چهل و دومین گردهمایی (همایش) ملی
علـوم زمیـــن
The 42nd National
Geosciences Congress
www.geoconf.ir

مدلسازی میزان فرونشست دشت سیلاخور (دورود- بروجرد) با استفاده از داده های راداری

رضا قائدرحمتی[۱]، فرزاد مرادپوری[۲]، مسعود مجرب[۳] نجم الدین الماسی[۴]

[۱]دانشگاه لرستان، خرم آباد Ghaedrahmati.r@lu.ac.ir (نویسنده مسئول)

[۲] دانشگاه لرستان، خرم آباد، شهر f.moradpouri@gmail.com

[۳] شرکت بنیان زمین پایدار، تهران mmojarab@gmail.com

[۴]دانشگاه لرستان، خرم آباد Snalmasi@gmail.com

چکیده

در این مطالعه، جابه‌جایی زمین (فرونشست) در محدوده دشت سیلاخور (دورود - بروجرد) بررسی شده است. تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری با استفاده از الگوریتم خط مبنای مکانی کوتاه (SBAS) به عنوان یکی از کارآمدترین روش ها برای به دست آوردن میزان جابه‌جایی در این منطقه، بکار گرفته شده است. تصاویر راداری سنتینل- ۱ در مسیر صعودی با شماره ترک برداشتی ۱۰۱ از تاریخ ۲۰۱۸/۰۱/۰۶ الی ۲۰۲۳/۰۱/۲۲ مورد تحلیل قرار گرفته است. پروفیل‌های طولی و عرضی در محدوده جابه‌جایی منطقه مورد مطالعه ترسیم شد و همچنین برخی نقاط منتخب به صورت سری زمانی جابه‌جایی نمایش داده شدند. نتایج حاصل نشان می‌دهد فرونشست بالای ۳ سانتی‌متر بیشتر بخش دشت را در بر گرفته است که در برخی نقاط با پوشش بسیار پایین در حد ۱۰۰ الی ۳۰۰ متری فرونشست بالاتر از ۶ سانتی‌متر نیز مشاهده شده است. محدوده فرونشست الگوی مشخصی بر روی محدوده آبخوان دشت سیلاخور و مناطق کشاورزی را نشان می دهد. این در حالی است که این میزان جابه‌جایی بیرون از این ناحیه مشاهده نمی‌گردد.

واژه‌های کلیدی

فرونشست، تداخل سنجی راداری، دشت سیلاخور، دورود – بروجرد، الگوریتم خط مبنای مکانی کوتاه.

چهل و دومین گردهمایی (همایش) ملی
علوم زمین
The 42nd National Geosciences Congress
www.geoconf.ir

Modeling of Subsidence amount in the Silakhor plain (Dorud-Borujerd) using Radar data

Ghaedrahmati, R., Moradpouri, F., Mojarab, M., and Almasi, N.

In this study, land displacement (subsidence) in the area of Silakhor plain (Dorud - Borujerd) has been investigated. Time series analysis of radar interferometry using Small Baseline Subset Algorithm (SBAS) has been performed as one of the most efficient methods to obtain the amount of displacement, in this area. Radar images of Sentinel-1 in the ascending path with crack number 101 have been analyzed from 2018/06/01 to 2023/01/22. Longitudinal and transverse profiles were drawn in the displacement zone of the studied area as well as displacement time series were displayed at some selected points in the subsidence zone. The results show that subsidence with an amount greater than 3 cm has covered most of the plain, and in some places with very low coverage in the range of 100 to 300 meters, the amount of subsidence is greater than 6 cm. The subsidence zone shows a specific pattern on the Silakhor Plain aquifer and agricultural areas. Whereas this displacement rate is not observed outside this area.

Keywords
subsidence, Radar interferometry, Silakhor, Dorud-Borujerd.

۱. مقدمه

فرونشست را می‌توان اُفت تدریجی و یا ناگهانی زمین به تراز پائین‌تر در نتیجه جابه‌جایی زیرسطحی مصالح زمین تعریف کرد. علل اصلی این پدیده عبارت است از تحکیم (تراکم) سیستم آبخوان، زهکشی خاک‌های اُرگانیک، استخراج معادن زیرزمینی، تحکیم آبی، تحکیم طبیعی، فروچاله‌ها و آب‌شدن یخ در زمین‌های یخ‌بسته. علل بروز فرونشست را می‌توان به دو دسته اصلی شامل علل زمین‌شناختی مانند غارها، فروچاله‌ها، و توپوگرافی کارستی و علل انسانی که عموماً ناشی از استخراج معدن یا برداشت سیال (آب زیرزمینی و/ یا نفت یا گاز) است، تفکیک کرد.

