

پایش فرونشست زمین در اثر برداشت بی‌رویه آب‌های زیر زمینی با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به روش پراکنش‌گرهای دائمی (مطالعه موردی: شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور)

رضا سودمند افشار^۱، سلمان احمدی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد سنجش از دور، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲- استادیار فتوگرامتری و سنجش از دور، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۲۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۷

چکیده

فرونشست زمین از معدود مخاطرات زیست‌محیطی است که به دلیل تلفات انسانی پایین نسبت به دیگر مخاطرات بسیار کمتر مورد توجه جوامع انسانی قرار گرفته است. با این وجود پدیده فرونشست در گذر زمان خساراتی جبران‌ناپذیر را به پیکره مناطق شهری و دشت‌های مجاور در طول زمان وارد می‌سازد. در پژوهش حاضر جهت پایش فرونشست زمین در شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور واقع در غرب استان همدان از روش پراکنش‌گرهای دائمی با استفاده از ۸۹ تصویر ماهواره سنتینل در گذر صعودی و ۸۵ تصویر در گذر نزولی استفاده شده است. بر اساس خروجی‌های حاصل از این تحقیق در منطقه روستای بادخوره و جنت‌آباد شهرستان اسدآباد، بیشینه میانگین نرخ فرونشست ۲۲۰- میلی‌متر در سال نسبت به دیگر مناطق، در بازه زمانی مطالعاتی صورت گرفته است. همچنین با توجه به نتایج حاصل از تحقیق می‌توان گفت که نرخ فرونشست از مناطق شهری به سمت دشت‌های اطراف صعودی بوده است. بعلاوه مدل مورد استفاده در مناطق شهری تعداد نقاط پراکنش‌گر بیشتر با میانگین همبستگی زمانی بیشتری را نسبت به مناطق مختلط شامل دشت و شهری انتخاب کرده است. در ادامه جهت یافتن علت فرونشست، اطلاعات چاه‌های پیژومتری موجود در منطقه اخذ و تغییرات آنها در طول زمان بررسی گردید. در این خصوص می‌توان گفت که یکی از دلایل اصلی فرونشست زمین در شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور با توجه به رفتار افزایشی عمق چاه‌های پیژومتری موجود در منطقه در بازه زمانی مطالعاتی را می‌توان به برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی نسبت داد.

کلیدواژه‌ها: فرونشست، تداخل‌سنجی راداری، تکنیک پراکنش‌گرهای دائمی.

* نویسنده مکاتبه کننده: گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

تلفن: ۰۹۱۲۶۲۱۷۶۹

۱- مقدمه

در حال حاضر فرونشست زمین یکی از مهم‌ترین مخاطرات زمین‌شناسی است که به علت تلفات کم‌تر انسانی نسبت به سایر پدیده‌های مخاطره‌آمیز از جمله سیل، زمین‌لغزش و زلزله در جوامع امروزی کمتر مورد توجه قرار گرفته است، که همین امر خود به تنهایی یکی از عوامل اصلی پیشرفت هر چه بیشتر این پدیده مخاطره‌آمیز است. این پدیده مخاطره‌آمیز تغییراتی در توپوگرافی سطح زمین ایجاد می‌کند که در بیشتر موارد آسیب‌های وارده توسط این پدیده غیر قابل جبران است [۱ و ۲]. فرونشست زمین در نقاط مختلف جهان به دلایل متفاوتی از جمله برداشت بی‌رویه از منابع آب-های زیرزمینی، لغزش زمین، انقباض خاک و سقوط دیواره داخلی معادن صورت می‌گیرد [۳ و ۴].

در مطالعه حاضر جهت پایش فرونشست زمین در شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور از روش پراکنش-گره‌های دائمی^۱ که برای اولین بار توسط فرتی و همکاران مطرح شد، استفاده شده است [۵ و ۶]. با این وجود برای مطالعه و بررسی رفتار فرونشست در یک منطقه باید تکنیکی به کار گرفته شود که رفتار این پدیده مخاطره‌آمیز را در طول زمان همانند روش‌های مبتنی بر سری زمانی مورد بررسی قرار دهد [۷ و ۸]. پایش فرونشست زمین در راستای پیشگیری از اثرات مخرب بلایای طبیعی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. تکنیک‌های تداخل‌سنجی توانایی برآورد فرونشست را با دقتی در محدوده میلی‌متر با استفاده از مشاهدات فاز را دارا هستند [۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲]. خروجی تکنیک‌های تداخل‌سنجی در سنجش جابجایی‌های صورت گرفته به شکل فرونشست بعنوان یک روش بسیار مؤثر شناخته شده است. همچنین خروجی‌های مربوطه در مطالعات زمین‌شناسی و بررسی رفتار و الگوی فرونشست در مناطق مختلف بسیار مورد استفاده قرار

می‌گیرد [۱۳ و ۱۴]. در تکنیک تداخل‌سنجی راداری عواملی همچون عدم همبستگی زمانی، عدم همبستگی مکانی و مصنوعات اتمسفر به عنوان محدودیت‌های تکنیک مورد نظر در نظر گرفته می‌شوند [۱۵، ۱۶ و ۱۷]. نتایج مربوط به مطالعه صورت‌گرفته توسط مقصودی و همکاران بیان‌کننده این مهم است که به منظور دستیابی به خروجی مطلوب در جهت پایش فرونشست در منطقه مطالعاتی با وجود پوشش گیاهی متراکم به دلیل خطای عدم همبستگی زمانی بهتر است از تصاویر ماهواره‌هایی با طول موج‌هایی بلند به منظور کاهش اثر خطای عدم همبستگی زمانی استفاده کرد [۱۸]. در ایران نیز بحث فرونشست زمین به یک بحران ملی تبدیل شده که در بیشتر موارد ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی می‌باشد. در این خصوص پژوهشگران مختلفی میزان فرونشست زمین را در مناطق مختلف ایران همانند دشت فامنین، ورامین، تهران، مشهد و رفسنجان به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری مورد مطالعه و بررسی قرار داده اند [۱۹]. برای اولین بار از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در استان تهران در سال ۲۰۰۵ میلادی توسط شمشکی و همکاران با استفاده از ۶ تصویر ماهواره انویست^۲ به منظور تخمین سرعت و محدوده تغییرات جابجایی پرداختند [۲۰]. معتق و همکاران (۲۰۰۷) منطقه دره مشهد و منطقه شهری مشهد را در بازه زمانی ۲۰۰۵-۲۰۰۳ با استفاده از تصاویر ماهواره انویست مورد مطالعه قرار دادند که نتایج تحقیق مورد نظر نشان‌دهنده این اصل بود که طبق رفتار افزایشی عمق چاه‌های پیزومتری برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی عامل اصلی فرونشست صورت‌گرفته می‌باشد [۱۳]. حق شناس و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی و مطالعه فرونشست منطقه جنوب غربی تهران با استفاده از تصاویر ماهواره انویست، الوس و تراسار-اپکس^۳

² ENVISAT³ TerraSAR-X¹ Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR)

گرفته توسط ونگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی با استفاده از تصاویر ماهواره انویست و تراسار-یکس نشان‌دهنده نرخ فرونشستی بیش از ۱۰ میلی متر در سال در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۰۳ میلادی می‌باشد [۲].

مطالعات بسیاری در حوزه استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری روش پراکنش‌گرهای دائمی در بررسی جابجایی‌های صورت‌گرفته در مناطق زمین لغزش، برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی، حرکت‌های تکتونیکی و مطالعات مربوط به جابجایی‌های صورت‌گرفته ناشی از آتش فشان صورت‌گرفته است [۲، ۷، ۲۳، ۲۴، ۲۵ و ۲۶]. در اقصی نقاط جهان و به خصوص در ایران، برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی را می‌توان یکی از علل اصلی فرونشست زمین در این مناطق عنوان کرد [۲۷ و ۲۸].

در پژوهش حاضر برای اولین بار به بررسی فرونشست شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور با استفاده از روش پراکنش‌گرهای دائمی در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۱۵ میلادی پرداخته شده است. پژوهش موردنظر در چند بخش با عناوین: بخش ۲ منطقه مورد مطالعه، بخش ۳ داده‌های ماهواره‌ای، بخش ۴ روش تحقیق، بخش ۵ نتایج و در نهایت بخش ۶ نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شهرستان اسدآباد واقع شده است. شهرستان اسدآباد بین مدار ۳۴ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این شهرستان با ارتفاع ۱۶۰۷ متر از سطح دریا، آخرین شهرستان غربی استان همدان است. از شمال به شهرستان قروه استان کردستان، از شمال شرقی و مشرق به شهرستان بهار استان همدان، از جنوب شرقی به شهرستان تویسرکان استان همدان، از جنوب به شهرستان کنگاور استان کرمانشاه و از غرب به شهرستان سنقر استان کرمانشاه منتهی می‌شود.

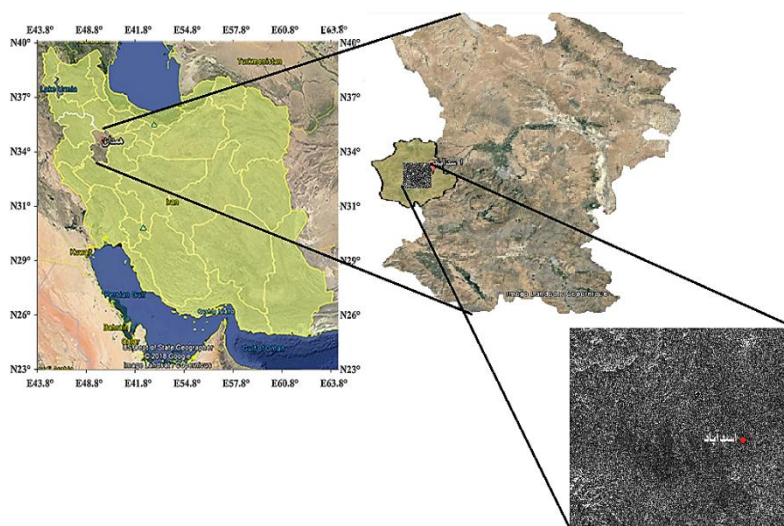
پرداختند که نتایج مطالعه موردنظر نشان‌دهنده این مهم است که تصاویر ماهواره‌های با طول‌موج کوتاه تر جهت پایش فرونشست اثرپذیری بیشتری از خطای عدم‌همبستگی زمانی به دلیل وجود پوشش گیاهی را در کنار پایش جابجایی با دقت بالاتر دارا هستند [۲۱]. در مطالعه‌ای دیگر توسط دهقانی و همکاران (۲۰۱۰) در منطقه جنوب غربی تهران با استفاده از ۱۲ تصویر ماهواره‌ای انویست به توسط روش خط مبنای مکانی کوتاه^۱، نشان‌دهنده فرونشستی به صورت میانگین برابر با ۲۴ سانتی‌متر در سال جهت ارزیابی رفتار فرونشست در منطقه انجام گرفت که نتایج مطالعه مورد نظر نشان‌دهنده این اصل بود که یکی از عوامل تاثیرگذار در فرونشست زمین در کنار تراکم سیستم آخوان، نوع خاک منطقه مطالعاتی می‌باشد [۲۲]. در مطالعه‌ای دیگر که توسط دهقانی و همکاران (۲۰۱۳) بر روی استان تهران صورت گرفت نشان‌دهنده فرونشستی در حدود ۱۴ سانتی‌متر در سال با دقتی در حدود ۱/۴ سانتی‌متر بود، در واقع مطالعه صورت‌گرفته برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی را عامل اصلی فرونشست صورت‌گرفته در منطقه عنوان کرد [۲۳].

