تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴

DOI: 10.48303/bese.2024.2015272.1143

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی تأثیر عوامل ساختاری و غیرساختاری بر تغییرات عمودی سطح زمین با نگاه ویژه به فرونشست شهرستان‌های بشرویه و طبس با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری

راضیه عباس‌پور
دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سید مرتضی موسوی (نویسنده مسئول)
دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، mmoussavi@birjand.ac.ir

احمد رشیدی
دانشیار، گروه پژوهشی زمین‌لرزه، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

محمدمهدی خطیب
استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

دشت‌های طبس و بشرویه که به ترتیب در بخش‌های غربی و شرقی فرازمین شتری[1] قرار دارد، طی چند دهه گذشته دچار فرونشست شده است. یکی از کم‌هزینه‌ترین روش‌ها در پایش سرعت قائم پوسته زمین، روش تداخل‌سنجی راداری است. روشی مؤثر با پوشش وسیع و با قدرت تفکیک بالا است. در این پژوهش، دشت‌های طبس و بشرویه به‌منظور تعیین الگوی سرعت قائم و ارتباط‌سنجی آن با ساختارهای فعال منطقه و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۵ انتخاب شد تا با بهره‌مندی از تلفیق اطلاعات ساختاری و افت سطح آب‌های زیرزمینی در طی بازه زمانی مورد نظر با نتایج به‌دست‌آمده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری رابطه بین الگوی سرعت قائم پوسته زمین با این مشخص شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بخش‌هایی از منطقه بیش از ۵/۲ میلی‌متر در راستای گسل اسفندیار در حال فراخاست است. درحالی‌که فرونشست در این دشت‌های منحصر به دشت‌های بشرویه و طبس با بیش از ۳۷- میلی‌متر در طی دوره زمانی مورد نظر می‌باشد. دامنه زیاد تغییرات در منطقه، به‌ویژه در گسل‌های راندگی به دلیل بالا نبودن میزان دگرشکلی بین لرزه‌ای و عدم رخداد زمین‌لرزه با بزرگای بالا در دوره زمانی تفسیر تصاویر مورد استفاده در این مطالعه، دلیل مهم غیرزمین‌ساختی دارد. در منطقه، عامل تأثیرگذار در شکل‌گیری چنین تغییراتی، وقوع سیلاب‌های شدید فصلی و نشست رسوبات حمل شده توسط آنها می‌باشد؛ اما شواهدی همچون رودخانه‌های ماندری، رودخانه‌های منحرف شده و سربریده، دره‌های باریک و ژرف و... در منطقه بر فراخاست منطقه تأکید دارد.

واژگان کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، سرعت قائم، فرازمین شتری، فرونشست، طبس، بشرویه.

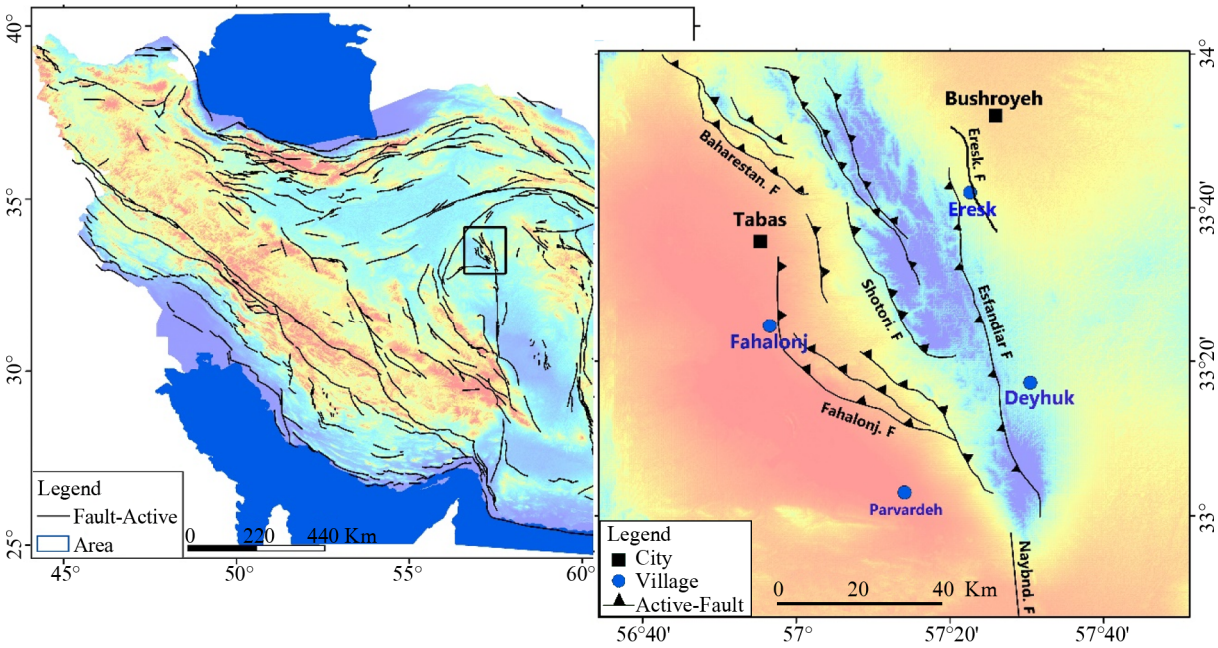
۱- مقدمه

فرونشست یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های سطح زمین است و به‌صورت سرعت قائم در سطح زمین قابل مشاهده می‌باشد. این پدیده غالباً در اثر برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی یا انحلال و فرسایش‌های زیرسطحی رخ می‌دهد و می‌تواند سبب بروز خسارت‌های جبران‌ناپذیری همچون آسیب به زیرساخت‌ها حتی نابودی سفره‌های آب زیرزمینی در مناطق حساس از نظر ویژگی‌های سنگ و خاک شود (Amelung et al., 2000). بر اساس تعریف سازمان زمین‌شناسی آمریکا، پدیده فرونشست شامل فروریزش یا نشست رو به پائین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار سرعت افقی نیز باشد (Amighpey & Arabi, 2016). فرونشست که می‌تواند در اثر عوامل زمین‌شناختی همچون انحلال، آب شدن یخ‌ها، تراکم نهشته‌ها، خشکی‌زایی (حرکات آرام پوسته زمین) و خروج گدازه از پوسته جامد زمین یا فعالیت‌های انسانی مانند معادن، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و استخراج نفت ایجاد می‌شود (Amighpey & Arabi, 2016). متأسفانه شدت فرونشست در

دشت‌های ایران ۹۰ برابر بیشتر از بحرانی‌ترین شرایط در کشورهای توسعه‌یافته جهان است. میزان فرونشست ۴ میلی‌متر در سال در کشورهای توسعه یافته شرایط بحرانی قلمداد می‌شود، درحالی‌که در سال ۸۵ نرخ فرونشست در کشور ما ۱۷ سانتی‌متر در سال بوده و در سال ۹۰ این نرخ به ۳۶ سانتی‌متر در سال افزایش یافته است (روزنامه شرق کشور). این پدیده در گذشته از بیشتر مناطق جهان همچون کالیفرنیا، شهرهای اوزاکو و توکیو در ژاپن، در ایتالیا، در هندوستان و... گزارش شده است (Larson et al., 2001). فرونشست در ایران هم از دشت‌هایی همچون دشت کاشمر در استان خراسان رضوی، دشت مشهد (Lashkaripur et al., 2006)، دشت نیشابور (Deghani et al., 2009; Motagh et al., 2007)، دشت نوق و بهرمان (Sharifi Kia, 2012) و دشت رفسنجان توسط محققان مختلف گزارش شده است.