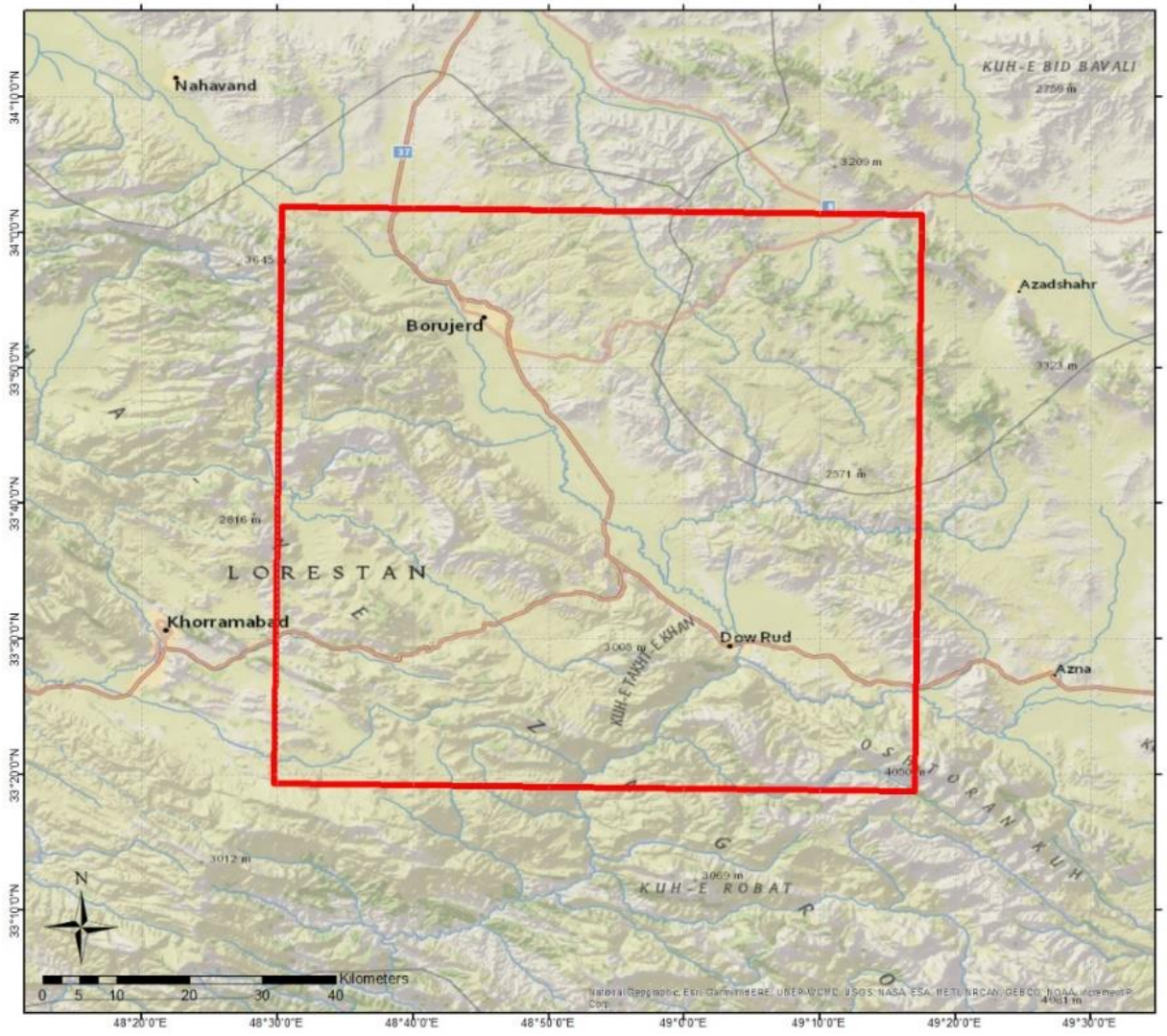
فرونشست‌های فاجعه‌بار غالباً در نتیجه افت تراز آب زیرزمینی در اثر پمپاژ یا انحراف رواناب سطحی یا جریان آب زیرزمینی از درون سنگ‌های مستعد رخ می‌دهد. با اینکه پدیده فروریزش معمولاً در مقیاس موضعی پدید می‌آید، اما می‌تواند امکان ورود آلاینده‌ها را به درون سیستم آبخوان فراهم آورد. بدین ترتیب اثرات منطقه‌ای درازمدتی را بر جای می‌گذارد.

روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری و محاسبه میزان جابه‌جایی سطح زمین اعم از ترازیابی و یا استفاده از گیرنده مولتی‌فرکانس و همچنین تداخل‌سنجی راداری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای وجود دارد. این روش‌ها به‌طور عمومی تغییرات نسبی در محل سطح زمین را اندازه‌گیری می‌کنند. در سال های اخیر روش های تداخل سنجی راداری از مهمترین روش های مورد استفاده در پهنه بندی و پیش بینی میزان فرونشست بوده اند. از جمله این موارد می توان به کار هافمن [۱]، کار نیکتا و محبی [۲]، ارزیابی فرونشست شهر مشهد توسط صالحی متعهد و همکاران [۳]، مطالعه فرونشست با استفاده از داده های راداری توسط یاستیکا و همکاران [۴] و تعیین میزان فرونشست جاجرود توسط عمادالدین و همکاران [۵] اشاره کرد.