نتایج مطالعه صورت‌گرفته توسط زبکر و ویلانسون (۱۹۹۲) نشان‌دهنده این مهم است که خطای عدم‌همبستگی زمانی در صورت عدم وجود پراکنش غالب در بازه زمانی مطالعاتی ناشی از تغییرات پدیده و خطای عدم‌همبستگی مکانی در صورت افزایش بی‌رویه خط مبنای مکانی در جهت دستیابی به دقت بالاتر در اندازه‌گیری ارتفاع بوجود می‌آید [۱۵]. مطالعه صورت‌گرفته توسط دکلرک و همکاران (۲۰۱۷) توسط تصاویر ماهواره انویست و تراسار-یکس در بازه زمانی ۱۹۹۲-۲۰۱۴ با استفاده از روش پراکنش‌گرهای دائمی صورت‌گرفت. نتایج مطالعه صورت‌گرفته برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی را عامل اصلی فرونشست در منطقه موردنظر در نظر گرفت [۲۴]. مطالعه صورت-

¹ Small Baseline Subset (SBAS)

در استان همدان محسوب می‌شوند باید جلوگیری کرد. در این راستا منطقه مطالعاتی شهرستان اسدآباد و دشت مجاور آن انتخاب شده است که در شکل (۱) موقعیت منطقه مطالعاتی نمایش داده شده است.

در واقع دشتهای شهرستان اسدآباد یکی از مهم‌ترین دشتهای استان همدان محسوب می‌شوند به همین جهت از پیشرفت هرچه بیشتر بلایای طبیعی که به عنوان تهدیدی برای این دشت و دشتهای اطراف



شکل ۱: شهرستان اسدآباد و دشتهای مجاور

رفتاری ثابت و پایدار در طول زمان با استفاده از داده‌های راداری است. در واقع بر روی هر پراکنش‌گر دائمی اطلاعاتی از قبیل نرخ سرعت جابجایی و خطای باقیمانده مدل ارتفاعی رقومی زمین^۵ در یک بازه زمانی مشخص برآورد می‌شود. بر طبق تحقیقات مختلف در گذشته در مناطق مختلف، شناسایی این نقاط در مناطق شهری که عمدتاً نشان‌دهنده حالتی پایدار در یک بازه زمانی مشخص هستند، بسیار موفق‌تر نسبت به سایر مناطق موجود بوده است [۲۹]. در شکل (۲) نمودار مراحل مختلف روش پراکنش‌گرهای دائمی ارائه شده است.

۳- داده‌های ماهواره‌ای

در پژوهش حاضر در مجموع از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۱۸ میلادی از تصاویر ماهواره سنتینل^۱ در حالت صعودی و نزولی همراه با قطبش^۲ ۷۷ استفاده شده است. مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده و تصویر پایه انتخابی برای هر بازه زمانی در جدول (۱) ارائه شده است.

۴- روش تحقیق

در پژوهش حاضر از روش پراکنش‌گرهای دائمی طبق فلوجارت شکل (۲) به منظور پایش فرونشست در شهرستان اسدآباد و دشتهای مجاور این شهرستان استفاده شده است. در واقع ایده اصلی تکنیک پراکنش‌گرهای دائمی^۳ شناسایی نقاط همبسته^۴ با

Aperture Radar (PS-InSAR)

⁴ Coherent

⁵ Digital Elevation Model (DEM)

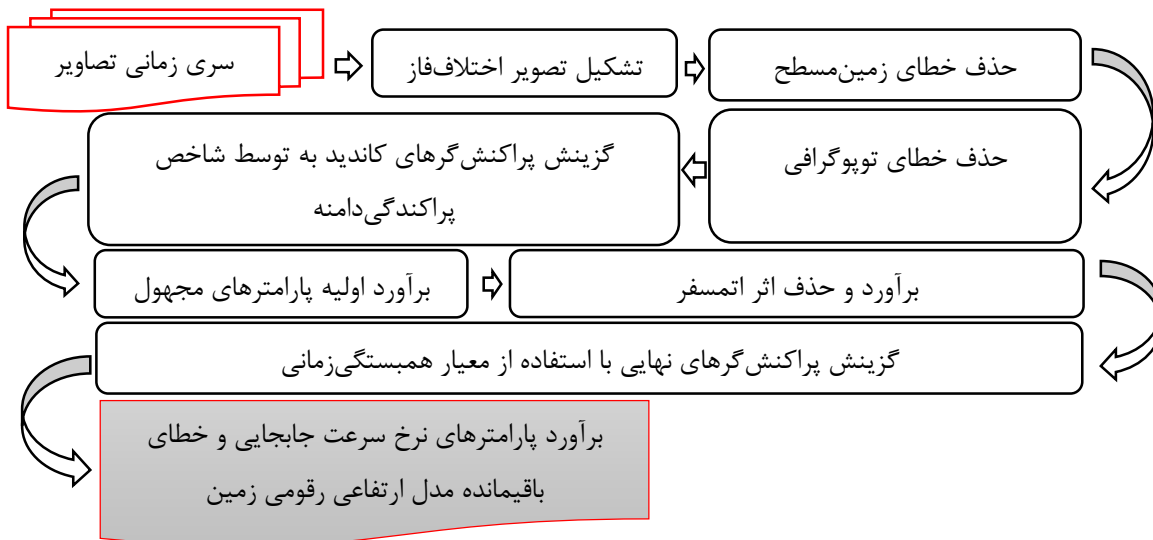
¹ Sentinel-1A

² Polarization

³ Permanent Scatterer Interferometric Synthetic

جدول ۱: اطلاعات مربوط به تصاویر مورد استفاده در پژوهش حاضر

سال	تصویر پایه	تعداد تصاویر	حالت مداری
۲۰۱۶-۲۰۱۵	۲۰۱۵۱۰۳۱	۳۰	صعودی
	۲۱۶۰۳۰۵	۲۷	نزولی
۲۰۱۷	۲۰۱۷۰۶۱۰	۳۰	صعودی
	۲۰۱۷۰۷۲۲	۲۹	نزولی
۲۰۱۸	۲۰۱۸۰۶۱۷	۲۹	صعودی
	۲۰۱۸۰۸۱۰	۲۹	نزولی
۲۰۱۸-۲۰۱۵	۲۰۱۷۰۵۲۹	۸۱	صعودی
	۲۰۱۷۰۴۲۹	۷۸	نزولی



شکل ۲: فلوچارت روش پراکنش گره‌های دائمی

دو تصویر رادار، جهت دستیابی به تصویر اختلاف فاز^۲، تصویر پایه^۳ در تصویر پیرو^۴ ضرب می‌گردد. در تصویر اختلاف فاز، در هر پیکسل علاوه بر فاز ناشی از جابجایی، فاز ناشی از خطای زمین مسطح، فاز ناشی از توپوگرافی، فاز ناشی از اثر اتمسفر و در نهایت فاز ناشی از عوامل دیگر (نویز) نیز وجود دارد. در تکنیک تداخل سنجی جهت پایش فرونشست تنها فاز ناشی از

در روش پراکنش گره‌های دائمی جهت شناسایی نقاط پراکنش گر دائمی می‌توان از شاخص‌های متفاوتی استفاده کرد و در پژوهش حاضر از شاخص پراکنندگی دامنه^۱ استفاده شده است [۵ و ۶]. در پژوهش حاضر به منظور بررسی رفتار فرونشست در شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور، از نرم افزار سارپروز استفاده شده است [۳۰].

۴-۱- روش پراکنش گره‌های دائمی

در روش پراکنش گره‌های دائمی در ابتدا با استفاده از

² interferogram

³ Master

⁴ Slave

¹ Amplitude Dispersion Index (ADI)

برآورد می‌شود. در واقع اختلاف فاز برآورد شده در تصویر، اختلاف فاز تشکیل شده از چند عامل فاز می‌باشد [۶].

$$\phi_{diff} = \phi_{flat-earth} + \phi_{topography} + \phi_{displacement} + \phi_{atm} + \phi_{noise}$$

تشکیل تصویر اختلاف فاز از گراف همراه با خط مبنای مکانی و خط مبنای زمانی مشخص استفاده شده است. در اصل پس از تشکیل تصویر اختلاف فاز باید اثرات ناخواسته از فاز برآورد شده حذف شود. یکی از این اثرات نامطلوب، فاز ناشی از زمین مسطح می‌باشد. در مبحث تداخل‌سنجی انتظار داریم که در صورت وجود زمین مسطح، بین دو نقطه در روی زمین که با یکدیگر اختلاف ارتفاعی وجود ندارد و به عبارت دیگر جابجایی صورت نگرفته است، اختلاف‌فازی نیز شاهد نباشیم، اما به جهت ماهیت تصویربرداری رادار با گشودگی مصنوعی (سار)^۱ و وجود فاصله بین دو نقطه، ترمی سیستماتیک وجود دارد که با استفاده از روش‌های مثلثاتی قابل مدل کردن و در نهایت قابل حذف از اختلاف فاز کل است. در اصل این مقدار از فاز به منظور دستیابی به فاز جابجایی با دقت بالاتر، باید قبل از عمل واپیچش^۲ فاز از روی فاز برآورد شده اولیه حذف گردد [۳۲ و ۳۳].

در نهایت برای حذف اثر خطای توپوگرافی از فاز برآورد شده کلی پس از حذف اثر خطای زمین مسطح از تصویر اختلاف فاز، از مدل ارتفاعی رقومی زمین استفاده می‌شود. از طرفی هر آنچه طول موج ما کوتاه‌تر باشد، برآورد تغییرات ارتفاعی با دقت بهتری انجام می‌شود. در نتیجه می‌توان اظهار داشت که طول موج در رادار نقش خط‌کشی مندرج را دارا است و به عبارت دیگر طول موج‌های کوتاه بسیار حساس‌تر نسبت به طول موج‌های بلند در تشخیص جابجایی می‌باشد [۶ و ۳۴]. سنسور ماهواره‌های X باند به دلیل طول موج کوتاه

جابجایی مورد نیاز است. به عبارت دیگر مقادیر اختلاف فاز به غیر از فاز جابجایی را باید از روی اختلاف فاز برآورد شده حذف و در نهایت با استفاده از این مقدار، میزان جابجایی در بازه زمانی مشخص رابطه (۱)

