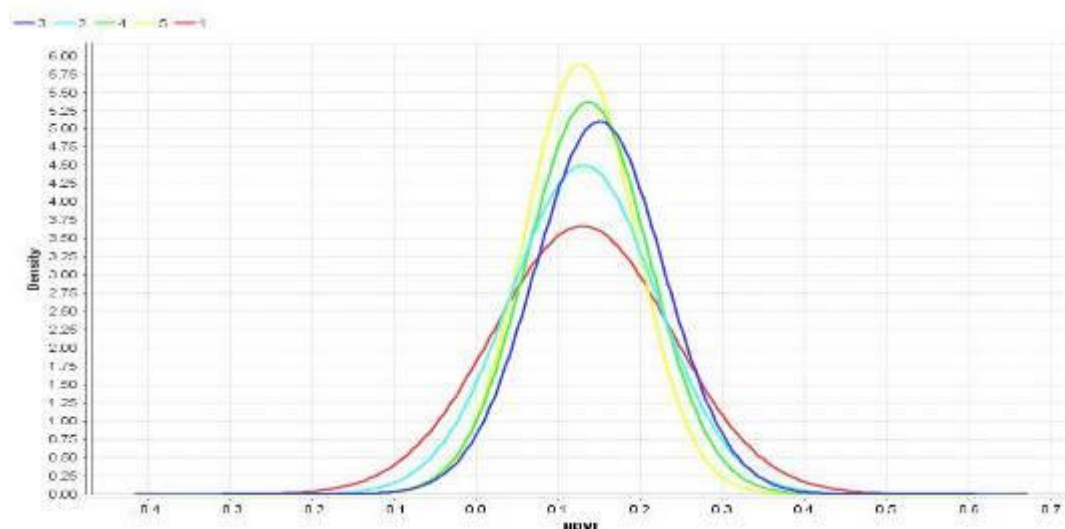
در این تحقیق ابتدا به تعیین میزان فرونشست دشت میناب در مقیاس ماهانه در بازه زمانی سال‌های مختلف پرداخته شد. در این فرایند بعد از وارد شدن فازهای باز شده در نرم‌افزار SNAP، اختلاف فاز به جابه‌جایی عمودی در سیستم متریک تبدیل و در نهایت، نقشه نهایی (شکل ۱۳) تهیه شد. ذکر این امر لازم است که موقعیت فروچاله‌های حاصل از بازدیدهای میدانی، بر روی نقشه‌های نهایی سال‌های مختلف ذکر شده است.



شکل ۴: نقشه فرونشست دشت میناب و موقعیت فروچاله‌های روی آن برای سال‌های مختلف

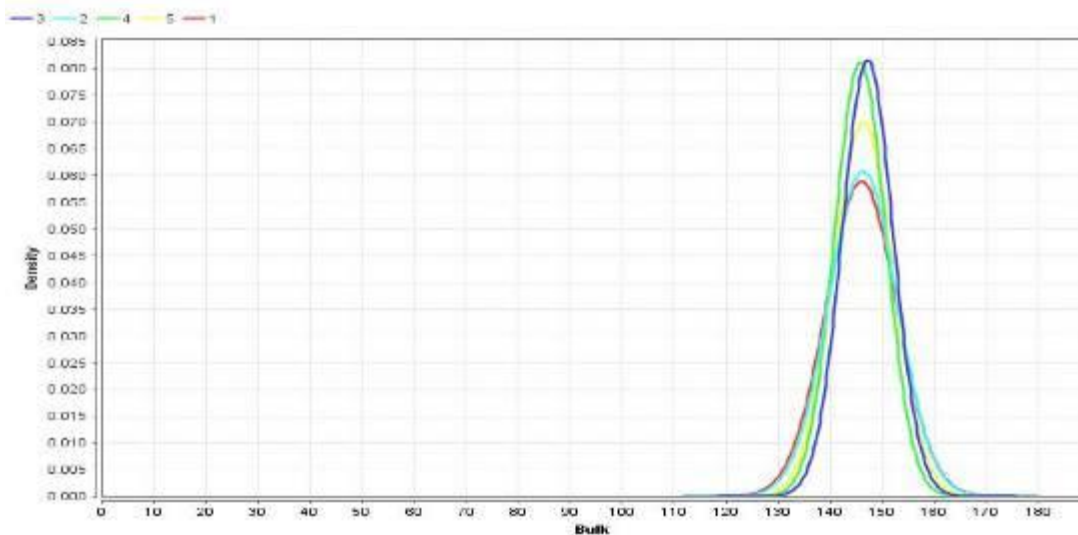
همان گونه که در شکل بالا مشاهده می‌شود، در سال ۲۰۱۵ بیشتر فرونشست‌های بحرانی در قسمت مرکزی دشت صورت گرفت و میزان این فرونشست‌ها ۳/۶۱ سانتی‌متر برآورد شد. در سال ۲۰۱۷، تغییرات مکانی فرونشست‌های بحرانی به سمت قسمت‌های شمالی و لبه دشت بود و میزان این فرونشست ۰/۹۲ سانتی‌متر در مقیاس ماهانه برآورد شد.

در سال ۲۰۱۹، این تغییرات مکانی به سمت غرب و جنوب غربی بود و ساحل پیش‌روی داشت. میزان فرونشست در بازه زمانی مطالعاتی نیز به بیشترین حد خود رسید؛ یعنی ۵/۶۹ سانتی‌متر در مقیاس ماهانه. آنچه نتایج تحقیق نشان داد، پیش‌روی فرونشست‌ها از قسمت‌های مرکزی دشت به سمت لبه‌های دشت بود و نواحی شرقی دشت نیز فرونشست کمتری نسبت به نواحی دیگر داشت. همان گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، موقعیت هر کدام از فروچاله‌های حاصل از بازدیدهای میدانی در این شکل ذکر شده است. برای سال ۲۰۱۵ از هشتاد فروچاله، تعداد ۶۱ نقطه و در سال ۲۰۱۷، تعداد ۵۸ نقطه روی نقشه فرونشست ترسیمی صحیح برآورد شد. برای سال ۲۰۱۹ نیز از هشتاد فروچاله، تعداد ۴۸ نقطه روی نقشه فرونشست ترسیمی صحیح برآورد شد. RMSE نقشه‌های ترسیمی برای سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ به ترتیب ۲/۴۵، ۳/۵۷ و ۴/۴۷ برآورد شد. مقادیر یاد شده همگی کمتر از حد واسط مقدار RMSE یعنی مقدار ۴/۴۷ بود و همه نقشه‌های فرونشست، بیش از ۶۰٪ نقاط فروچاله را صحیح برآورد کرده بود. در تحقیق حاضر برای بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک و مشخصات سطح زمین، از تکنیک شبکه بیزی ساده استفاده شد. در این خصوص، میزان فرونشست به پنج طبقه تقسیم و با متغیرهای مستقلی که پیش از این ذکر شده بود (رطوبت خاک، دمای سطح زمین، پوشش اراضی، پوشش گیاهی و ...)، بررسی شد؛ بدین صورت که ابتدا تأثیر پوشش گیاهی دشت میناب بر طبقات مختلف فرونشست بررسی شد (شکل ۵). همان گونه که در این نمودار ملاحظه می‌شود، طبقه بحرانی فرونشست (طبقه یک به رنگ قرمز)، کمترین میزان پوشش گیاهی را نشان می‌دهد و در طبقه پنج که کمترین میزان فرونشست را نشان می‌دهد (طبقه پنج به رنگ زرد)، بیشترین مقدار پوشش گیاهی دیده می‌شود.