یکی از دشت‌های ایران که در طی دهه‌های اخیر دست‌خوش سرعت قائم (نشست- فراخاست) قرار گرفته‌اند؛ دشت‌های طبس و بشرویه در بخش‌های غربی و شرقی فرازمین است (شکل ۱). زو و همکاران (Zhou et al., 2016) با استفاده از همبستگی تصاویر نوری از تصاویر هوایی تاریخی و تصاویر ماهواره‌ای مدرن به بررسی زمین‌لرزه‌ی (معکوس) ۱۹۷۸ طبس گلشن با بزرگی ۷/۳ ریشتر در شرق ایران پرداخته است و از مقایسه ارتفاع تراس‌ها با فراخاست زمین‌لرزه، معتقد است که سیستم چین طبس رفتار لغزش مشخصی داشته است. این رفتار نیازمند یک زمین‌لرزه با بزرگی ۷/۳ تقریباً در هر ۳۵۰۰ سال است که با نرخ کوتاه‌شدگی محاسبه‌شده تقریباً ۰/۱ میلی‌متر در سال همخوانی دارد.

Coply (۲۰۱۴) با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به تخمین میزان لغزش پس از زمین‌لرزه ۱۹۷۸ طبس پرداخته و میزان لغزش را ۵ میلی‌متر در سال در طی یک دوره زمانی ۳۰ ساله تخمین زده است و این میزان لغزش را ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی در منطقه می‌دانست. عباس‌پور و همکاران (Abbaspour et al., 2022) به پایش سرعت قائم سطح زمین در بخش غربی فرازمین شتری پرداخته و حداکثر تغییرات قائم را ۷/۱ میلی‌متر در سال، در طی یک دوره زمانی ۵ ساله به دست آورده این میزان از تغییرات را ناشی از فرایندهای غیرزمین‌ساختی همچون وقوع سیلاب‌های شدید فصلی و نشست رسوبات حمل شده توسط آنها در منطقه عنوان کرده است.



شکل (۱): موقعیت منطقه‌ی مورد پژوهش (کادر سیاه‌رنگ) بر روی تصاویر عارضه‌بندی رقومی (SRTM). منطقه بخشی از فرازمین شتری است که در پایانه‌ی شمالی گسله نایبند واقع است.

از این‌رو، پایش سرعت قائم پوسته زمین اعم از فراخاست و فرونشست به‌منظور صیانت از سازه‌ها در مناطق مسکونی و آبخوان‌ها در دشت‌های زیر کشت دارای اهمیت است. از روش‌های مورد استفاده در پایش تغییرات سطح زمین اندازه‌گیری‌های صحرایی، برداشت‌های ایستگاه‌های GPS و تکنیک تداخل‌سنجی راداری است. از بین این روش‌های ذکر شده تکنیک تداخل‌سنجی راداری روشی بسیار ارزشمند و دقیق در پایش میزان سرعت قائم در سطح زمین و همچنین قادر به انجام محاسبات دقیق تغییرات سطح زمین در بازه‌های زمانی مختلف است (Beradio et al., 2002). بدین‌ترتیب این فرضیه شکل می‌گیرد که علاوه بر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی عوامل زمین‌ساختی نیز می‌تواند بر میزان و الگوی فرونشست دشت‌های طبس و بشرویه تأثیرگذار باشد. هدف از این پژوهش، تعیین الگوی سرعت قائم سطح زمین در بخش شرقی رشته‌کوه شتری با نگاه ویژه به فرونشست شهرستان‌های طبس و بشرویه در طی دوره زمانی پنج سال و بررسی اثر عوامل زمین‌ساختی و غیرزمین‌ساختی است. محدوده‌ی مورد مطالعه، بخش شرقی و غربی فرازمین شتری واقع در پایانه‌ی شمالی گسله نایبند است (شکل ۱).

۲- مواد و روش‌ها

یکی از ابزارهای قدرتمند، به‌منظور پایش سرعت قائم سطح زمین (پدیده فرونشست و فراخاست) روش تداخل‌سنجی راداری است. این روش با اختلاف فاز دو تصویر راداری که در دو زمان مختلف اخذ شده، قادر به تعیین نرخ سرعت قائم سطح زمین در آن بازه‌ی زمانی می‌باشد. برای انجام این مرحله از تحقیق از داده‌های سنجنده سنیتنل ۱ با طول موج ۵/۶ سانتی‌متری (باند C) برای بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۵ مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۱).

روش‌های مرسوم پایش سرعت‌های خطوط ریلی مانند ترازیابی و سیستم موقعیت‌یابی جهانی، با وجود دقت قابل‌اطمینان این روش‌ها وقت‌گیر و دارای هزینه زیادی است. در مقابل، روش تداخل‌سنجی راداری با پوشش مکانی زیاد و دقت بالا به یک روش پر قدرت در شناسایی سرعت‌های سطح زمین تبدیل شده است. این امر به اثبات رسیده که تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری، یک تکنیک قدرتمند برای شناسایی سرعت قائم سطح زمین با پوشش گسترده و دقت بالا هستند. با این حال، عوامل متعددی همچون خطای توپوگرافی، اثرات مداری، اختلالات جوی و سایر منابع خطا می‌توانند دقت تداخل‌سنجی راداری را کاهش دهند. به‌منظور کاهش این محدودیت‌ها، روش تداخل‌سنجی راداری چند زمانه، مانند پراکنش کننده‌های دائمی[۲] و الگوریتم خط مبنای کوتاه[۳] معرفی شده است. در جدول (۲) خلاصه‌ای از محدودیت‌ها و روش‌های تداخل‌سنجی راداری ارائه شده است.

در ادامه، به‌طور خلاصه به شرح روش پیشنهادی پرداخته شده است؛ که این روش پیشنهادی در طی پنج مرحله انجام می‌شود (شکل ۲).

جدول (۱): مشخصات تصاویر مورد استفاده در این پژوهش.

سنجنده	فرمت تصاویر	تاریخ اخذ تصاویر پایه	عبور	تعداد تصاویر	قطبش
Sentinel 1A	SLC	2015/02/12 2020/05/11	Ascending	69	VV

جدول (۲): تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری و محدودیت‌های آنها.

تکنیک‌ها	روش‌ها	محدودیت‌ها
تداخل‌سنجی سنتی		خطای توپوگرافی، اثرات مداری، اتمسفری و سایر خطاها
تداخل‌سنجی چند زمانه	پراکنش کننده‌های دائمی (PSI)	۱. نیاز به دانش مدل سرعت از پیش تعیین شده نسبت به زمان ۲. نیاز به وجود تعداد زیادی ساختارهای دست‌ساز بشر در منطقه
	الگوریتم خط مبنای کوتاه (SBAS)	خطاهای محتمل DEM باید محاسبه و از داده‌ها حذف گردد.