در رابطه (۱) ترم $\phi_{flat-earth}$ فاز مربوط به زمین-سطح، $\phi_{topography}$ فاز ناشی از توپوگرافی زمین، $\phi_{displacement}$ فاز ناشی از جابجایی، ϕ_{atm} فاز ناشی از اثر اتمسفر و در نهایت ϕ_{noise} فاز ناشی از عوامل مزاحم همانند خطای عدم همبستگی زمانی و خطای عدم همبستگی مکانی می‌باشد که در ترم نویز در رابطه (۱) قرار گرفته می‌شود [۶]. در واقع سطوح پوشش گیاهی در طول زمان موجب ایجاد خطای عدم همبستگی زمانی می‌شوند و دلیل این امر این است که در طول زمان پوشش گیاهی به دلیل رشد گیاه پراکندگی غالبی از خود ندارد و این پراکندگی‌ها در طول زمان رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهند که این امر موجب ایجاد خطای عدم همبستگی زمانی می‌شود. بنابراین خطای عدم همبستگی زمانی به عنوان یکی از عوامل کاهش‌دهنده دقت به حساب می‌آید. از طرفی خطای عدم همبستگی مکانی نیز در صورتی که خط مبنای مکانی بیش از حد بلند باشد به عنوان یکی دیگر از عوامل اصلی کاهش‌دهنده دقت در روش پراکنش‌گرهای دائمی تلقی می‌شود [۱۵]. طبق تحقیقات صورت‌گرفته توسط پژوهشگران حوزه تداخل‌سنجی بهتر است در مناطق پوشش گیاهی متراکم از سنسور ماهواره‌های L باند استفاده کرد [۳۱]. برای یک پراکنش‌گر مطلوب با شاخص پراکندگی دامنه مناسب، می‌توان از ترم نویز صرف‌نظر کرد. در صورتی که از اطلاعات مداری با دقت بالا استفاده شود می‌توان از ترم مربوط به خطاهای مداری نیز صرف‌نظر کرد. در انتها تنها فاز ناشی از جابجایی باقی مانده و تمام فازهای تاثیرگذار به عنوان منبع خطا از فاز برآورد شده حذف می‌شوند [۲۴]. در پژوهش حاضر به منظور

¹ Synthetic Aperture Radar

² Unwrapping

در این رابطه، p_{ij} نشان‌دهنده ارتباط میان نقطه پراکنش گر کاندید p_i و p_j ، تعداد اینترفروگرام، λ طول موج رادار، θ زاویه برخورد^۳ و R نیز فاصله هدف تا سنسور می‌باشد. ترم $\Delta\varphi_{s,k}$ مربوط به اختلاف فاز اینترفرومتریک میان دو تصویر s و k ، $B_{n,s}$ و $B_{t,s}$ خط مبنای مکانی و اینترفرومتریک نرمال می‌باشد. در نهایت جهت حل معادله مورنظر از بیشینه‌سازی مقادیر مطلق پریودوگرام با استفاده از $\Delta\tilde{v}(p_{ij})$ و $\Delta\tilde{h}(p_{ij})$ توسط رابطه (۴) استفاده می‌شود.

در واقع در این تکنیک مقدار مطلق^۴ بیشینه پریودوگرام، همبستگی زمانی^۵ نامیده می‌شود که به عنوان پارامتر درصد اطمینان پذیری^۶ برای برآوردهای صورت گرفته بر روی نقاط پراکنش گر کاندید در نظر گرفته می‌شود (رابطه (۵)).

در اصل پس از گزینش پراکنش‌گرهای کاندید با استفاده از شاخص پایداری دامنه در مرحله برآورد اثر اتمسفر بر روی کل تصویر^۷، اثر اتمسفر بر روی هر تصویر اختلاف‌فاز با استفاده از روش‌های درونیایی برآورد و در نهایت اثر برآورد شده از روی برآوردهای صورت‌گرفته بر روی پراکنش‌گرهای کاندید منتخب حذف می‌شود [۶ و ۲۹]. اتمسفر پدیده‌ای همبسته در مکان است. بنابراین اثر این پدیده با استفاده از روش درونیایی بر روی تمام تصاویر اختلاف‌فاز برآورد و حذف می‌شود. در مرحله بعد اثر اتمسفر بر روی هر پراکنش‌گر کاندید برآورد و حذف می‌شود. در نهایت پارامتر همبستگی زمانی را برای هر پراکنش‌گر کاندید محاسبه و پراکنش‌گرهای نهایی را با استفاده از اعمال مقدار مناسب برای پارامتر همبستگی زمانی و محاسبه این پارامتر برای هر پراکنش‌گر گزینش می‌کنیم [۳۸].

بسیار حساس به اتمسفر بوده و اثر این پدیده را نسبت به دیگر ماهواره‌ها با طول موج بلندتر، با دقت بالاتری برآورد می‌کنند [۳۵].

در گام بعدی به منظور برآورد و حذف اثر اتمسفر از اختلاف‌فاز برآورد شده با استفاده از شاخص پراکنش‌گر دامنه نقاطی را به عنوان پراکنش‌گر دائمی شناسایی و پارامتر سرعت جابجایی و خطای باقیمانده مدل رقومی^۱ بر روی این نقاط برآورد می‌گردد [۶].

$$\text{رابطه (۲)} \quad D_{\text{dispersion}} \cong \frac{\sigma_A}{m_A} < 0.25$$

در رابطه (۲) σ_A انحراف از معیار و m_A میانگین مقادیر پیکسل موردنظر در تصویر ضرب دامنه‌ها در بازه زمانی می‌باشد. در روش پراکنش‌گرهای دائمی نخست از تصویر دامنه جهت شناسایی نقاط پراکنش‌گر کاندید استفاده می‌شود. به عبارت دیگر نقاطی در این مرحله از پردازش، به عنوان پراکنش‌گر کاندید به منظور برآورد و حذف اثر اتمسفر گزینش می‌شوند که نقاط انتخابی دارای کیفیت سیگنال رادار مربوط به دامنه نسبتاً بالایی نسبت به سایر نقاط موجود دارا باشند [۳۶]. حال از شاخص پایداری دامنه به منظور ایجاد شبکه‌ای از پراکنش‌گرهای کاندید در مرحله برآورد و حذف اثر اتمسفر استفاده می‌کنیم. در اصل در مرحله برآورد اثر اتمسفر، اهدافی که دارای کمترین مقدار شاخص پراکنش‌گر دامنه باشند به عنوان پراکنش‌گر کاندید گزینش می‌شوند [۳۰ و ۳۷]. حال در این مرحله با استفاده از گزینش نقطه رفرنس مناسب به منظور برآورد جابجایی نقاط موجود نسبت به نقطه رفرنس، پارامترهای مجهول سرعت جابجایی و خطای مدل ارتفاعی رقومی را با استفاده از روش بیشینه‌سازی پریودوگرام^۲ بر روی اتصالات شبکه مکانی ایجاد شده بین نقاط پراکنش‌گر دائمی برآورد می‌کنیم، که معادلات ریاضی در رابطه (۳) ارائه شده است [۳۵].

³ incidence angle

⁴ Absolute value

⁵ Temporal Coherence (TC)

⁶ reliability parameter

⁷ Atmospheric Phase Screen (APS)

¹ DEM Error

² Periodogram

$$\xi[\Delta v(p_{ij}), \Delta h(p_{ij})] = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N e^{j[\Delta\varphi_{s,k}(p_{ij}) - \frac{4\pi}{\lambda}\Delta v(p_{ij})B_{r,s} - \frac{4\pi}{\lambda R \sin\theta}\Delta h(p_{ij})B_{n,s}]} \quad (۳)$$

$$\Delta \tilde{v}(p_{ij}), \Delta h(p_{ij}) = \arg \max \left\{ \left| \xi[\Delta v(p_{ij}), \Delta h(p_{ij})] \right| \right\} \quad (۴)$$

$$\xi(p_{ij}) = \left| \xi[\Delta \tilde{v}(p_{ij}), \Delta h(p_{ij})] \right| \quad (۵)$$

بادخوره با مساحتی در حدود ۹ کیلومترمربع به عنوان مناطق مطالعاتی انتخاب و مورد بررسی و تحلیل در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۱۵ میلادی قرار گرفته‌اند.

در پژوهش حاضر به عنوان مطالعه‌ای دیگر به منظور بررسی رفتار فرودنشست و تغییرات عمق چاه‌های پیژومتری از اطلاعات مربوط به تغییرات عمق چاه‌ها و فرودنشست اتفاق افتاده در منطقه استفاده گردید. اطلاعات مربوط به موقعیت مکانی چاه‌های پیژومتری موجود در منطقه مطالعاتی در جدول (۲) ارائه شده است. در این بخش نتایج سرعت جابجایی و تحلیل‌های مربوطه در سه بازه ۲۰۱۶-۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ در منطقه مطالعاتی شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور در قالب نقشه نرخ جابجایی در بازه زمانی یک ساله ارائه شده است. شکل (۴) نقشه مربوط به نرخ سرعت جابجایی مربوط به بازه ۲۰۱۶-۲۰۱۵ میلادی در گذر صعودی و نزولی را نشان می‌دهد.

در شکل (۴) نقشه‌های نرخ سرعت جابجایی در بازه زمانی یک ساله در گذر صعودی و نزولی ارائه شده است. در واقع در نقشه نرخ سرعت جابجایی میزان جابجایی در بازه زمانی یک ساله ارائه شده است. بنابراین میزان جابجایی صورت گرفته در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۱۵ دو برابر مقادیر ارائه شده در نقشه‌های نرخ سرعت جابجایی برای هر نقطه پراکنش گر دائمی می‌باشد. مطابق با نقشه‌های نرخ سرعت جابجایی، دلیل انتخاب بازه دو ساله ۲۰۱۶-۲۰۱۵ در کمبود تعداد تصاویر در بازه‌های یک ساله ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ به تنهایی می‌باشد. مطابق با جدول (۱) در بازه زمانی دو ساله ۲۰۱۶-۲۰۱۵ میلادی به تنهایی تعداد تصاویری در حدود تعداد تصاویر موجود در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸

در مرحله پایانی با استفاده از روش ادغام^۱ پارامترهای مجهول از قبیل نرخ سرعت جابجایی در جهت دید ماهواره^۲ و خطای مدل ارتفاعی رقومی با استفاده از مقادیر برآورد شده بر روی اتصالات میان نقاط، بر روی نقاط پراکنش گر کاندید برآورد می‌شود. در پایان نقاط پراکنش گر نهایی همراه با مقادیر بالا معیار همبستگی زمانی به منظور تشکیل نقشه جابجایی گزینش می‌شوند [۶].

۵- نتایج

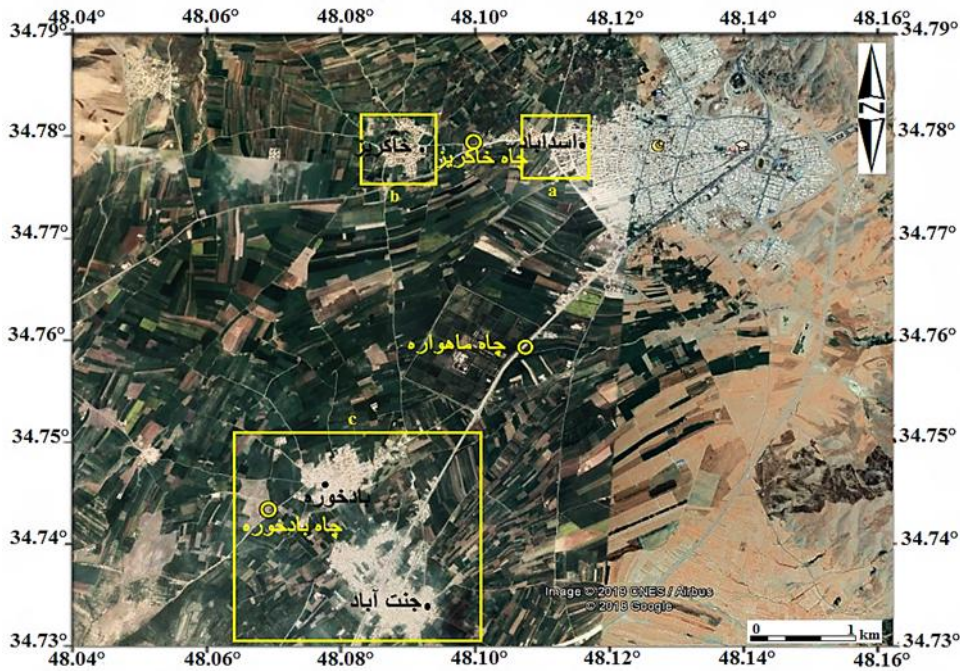
در پژوهش حاضر جهت مقایسه رفتار فرودنشست در مناطق شهری و غیر شهری از نظر میزان آسیب‌پذیری و همخوانی مدل انتخابی جهت پایش فرودنشست در منطقه موردنظر، مناطق مستعد جابجایی به سه منطقه a ، b و c تقسیم و خروجی‌های مربوط به مناطق انتخابی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۳) موقعیت جغرافیایی محدوده شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور و نیز مناطق a ، b و c نمایش داده شده است.