هدف اصلی این مطالعه تعیین میزان نرخ فرونشست در منطقه سیلاخور (دورود- بروجرد)، با استفاده از تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری با روش خط مبنای مکانی کوتاه است.

۲. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بروجرد (از نظر زمین‌شناسی در چهارگوشه‌های ۱/۲۵۰۰۰۰ ، همدان و خرم‌آباد و در چهارگوشه‌های ۱/۱۰۰۰۰۰، خنداب، شازند، بروجرد و تنگ هفت) قرار دارد. محدوده آبخوان سیلاخور در حد واصل دو شهر دورود و بروجرد واقع شده است که هدف اصلی مطالعه، بررسی میزان فرونشست در این محدوده می باشد. محدوده پردازشی تصاویر راداری برای منطقه مورد مطالعه از بازه طول جغرافیایی ۴۸/۵۱۶ الی ۴۹/۳۰۹ و عرض جغرافیایی ۳۳/۳۶۷ الی ۳۴/۰۶۵ است. طول و عرض این محدوده پردازشی به ترتیب برابر با ۷۳ و ۷۸ کیلومتر است. محدوده مورد پردازش به میزان کافی وسیع انتخاب شده است تا الگوهای رفتار جابه‌جایی در مناطق مختلف کامل تشکیل شوند و از خطاهای مختلف در امان باشند. **Error! Reference source not found.** محدوده‌ی مطالعاتی با استفاده از پردازش داده های راداری را نشان می‌دهد.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه (محدوده قرمز رنگ محل پوشش تصاویر راداری مورد پردازش است)

۳. روش تداخل سنجی راداری

تکنیک تداخل‌سنجی راداری (Radar Interferometry) فضابرد با تحقیق ماسونت و همکاران فراگیر شد (ماسونت و همکاران،۱۹۹۵). تداخل‌سنجی راداری تکنیکی است که به واسطه آن اختلاف فاز بین تصاویر راداری اخذ شده از یک منظر، محاسبه می‌شود. این تصاویر ممکن است از موقعیت‌های تصویربرداری و یا حتی زمان‌های تصویربرداری مختلف، اخذ شده باشند. در تداخل‌سنجی راداری، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت‌های تصویربرداری و یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه می‌شود. از تفاضل‌گیری بین این مقادیر، تصویر جدید حاصل می‌شود که تداخل‌نما (Interfrogram) نام دارد. تصاویر رجیستر شده در مرحله قبلی وارد فرآیند تولید تداخل‌نما می‌شود.

اختلاف فاز به دست آمده از تداخل‌سنجی راداری متاثر از چند مولفه است. برخی از مهمترین آن‌ها عبارت از مولفه مسیرهای مداری، مولفه توپوگرافی، مولفه جابه‌جایی و مولفه اتمسفری است. در رابطه ۱ تاثیر پارامترهای ذکر شده بر اختلاف فاز حاصل شده قابل مشاهده است.

$$\Delta\phi\text{int} = W(\Delta\phi_{Topo} + \Delta\phi_{Defo} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{FE} + \Delta\phi_{Noise} + \Delta\phi_{orb})$$ رابطه ۱

در این رابطه $\Delta\phi\text{int}$ فاز تداخل‌سنجی راداری، $\Delta\phi_{Topo}$ فاز توپوگرافی، که زمانی به عنوان عامل مزاحم شناخته می‌شود که هدف تداخل‌سنجی بررسی تغییرات ارتفاعی در بازه زمانی باشد. اختلاف فاز پیکسل‌های مجاور در تداخل‌نما معرف اختلاف ارتفاع این نقاط است همچنین $\Delta\phi_{Defo}$ فاز ناشی از تغییرات ارتفاع (جابه‌جایی)، $\Delta\phi_{FE}$ فاز ناشی از تغییر زاویه دید سنجنده در امتداد آزیموت یا زمین مسطح که در زمان اخذ یک تصویر راداری، فاز ثبت شده تابعی از فاصله سنجنده از هدف است؛ که این فاصله (رنج) علاوه بر توپوگرافی متاثر از رنج زمینی هدف (فاصله نقطه از پای نادیر) نیز است، $\Delta\phi_{atm}$ فاز مربوط به سهم اتمسفر، تغییر ضریب شکست در مسیر انتشار امواج راداری باعث ایجاد تاخیر زمانی در موج راداری می‌شود که اگرچه اثر آن بر دامنه قابل صرفنظر کردن است اما مستقیما بر فاز امواج اثرگذار است. $\Delta\phi_{Noise}$ فاز ناشی از نوفه که متاثر از اثرات اتمسفر و مدار و $\Delta\phi_{orb}$ فاز بوجود آمده در اثر خطای مداری است [۶].