۱. پیش‌پردازش (تصحیحات هندسی، مرجع‌سازی، حذف اثرات زمین مسطح و توپوگرافی) بر روی تصاویر انجام و تداخل‌نگارهای بازیابی شده[۴] و همدوستی[۵] تولید می‌شود.
۲. با استفاده از داده‌های GACOS فاز تروپوسفر محاسبه و از تداخل‌نگارها حذف می‌گردد. سپس به‌منظور کاهش حجم و همچنین زمان پردازش، تداخل‌نگارها برش[۶] داده می‌شوند.
۳. تجزیه‌وتحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری برای برآورد مقدار سرعت زمین بر روی تداخل‌نگارها انجام می‌شود.
۴. به‌منظور برآورد سرعت تغییرات سرعت پیکسل‌ها در طول زمان، یک وارونگی خط مبنای کوتاه SB[۷] در شبکه تداخل‌نگارها انجام می‌شود. در این مرحله با استفاده از الگوریتم خط مبنای زمانی و مکانی کوتاه NSBAS[۸] تداخل‌نگارها اولیه معکوس شده تا سری زمانی سرعت به دست آید.
۵. در طی این مرحله، با بهره‌مندی از روش Bootstrap انحراف استاندارد سرعت محاسبه می‌شود.
۶. جهت شناسایی پیکسل‌های بد با استفاده از چندین شاخص نوفه یک ماسک بر روی پیکسل‌ها اعمال می‌شود. درصورتی‌که هریک از مقادیر شاخص‌های نوفه برای هر پیکسل از آستانه مشخص شده بیشتر باشند، پیکسل ماسک می‌شود. در نهایت با استفاده از یک فیلتر زمانی- مکانی خطای باقی‌مانده خطای نوفه تروپسفریک، نوفه یونسفر و خطای مداری از سری زمانی سرعت برداشته می‌شود.

زمانی که در یک سیستم SAR یک فاصله اندازه‌گیری می‌شود با استفاده از تداخل‌سنجی راداری می‌توان تغییر در این فاصله را بررسی و محاسبه نمود. اندازه‌گیری اختلاف فاز به خاطر تغییرات در سطح زمین، یکی از اهداف اصلی پایش تغییرات با فناوری تداخل‌سنجی راداری است. اصول ریاضی تداخل‌سنجی راداری به این صورت است که تصاویر SAR شامل دو بخش حقیقی و مختلط می‌باشند که می‌تواند به‌صورت رابطه (۱) نوشته شود (Strozzi et al., 2002):

$$y = |a|e^{i\phi} \qquad (۱)$$

که در آن، i و ϕ، $|a|$ به ترتیب دامنه، فاز و واحد موهومی می‌باشند. فاز تداخل‌سنجی که $y_m\overline{y}_s$ (که m نماینده تصویر اصلی و S نماینده تصویر فرعی می‌باشد) از ضرب مختلط تصویر اصلی با مزدوج مختلط تصویر فرعی طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$y_m\overline{y}_s = |a_m|e^{i\phi_m}|a_s|e^{i\phi_s} = |a_m||a_s|e^{i(\phi_m - \phi_s)} \qquad (۲)$$

اختلاف SAR به‌دست‌آمده محاسبه می‌شود و در نتیجه تداخل‌نگار تولید می‌شود. مؤلفه‌های اصلی سهیم در فاز تداخل‌نگار تولیدی عبارتند از (Strozzi et al., 2002):

$$\phi_{int} = \phi_m - \phi_s = \phi_{def} + \phi_{topo} + \phi_{flat} + \varepsilon_{error} \qquad (۳)$$

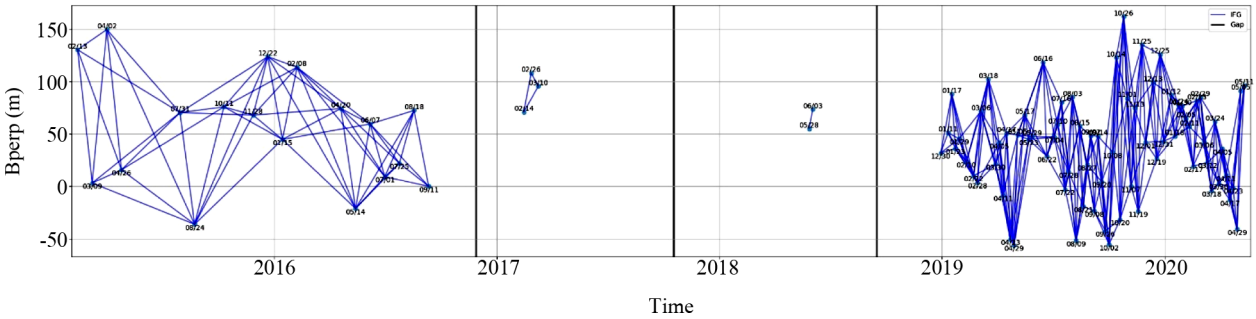
مؤلفه‌ی فازی ϕ_{def} تغییرهای سطحی به زمین به دلیل فرآیندهای طبیعی یا فعالیت‌های انسانی، ϕ_{topo} فاز ناشی از توپوگرافی، ϕ_{flat} فاز ناشی از مسطح بودن زمین و ε_{error} مؤلفه‌های فازی مزاحم در تداخل‌نگار (فاز اتمسفری، رمپ‌های مداری و باقی‌مانده فاز مربوط به نویز) است. به‌منظور برآورد میزان تغییرات قائم سطح زمین از روش سری زمانی SBAS استفاده شده است. در ادامه، روش SBAS تشریح شده است.

۳-۱- روش سری زمانی SBAS

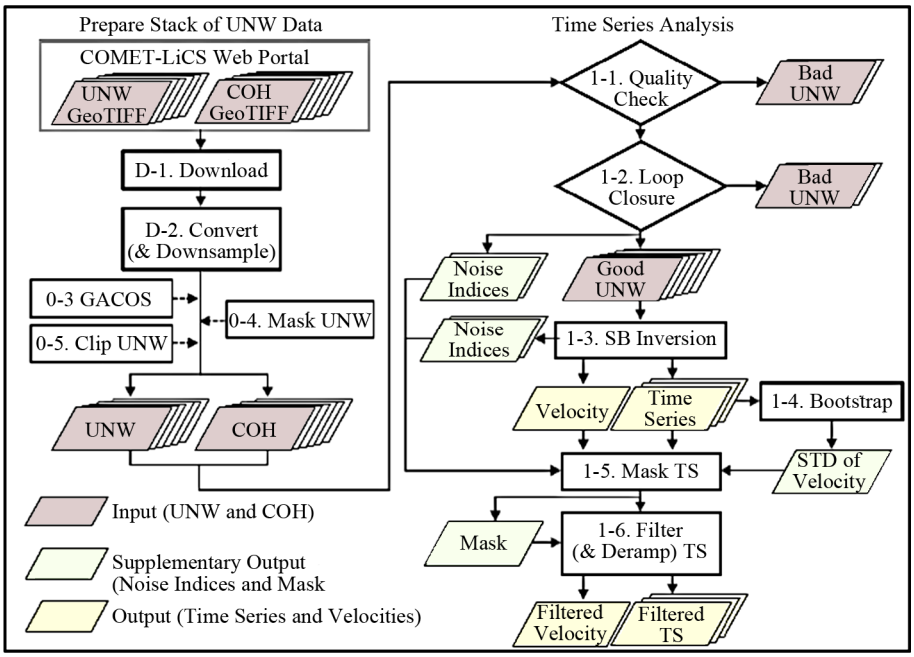
امروزه جهت برآورد تغییرات قائم سطح زمین از تکنیک‌های مختلفی استفاده می‌شود که یکی از این روش‌ها، روش سری زمانی SBAS است. روش SBAS از نتایج تداخل‌سنجی راداری استفاده می‌کند. در تداخل‌سنجی راداری، میزان و دامنه تغییرات قائم سطح زمین از طریق اختلاف فاز دو تصویر محاسبه می‌شود. پس از تهیه تداخل‌نگارها و انجام تصحیحات مختلف بر روی آنها، نظر به اینکه تداخل‌نگارها شامل منطقه‌ی وسیعی با همبستگی متفاوت است، از این‌رو نتایج آن قابل اعتماد نیست به همین دلیل تداخل‌سنجی یک جفت تصویر راداری به‌تنهایی نمی‌تواند تغییرات صورت گرفته را نشان دهد. در این راستا روش‌های مختلفی پیشنهاد شده که یکی از این روش‌های پیشنهاد شده روش سری زمانی SBAS است (Zhou, 2013). در این روش تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه‌ی قائم خط مبنای آنها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا باشد، همچنین خط مبنا زمانی