مطابق با شکل (۳) منطقه a مربوط به منطقه شهری شهرستان اسدآباد منتهی به دشت شمالی شهرستان با مساحتی در حدود ۱ کیلومترمربع، منطقه b مربوط به روستای خاکریز واقع در قسمت شمالی دشت اسدآباد که منطقه موردنظر دارای مساحتی در حدود یک کیلومترمربع و منطقه c نیز مربوط به قسمت میانی دشت اسدآباد شامل روستای جنت‌آباد و

¹ Integration

² Line of Sight (LOS)

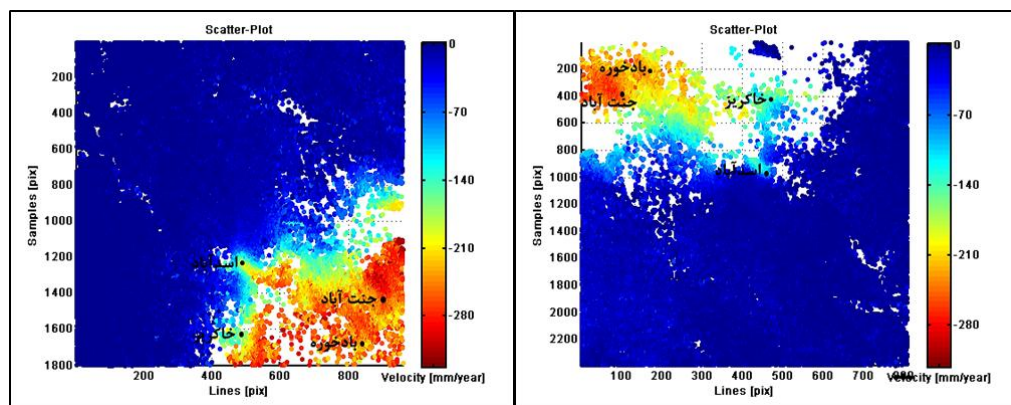
میلادی در دسترس می‌باشد



شکل ۳: موقعیت مناطق انتخابی در منطقه مورد مطالعه

جدول ۲: موقعیت چاه‌های پیژومتری موجود در منطقه مطالعاتی

عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	چاه پیژومتری
34°44'22"N	48°4'19"E	بادخوره
34°46'59"N	48°5'35"E	خاکریز
34°45'32"N	48°6'10"E	ماهواره



شکل ۴: نقشه نرخ سرعت جابجایی مربوط به بازه ۲۰۱۶-۲۰۱۵ میلادی در گذر صعودی (راست) و نزولی (چپ)

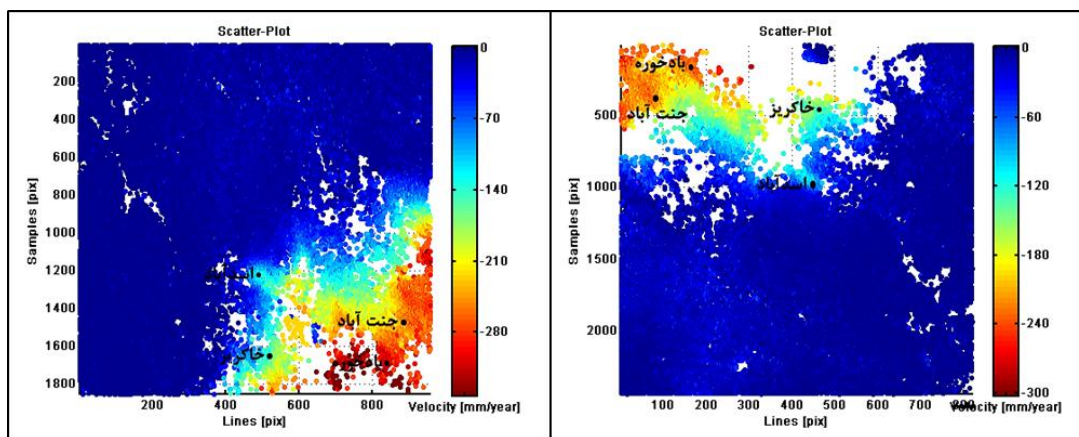
در فرمت تصویربرداری راداری (سار)

۲۰۱۸ میلادی در گذر صعودی و نزولی نمایش داده شده است.

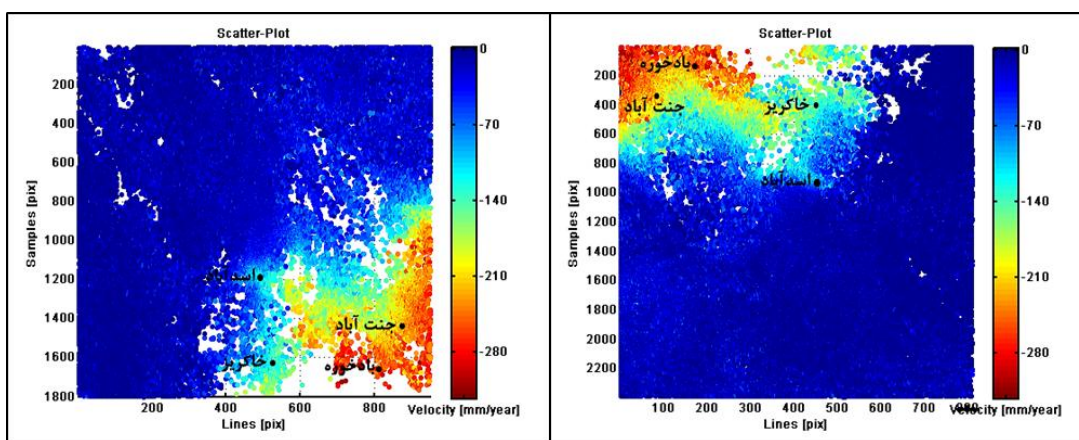
در شکل (۵) و شکل (۶) به ترتیب نقشه مربوط به نرخ سرعت جابجایی مربوط به سال ۲۰۱۷ و سال

اطراف روستای جنت آباد و بادخوره (محدوده منطقه c) در سه بازه زمانی مطالعاتی ۲۰۱۶-۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ میلادی می باشد.

در حالت کلی مطابق با نقشه های جابجایی ارائه شده در شکل های (۴)، (۵) و (۶) می توان اظهار داشت که بیشترین فرونشست صورت گرفته مطابق با برآورد میانگین جابجایی نقاط پراکنش گر موجود در مناطق



شکل ۵: نقشه نرخ سرعت جابجایی در بازه ۲۰۱۷ میلادی در گذر صعودی (راست) و نزولی (چپ) در فرمت تصویربرداری راداری (سار)

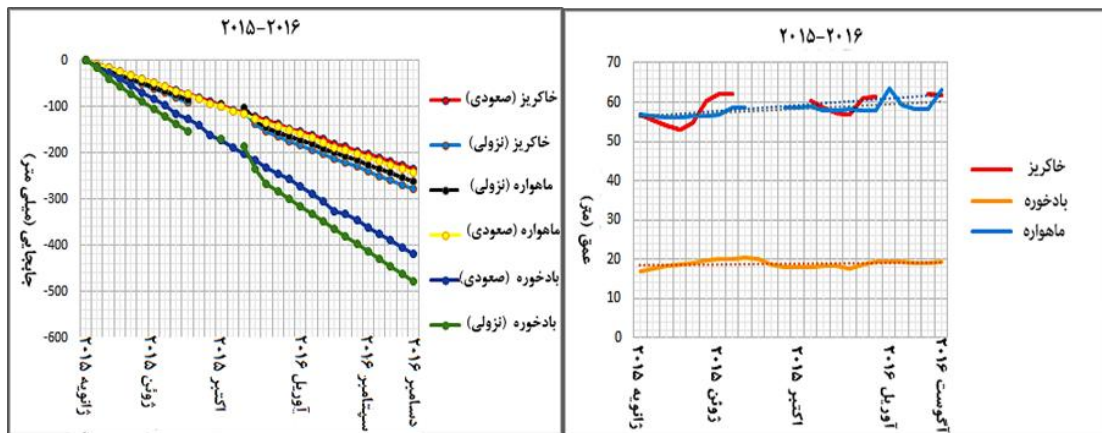


شکل ۶: نقشه نرخ سرعت جابجایی در بازه ۲۰۱۸ میلادی در گذر صعودی (راست) و نزولی (چپ) در فرمت تصویربرداری راداری (سار)

پراکنش گر موجود در محدوده اطراف چاه های پیزومتری در بازه زمانی مطالعاتی، استفاده شده است. نمودار مربوط به عمق چاه های پیزومتری و نیز جابجایی نقاط اطراف چاهها بر اثر فرونشست در بازه ۲۰۱۶-۲۰۱۵ در شکل (۷) نشان داده شده است.

۵-۱- مقایسه رفتار فرونشست در منطقه با رفتار عمق چاه های پیزومتری

در پژوهش حاضر به منظور بررسی رابطه میان رفتار فرونشست صورت گرفته در منطقه و عمق چاه های پیزومتری موجود، از تحلیل رابطه میان عمق چاه های پیزومتری و میانگین جابجایی برآورد شده بر روی نقاط



شکل ۷: نمودارهای مربوط به عمق چاه‌های پیزومتري و جابجایی در بازه ۲۰۱۵-۲۰۱۶ میلادی

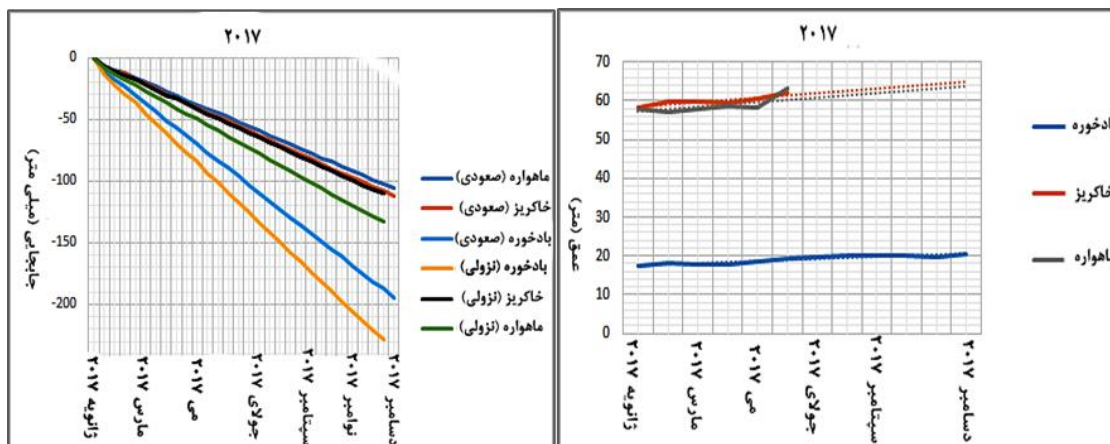
میلادی ایجاد شده است. در چاه خاکریز نیز در بازه زمانی دو ساله افزایش عمقی در حدود ۴ متر مشاهده می‌گردد. از طرفی در چاه ماهواره نیز افزایش عمقی در حدود ۴ متر در بازه موردنظر وجود دارد. از طرفی مطابق با نتایج مربوط به میانگین جابجایی اطراف چاه‌های پیزومتري، فرونشست صورت گرفته در بازه ۲۰۱۵-۲۰۱۶ میلادی به صورت خطی می‌باشد. نمودار مربوط به عمق چاه‌های پیزومتري و نیز جابجایی نقاط اطراف چاهها بر اثر فرونشست در سال ۲۰۱۷ میلادی در شکل (۸) نمایش داده شده است.