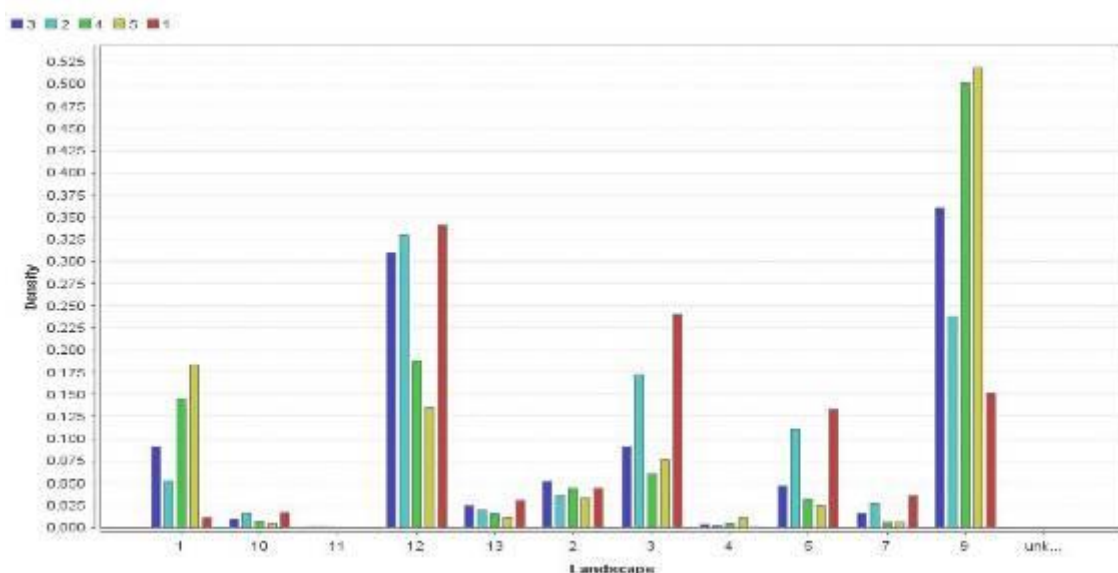
شکل ۵: بررسی تأثیر میزان پوشش گیاهی بر طبقات مختلف فرونشست دشت میناب

در شکل ۶، تأثیر وزن ظاهری خاک بر طبقات مختلف فرونشست نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین میزان فرونشست (طبقه یک و به رنگ قرمز)، کمترین وزن ظاهری خاک را دارد و بقیه طبقات فرونشست، مقدار وزن ظاهری خاک آنها بیشتر است.



شکل ۶: بررسی تأثیر میزان وزن ظاهری خاک بر طبقات مختلف فرونشست دشت میناب

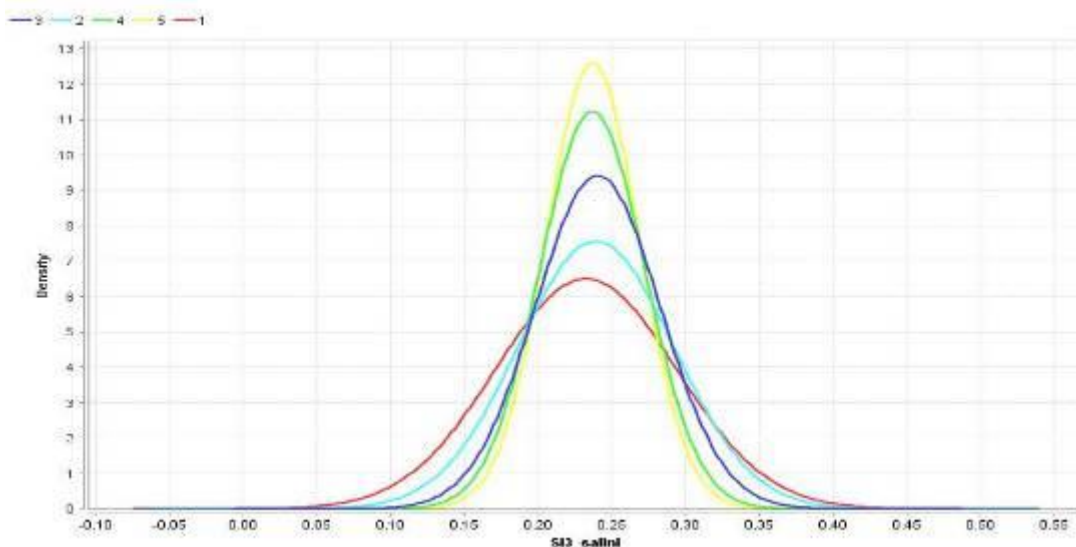
در شکل ۷، تأثیر پوشش اراضی بر میزان فرونشست در دشت میناب نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، طبقه بحرانی میزان فرونشست (طبقه یک و به رنگ قرمز) بیشتر روی اراضی کشاورزی (کد ۱۲) دیده می‌شود. در مناطقی که کلوت (یاردانگ) و ماسه‌زارها (شکل ۷) در دشت میناب وجود دارد، کمترین میزان فرونشست دیده می‌شود. یادآوری این امر لازم است که فرونشست، پدیده‌ای ثانویه ناشی از فعالیت‌های ناپایدار انسانی است و در مناطقی که فعالیت‌های انسانی به دلیل محدودیت‌های محیطی آن چنان توسعه نیافته است، این پدیده نیز کمتر دیده می‌شود.