امروزه در حالت کلی از سه تکنیک تداخل سنجی راداری برای مطالعات پایش جابجایی زمین استفاده می شود. تکنیک اول که از دو تصویر مجزا در زمان های مختلف از یک مکان استفاده می کند به تکنیک (DInSAR: Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar) معروف است. تکنیک دوم روش پراکنشگرهای دائمی (PSInSAR: Permanent Scattering InSAR) است که از سریهای زمانی تصاویر برای پایش جابجایی های سطح زمین استفاده می کند و با توجه به اینکه در این روش از پیکسل های براکنش کننده غالب یا دائمی استفاده می شود ، این روش برای تخمین جابجایی مناطق شهری مناسب تر است. تکنیک سوم الگوریتم خط مبنای مکانی کوتاه (SBAS: Small Baseline Subset) می باشد که از سری های زمانی داده های راداری استفاده می کند و با استفاده از این تکنیک جابجایی و سرعت جابجایی زمین را می توان در طول زمان مورد نظر با توجه به تصاویر مورد استفاده تخمین زد [۷ و ۸].

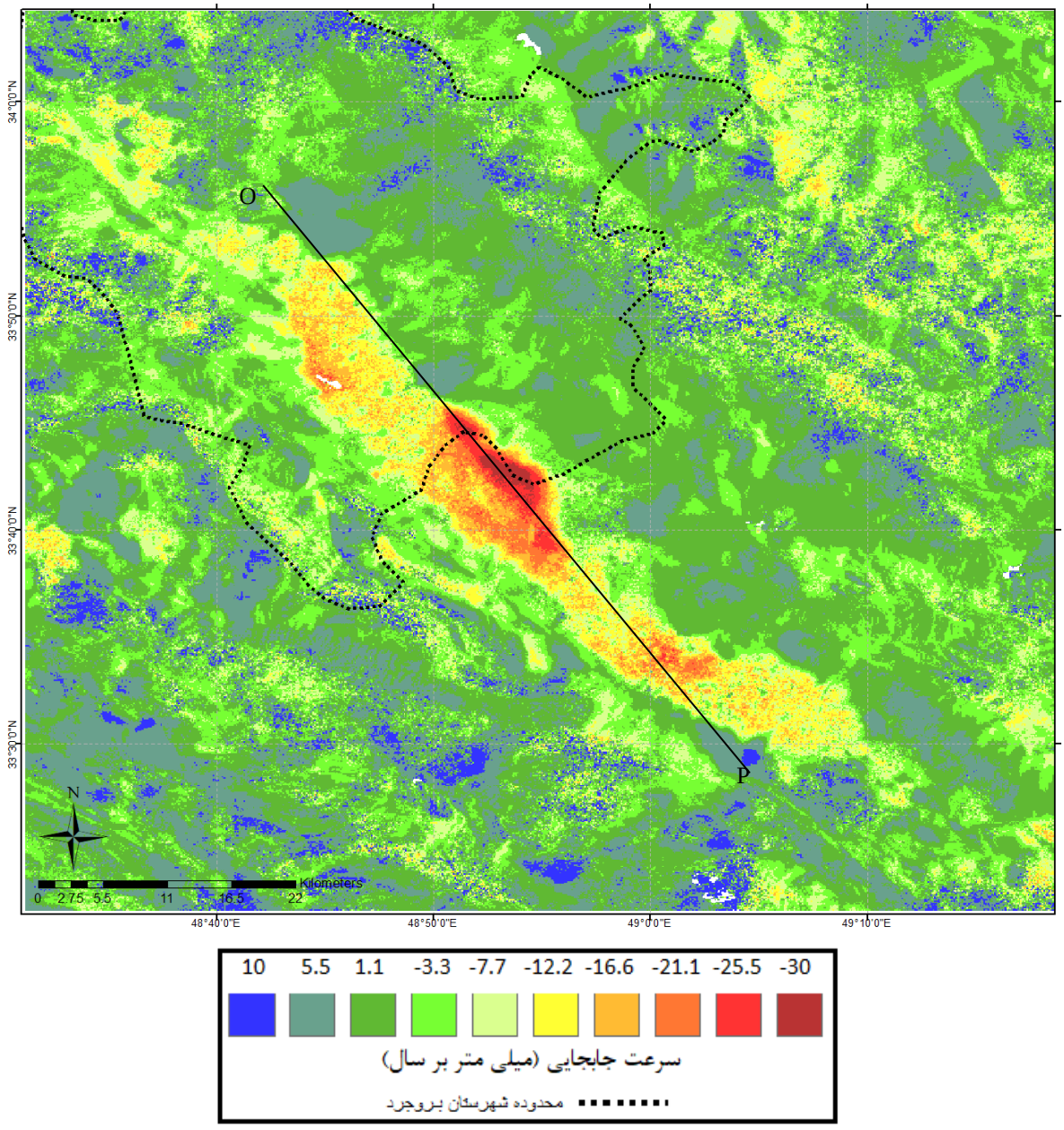
به دلیل اینکه در این پروژه، هدف مطالعه‌ی محدوده‌ی دشت است، روش SBAS برای انجام این مهم انتخاب شد. این فرایند با استفاده از الگوریتم NSBAS و نرم‌افزار LicSBAS انجام شده است [۹].