آنها نیز هم‌زمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل‌نگارهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخل‌نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار سرعت هر پیکسل تخمین زده می‌شود (Deng et al., 2016) (شکل های ۲ و ۳).

- مرحله ۱: در این مرحله از تصاویر مورد نظر به‌منظور انجام روش SBAS تهیه شده است که برای این منظور از ۹۶ تصاویر ماهواره سنتینل ۱ استفاده شده است. در جدول (۱) مشخصات تصاویر نشان داده شده است.
- مرحله ۲: پس از تهیه تصاویر مورد نظر ابتدا پیش‌پردازش‌هایی بر روی تصاویر انجام شده است و سپس در نرم‌افزار نقشه‌های اینترفروگرام منطقه تهیه شده است. به‌منظور تهیه نقشه‌های اینترفروگرام از خط مبنای زمانی و مکانی تصاویر استفاده شده است و بر مبنای آنها جفت تصاویر مورد نظر جهت انجام تداخل‌سنجی راداری انتخاب شده است.
- مرحله ۳: پس از تهیه نقشه‌های اینترفروگرام، نقشه میزان سرعت منطقه با استفاده از روش SBAS تهیه شده است و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار ARCGIS خروجی نهایی تهیه شده است.



شکل (۲): شبکه تداخل‌نگارهای تولید شده.



شکل (۳): مراحل انجام محاسبه سرعت سرعت به روش LICSBAS. آماده‌سازی و تهیه داده‌های فاز اینترفرومتریک آنرپ شده و کوهرنسی قبل از انجام تجزیه‌وتحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری (مراحل ۰۵-۰۱). انجام تصحیحات اتمسفریک، ماسک و کلیپ کردن (مراحل اختیاری با خط‌چین نشان داده شده است). وارونگی تداخل‌نگارهای اولیه جهت برآورد سرعت سرعت. ماسک کردن و اعمال فیلتر به‌منظور شناسایی پیکسل‌های بد و حذف آنها (Morishita et al., 2020).

- مرحله ۴: پس از تهیه نقشه نهایی، به‌منظور ارزیابی ارتباط فرونشست منطقه با افت سطح آب‌های زیرزمینی، میزان افت آب‌های زیرزمینی در این دوره‌ی زمانی و روش SBAS با هم مقایسه و تحلیل شده است.

۳-۲- آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی

بعد از تولید تداخل‌نگارها و تصحیح آنها نسبت به خطاهای موجود در تداخل‌سنجی، یک مجموعه از تداخل‌نگارها از یک منطقه حاصل می‌شود که در بازه‌های زمانی مختلف می‌باشند. عدم همبستگی زمانی و مکانی بین تصاویر سبب می‌شود تا تقریباً هر تداخل‌نگار شامل مناطق بزرگی باشد که در آنها همبستگی پایین است و اندازه‌گیری انجام شده در این مناطق قابل اطمینان نیست و یا اصلاً قابل انجام نیست. این محدودیت‌ها سبب می‌شود تا روش تداخل‌سنجی به‌تنهایی ابزاری کامل جهت نظارت و اندازه‌گیری اعوجاجات سطح زمین و تغییرات توپوگرافی نباشد (Alipour et al., 2008, Kiseleva et al., 2014, Li et al., 2005, Sousa et al., 2011, Zhou, 2013). در حال حاضر سه روش کلی جهت غلبه بر این‌ها و محدودیت تحلیل سری زمانی تداخل‌نگار وجود دارد که عبارتند از:

۱. تجمیع تداخل‌نگارها
۲. الگوریتم خط مبنای کوتاه SBAS
۳. پراکنش‌کننده‌های دائمی

- تجمیع تداخل‌نگارها: پس از ایجاد یک مجموعه تداخل‌نگار، برای برآورد فاز تجمعی آنها و بررسی سری زمانی مربوط به نرخ جابه‌جایی در طول مدت‌زمان برداشت تصاویر، تداخل‌نگارها را با همدیگر تجمیع می‌کردند، به این صورت که فازهای مربوط به پیکسل‌های یکسان در تداخل‌نگارها را با همدیگر جمع کرده و تقسیم بر زمان کل تداخل‌نگارها می‌کردند (Samsonov et al., 2010).

$$V_{\text{maen LOS velocity}} = \frac{\sum \phi_{obs}^{k}}{\sum t^{k}} \qquad (۴)$$

که در این فرمول $v_{\text{mean LOS velocity}}$ میانگین نرخ تغییر شکل اندازه‌گیری شده در واحد رادیان بر سال، ϕ_{obs}^{k} فاز تداخل‌نگار در واحد رادیان که در k مشاهده شده برای دوره زمانی k (برحسب سال) محاسبه شده است. در t انجام عملیات تجمیع تداخل‌نگارها در صورت وجود مؤلفه‌ی خطا بر روی فاز تداخل‌نگار، با میانگین‌گیری که انجام می‌شود میزان این خطا تا حدودی تقلیل پیدا می‌کند.

- الگوریتم خط مبنای کوتاه(SBAS): روش SBAS برای تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی توسط (Berardino et al., 2002) پیشنهاد شد. این روش توسط (Hong et al., 2010) اصلاح و روش خط مبنای زمانی کوتاه STABS[۹] را ارائه دادند و در سال (Doin et al., 2011) روش N-SBAS را مطرح نمودند (Zhou et al., 2011). در روش SBAS تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه‌ی قائم خط مبنای آنها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا باشد، همچنین خط مبنا زمانی آنها نیز هم‌زمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل‌نگارهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخل‌نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه‌جایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود (Dong et al., 2014; Jung et al., 2008, Lee et al., 2006). برای درک بهتر روش محاسبه جابه‌جایی هر پیکسل راداری در این روش فرض کنید که تعداد N+1 تصویر راداری یک منطقه که در بازه‌ی زمانی (t_0, t_1,..... t_n) برداشت شد در اختیار داریم که تعداد تداخل‌نگارهای ایجاد شده از این تصاویر M عدد می‌باشد. فرض کنید که اختلاف برای یک پیکسل همدوس با مختصات (x,y) در تداخل‌نگار j که از دو تصویر راداری در زمانی‌های t_B و t_A اخذ شده را به‌صورت زیر نوشت:

$$\delta\phi_j = (x,r) = \phi(t_B,x,r) - \phi(t_A,x,r)\,\forall_j = 1,2.3,\ldots\ldots\ldots M$$

$$\approx \frac{4\pi}{\lambda}\left[d(t_B,x,r) - d(t_A,x,r)\right] + \frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_{\perp j}}{r\sin\theta}\Delta z(x,r) \qquad (۵)$$

$$+ \frac{4\pi}{\lambda}\left[d_{atm}(t_B,x,r) - d_{atm}(t_A,x,r)\right] + n_j$$

در این فرمول B_j اندازه خط مبنا عمودی برای تداخل‌نگار j، $\Delta z(x,r)$ ارتفاع پیکسل نسبت به سطح رفرنس، d_{atm} میزان جابه‌جایی رخ داده در فاز به خاطر اتمسفر و n_j مؤلفه‌ی نویز موجود در تداخل باشند. با فرض نادیده گرفتن اثر اتمسفر و نویز موجود در تداخل‌نگارها و اینکه قسمت اول معادله‌ی (۵) را می‌توان به‌صورت رابطه (۶) بنویسیم (Berardino et al., 2002):

$$\phi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda}\left[d(t_B,x,r) - d(t_A,x,r)\right] = \frac{4\pi}{\lambda}\sum_{A}^{B-1} v_k v_{K+1}(t_{K+1} - t_K) \quad (۶)$$

که v_k v_{k+1} سرعت بین زمان‌های K تا K+1 است. برای هر پیکسل در تداخل‌نگار V، برداری K+1 برای سرعت‌های متوالی بین تداخل‌نگارها و T برداری M*N برای هر فاصله زمانی بین تداخل‌نگارهاست. در نهایت تلفیق روابط (۵) و (۶) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} \left[T_{M*N} \quad C_{M*N}\right]\begin{matrix} v_{N*1} \\ Z_{1*1} \end{matrix} = \left[R_{M*1}\right] \\ C^T = \left[\frac{B_{\perp 1}}{r\sin\theta}, \frac{B_{\perp 2}}{r\sin\theta}, \ldots\ldots, \frac{B_{\perp N}}{r\sin\theta}\right] \\ R^T = \left[\frac{\lambda}{4\pi}\delta_1, \frac{\lambda}{4\pi}\delta_2, \ldots\ldots, \frac{\lambda}{4\pi}\delta_M\right] \end{cases} \quad (۷)$$

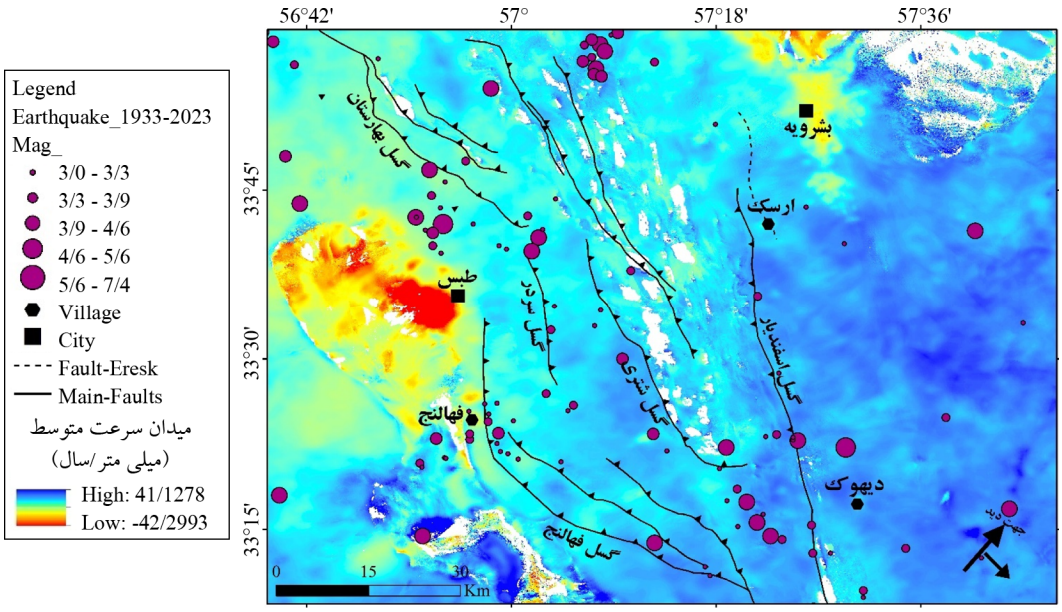
اگر بین شبکه تداخل‌نگارها ارتباط پیوسته وجود داشته باشد در این صورت $M \geq N$ و مرتبه ماتریس T برابر N خواهد شد و شکل ماتریسی رابطه (۷) از راه سرشکنی کمترین مربعات قابل حل است. بنابراین سری زمانی نرخ جابه‌جایی برای هر پیکسل به دست می‌آید. از طرفی دیگر، با توجه به اینکه دو تصویر SAR در زمان‌های مختلف تهیه شده‌اند، اطلاعات جابه‌جایی را می‌توان از آن استخراج کرد. در حقیقت، در بازه‌ی زمانی برداشت دو تصویر (۲۰۲۰-۲۰۱۵) که موقعیت مکانی نقاط به دلیل فرونشست- برخاستگی تغییر کرده است.

به‌منظور تهیه نقشه‌ی جابه‌جایی سطح زمین اثر فاز توپوگرافی با توجه به مدل رقومی ارتفاعی به‌دست‌آمده حذف و مقادیر باقی‌مانده نشان‌دهنده‌ی میزان جابه‌جایی مناطق مختلف منطقه‌ی مورد پژوهش است.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- بررسی‌های ساختاری

در این پژوهش، از قابلیت‌های روش تداخل‌سنجی در تعیین میزان سرعت قائم پوسته زمین استفاده شده است. نتایج حاصل از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (میدان سرعت متوسط برحسب میلی‌متر بر سال در بازه‌ی زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۵) ارائه شده است (شکل ۴).