شکل ۷: بررسی تأثیر پوشش اراضی بر طبقات مختلف فرونشست دشت میناب

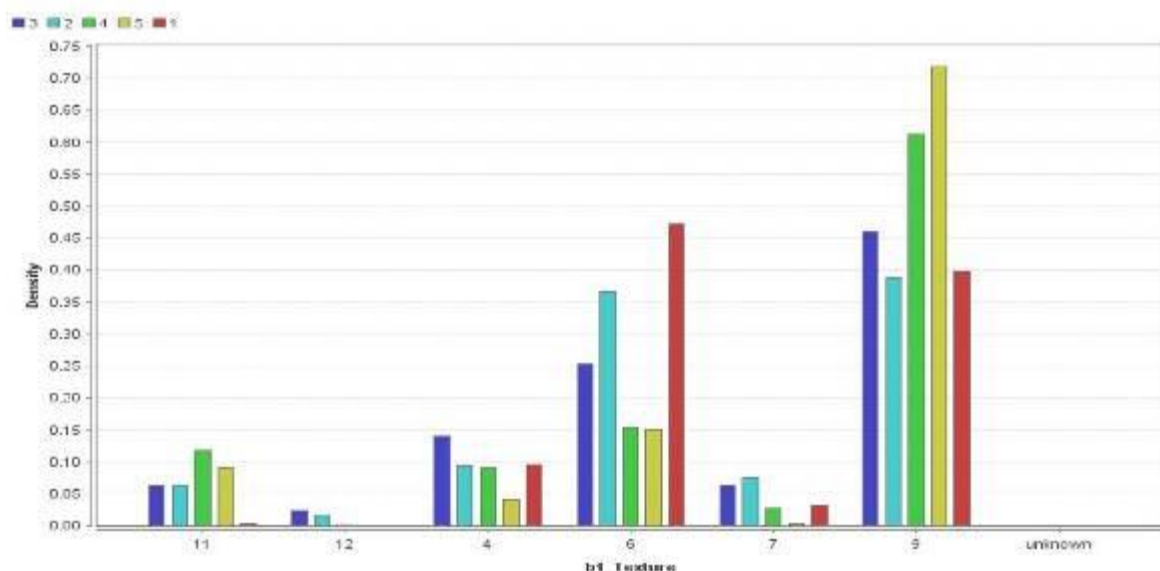
شکل ۸، به بررسی اثر شاخص شوری خاک (SI_3) بر طبقات مختلف فرونشست می‌پردازد. طبقه بحرانی فرونشست (طبقه یک به رنگ قرمز)، کمترین میزان شوری خاک و طبقه پنجم فرونشست (رنگ زرد)، بیشترین میزان شوری

خاک را به خود اختصاص می‌دهد. شوری خاک هر چه بیشتر باشد، پخش شدن ذرات خاک و تخریب ساختمان آن بیشتر می‌شود و در نتیجه، احتمال فرونشست و ریزش بالاتر می‌رود.



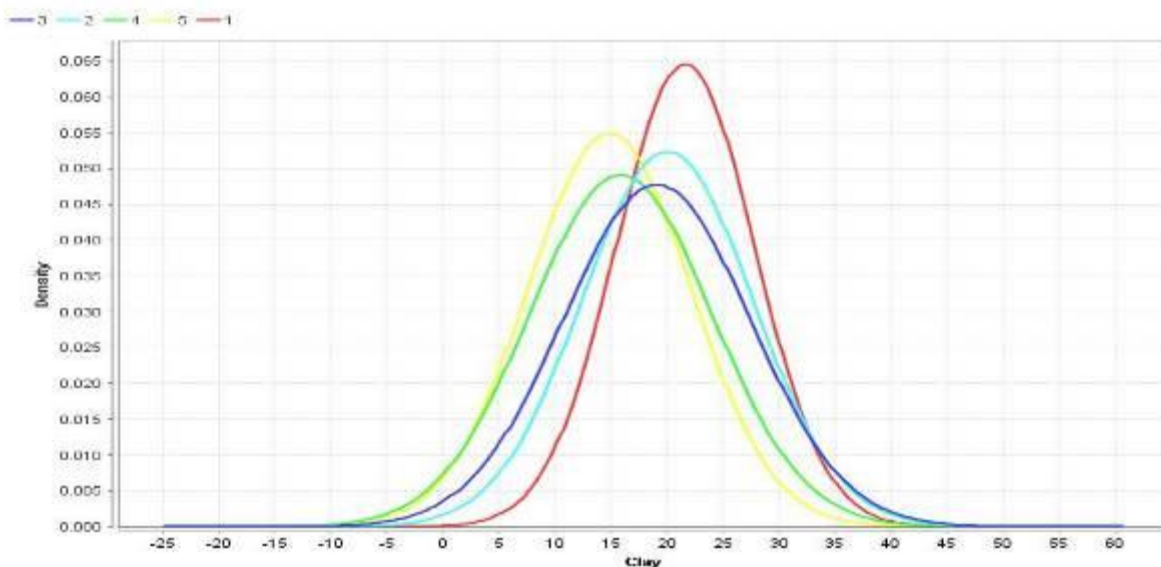
شکل ۸: بررسی تأثیر میزان شاخص شوری خاک (SI₃) بر طبقات مختلف فرونشست دشت میناب

در شکل ۹، اثر بافت خاک بر طبقات مختلف فرونشست نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین میزان فرونشست روی خاک‌هایی با بافت SaClLo (لومی رسی شنی) می‌باشد که در این بافت، میزان شن و رس زیاد است.

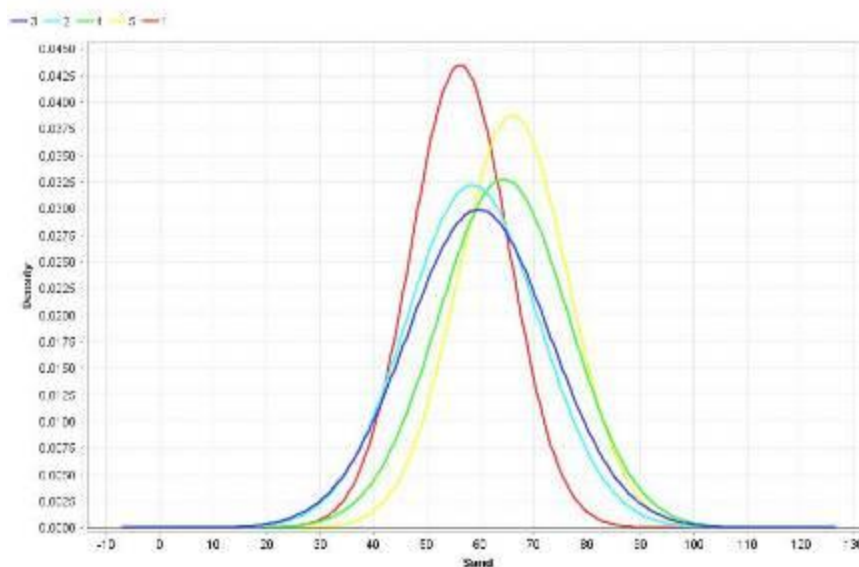


شکل ۹: بررسی تأثیر نوع بافت خاک سطحی بر طبقات مختلف فرونشست دشت میناب

همچنین بررسی میزان رس و شن بر طبقات مختلف فرونشست دشت میناب نشان داد که طبقات یک (بیشترین میزان فرونشست) نسبت به دیگر طبقات، دارای بیشترین مقادیر رس و شن فرونشست است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). این مطلب، تأییدی بر نتیجه مربوط به اثر بافت خاک بر طبقات مختلف فرونشست می‌باشد (شکل ۹).