نمودارهای موجود در شکل (۸) نشان‌دهنده تغییرات عمق چاه‌های پیزومتري موجود در منطقه و رفتار نقاط پراکنش‌گر موجود در اطراف چاه‌های موجود در منطقه در بازه زمانی سال ۲۰۱۷ میلادی می‌باشند. در واقع نمودارهای مربوط به عمق چاه‌های پیزومتري در شکل (۸) در بازه زمانی یک ساله ۲۰۱۷ میلادی برای چاه بادخوره نشان‌دهنده افزایش عمقی در حدود ۲ متر است. از طرفی در چاه خاکریز نیز در بازه زمانی شش ماهه از ابتدای ژانویه ۲۰۱۷ تا انتهای ژوئن ۲۰۱۷ میلادی افزایش عمقی در حدود ۴ متر اتفاق افتاده است. اطلاعات مربوط به تغییرات عمق چاه‌های پیزومتري در چاه ماهواره نشان‌دهنده افزایش عمقی در حدود ۵ متر در بازه زمانی شش ماهه می‌باشد. نتایج

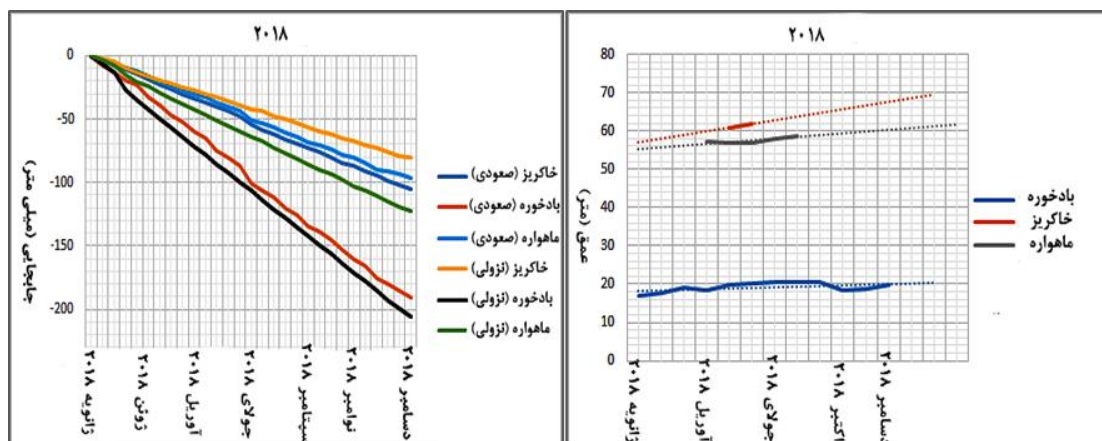
شکل (۷) نشان‌دهنده میزان تغییرات عمق چاه‌های پیزومتري و جابجایی مربوط به نقاط پراکنش‌گر اطراف چاه‌های موجود در منطقه را در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۱۵ میلادی می‌باشد. در شکل (۷) در نمودار سمت چپ محور افقی نشان‌دهنده زمان و محور عمودی نیز نشان‌دهنده میزان جابجایی در بازه زمانی موردنظر می‌باشد. نمودار جابجایی نشان‌دهنده افزایش میزان جابجایی در جهت دید ماهواره به صورت فرونشست می‌باشد. در نمودار سمت راست نیز محور افقی نشان‌دهنده زمان و محور عمودی نشان‌دهنده تغییرات عمق چاه‌های پیزومتري در بازه زمانی مطالعاتی می‌باشد. در نمودارهای مربوطه رفتار نقاط پراکنش‌گر دائمی اطراف چاه‌های پیزومتري موجود در منطقه و رفتار عمق چاه‌های موردنظر در بازه زمانی مطالعاتی ارائه شده است. مطابق با داده‌های اخذ شده از اداره آب منطقه‌ای استان همدان در نمودار مربوط به عمق چاه‌های پیزومتري دلیل عدم یکپارچگی نمودار مربوط به عمق چاه‌های پیزومتري در نبود اطلاعات عمق به دلیل خشکی چاه و یا عدم اندازه‌گیری توسط اداره مربوطه در زمان‌های خالی از اطلاعات می‌باشد. مطابق با نمودارهای ارائه شده در شکل (۷) در چاه بادخوره افزایش عمقی در حدود ۲ متر را طبق اطلاعات دریافتی از اداره آب منطقه‌ای استان همدان در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۱۵

شکل (۹) نمودار مربوط به عمق چاههای پیزومتری و نیز جابجایی نقاط اطراف چاهها بر اثر فرونشست در سال ۲۰۱۸ را نشان می دهد.

مربوط به میانگین جابجایی مربوط به سال ۲۰۱۷ میلادی نیز نشان دهنده فرونشستی خطی در هر دو گذر سعودی و نزولی می باشد.



شکل ۸: نمودارهای مربوط به عمق چاههای پیزومتری و جابجایی در بازه ۲۰۱۷ میلادی



شکل ۹: نمودارهای مربوط به عمق چاههای پیزومتری و جابجایی در بازه ۲۰۱۸ میلادی

است. اطلاعات مربوط به تغییرات عمق چاه ماهواره نیز در بازه زمانی پنج ماهه ابتدای آوریل ۲۰۱۸ میلادی تا انتهای آگوست ۲۰۱۸ میلادی نشان دهنده افزایش عمقی در حدود ۱/۵ متر می باشد.

مطابق با نمودارهای جابجایی ارائه شده در شکل های (۷)، (۸) و (۹) می توان اظهار داشت که در حالت کلی رفتار فرونشست با توجه به میانگین جابجایی صورت گرفته مربوط به نقاط پراکنش گر اطراف چاههای پیزومتری موجود در منطقه، همراه با تغییرات

نمودارهای موجود در شکل (۹) نشان دهنده تغییرات عمق چاههای پیزومتری موجود در منطقه و رفتار نقاط پراکنش گر موجود در اطراف چاهها در بازه زمانی مطالعاتی می باشند. در اصل بر طبق نمودارهای ارائه شده در شکل (۹) در بازه زمانی یک ساله در چاه بادخوره افزایش عمقی در حدود ۳ متر مشاهده می شود. از طرفی در چاه خاکریز نیز در بازه زمانی دو ماهه از ابتدای می ۲۰۱۸ میلادی تا انتهای ژوئن ۲۰۱۸ میلادی افزایش عمقی در حدود ۲ متر صورت گرفته

شده است.

در مطالعه حاضر از بررسی رابطه میان پارامتر میانگین همبستگی زمانی نقاط پراکنش‌گر و تعداد نقاط انتخابی در محدوده‌های انتخابی، جهت بررسی همخوانی مدل انتخابی با منطقه مطالعاتی از تحلیل پارامترهای موردنظر در قالب هیستوگرام از اطلاعات ارائه شده در جدول (۳) استفاده شده است. در هیستوگرام‌های ارائه شده در شکل (۱۰) تعداد نقاط پراکنش‌گر موجود در مناطق انتخابی همراه با میانگین همبستگی زمانی نقاط موردنظر ارائه شده است.

از طرفی مطابق با هیستوگرام‌های ارائه شده در شکل (۱۰) می‌توان اظهار داشت که منطقه a با مساحتی در حدود ۱ کیلومتر مربع دارای تعداد نقاط پراکنش‌گر بیشتر همراه با متوسط میانگین همبستگی زمانی ۰٫۸۳ در هر سه بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۱۵، ۲۰۱۷-۲۰۱۸ و ۲۰۱۸ میلادی نسبت به مناطق b و c می‌باشد. از طرفی مناطق b و c که به ترتیب دارای مساحتی در حدود ۱ و ۹ کیلومتر مربع می‌باشند و این در حالی است که در منطقه b همراه با مساحتی یکسان با منطقه a و منطقه c با مساحت ۹ برابر منطقه a ، تعداد نقاط پراکنش‌گر کمتری نسبت به منطقه a دارند. در منطقه a نیز پوشش غالب، منطقه متراکم شهری می‌باشد. این در حالی است که منطقه b نسبت به منطقه a با مساحتی مشابه درصد کمتری از پوشش منطقه شهری را دارا می‌باشد و منطقه c نیز حتی با داشتن مساحتی بالغ بر ۹ کیلومتر مربع تنها در حدود نیمی از منطقه متراکم شهری و نیمی دیگر از دشت پوشیده است. در واقع طبق مقادیر ارائه شده در بخش فوق می‌توان اظهار داشت که روش پراکنش‌گرهای دائمی در منطقه a به دلیل تراکم بالای منطقه شهری، تعداد نقاط پراکنش‌گر دائمی بیشتری را همراه با میانگین همبستگی زمانی بالا نسبت به منطقه c در نظر گرفته است. در حالت کلی مطابق با تحلیل‌های صورت‌گرفته می‌توان اظهار داشت که روش پراکنش‌گرهای دائمی در مناطق شهری به دلیل وجود ثبات

افزایشی عمق چاه‌های موردنظر در بازه زمانی مطالعاتی، به صورت خطی می‌باشد.

در مطالعه انجام شده هدف از ارائه نمودارهای مربوط به تغییرات عمق چاه‌های پیژومتری و جابجایی مربوط به نقاط پراکنش‌گر اطراف چاه‌های موردنظر، صرفاً جهت نمایش همبستگی میان رفتار افزایشی فرونشست همراه با رفتار افزایشی تغییرات عمق چاه-های پیژومتری موجود در منطقه در بازه زمانی مطالعاتی می‌باشد. بنابراین از رابطه مستقیم میان افزایش فرونشست و افزایش عمق چاه‌های پیژومتری موجود در منطقه می‌توان نتیجه گرفت که یکی از عوامل اصلی فرونشست زمین در شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور افزایش بی‌رویه برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی به خصوص در بخش مصارف کشاورزی می‌باشد. بنابر نتایج فوق می‌توان اظهار داشت که برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی موجب تراکم سطوح زیرین زمین و در نهایت وقوع پدیده فرونشست در بازه زمانی می‌شود. در حال حاضر روش کوتاه مدتی جهت کاهش اثرات ناشی از فرونشست زمین وجود ندارد و عملاً روش‌های بلندمدتی از جمله اصلاح الگوی مصرف در نظارت بر برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی نسبت به روش‌های کوتاه‌مدت کارایی بیشتری را دارا هستند.