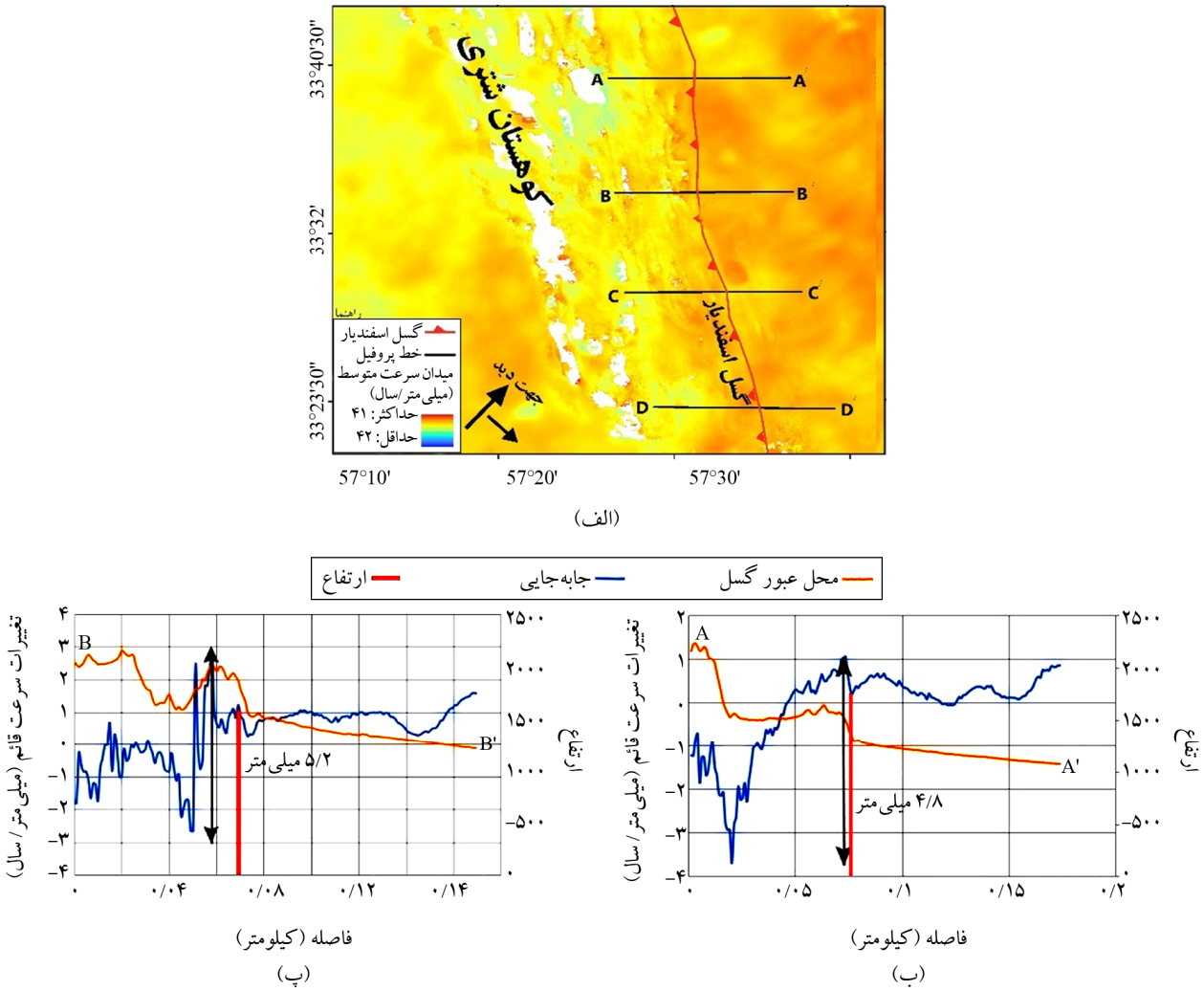


شکل (۴): نقشه میانگین سرعت جابه‌جایی (برحسب میلی‌متر/ سال) همراه با توزیع کانونی زمین‌لرزه‌های رخ داده در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۵ در منطقه.

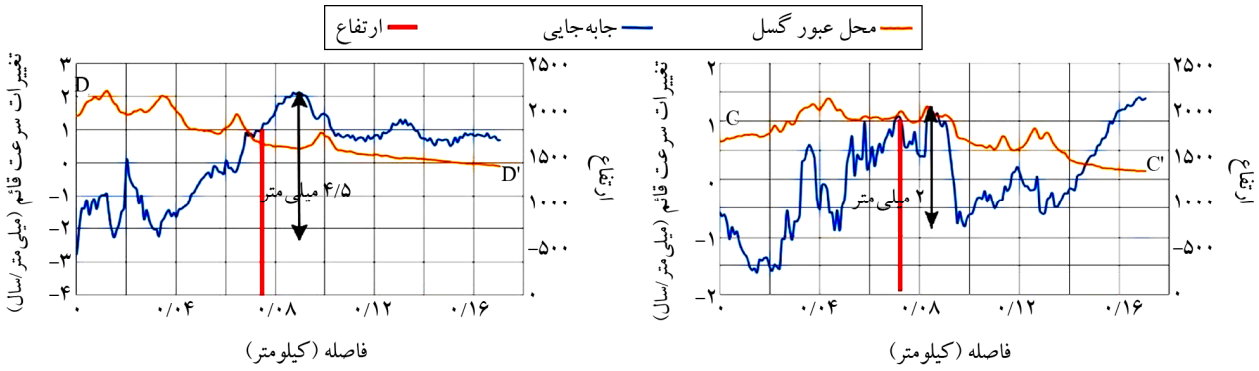
با توجه به نقشه به‌دست‌آمده از میانگین سرعت جابه‌جایی به‌وسیله‌ی روش تداخل‌سنجی راداری مشاهده می‌گردد که گسل‌های راندگی در معرض فراخاست (سرعت قائم) هستند. در ادامه به‌طور جداگانه به معرفی گسل‌های فعال و شاخص در بخش شرقی فرازمین شتری و همچنین به شرح و تفسیر نتایج به‌دست‌آمده خواهیم پرداخت.

۴-۱-۱- گسل راندگی اسفندیار

گسل اسفندیار، گسل راندگی با روند شمال غربی- جنوب شرقی و با شیبی به سمت غرب در پایانه‌ی شمالی گسل نایبند قرار دارد (شکل ۱). فعالیت این گسل سبب شکل‌گیری پدیده‌های مورفولوژی خاصی در منطقه شده است که می‌توان به پدیده‌هایی همچون پرتگاه‌های گسلی، حد کوه و دشت مستقیم، دره‌های v شکل و باریک با شیب تند، مورفولوژی مخروطه افکنه‌ها، رودخانه‌های مئاندری و غیره اشاره کرد. جهت محاسبه نرخ سرعت قائم رخ داده توسط راندگی اسفندیار در منطقه‌ی مورد مطالعه، عمود بر راستای گسل مقاطع توپوگرافی و سرعت قائم در محیط نرم‌افزاری تهیه گردید (شکل ۵، الف). حداکثر سرعت قائم توسط راندگی اسفندیار در طی پنج سال ۵/۲ میلی‌متر تخمین زده شد (شکل ۵، پ).



شکل (۵): (الف) نقشه سرعت قائم و موقعیت گسل راندگی اسفندیار همراه با پروفیل‌های ترسیم شده در راستای عمود بر راندگی اسفندیار، (ب) پروفیل سرعت قائم و توپوگرافی در راستای 'AA، (پ) پروفیل سرعت قائم و توپوگرافی در راستای 'BB، (ت) پروفیل سرعت قائم و توپوگرافی در راستای 'CC و (ث) پروفیل سرعت قائم و توپوگرافی 'DD. در مقاطع سرعت قائم بر حسب میلی‌متر و فاصله بر حسب کیلومتر می‌باشد. رنگ قرمز به معنای نزدیک شدن و رنگ آبی به معنای دور شدن از ماهواره است.