۴. داده های مورد استفاده

تصاویر ماهواره سنتینل- ۱ (Sentinel-1) یکی از بهترین سنجنده‌های حال حاضر سنجش از دور راداری که صرفاً برای اهداف تداخل‌سنجی طراحی شده است، برای برآورد جابه‌جایی محدوده مورد مطالعه استفاده شده است. این سنجنده توسط آژانس فضایی اروپا اواخر سال ۲۰۱۴ پرتاب شد که در باند C محدوده امواج مایکرویو تصویربرداری می‌کند. در این مطالعه از تصاویر گذر صعودی (Ascending) در ترک برداشتی شماره ۱۰۱ استفاده شده است. تاریخ تصاویر مورد پردازش در محدوده زمانی ششم ژانویه ۲۰۱۸ تا ۲۲ ژانویه ۲۰۲۳ می باشد. اگر چه داده های سنتینل-۱ معمولا دارای پریودهای ۱۲، ۲۴ و ۳۶ روز می باشند ولی با توجه به موجود بودن تصاویر سنجنده دوقلوی این ماهواره (Sentinel-1-B) در این منطقه و در این محدوده زمانی، خوشبختانه داده ها غالباً دارای پریود زمانی ۶ روز بوده اند. لذا حجم زیادی از تصاویر (۲۶۵ تصویر) در این مطالعه مورد پردازش قرار گرفته است.

۵. نتایج و بحث

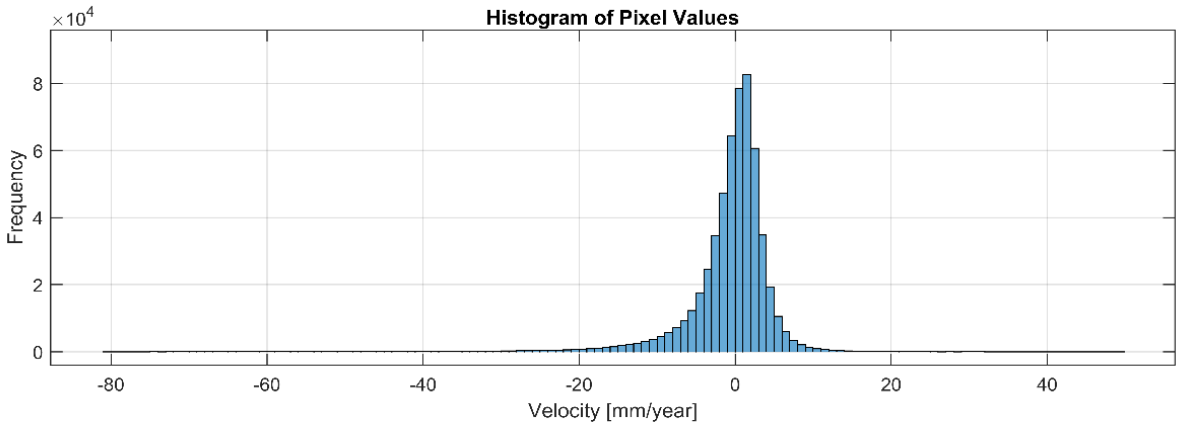
شکل ۲ نقشه سرعت جابجایی زمین حاصل از پردازش ۲۶۵ تصویر راداری سنجنده سنتینل ۱ از محدوده مورد مطالعه را با استفاده از الگوریتم خط مبنای مکانی کوتاه نشان می دهد. نقشه سرعت جابجایی در این شکل نشان می دهد که منطقه‌ی مورد بررسی در قسمت دشت (حد فاصل شهرستان های دورود و بروجرد، مطابق شکل ۱) دارای حدودا ۳ سانتی‌متر فرونشست است. با توجه به راهنمای این نقشه که از رنگ آبی (مناطق دارای بالا آمدگی سالانه) تا رنگ سبز (مناطق پایدار با کمترین میزان جابه‌جایی) و رنگ قرمز (فرونشست مطلق) مشخص می‌شود، به غیر از منطقه کشاورزی (قسمت دشت)، سایر مناطق که به صورت کوهستانی است اغلب نقاط دارای پایداری نسبی و یا بالامدگی به میزان بسیار پایین است. دلیل بالاآمدگی در این مناطق می‌تواند ناشی از خطاهای توپوگرافی به دلیل پستی‌بلندی شدید این منطقه باشد. همچنین بارندگی‌های متعدد در این مناطق می‌تواند اثر خود را بر روی فاز تصاویر راداری داشته و شاهد نتیجه آن در برآورد جابه‌جایی به شکل بالاآمدگی باشیم.