۵-۲- بررسی سازگاری روش پراکنش‌گرهای دائمی در مناطق شهری و غیرشهری

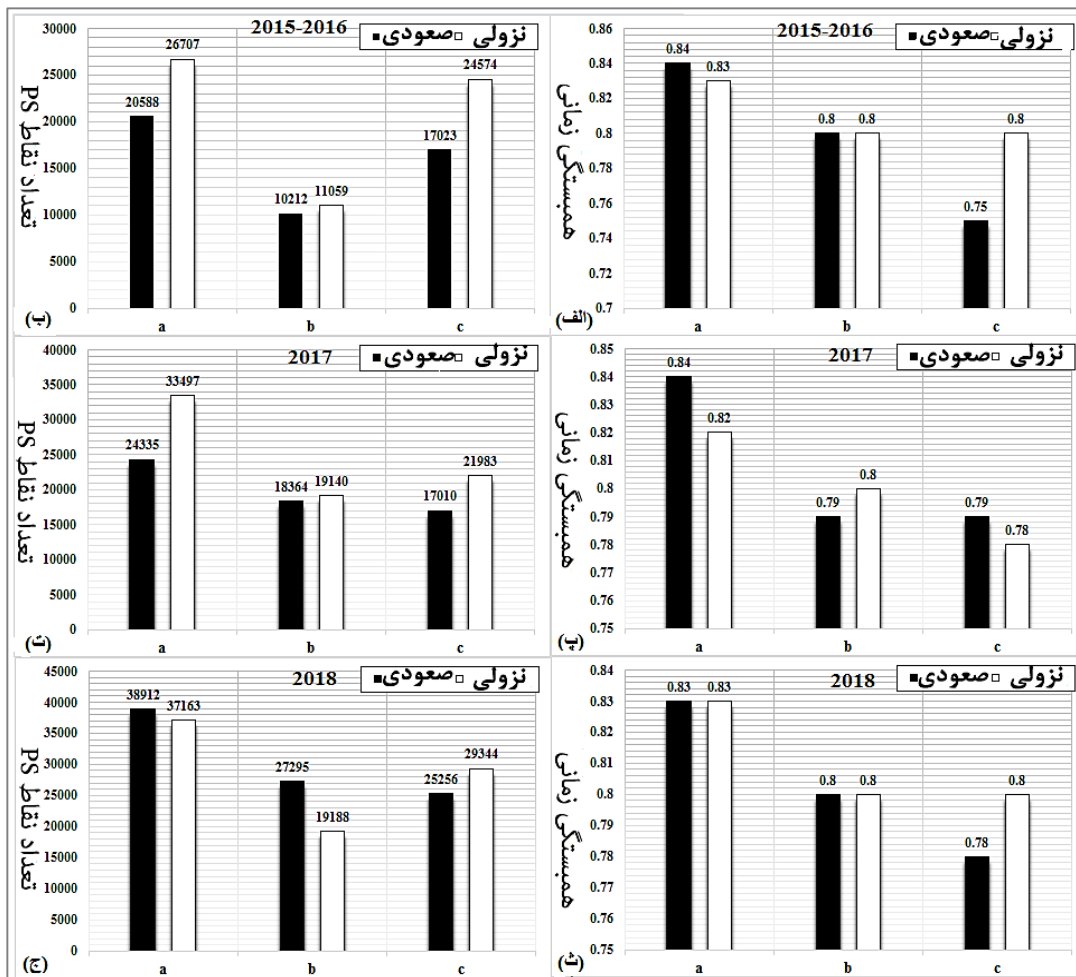
در مطالعه حاضر جهت بررسی سازگاری روش پراکنش‌گرهای دائمی در مناطق شهری و مناطق مختلط شامل مناطق شهری و غیرشهری از مناطق منتخب a ، b و c و در این مناطق از تحلیل میان پارامتر میانگین همبستگی زمانی و تعداد نقاط پراکنش‌گر در مناطق منتخب استفاده شده است. در جدول (۳) اطلاعات مربوط به میانگین جابجایی، تعداد نقاط پراکنش‌گر دائمی و میانگین همبستگی زمانی برای مناطق انتخابی در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۱۵ ارائه

۳۸۰۰۰ پراکنش گر همراه با متوسط همبستگی زمانی ۰/۸۳ و در منطقه b نیز به صورت میانگین در بین گذر صعودی و نزولی تعداد ۲۴۵۰۰ پراکنش گر با متوسط همبستگی زمانی ۰/۸ و در منطقه c نیز به صورت میانگین تعداد ۲۷۰۰۰ پراکنش گر با متوسط همبستگی زمانی میان دو گذر صعودی و نزولی ۰/۷۹ در سال ۲۰۱۸ میلادی موجود می باشد.

اهداف موجود در منطقه در طول زمان، به منظور مدلسازی رفتار سیگنال رادار برای اهداف موردنظر به عنوان نقاط پراکنش گر دائمی همراه با میانگین همبستگی زمانی به مراتب بالاتر نسبت به اهداف موجود در مناطق غیر شهری، خروجی مطلوبی را به همراه دارد. برای مثال مطابق با هیستوگرام‌های ارائه شده در شکل (۱۰-ث) و (۱۰-ج) در منطقه انتخابی a به صورت میانگین در بین گذر صعودی و نزولی تعداد

جدول ۳: مقادیر مربوط به زیر مناطق انتخابی a و b و c در سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ میلادی

منطقه	سال	حالت مداری	میانگین جابجایی (میلی متر)	تعداد نقاط پراکنش گر دائمی	میانگین همبستگی زمانی
a	۲۰۱۵	صعودی	-۱۰۹,۳۷	۲۰۵۸۸	۰,۸۴
	۲۰۱۶		-۶۳,۸۵	۲۴۳۳۵	۰,۸۴
	۲۰۱۷		-۶۵,۹۷	۳۸۹۱۲	۰,۸۴
	۲۰۱۸	نزولی	-۸۵,۰۳	۲۶۷۰۷	۰,۸۳
	۲۰۱۵		-۸۲,۹۹	۳۳۴۹۷	۰,۸۲
	۲۰۱۶		-۷۳,۷۸	۳۷۱۶۳	۰,۸۳
b	۲۰۱۷	صعودی	-۱۸۸,۸۳	۱۰۲۱۲	۰,۸۰
	۲۰۱۸		-۱۳۳,۹۶	۱۸۳۶۴	۰,۷۹
	۲۰۱۵		-۱۲۳,۰۹	۲۷۲۹۵	۰,۸۰
	۲۰۱۶	نزولی	-۱۸۵,۰۶	۱۱۰۵۹	۰,۸۰
	۲۰۱۷		-۱۴۶,۷۲	۱۹۱۴۰	۰,۸۰
	۲۰۱۸		-۱۰۹,۱۴	۱۹۱۸۸	۰,۸۰
c	۲۰۱۵	صعودی	-۴۳۱,۰۱	۷۰۲۳	۰,۷۵
	۲۰۱۶		-۱۹۶,۷۶	۱۷۰۱۰	۰,۷۹
	۲۰۱۷		-۱۹۳,۹۱	۲۵۲۵۶	۰,۷۸
	۲۰۱۸	نزولی	-۴۹۰,۱۳	۲۴۵۷۴	۰,۸۰
	۲۰۱۵		-۲۲۸,۶۵	۲۱۹۸۳	۰,۷۸
	۲۰۱۶		-۲۰۵,۱۳	۲۹۳۴۴	۰,۸۰



شکل ۱۰: هیستوگرام‌های مربوط به تعداد نقاط پراکنش گر (ب، ت و ج) و میانگین همبستگی زمانی (الف، پ و ث) در مناطق *a* و *b* و *c*

۳-۵- بررسی میزان فرونشست در مناطق مختلف برای بازه‌های زمانی متفاوت

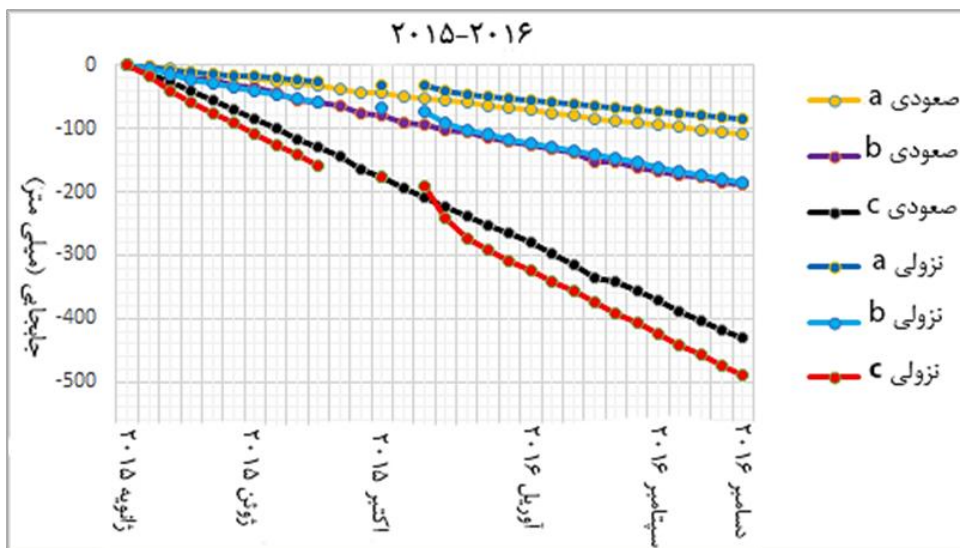
در پژوهش حاضر جهت بررسی رفتار پیشروی فرونشست از منطقه متراکم شهری به طرف مناطق شهری محصور در دشت، از تحلیل و بررسی فرونشست در قالب نمودار در سه زیر منطقه انتخابی *a*، *b* و *c* در بازه زمانی مطالعاتی و مقایسه میانگین جابجایی در گذر صعودی و نزولی برای مناطق انتخابی استفاده شده است. در ضمن در نمودارهای ارائه شده در شکل (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) میزان جابجایی به صورت میانگین برای نقاط پراکنش گر موجود در محدوده مناطق انتخابی در

قالب نمودار ارائه شده است. مطابق با شکل (۱۱) در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۱۵ میلادی در منطقه *a* به صورت میانگین در بین گذر صعودی و نزولی فرونشستی معادل با ۹۵ میلی متر و در منطقه *b* نیز به صورت میانگین در بین گذر صعودی و نزولی فرونشستی معادل با ۱۸۵ میلی متر و در منطقه *c* در بازه زمانی موردنظر فرونشستی به صورت میانگین در بین گذر صعودی و نزولی معادل با ۴۵۰ میلی متر اتفاق افتاده است.