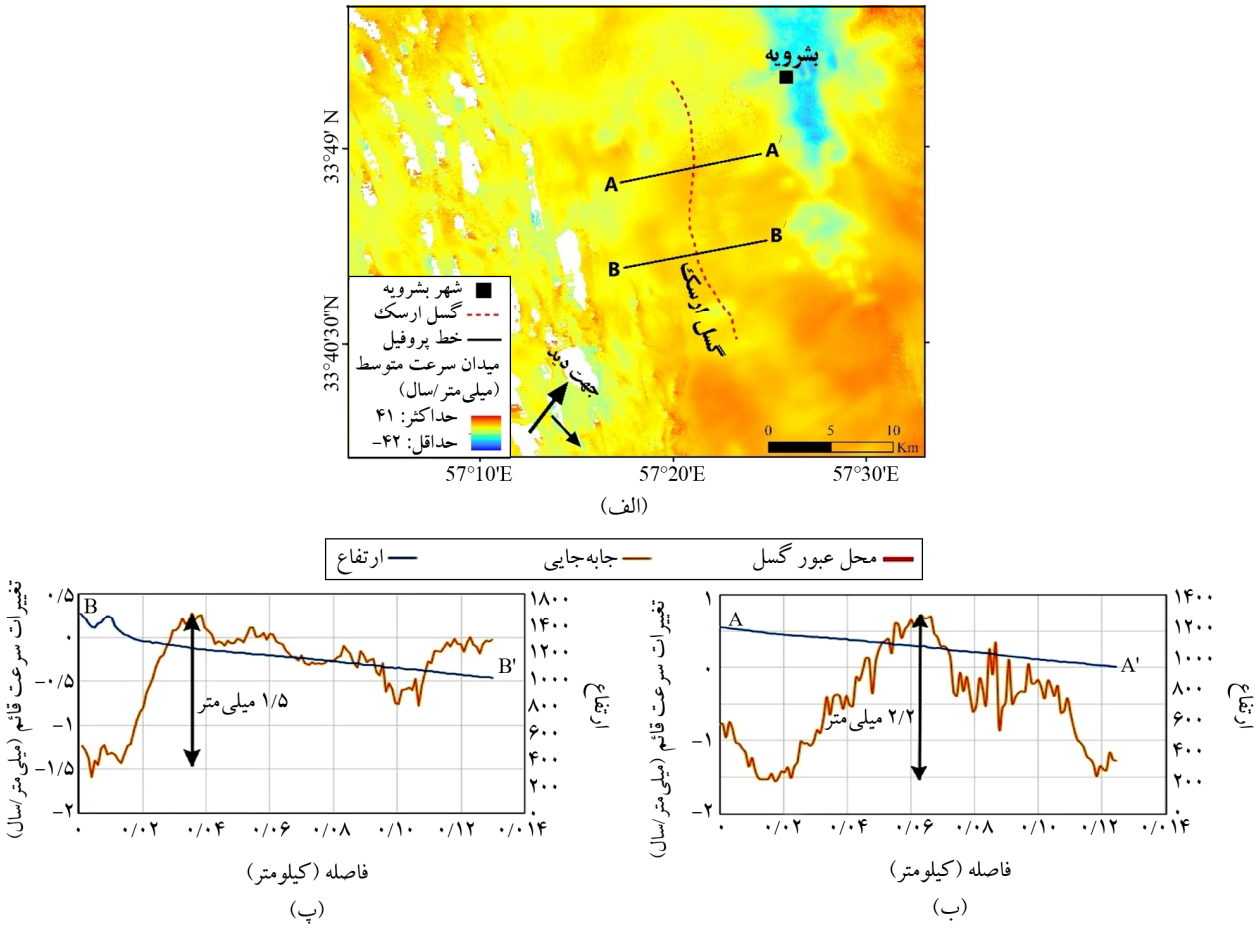


(ت) (ث)

ادامه شکل (۵).

۴-۱-۲- گسل ارسک

گسل ارسک که در قسمت غربی شهرستان بشرویه و در حدود ۶ کیلومتری این شهر و از ۵۰۰ متری شهر ارسک می‌گذرد طولی حدود ۳۰ کیلومتر و دارای روند تقریباً شمالی-جنوبی است (شکل ۱). از شواهد مورفولوژی این گسل کمی توان به بیرون‌زدگی سنگ‌های آتش‌فشانی (داسیت ها)، سرعت رودها و ایجاد پرتگاه‌های گسلی در رسوبات آبرفتی و غیره اشاره کرد. به‌منظور محاسبه‌ی سرعت قائم در راستای گسل ارسک به روش تداخل‌سنجی راداری، عمود بر راستای گسل پروفیل‌های سرعت قائم در محیط نرم‌افزاری QGIS تهیه شده است (شکل ۶، الف).



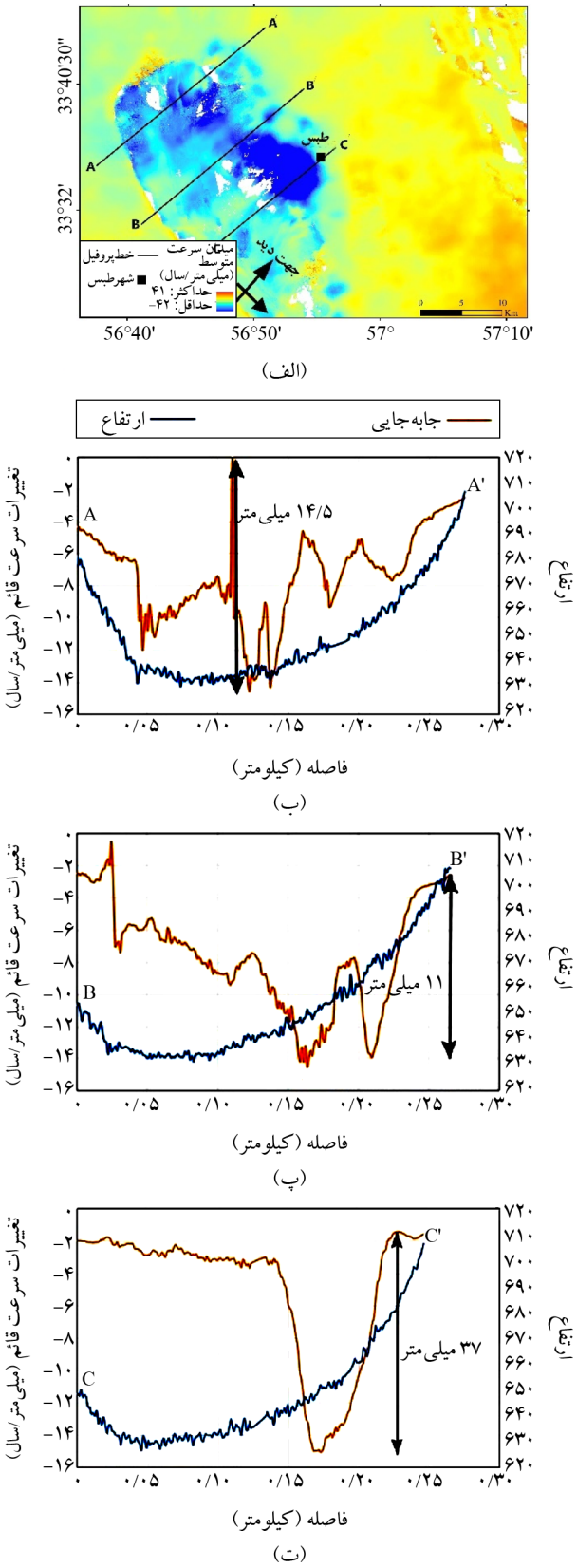
شکل (۶): (الف) نقشه سرعت قائم و موقعیت گسل ارسک همراه با پروفیل‌های ترسیم شده در راستای عمود بر راستای گسل، (ب) پروفیل سرعت قائم و توپوگرافی در راستای 'AA و (پ) پروفیل سرعت قائم و توپوگرافی در راستای 'BB. سرعت قائم بر حسب میلی‌متر و فاصله بر حسب کیلومتر می‌باشد. رنگ قرمز به معنای نزدیک شدن و رنگ آبی به معنای دور شدن از ماهواره است.