۲. نقشه نرخ جابه‌جایی سالانه در محدوده مورد مطالعه (خط OP موقعیت پروفیل انتخابی برای بررسی جابجایی می باشد که در ادامه بررسی می گردد)

شکل ۳ نمودار فراوانی یا هیستوگرام سرعت جابه‌جایی را برای مقادیر سرعت جابجایی پیکسل ها، برای منطقه مورد مطالعه، نشان می دهد. مطابق این نمودار در محدوده مورد پردازش، مناطقی وجود دارد که فرونشست آن حتی به میزان ۶ سانتی‌متر در سال و بالاتر نیز رسیده است اما به دلیل اینکه این رفتار تنها در چند نقطه محدود وجود دارد راهنمای اصلی و رنگ جابه‌جایی‌ها با بازه با بیشترین آمار جابه‌جایی ترسیم می‌شود و در نقشه سرعت جابجایی در شکل ۲ به خوبی دیده نمی شود. همانگونه که مشخص است پیک این نمودار بر روی بازه صفر است بدین معنی که غالب این منطقه رفتار پایدار نزدیک به صفر دارد. در حالی‌که در سمت چپ این نمودار جابه‌جایی به صورت فرونشست با اعداد منفی قابل مشاهده است. همانگونه که مشخص است از بازه ۲۰- میلی‌متر بر سال الی ۸۰- میلی‌متر بر سال

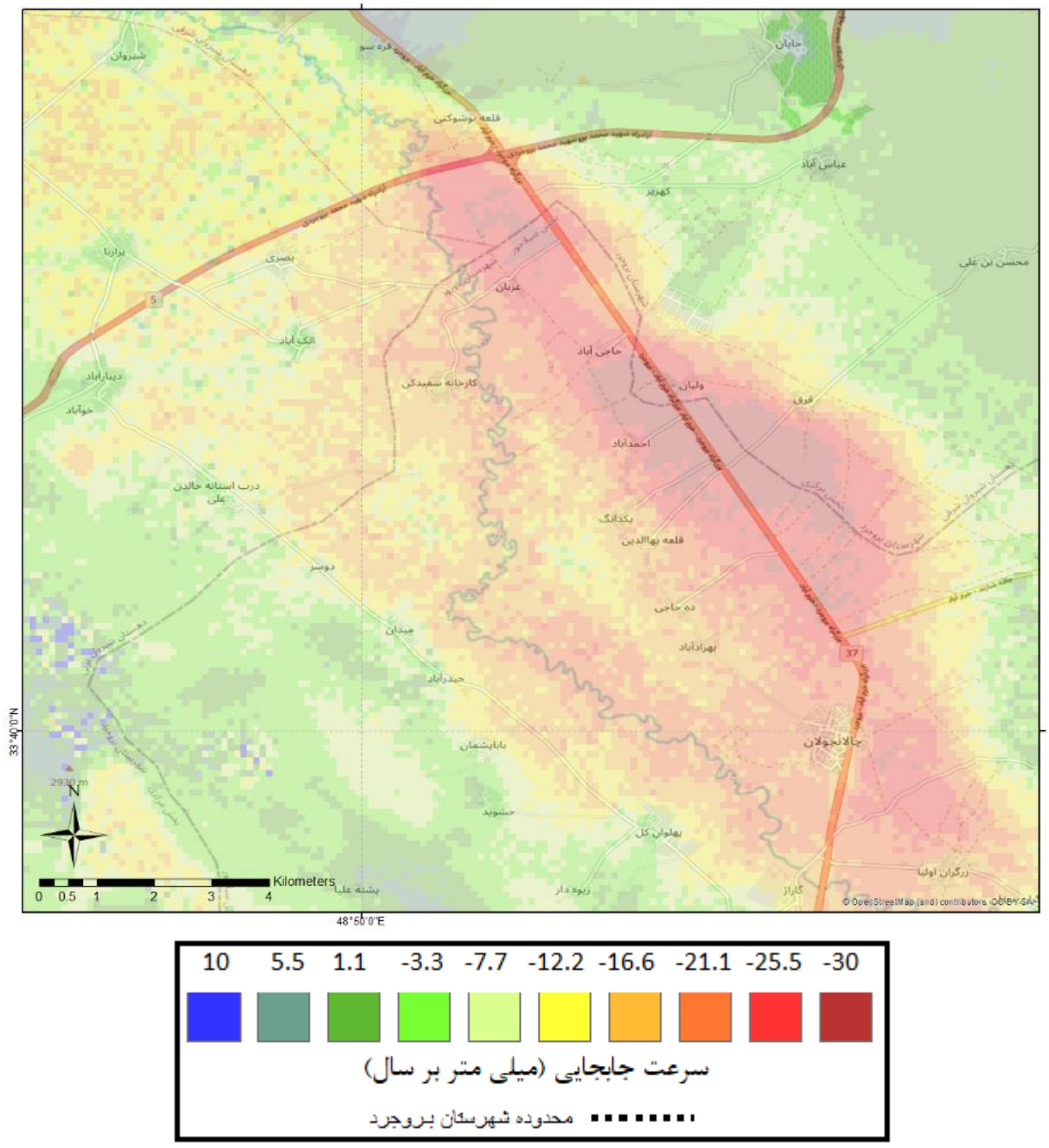
تعداد پیکسل‌های بسیار محدودی وجود دارد و شمار آن‌ها اندک است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت در منطقه مورد مطالعه مناطق محدودی فرونشست بالاتر از ۶ سانتی‌متر بر سال را نیز تجربه کرده‌اند. اما غالب فرونشست در این منطقه در حدود ۳ سانتی‌متر بر سال است.