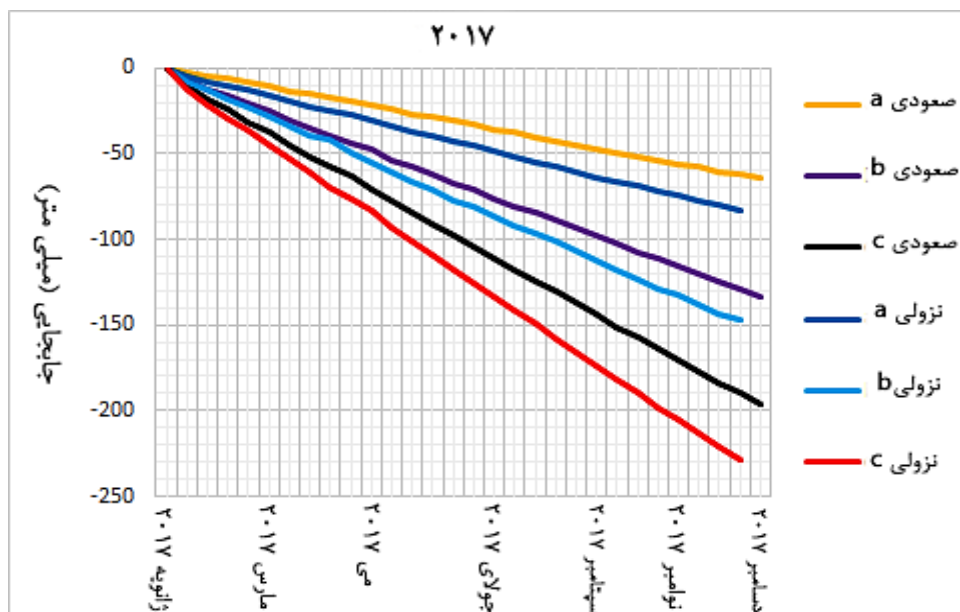
با توجه به شکل (۱۲) در بازه زمانی سال ۲۰۱۷ میلادی نیز منطقه *a* به صورت میانگین برای گذر صعودی و نزولی نیز فرونشستی معادل با ۷۵ میلی متر

صورت گرفته در منطقه c که ترکیبی از منطقه شهری و دشت می باشد به مراتب بیشتر از فرونشست صورت گرفته در مناطق شهری است.

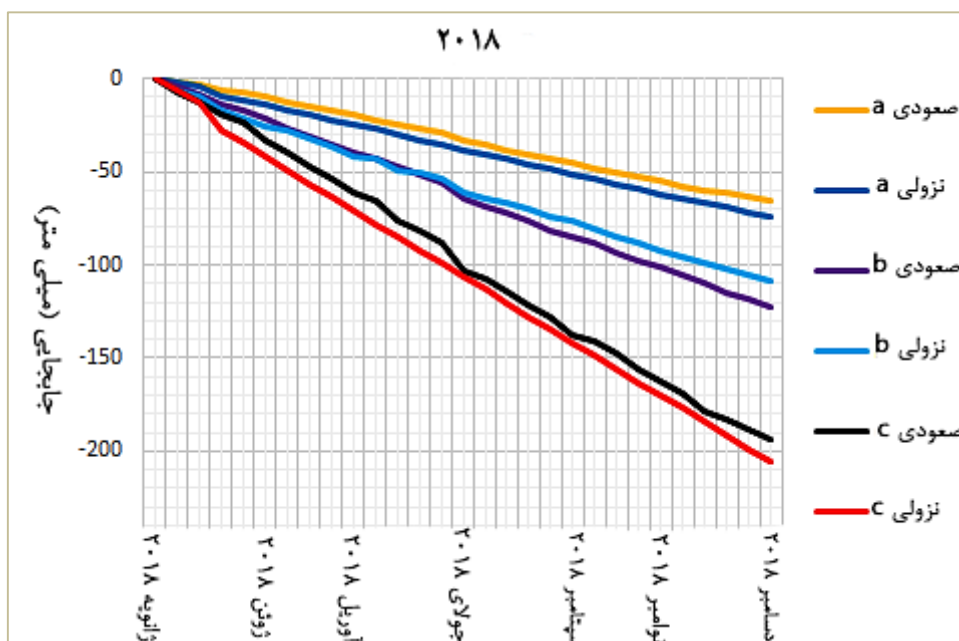
و برای منطقه b نیز به صورت میانگین در بین گذر صعودی و نزولی فرونشستی معادل با ۱۴۰ میلی متر و منطقه c نیز فرونشستی به صورت میانگین در بین گذر صعودی و نزولی معادل با ۲۱۰ میلی متر را در بازه یک ساله اتفاق افتاده است. طبق شکل (۱۲) فرونشست



شکل ۱۱: نمودار میانگین جابجایی نقاط پراکنش گر موجود در مناطق منتخب a و b و c در بازه ۲۰۱۵-۲۰۱۶ میلادی



شکل ۱۲: نمودار میانگین جابجایی نقاط پراکنش گر موجود در مناطق منتخب a و b و c در بازه ۲۰۱۷ میلادی



شکل ۱۳: نمودار میانگین جابجایی نقاط پراکنش‌گر موجود در مناطق منتخب *a* و *b* و *c* در بازه ۲۰۱۸ میلادی

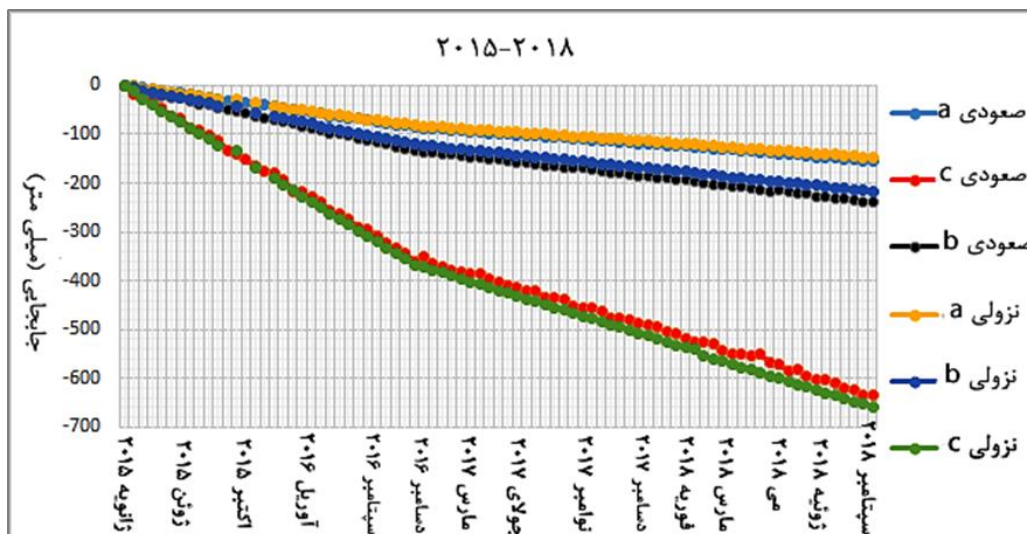
فرونشست بیشتر گریبان‌گیر مناطق محصور و یا منتهی به دشت‌های آسیب دیده می‌باشد. مطابق با تحلیل‌های صورت گرفته می‌توان اظهار داشت که در بخش آسیب‌پذیری، مناطق محصور در دشت خسارات بسیار بیشتری را از اثرات نامطلوب پدیده فرونشست متحمل می‌شوند.

۴-۵- بررسی میزان فرونشست در مناطق مختلف برای بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۱۸

در پژوهش حاضر جهت تمایز بهتر مدل‌سازی رفتار خطی فرونشست در بازه‌های زمانی متفاوت، از بررسی رفتار خطی فرونشست در بازه‌های زمانی یک ساله و دو ساله با رفتار فرونشست در بازه زمانی چهار ساله استفاده شده است. در شکل (۱۴) نمودار مربوط به میانگین جابجایی نقاط پراکنش‌گر موجود در مناطق منتخب *a*، *b*، *c* در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۱۸ میلادی ارائه شده است.

بعلاوه همان‌طور که در شکل (۱۳) ملاحظه می‌شود در بازه زمانی سال ۲۰۱۸ میلادی در منطقه *a* به صورت میانگین در بین گذر صعودی و نزولی فرونشستی معادل با ۷۰ میلی‌متر و برای منطقه *b* به صورت میانگین در بین گذر صعودی و نزولی فرونشستی معادل با ۱۱۵ میلی‌متر و منطقه *c* نیز به صورت میانگین در بین گذر صعودی و نزولی فرونشستی معادل با ۲۰۰ میلی‌متر را در بازه یک ساله اتفاق افتاده است. در واقع طبق نمودارهای موجود در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) می‌توان عنوان کرد که فرونشست صورت گرفته در بازه‌های زمانی ۲۰۱۶-۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ دارای رفتاری خطی می‌باشد.

بنابراین مطابق با نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) می‌توان اظهار داشت که در بین مناطق مشخص شده، منطقه *c* به دلیل قرارگیری در دشت بیشترین میزان فرونشست را نسبت به مناطق *a* و *b* دارا است. در واقع اثرات نامطلوب برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی به صورت



شکل ۱۴: میانگین جابجایی مربوط به نقاط پراکنش گر موجود در مناطق منتخب a و b و c در بازه ۲۰۱۵-۲۰۱۸ میلادی

می‌توان اظهار داشت که فرض مدل خطی با پایش فرونشست در بازه زمانی چند ساله مطابقت نداشته و فرونشست برآورد شده در بازه زمانی چند ساله بسیار کمتر از مقدار واقعی فرونشست با فرض مدل خطی می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

فعالیت‌های پژوهش حاضر سعی در پایش جابجایی‌های صورت‌گرفته در شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور را با استفاده از روش پراکنش‌گرهای دائمی داشته است. مطابق با نتایج ارائه شده می‌توان اظهار داشت که فرض مدل خطی با پایش فرونشست صورت‌گرفته در بازه زمانی چند ساله مطابقت نداشته و فرونشست برآورد شده در بازه زمانی چند ساله بسیار کمتر از مقدار واقعی فرونشست برآورد شده در بازه‌های زمانی کوتاه تر با فرض مدل خطی می‌باشد. داده‌های مورد استفاده تصاویر ماهواره سنتینل می‌باشد. در اصل مطابق با اطلاعات عمق چاه‌های پیژومتری موجود در منطقه می‌توان اظهار داشت که فرونشست صورت‌گرفته در شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی در بازه زمانی مطالعاتی می‌باشد. مطابق با نقشه‌های جابجایی می‌توان اظهار داشت که جهت پیشروی فرونشست

در شکل (۱۴) نمودارهای مربوط به جابجایی در بازه زمانی ابتدای ماه ژانویه ۲۰۱۵ تا انتهای ماه سپتامبر ۲۰۱۸ میلادی برای مناطق منتخب a و b و c ارائه شده است. مطابق با نمودارهای ارائه شده در شکل (۱۴) در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۱۸ میلادی در منطقه a به صورت میانگین در میان گذر صعودی و نزولی فرونشستی معادل با ۶۵ میلی‌متر و در منطقه b نیز به صورت میانگین در میان گذر صعودی و نزولی فرونشستی معادل با ۱۱۰ میلی‌متر و در منطقه c در بازه زمانی موردنظر فرونشستی به صورت میانگین در میان گذر صعودی و نزولی معادل با ۳۸۵ میلی‌متر اتفاق افتاده است. برای مثال در مدل‌سازی رفتار فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۱۶ میلادی طبق نمودار موجود در شکل (۱۱) در منطقه a به صورت میانگین در بین گذر صعودی و نزولی فرونشستی، نشان‌دهنده فرونشستی معادل با ۹۵ میلی‌متر، در منطقه b نیز به صورت میانگین در بین گذر صعودی و نزولی فرونشستی معادل با ۱۸۵ میلی‌متر و در منطقه c نیز فرونشستی معادل با ۴۵۰ میلی‌متر به صورت میانگین در میان گذر صعودی و نزولی در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۱۶ می‌باشد.