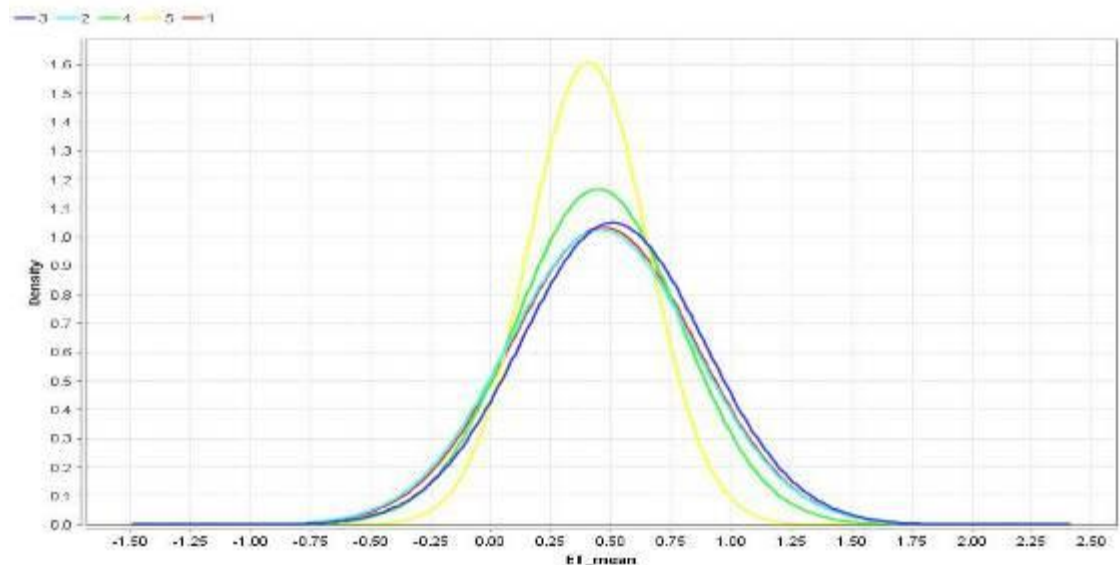


شکل ۱۰: بررسی تأثیر درصد رس خاک سطحی بر طبقات مختلف فرونشست دشت میناب



شکل ۱۱: بررسی تأثیر درصد شن خاک سطحی بر طبقات مختلف فرونشست دشت میناب

بررسی تبخیر و تعرق از سطح خاک با طبقات مختلف فرونشست در دشت میناب نشان داد که بیشترین میزان فرونشست (طبقه یک و به رنگ قرمز)، در کمترین میزان تبخیر و تعرق از سطح خاک رخ داده‌است و دیگر طبقات فرونشست و به خصوص طبقه پنجم (با رنگ زرد)، بیشترین میزان تبخیر و تعرق از سطح خاک را نشان می‌دهد. شکل ۱۲، این امر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: بررسی تأثیر تبخیر و تعرق سطح خاک بر طبقات مختلف فرونشست دشت میناب

جدول ۲: نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل‌ساز

نام شاخص	مدل درخت تصمیم	مدل بیزی ساده	مدل نزدیک‌ترین همسایه	مدل جنگل تصادفی
دقت مدل	۶۳/۱۵	۴۳/۶۷	۵۶/۶۳	۵۲/۱۴
خطای طبقه‌بندی	۳۶/۸۵	۵۶/۳۳	۴۳/۴۷	۴۷/۸۶
کاپا	۲۹/۷	۲۱/۶	۳۰/۲	۰/۰۳
خطای مطلق	۰/۵	۰/۵۷	۰/۴۳	۰/۵۸
خطای نسبی	۰/۵	۰/۵۶	۰/۴۳	۰/۵۸
خطای مطلق نرمال‌شده	۰/۴۵	۰/۵۱	۰/۳۹	۰/۵۲
مجموع مربعات باقیمانده خطا	۰/۵۶	۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۶۰

در مورد ارزیابی مدل‌سازها از شاخص‌های صحت‌سنجی^۱، خطای طبقه‌بندی^۲، ضریب کاپا^۳، خطای مطلق^۴، خطای مطلق نرمال‌شده^۵، خطای نسبی^۶ و مجموع مربعات باقیمانده خطا^۷ استفاده شد. همان‌گونه که جدول ۲ نشان می‌دهد بهترین مدل‌ساز، تکنیک درخت تصمیم است. این مدل در مقایسه با دیگر مدل‌ها توانسته است نتایج قابل قبول‌تری در مورد پیش‌بینی پهنه‌های فرونشست دشت میناب با توجه به ویژگی‌های خاک و سطح زمین کسب کند. پس از ارزیابی مدل‌سازها، نوبت به اعتبارسنجی^۸ عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی پهنه‌های مختلف فرونشست می‌رسد. جدول زیر نتایج این اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

^۱ accuracy

^۲ classification error

^۳ kappa

^۴ absolute error

^۵ Normalized absolute error

^۶ Relative error

^۷ Root mean squared error

^۸ Validation

جدول ۳: نتایج اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی کننده پهنه‌های مختلف فرونشست

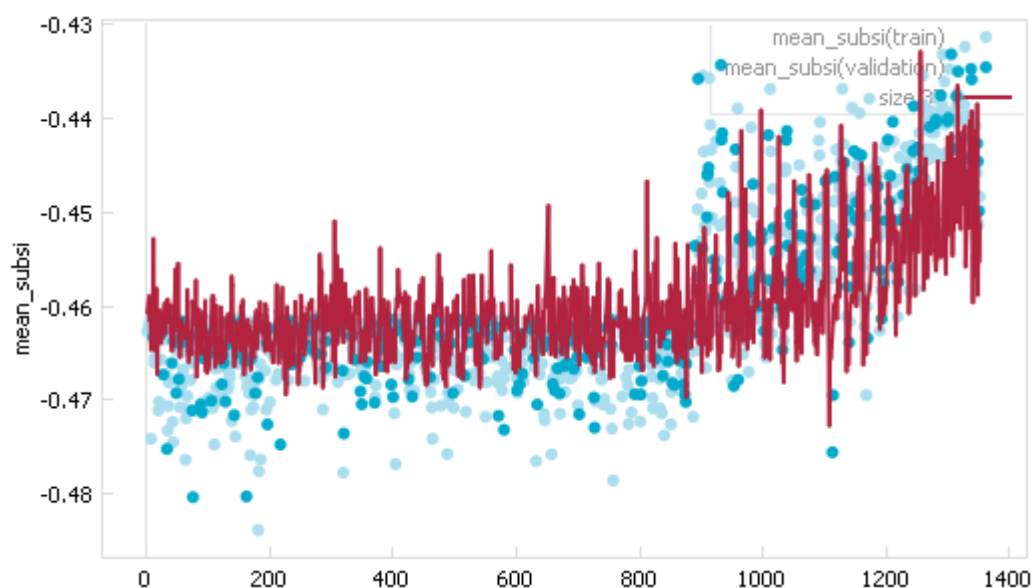
مدل جنگل تصادفی	مدل نزدیک‌ترین همسایه	مدل بیزی ساده	مدل درخت تصمیم	نام شاخص
۵۶.۶۹±۴.۱۱	۵۴.۶۶±۱.۶۴	۴۴.۳۰±۱.۷۳	۶۵.۳۲±۰.۹۴	صحت مدل (درصد)