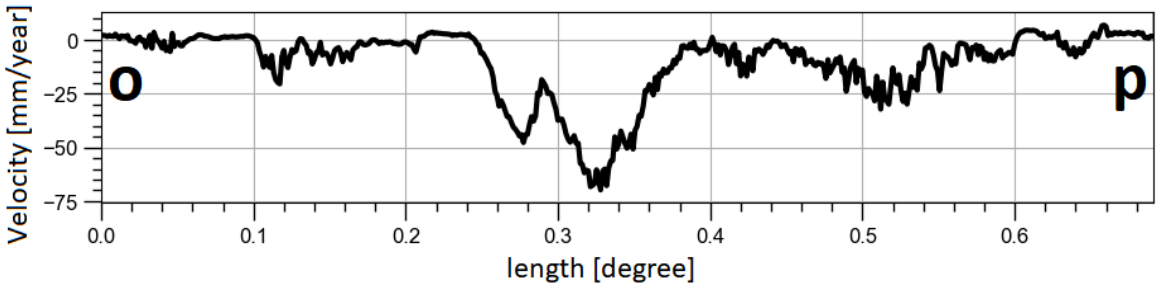
شکل ۳. نمودار فراوانی (هیستوگرام) سرعت جابه‌جایی‌ها در منطقه‌ی مورد مطالعه

Error! Reference source not found. ۴، نقشه سرعت جابه‌جایی در محدوده بیشینه فرونشست با پوشش بسیار وسیع در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این نقشه کاملا مشخص است روستاهای احمدآباد و حاجی‌آباد به طور کامل در زون بیشینه فرونشست هستند. همچنین در این تصویر بخشی از بزرگراه بروجرد - خرم‌آباد به طور مشخص درگیر فرونشست است.

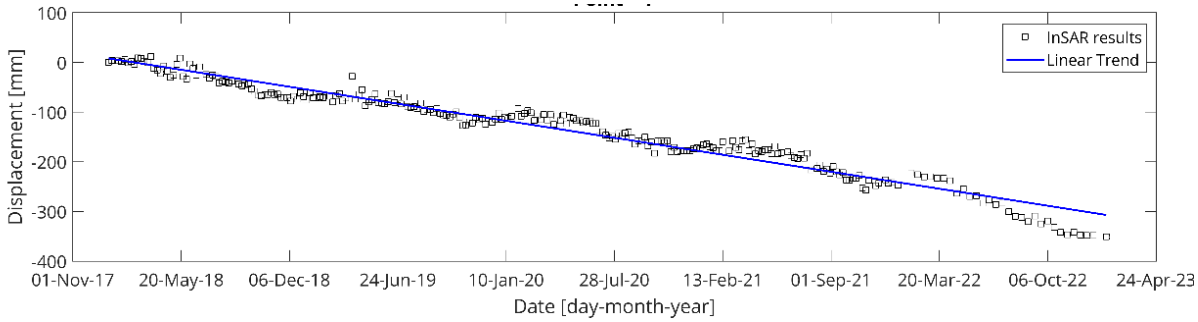
در شکل ۵ تغییرات سرعت جابه‌جایی روی پروفیل OP نشان داده شده است. این پروفیل نشان می دهد که بیشینه فرونشست در محدوده پروفیل به حدود ۷ سانتی متر بر سال می رسد که بسیار قابل ملاحظه است. **Error! Reference source not found.**۶، رفتار سری زمانی جابه‌جایی در کل بازه زمانی پردازشی به ازای هر تاریخ را برای یک نقطه انتخابی در محدوده با فرونشست شدید نشان می‌دهد. محور افقی، محور زمان و محور عمودی، جابه‌جایی بر حسب میلی‌متر را نشان می‌دهد. هر یک از مربع‌ها تصویر اخذ شده در یک تاریخ خاص و به عبارتی جابه‌جایی حاصل از پردازش تداخل‌سنجی راداری را نشان می‌دهد. همچنین به جهت تفسیر بهتر نتایج، رفتار سری زمانی به صورت خطی بر روی داده های نمودار ترسیم شده است. رفتار جابه‌جایی نشان می‌دهد که یک الگوی نسبی سینوسی در نقاط وجود دارد که ناشی از تغییرات فصلی در سطح تراز آب‌های زیرزمینی است. همانگونه که مشخص است در برخی نقاط جابه‌جایی در انتهای بازه سری زمانی به بیش از ۳۰ سانتی‌متر رسیده است. این جابه‌جایی، تجمعی است که در طول مدت پردازشی از جابه‌جایی صفر (در اولین تصویر) به جابه‌جایی بیش از ۳۰ سانتی‌متر فرونشست (در انتهایی‌ترین تصویر) رسیده است.