در نهایت، در حالت کلی مطابق با نتایج ارائه شده

نقاط پراکنش‌گر موجود در منطقه روستای بادخور و جنت‌آباد (مطابق با شکل ۳) محدوده منطقه c، فرونشستی در حدود ۸۴۰ میلی‌متر در بازه زمانی چهار-ساله ۲۰۱۵-۲۰۱۸ میلادی (نرخ فرونشستی در حدود ۲۰۰-۲۲۰ میلی‌متر در سال) صورت گرفته است. در حالت کلی نیز باید اظهار داشت که داده‌های رادار در سنجش از دور خروجی‌های مطلوبی را از نظر رفتار و وسعت مکانی فرونشست در بازه زمانی مشخص به ما ارائه می‌کنند. پیشنهاد می‌شود فرونشست صورت گرفته در شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور با استفاده از روش خط مبنای مکانی کوتاه نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج روش موردنظر با روش پراکنش‌گرهای دائمی مقایسه و تحلیل شود.

زمین در بازه زمانی مورد مطالعه از جهت غرب شهرستان اسدآباد به سمت منطقه شهری صورت گرفته است. از طرفی می‌توان اظهار داشت که میزان فرونشست صورت گرفته در دشت به مراتب بیشتر از فرونشست صورت گرفته در مناطق شهری می‌باشد. مطابق با نتایج ارائه شده می‌توان عنوان کرد که روش پراکنش‌گرهای دائمی در مناطق شهری به دلیل وجود ثبات اهداف موجود در منطقه در طول زمان، به منظور مدل‌سازی رفتار سیگنال رادار برای اهداف موردنظر به عنوان نقاط پراکنش‌گر دائمی همراه با میانگین همبستگی زمانی به مراتب بالاتر نسبت به اهداف موجود در مناطق غیر شهری، خروجی مطلوبی را ارائه می‌کند. جابجایی‌های صورت گرفته در منطقه موردنظر نیز حاکی از آن است که با توجه به میانگین جابجایی

مراجع

- [1] H. Yue, R. Hanssen, F. Van Leijen, P. Marinkovic, and G. Ketelaar, "Land subsidence monitoring in city area by time series interferometric SAR data" *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'05. Proceedings, Vol. 7*, pp. 4590-4592, 2005.
- [2] T. Wang, D. Kimberly, L. Zhong, T. F. Jeffrey. "Complex surface deformation of Akutan volcano, Alaska revealed from InSAR time series", *International journal of applied earth observation and geoinformation*, Vol. 64, pp. 171-180, 2018.
- [3] C. Yoo, L. Dongyeob, "Deep excavation-induced ground surface movement characteristics—A numerical investigation." *Computers and Geotechnics*, Vol. 35(2), pp. 231-252, 2008
- [4] H. Akcin, H. Kutoglu, T. Deguchi, E. Koksak, "Monitoring subsidence effects in the urban area of Zonguldak Hardcoal Basin of Turkey by InSAR-GIS integration", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10(9), pp. 1807, 2010.
- [5] A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca, "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry", *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 38. 5, pp. 2202-2212, 2000.
- [6] A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry", *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 39(1), pp. 8-20, 2001.
- [7] M.L. Velez, P. Euillades, A. Caselli, M. Blanco, J.M. Díaz, "Deformation of Copahue volcano: Inversion of InSAR data using a genetic algorithm", *Journal of Volcanology and geothermal research*, Vol. 202(1-2), pp. 117-26, 2011.
- [8] L.M Wallace, P. Barnes, J. Beavan, R. Van Dissen, N. Litchfield, J. Mountjoy, R. Langridge, G. Lamarche, N. Pondard. "The kinematics of a transition from subduction to strike-slip: An example from the central New Zealand plate boundary", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 117, B2, 2012.
- [9] M. Crosetto, J.A. Gili, O. Monserrat, M. Cuevas-González, J. Corominas, D. Serral,

- "Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 13(4), pp. 923-33, 2013.
- [10] C. Colesanti, and J. Wasowski, "Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry.", *Engineering geology*, Vol. 88 (3-4), pp. 173-199, 2006.
- [11] D. Perissin, F. Rocca "High-accuracy urban DEM using permanent scatterers," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 44 (11), pp. 3338-3347, 2006.
- [12] A. Monti-Guarnieri, F. Parizzi, P. Pasquali, C.L. Prati, F. Rocca, "SAR interferometry experiments with ERS-1," *Proceedings of IGARSS'93-IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 991-993, 1993.
- [13] M. Motagh, Y. Djamour, T.R. Walter, H.U. Wetzell, J. Zschau, S. Arabi. "Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS," *Geophysical Journal International*, Vol. 168 (2), pp. 518-526, 2007.
- [14] A.I. Calderhead, R. Therrien, A. Rivera, R. Martel, J. Garfias "Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico" *Advances in Water Resources*, Vol. 34 (1), pp. 83-97, 2011.
- [15] H.A. Zebker, J. Villasenor, "Decorrelation in interferometric radar echoes," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* Vol. 30(5), pp. 950-959, 1992.
- [16] R. Goldstein, "Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry.", *Geophysical research letters*, Vol. 22(18), pp. 2517-2520, 1995.
- [17] H.A. Zebker, P.A. Rosen, S. Hensley, "Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps" *Journal of geophysical research: solid earth*, Vol. 102(B4), pp. 7547-7563, 1997.
- [18] Y. Maghsoudi, F. van der Meer, C. Hecker, D. Perissin, A. Saepuloh, "Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia," *International journal of applied earth observation and geoinformation*, Vol 64, pp. 386-396, 2018.
- [19] M. Sharifikia, "Evaluation of land subsidence related disasters in plains and residential areas of Iran," *Iranian Association of Engineering Geology* Vol 3 (3), pp. 43-58, 2010.
- [20] A. Shemshaki, M. Blourchi, F. Ansari, "Earth subsidence review at Tehran plain-Shahriar first report," , 2005.
- [21] M. Haghshenas-Haghighi, M. Motagh, and M. Esmaili, "continuous compaction of aquifer system in Tehran ,Iran, as evidenced by C-band, L-band and X-band radar measurements," in *The 5th TerraSAR-X Science Team Meeting*, 2013.
- [22] M. Deghani, M.J.V. Zoj, I. Entezam, S. Saatchi, A. Shemshaki, "Interferometric measurements of ground surface subsidence induced by overexploitation of groundwater," *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 4(1), 041864, 2010.
- [23] M. Deghani, M.J.V. Zoj, A. Hooper, R.F. Hanssen, I. Entezam, S. Saatchi, "Hybrid conventional and persistent scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin, Iran," *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, Vol. 79, pp. 157-170, 2013.
- [24] P.Y. Declercq, P. Gerard, E. Pirard, D. Perissin, J. Walstra, X. Devleeschouwer, "Subsidence related to groundwater pumping for breweries in Merchtem area (Belgium), highlighted by Persistent Scatterer Interferometry," *International journal of applied earth observation and geoinformation*, Vol. 63, pp. 178-185, 2017.
- [25] A. Ciampalini, F. Bardi, S. Bianchini, W. Frodella, C. Del Ventisette, S. Moretti, N.

- Casagli, "Analysis of building deformation in landslide area using multisensor PSInSAR™ technique," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 33, pp. 166-180, 2014.
- [26] C. Yang, Z. Lu, Q. Zhang, C. Zhao, J. Peng, L. Ji, "Deformation at Longyao ground fissure and its surroundings, north China plain, revealed by ALOS PALSAR PS-InSAR," *International journal of applied earth observation and geoinformation*, Vol. 67, pp. 1-9, 2018.
- [27] M. Motagh, R. Shamshiri, M.H. Haghighi, H.U. Wetzel, B. Akbari, H. Nahavandchi, S. Roessner, S. Arabi, "Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjani plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements," *Engineering geology*, Vol. 218, pp. 134-151, 2017.
- [28] F. Foroughnia, S. Nemati, Y. Maghsoudi, D. Perissin, "An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation," *International Journal Of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 74, pp. 248-258, 2019.
- [29] J.J. Sousa, A.M. Ruiz, R.F. Hanssen, L. Bastos, A.J. Gil, J. Galindo-Zaldívar, C.S. de Galdeano, "PS-InSAR processing methodologies in the detection of field surface deformation—Study of the Granada basin (Central Betic Cordilleras, southern Spain)," *Journal of Geodynamics*, Vol. 49(3-4), pp. 181-189, 2010.
- [30] D. Perissin, Z. Wang, T. Wang, "The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China," *Proceedings of the ISRSE, Sidney, Australia*, Vol. 1015, 2011.
- [31] H. Sun, Q. Zhang, C. Zhao, C. Yang, Q. Sun, W. Chen, "Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohai plain, China with a multi-track PS-InSAR technique," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 188, pp. 73-84, 2017.
- [32] K. Desai, P. Joshi, S. Chirakkal, D. Putrevu, R. Ghosh, "ANALYSIS OF PERFORMANCE OF FLAT EARTH PHASE REMOVAL METHODS," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 42, pp. 5, 2018.
- [33] B. Ai, K. Liu, X. Li, D.H. Li, "Flat-earth phase removal algorithm improved with frequency information of interferogram," *In Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment: Classification of Remote Sensing Images*, Vol. 7147, pp. 71471A. *International Society for Optics and Photonics*, 2008.
- [34] M. Liao, T. Wang, L. Lu, W. Zhou, D. Li, "Reconstruction of DEMs from ERS-1/2 tandem data in mountainous area facilitated by SRTM data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45(7), pp. 2325-2335, 2007.
- [35] D. Perissin, Z. Wang, H. Lin, "Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 73, pp. 58-67, 2012.
- [36] M. Bakon, J. Papco, D. Perissin, J.J. Sousa, and M. Lazecky, "Multi-sensor InSAR deformation monitoring over urban area of Bratislava (Slovakia)," *Procedia Computer Science*, Vol. 100, pp. 1127-1134, 2016.
- [37] D. Perissin, T. Wang, "Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 50, no. 1, pp. 271-280, 2011.
- [38] S. Cheng, D. Perissin, H. Lin, F. Chen, "Atmospheric delay analysis from GPS meteorology and InSAR APS," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* vol. 86, pp. 71-82, 2012.



Monitoring of land subsidence due to overexploitation of groundwater using PS-InSAR in the region in hamadan proviance, Iran

Reza Soodmand Afshar¹, Salman Ahmadi^{2*}

1- M.Sc. in Remote Sensing, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kurdistan University, Sanandaj, Iran.

2- Assistant professor in Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

Abstract

Land subsidence is one of the environmental hazards that has been less well-regarded by human societies due to lower human casualties. However, the earth subsidence causes irreparable damage to the urban areas and adjacent plains over time. In this study, Permanent Scatterer (PS) method has been used to monitor land subsidence in the region in hamadan proviance and its adjacent plains in west of Hamadan province using 89 Sentinel-1A satellite images in ascending pass and 85 descending pass images. Based on the results of our study, the Badkhora and Jannatabad villages in the region in hamadan proviance compared to the other regions have the maximum of average subsidence rate of PSs, with subsidence rate of 200-220 mm/year. Furthermore, according to the results, it can be conducted that the rate of subsidence from urban areas towards the plains have been raised. In addition, in urban areas the model has chosen more PSs with higher mean temporal coherence than mixed areas including plain and urban. In order to find the cause of subsidence, the information of piezometric wells in the study area and its temporal changes were investigated. In this regard, one of the main causes of land subsidence in the region in hamadan proviance and adjoining plains due to the increasing depth of piezometric wells in the study period can be attributed to the high pumping of groundwater resources.

Key words: Land subsidence, Interferometry, PS-InSAR technique.