همان گونه که جدول بالا نشان داده شده است، مدل درخت تصمیم بیشترین امتیاز اعتبارسنجی را با مقدار ۶۵/۳۲٪ نسبت به بقیه مدل‌ها کسب کرد و سایر مدل‌ها در خصوص پیش‌بینی پهنه‌های مختلف فرونشست دشت میناب، نتایج قابل قبولی داشت که شکل زیر نتایج این پیش‌بینی را نشان می‌دهد. همان گونه که این شکل نشان می‌دهد، پهنه‌های فرونشست از قسمت‌های مرکزی دشت به سمت غرب، شمال و جنوب غربی دشت در حال گسترش و پراکنده شدن است. علاوه بر نتایج بالا، خروجی نرم‌افزار یورکا نیز نشان داد که بهترین رابطه، با برازش ۰/۸ و خطای مطلق ۰/۵۷ به صورت رابطه ۵ است:

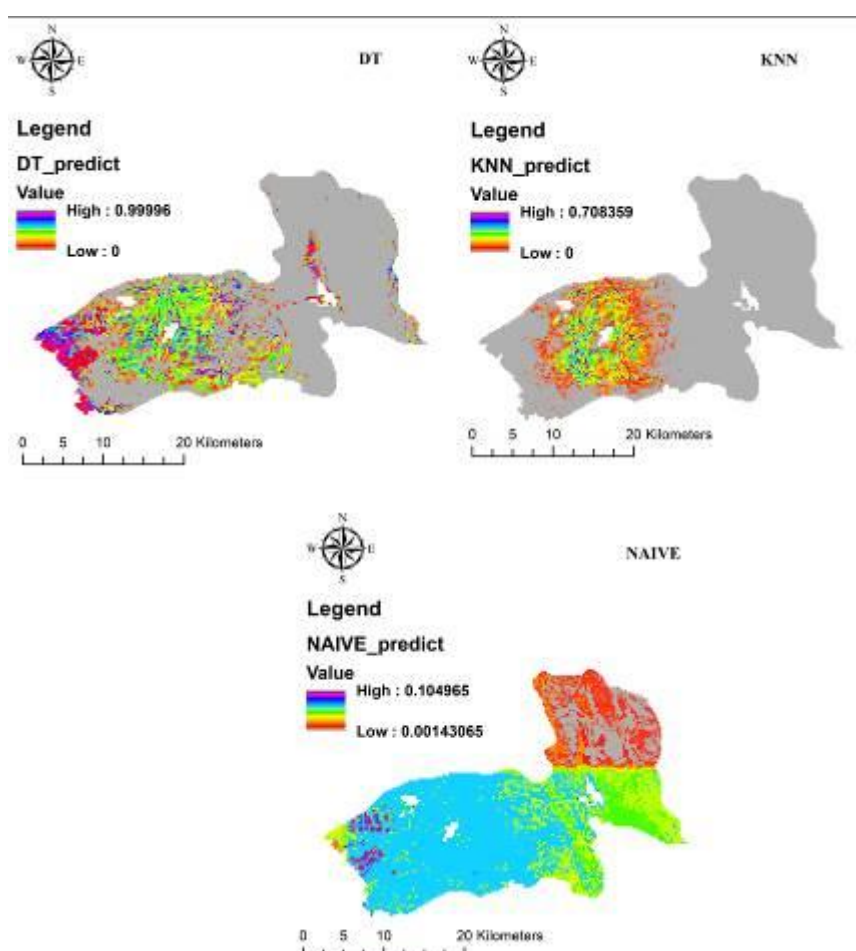
رابطه ۵

$$\text{mean_subsi} = 0.074459271844957 * \text{ET_Actual} + 0.000750614862156282 * \text{LST} + 0.000872533605992855 * \text{ET_Actual}^2 + 7.29054635293302e-5 * \text{Clay}^2 - 0.475796089288522 - 0.000131691269956043 * \text{Landscape} - 0.00268399743798191 * \text{Clay} - 0.00249341552520876 * \text{ET_Actual} * \text{Clay}$$

در این رابطه، میانگین فرونشست (به اختصار mean_subsi) از بین تمام ویژگی‌ها با تبخیر و تعرق واقعی (به اختصار ET_Actual) از سطح خاک، دمای سطح خاک (LST)، درصد رس خاک (Clay) و پوشش اراضی (Landscape) بهترین رابطه را داشت. در شکل زیر، روند مدل‌سازی بین مقادیر آموزشی و تست مشاهده می‌شود. ذکر این امر لازم است که تمامی داده‌های ورودی به نرم‌افزار یورکا برای مدل‌سازی، نرمال‌سازی و حذف داده‌های پرت بر روی آنها انجام شده است. در شکل، روند شبیه‌سازی با توجه به تعداد سلول‌های متغیرهای مستقل بر روی تصویر میانگین فرونشست مشاهده می‌شود. در این راستا، از ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش و از ۳۰٪ آنها به شکل تصادفی برای صحت‌سنجی استفاده شد. ذکر این امر لازم است که تعداد نمونه‌ها روی متغیر وابسته (میانگین فرونشست)، از تبدیل هر پیکسل سائز متغیرهای مستقل به نقشه نقطه‌ای در ArcGIS تحقق یافت.



شکل ۱۳: روند شبیه‌سازی داده‌های آموزشی و صحت‌سنجی برای بهترین رابطه بین متغیرهای مستقل و میانگین فرونشست



شکل ۱۴: نتایج پهنه‌بندی فرونشست دشت میناب حاصل از مدل‌های درخت تصمیم، نزدیک‌ترین همسایه، جنگل تصادفی و شبکه بیزی ساده

در جدول ۴، آنالیز حساسیت ویژگی‌های مهم در رابطه ۵ ذکر شده‌است.