شکل ۴. نقشه سایه سرعت جابه‌جایی بر روی نقشه شهری در محدوده بیشینه فرونشست در منطقه مورد مطالعه



شکل ۵. سرعت جابه‌جایی در راستای پروفیل OP (موقعیت پروفیل در شکل ۱ نشان داده شده است)



شکل ۶. میزان جابه‌جایی در یک نقطه انتخابی در محدوده فرونشست شدید در منطقه در طی دوره زمانی مورد بررسی

۶. خلاصه و نتیجه گیری

در این مطالعه فرونشست منطقه سیلاخور شامل شهرستانهای دورود و بروجرد در استان لرستان با استفاده از داده های راداری سنتینل ۱ مورد بررسی قرار گرفنه است. الگوریتم مورد استفاده در اینجا برای محاسبه میزان فرونشست، الگوریتم خط مبنای مکانی کوتاه (SBAS) است. نتایج این برررسی الگوی فرونشست مشخصی را در دشت سیلاخور و در محدوده آبخوان نشان می دهد. به طوری که مقدار فرونشست در این محدوده قابل ملاحظه و به طور متوسط ۳۰ میلی متر در سال است. در صورتیکه مقدار فرونشست در مناطق شهری بسیار کم بوده و نگران کننده نمی باشد. همان طور که انتظار می رود، بررسی نقشه های فرونشست نشان می دهد که مناطق اطراف دشت (شمال شرق و جنوب غرب دشت) که عمدتاً کوهستانی می باشد، دچار فرونشست نشده اند. این موضوع خود دلیلی بر صحت نتایج می باشد. همچنین نتایج می دهد که میزان فرونشست در طول زمان مورد بررسی (کمتر از ۵ سال) در برخی جاهای منطقه به بیش از ۳۰۰ میلی متر رسیده است.

۷. منابع

[1] Hoffmann, J., The application of satellite Radar interferometry to the study of the land subsidence over developed aquifer system, PhD thesis, Stanford University, 2003.pp. 229.

[2] میثم نیکتا و پریسا محبی، ۱۳۹۳، بکارگیری تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری در شناسایی، تعیین نرخ و علل فرونشست سازه های زیرزمینی، بیست و یکمین همایش ژئوماتیک، تهران، ایران.

[3] فهیمه صاحی متعهد، ناصر حافظی مقدس، غلامرضا لشکری پور و مریم دهقانی، ۱۳۹۸، ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل سنجی راداری و اندازه گیری های میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد، نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد ۱۳، شماره ۳، ص ۴۶۳-۴۳۵.

[4] Yastika P. E., Shimizu N. & Abidin H. Z., (2019). Monitoring of long-term land subsidence from 2003 to 2017 in coastal area of Semarang, Indonesia by SBAS DInSAR analyses using Envisat- ASAR, ALOS-ALSAR, and Sentinel-1A SAR data. Advances in Space Research, 63(5), 1719-1736.

[5] سمیه عمادالدین، ویدا شاهی، صالح آرخی و مریم آقتابایی، ۱۴۰۱، تعیین میزان فرونشست زمین در محدوده مخروط افکنه جاجرود با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری، فصل نامه پژوهش هی جغرافیای طبیعی، http://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.319591.1007596.

[6] Ferretti, A., Novali, F., Bürgmann, R., Hilley, G., Prati, C., 2004, InSAR permanent scatterer analysis reveals ups and downs in San Francisco Bay area. Eos, Transactions American Geophysical Union, 85(34), 317-324.

[7] Ferretti A, Prati C, Rocca F (2001) Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39(1):8-20.

[8] Berardino, P., Fornaro, G., Fusco, A., Galluzzo, D., Lanari, R., Sansosti, E., Usai, S., 2001, A new approach for analyzing the temporal evolution of Earth surface deformations based on the combination of DIFSAR interferograms. In IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217) (Vol. 6, pp. 2551-2553). IEEE.

[9] Morishita, Yu, Milan Lazecky, Tim J. Wright, Jonathan R. Weiss, John R. Elliott, and Andy Hooper, 2020, LiCSBAS: An open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor. Remote Sensing 12(3), 424.