جدول ۴: نتایج آنالیز حساسیت مهم‌ترین متغیرها در بهترین رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته

متغیر یا ویژگی	حساسیت	بزرگی منفی ^۱	درصد منفی	بزرگی مثبت ^۲	درصد مثبت
تبخیر و تعرق واقعی	۱/۲۴	۰/۱۹	۵٪	۱/۲۹	۹۵٪
درصد رس	۱/۰۴	۱/۱۷	۸۴٪	۰/۳۸	۱۶٪
پوشش اراضی	۰/۰۹	۰/۰۹۴	۱۰۰٪	۰	۰٪
دمای سطح زمین	۰/۴۵	۰	۰٪	۰/۴۵	۱۰۰٪

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر پس از محاسبه فرونشست دشت میناب طی دوره ۲۰۱۵-۲۰۱۹ با تصاویر رادار، سعی شد روابط پنهان و ناشناخته بین میانگین فرونشست و متغیرهای خاک - مشخصات سطح زمین، برای پیش‌بینی پهنه‌بندی مناطق جدید فرونشست بدون استفاده از داده‌های آب زیرزمینی و صرفاً با ویژگی‌های خاک و سطح زمین انجام شود. در همین ارتباط، برای مدل‌سازی مکانی از الگوریتم‌های داده‌کاوی بیز ساده (NB)، درخت تصمیم (DT) و k-نزدیک‌ترین همسایه (kNN) در نرم‌افزار RapidMiner و Eureqa Formulize برای یافتن بهترین رابطه بین این ویژگی‌ها با میزان فرونشست استفاده شد. ویژگی‌ها (متغیرهای مستقل) از سامانه گوگل ارت‌انجین (GEE) استخراج شد.

در مطالعه میزان فرونشست با استفاده از تداخل‌سنجی، استفاده از تنها یک زوج تصویر ابتدا و انتهای بازه مطالعاتی مناسب نبود؛ بنابراین، در این تحقیق سری زمانی دوازده زوج تصویر بررسی شد. نتایج پردازش‌های تداخل‌سنجی نشان داد که پیشروی فرونشست‌ها از قسمت‌های مرکزی دشت به سمت لبه‌های آن است و نواحی شرقی دشت میناب، فرونشست کمتری نسبت به نواحی دیگر دارد. همپوشانی نقاط فروچاله ثبت شده در بازدهی‌های میدانی و پیمایشی نیز با نتایج تحلیل تصاویر انطباق خوبی نشان داد. بیشترین میزان فرونشست در سال ۲۰۱۹ به میزان ۵/۶۹ سانتی‌متر رخ داد. این امر بیانگر اثرگذاری شدید این خطر بر کشاورزی، محیط زیست و تأسیسات است.

گام دیگر این پژوهش، بررسی ارتباط فرونشست با متغیرهای ورودی در مدل‌سازی توان فرونشست آینده دشت میناب شامل شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، پوشش اراضی، دمای سطح زمین، تبخیر و تعرق واقعی و ویژگی‌های خاک سطحی (بافت، شوری، مقدار رس و شن) است. نقشه‌های پتانسیل رخداد فرونشست دشت میناب نشان داد که این خطر در نواحی دارای کلوت و ماسه‌زارها کمتر بوده‌است؛ این در حالی است که فرونشست‌های دشت میناب، بیشتر بر روی کاربری کشاورزی و در مناطق دارای پوشش گیاهی کم رخ داده است که با مطالعه Arab Ameri و همکاران (۲۰۱۹) و بسیاری از پژوهش‌های گذشته همخوانی دارد. نتایج تداخل‌سنجی رادار در دشت مهیار نشان داد که بیشترین میزان فرونشست در مناطق تحت کشت و در نتیجه برداشت بیش از حد آب و فرونشست سطح مخازن آب‌های زیرزمینی رخ داده‌است (Arab Ameri et al, 2019). مهم‌ترین علت فرونشست منطقه‌ای سطح زمین در مناطق خشک و

¹ Negative Magnitude

² Positive Magnitude

نیمه‌خشک، تراکم مخازن آب زیرزمینی در اثر استخراج بی‌رویه از این منابع است (Sharifikia, 2012 & Abdollahi et al, 2019).

این وضعیت به ویژه در جایی که از مخازن آبدار ماسه‌ای متخلخل - که به صورت بین لایه‌ای با لایه‌های آبدار رسی نفوذناپذیر قرار دارد - پمپاژ بی‌رویه صورت می‌گیرد، بسیار حاد است و به فرونشست گسترده منجر می‌شود (Ebrahimi et al, 2020). بررسی چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه نشان داد که از تاریخ ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۳، سطح آب زیرزمینی به ارتفاع دو متر کاهش یافته که در پدیده فرونشست دشت تأثیرگذار بوده است (Jamour et al, 2019). همچنین در نواحی با پوشش گیاهی ضعیف در دشت، نفوذ آب به خاک کمتر بود و این خود می‌تواند استعداد این مناطق را برای فرونشست بیشتر نشان دهد (Abdollahi et al, 2019). همچنین باید توجه کرد که Shafiei و همکاران (2020)، میزان همبستگی میان دو پارامتر میزان افت آب زیرزمینی و میزان فرونشست را در آبخوان دشت نورآباد فارس همبستگی گرفتند که ضریب همبستگی R^2 برابر با ۷۲٪ بود. همچنین سازندها و خاک سطحی نفوذپذیر روی سازندهای آبرفتی که نفوذپذیری خوبی دارند، زمینه‌سازترین عامل فرونشست روی زمین‌های منطقه مطالعاتی است. همان گونه که از نتایج تحقیق یاد شده برمی‌آید با وجود رابطه مستقیم و تبیین قابل قبول ضریب همبستگی میان دو پارامتر قید شده، چیزی در حدود ۳۰٪ فقدان تبیین دیده می‌شود و می‌توان این سهم را بر دیگر پارامترها و عوامل نسبت داد. همچنین خاک‌ها و سازندهای آبرفتی نفوذپذیر (علاوه بر عامل ماشه‌ای افت آب زیرزمینی) را نیز از عوامل زمینه‌ای بروز پدیده فرونشست دانست.

از طرف دیگر، Mehrabi (2019) در تحقیقی برای بررسی جابه‌جایی توده‌های نمکی با روش‌های تداخل‌سنجی (منطقه شاه‌غیب لارستان) اعلام کردند که بین میزان جابه‌جایی و دمای متوسط ارتباط مستقیمی وجود دارد؛ به طوری که با افزایش دما، میزان بالاآمدگی سطح نمک افزایش و میزان فرونشست کاهش می‌یابد. بنابراین، می‌توان تا حدودی تغییرات ثانویه نمک بعد از رخنمون یافتن گنبد نمکی بر روی زمین را متأثر از شرایط آب و هوایی به ویژه دما دانست. همان گونه که مشاهده می‌شود، متغیرهای دیگری نیز بر پدیده جابه‌جایی و تحرکات زمین مؤثر است و صرفاً نمی‌توان به قطعیت، تنها یک عامل را با وجود ماشه‌ای بودن بر شدت و عمق رخداد دخیل دانست. در پدیده فرونشست نیز علاوه بر میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی به‌عنوان عامل ماشه‌ای و تغییرات سطح سفره، عوامل سطحی دیگری نظیر دمای سطح خاک، درصد رس خاک، پوشش زمین و ... نیز بر میزان آن مؤثر خواهند بود. در ضمن Mohammakhani (2019) با بررسی فرونشست در دشت قروه با میزان ۲۱۶ میلی‌متر در سال، آن را بیشتر متوجه نواحی حاشیه‌ای شرق و غرب دشت دانستند. در تحقیق حاضر نیز بیشترین میزان فرونشست متوجه مناطق حاشیه‌ای دشت میناب است.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که ارتباط رخداد فرونشست میناب با نواحی دارای رس زیاد، شوری کم، کمترین وزن ظاهری خاک، تبخیر و تعرق پایین و دارای بافت لومی رسی شنی بیشتر بود. رخداد فرونشست در بخش‌های دارای میزان رس بالا را می‌توان به ریزدانه بودن و نفوذپذیری کم رس و سیلت نسبت داد (Ebrahimi et al, 2020). نواحی دارای رس زیاد و بافت سنگین، نفوذپذیری کمی داشت و از نظر تغذیه و ذخیره آب‌های زیرزمینی تأثیر چندانی نداشت (Lubis et al, 2011).

بررسی صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی نشان داد که روش درخت تصمیم بهترین مدل بود و k -نزدیک‌ترین همسایه (kNN) و بیز ساده به ترتیب نتایج ضعیف‌تری داشتند؛ البته برای بهبود نتایج این مدل می‌توان از لایه‌های دیگری با تأثیرگذاری بالا در مدل‌سازی فرونشست استفاده کرد (تحقیق حاضر در خصوص شناسایی متغیرهای کمکی برای مدل‌سازی فرونشست، جدای از تحلیل تغییرات سطح آب‌زیرزمینی بر آن پدیده تلاش داشته‌است). روش درخت تصمیم از جمله مدل‌های ناپارامتری و غیرخطی است که از نظر انتخاب تعداد و نوع شاخص‌ها محدودیتی ندارد. بنابراین، بدون در نظر گرفتن پیش‌فرضی برای توزیع متغیرهای ورودی می‌توان بیشترین متغیرهای اثرگذار بر پدیده مورد مطالعه را در مدل‌سازی مکانی دخیل کرد. عملکرد قابل قبول این روش در مطالعات مختلفی تأیید شده‌است (Ebrahimi et al, 2020). همچنین این مدل با ساختار درخت تصمیم، اطلاعات مفیدی را برای تفسیر فراهم می‌کند و در مقایسه با روش‌هایی مانند ماشین بردار پشتیبان، محاسبات ساده‌تری دارد و این سادگی و کارایی به کاربرد این روش در علوم مکانی (مطالعه سیل‌خیزی، فرسایش و پیش‌بینی رواناب) منجر می‌شود (Abdollahi et al, 2019).

به سبب تداوم شرایط مثبت مسئله نشست در دشت میناب، تداوم پایش سنجش از دوری و تعبیه ایستگاه‌های اندازه‌گیری با GPS با فراهم آوردن امکان پایش تغییرات میزان و دامنه نشست، امکان مناسبی را برای سنجش دقت یافته‌های این روش و بهینه‌سازی آن در عرصه ملی فراهم کرد. همچنین با توجه به آسیب‌های ناشی از رخداد فرونشست زمین به منابع اقتصادی، محیط زیست و انسان، استفاده از روش‌های داده‌کاوی برای مدل‌سازی مکانی و تهیه نقشه خطر کمک بزرگی در جهت پیشگیری از خطرات فرونشست به شمار می‌رود. نتایج اندازه‌گیری فرونشست و نقشه پتانسیل رخداد آن در بخش‌های مختلف، می‌تواند نقش مهمی در برنامه‌ریزی آمایش سرزمین و مدیریت منابع آب منطقه داشته باشد.

منابع

1. Abdollahi, S.; Pourghasemi, H. R.; Ghanbarian, G. A.; & R. Safaeian, 2019. Spatial Simulation and Land-subsidence Susceptibility Mapping Using Maximum Entropy Model, *Journal of Watershed Management Research*, 10(20), 133-144. (in Persian).
2. Arab Ameri, A.; rafyi, M.; Rezaei, K.; Shirani, K.; & M. Nasrin, 2019. Estimation of land subsidence rate using InSAR technique and analysis of the effective parameters in Mahyar Plain, *Watershed Engineering and Management*, 11(3), 661-675. doi: 10.22092/ijwmse.2017.110660.1307. (in Persian).
3. Arvin, A.; Vahabzadeh, G.; Mousavi, S.; & M. Bakhtyari Kia, 2019. Geospatial Modeling of Land Subsidence in the South of the Minab Watershed using Remote Sensing and GIS, *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(3), 19-34. (in Persian).
4. Allbed, A., & L. Kumar., (2013). Soil Salinity Mapping and Monitoring in Arid and Semi-Arid Regions using Remote Sensing Technology: a Review, *Advances in Remote Sensing*, 2, 373-385.
5. Bagheri, M.; Hosseini, S. M.; Ataie-Ashtiani, B.; Sohani, Y.; Ebrahimian, H.; Morovat, F.; & S. Ashrafi, 2021. Land subsidence: A global challenge, *Science of The Total Environment*, 146193.
6. Bonì, R.; Bosino, A.; Meisina, C.; Novellino, A.; Bateson, L.; & H. McCormack, 2018. A Methodology to Detect and Characterize Uplift Phenomena in Urban Areas using Sentinel-1 Data, *Remote Sensing*, 10(4), 607.

7. Ebrahimi, A.; Ghasemi, A.; & H. Ganjaeian, 2020. Monitoring the Subsidence Rate of Pakdasht Urban Area Using Radar interferometry method, *Geography and Human Relationships*, 2(4), 29-41. (in Persian).
8. Foroughnia, F.; Nemati, S.; & Y. Maghsoudi, 2018. PS-InSAR Time Series Analysis using Sentinel-1A and ENVISAT-ASAR Data Stacks for Subsidence Estimation in Tehran, *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 10(1), 57-72. (in Persian).
9. Ghorbanian, A.; Kakooei, M.; Amani, M.; Mahdavi, S.; Mohammadzadeh, A.; & M. Hasanlou, 2020. Improved land cover map of Iran using Sentinel imagery within Google Earth Engine and a novel automatic workflow for land cover classification using migrated training samples, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 167, 276-288.
10. Gutiérrez, F.; Benito-Calvo, A.; Carbonel, D.; Desir, G.; Sevil, J.; Guerrero, J.; ... & I. Fabregat, 2019. Review on Sinkhole Monitoring and Performance of Remediation Measures by High-precision Leveling and Terrestrial Laser Scanner in the Salt Karst of the Ebro Valley, Spain, *Engineering Geology*, 248, 283-308.
11. Hakim, W. L.; Achmad, A. R.; Eom, J.; & C. W. Lee, 2020. Land Subsidence Measurement of Jakarta Coastal Area using Time Series Interferometry with Sentinel-1 SAR Data, *Journal of Coastal Research*, 102(SI), 75-81.
12. Jamour, R.; Eilbeigy, M.; & M. Morsali, 2019. Assessment of the Land Subsidence Crisis and the Advent of Salt Water in the Minab Plain Aquifer, *Iranian Journal of Ecohydrology*, 6(1), 223-238. doi: 10.22059/ije.2019.270938.998. (in Persian).
13. Lubis, A. M.; Sato, T.; Tomiyama, N.; Isezaki, N.; & T. Yamanokuchi, 2011. Ground Subsidence in Semarang-Indonesia Investigated by ALOS-PALSAR Satellite SAR Interferometry, *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(5), 1079-1088.
14. Mehrabi, A., 2019. The Effects of Different Weather Conditions on the Mobility of Salt Masses Using Interferometry Method of ASAR Time Series Images (Case Study: Larestan Shah-gheyb Salt Dome), *Physical Geography Research*, 51(3), 513-528. (in Persian).
15. Mohammakhhan, Sh.; Ganjaeian, H.; Garosi, L.; & Z. Zanganetabar, 2019, Assessing the impact of groundwater drop on the subsidence rate using the Sentinel-1 Radar images - Case study: Qorveh Plain, *Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28, 112. (in Persian).
16. Shafiei, N.; GoliMokhtari, L.; Amir Ahmadi, A.; & R. Zandi, 2020. Investigation of subsidence of Noorabad plain aquifer using radar interferometry method, *Quantitative Geomorphological Research*, 8(4), 93-111. (in Persian).
17. Sharifikia, M., 2012. Land Subsidence Rate and Area Assessment in Nogh-Bahraman Plain Based on D-InSAR Technique, *Spatial Planning (Modares Human Sciences)*, 16, 3 (75), 55-77. (in Persian).
18. Üstün, A.; Tuşat, E.; Yalvaç, S.; Özkan, İ.; Eren, Y.; Özdemir, A.; ... & F. F. Şimşek, 2015. Land Subsidence in Konya Closed Basin and its Spatio-temporal detection by GPS and DInSAR, *Environmental Earth Sciences*, 73(10), 6691-6703.
19. Zarekamali, M.; Alhoseini Almodaresi, S.; & K. Naghdi, 2017. Comparing the Magnitude of the Earth's Vertical Relocation using the SBAS Algorithm in X and C Radar Bands (Case study: Tehran lands), *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 8(3), 104-120. (in Persian).

Investigating the Effect of Soil and Land Surface Characteristics in the Prediction of Land Subsidence Using Remote Sensing (Case Study: Minab Plain of Hormozgan)

Mohamad Kazemi¹: Assistant Professor, Hormoz Studies and Research Center, University of Hormozgan, Bandar Abbas

Ali Reza Nafarzadegan: Assistant Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas

Ayoub Karami: Forough Fardad Pooyeshgaran Knowledge-based Company, Yazd Science and Technology Park, Yazd

Mohsen Ebrahimi-Khusfi: Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd

Article History (Received: 2021/08/2

Accepted: 2021/12/19)



20.1001.1.22517812.1401.12.2.1.8

Extended abstract

1- Introduction

In recent years, Minab plain, one of the most important agricultural plains in the south of the country, has experienced extensive land subsidence. Also, the study of the groundwater level of the Minab plain in a long-term periods showed that since 2001, the drop in the aquifer level has intensified and an average annual drop of 42 cm has been observed. Furthermore, previous geotechnical studies in the region have shown that besides the drop in groundwater level, the presence of swollen and soluble sediments has increased the severity of subsidence in the Minab plain. According to the evidences of the previous studies and damages caused by land subsidence to infrastructure, buildings and agricultural lands, recognizing this phenomenon, identifying areas sensitive to it and investigating the factors affecting its occurrence can play an important and effective role in predicting land subsidence and preventing associated damages. In the current study, unlike other land subsidence studies, which emphasized the drop in groundwater level and the type of geological formations, the characteristics of soil and land surface in the explanation of subsidence phenomenon have been considered.

2- Methodology

The study area of Minab plain with an area of 653.6 square kilometers is located between the longitudes of 56° 49' to 57° 15' East and latitudes of 27° 1' to 27° 19' North. First, a time-series analysis of Sentinel-1 radar was performed to identify the land subsidence sites and calculate the displacement rate. After calculating the vertical displacement, for the spatial modeling and the preparation of land subsidence hazard map of Minab plain, data mining methods were employed with soil and land surface features. The investigated time period in the present study covers the years 2015, 2017 and 2019. Spatial variations of 12 variables including soil texture, vegetation, percentages of sand, silt and clay, land surface temperature, soil bulk density, land cover type and soil salinity were gathered and prepared using Google Earth Engine (GEE) and TerrSet software to be used as independent variables of the spatial model. Then, by using Naïve Bayes (NB), Decision Tree (DT) and k-Nearest Neighbor (kNN) data mining models in the RapidMiner software platform, the necessary information was

¹ Corresponding Author: m.kazemi@hormozgan.ac.ir

extracted to map the potential land subsidence zones. It is noteworthy that in the constructed models, the land subsidence map for different years (resulting from Sentinel-1 radar image processing) was considered as a dependent variable and the maps associated with 12 variables mentioned were considered as independent variables. Performance criteria such as classification error, kappa coefficient, absolute error, normalized absolute error, relative error, and root mean squared error were used to evaluate the resulting models with respect to spatial accuracy.

3- Results

The amount of subsidence for 2015, 2017 and 2019 is computed 3.61, 0.92 and 5.69 cm, respectively. The results obtained by interferometry processes showed that the land subsidence progresses from the central parts of the plain to the edges of the plain and the eastern areas of Minab plain have less amount of land subsidence compared to other areas. Overlap of sinkhole points recorded in the field survey also showed good agreement with the results of radar image analysis. The highest rate of land subsidence, which was equal to 5.69 cm, occurred in 2019. This amount of land subsidence is certainly hazardous for agriculture, the environment and the facilities in the study region.

4- Discussion & Conclusions

Among the independent variables, vegetation, heavy soil texture and soil salinity had a more meaningful effect on different land subsidence classes. Also, among the models used for land subsidence risk mapping, the performance of the decision tree method with an accuracy of 63.15, classification error of 36.85, kappa of 29.7, absolute error and relative error of 0.5, normalized absolute error of 0.45 and the sum of the squares error of 0.56 was better than the other two models. Findings of this study showed that soil and land surface characteristics have the ability to express 0.6 of the variance of land subsidence phenomenon in the region and for more accurate modeling, effective data such as changes in groundwater level and the geological material of aquifer can be used. Also, the findings of this study as well as the prepared map of potential land subsidence occurrence in different parts of the study area can play an important role in risk reduction, land use planning and water resources management in the region.

Key Words: Spatial prediction, Radar image processing, Data mining, Google Earth Engine, Sentinel-1