بیشترین میزان تغییرات سرعت قائم به‌دست‌آمده در راستای این گسل در طی ۵ سال ۲/۲ میلی می‌باشد (شکل ۶، ب).

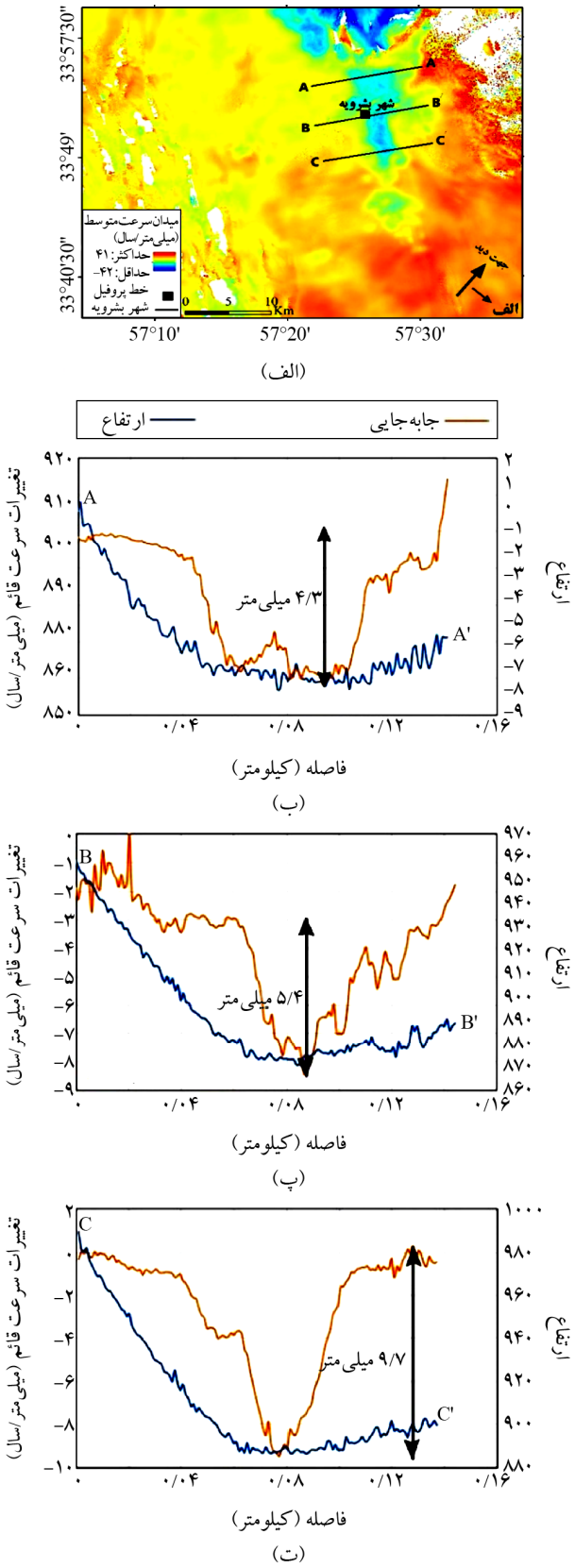
نتایج حاصل از برآورد نرخ سرعت قائم پوسته زمین (فرونشست- فراخاست) در این پژوهش نشان می‌دهد، حداکثر میزان فرونشست در جهت دید ماهواره ۳۷ میلی‌متر برای بازه زمانی ۵ ساله تخمین زده‌ایم و آن را می‌توان به عوامل زمین‌ساختی، غیر زمین‌ساختی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی از آبخوان دشت‌های بشرویه و طبس نسبت داد؛ و همچنین این نتایج نشان‌دهنده این امر است که منطقه مورد پژوهش نه‌تنها در حال فرونشست می‌باشد بلکه برخی از مناطق در حال فراخاست نیز می‌باشند. به‌طوری‌که در اثر عملکرد گسل راندگی اسفندیار و با توجه به پروفیل‌های تهیه شده در راستای عمود بر گسل ما شاهد ۵/۲ میلی‌متر در طی دوره‌ی زمانی ۵ سال فراخاست در طی بازه‌ی زمانی مورد نظر هستیم.

۴-۱-۳- فرونشست شهرهای طبس و بشرویه

پس از تهیه نقشه سرعت قائم فرازمین شتری و دشت‌های اطراف آن و مشاهده الگوی فراخاست- فرونشست در این منطقه مشخص شد، بخش‌هایی از منطقه به‌ویژه در راستای گسل‌های اسفندیار و ارسک در حال فراخاست هستند؛ به‌طوری‌که در برخی از مناطق شاهد بیش از ۳/۱ میلی‌متر فراخاست در طی ۵ سال هستیم (شکل ۴). فرونشست در دشت‌های طبس و بشرویه بیشتر منحصر به نوارهای با امتدادهای شمالی- جنوبی (بشرویه) و شمال غرب- جنوب شرق (طبس) با نرخ تقریباً ۴- تا ۳۷- میلی‌متر در طی بازه زمانی موردنظر می‌باشد (شکل‌های ۷ و ۸). دشت‌های طبس و بشرویه یکی از دشت‌های ایران است که درگیر پدیده فرونشست شده‌اند و در شمال شرقی و غرب- جنوب غربی فرازمین شتری قرار دارند. در بخش غربی فرازمین شتری به‌جز نهشته‌های نئوژن و کواترنری هیچ رخنمون سنگی دیگری وجود ندارد؛ اما در بخش شرقی فرازمین شتری به‌جز نهشته‌های کواترنری ما شاهد رخنمون واحدهای داسیتی و سازند قلعه دختر با سن ژوراسیک هستیم.



شکل (۷): نقشه سرعت قائم و موقعیت شهر طبس همراه با پروفیل‌های ترسیم شده در راستای عمود بر راستای فرونشست در دشت طبس؛ سرعت قائم بر حسب میلی‌متر و فاصله بر حسب کیلومتر می‌باشد. رنگ قرمز به معنای نزدیک شدن و رنگ آبی به معنای دور شدن از ماهواره است.



شکل (۸): نقشه سرعت قائم و موقعیت شهر بشرویه همراه با پروفیل‌های ترسیم شده در راستای عمود بر راستای فرونشست در دشت بشرویه؛ سرعت قائم بر حسب میلی‌متر و فاصله بر حسب کیلومتر می‌باشد. رنگ قرمز به معنای نزدیک شدن و رنگ آبی به معنای دور شدن از ماهواره است.

با بررسی نقشه سرعت قائم سطح زمین به نظر می‌رسد که فرونشست رخ داده در گستره‌ی مورد پژوهش هم روند با گسل‌های فعال در منطقه یعنی گسل‌های راندگی در بخش غربی رشته‌کوه (با روند تقریباً شمال غرب- جنوب شرق) و گسل ارسک و اسفندیار (با روند تقریباً شمالی- جنوبی) در بخش شرقی رشته‌کوه است و این احتمال می‌رود که فرونشست در شهرهای طبس و بشرویه در ارتباط با این گسل‌ها باشد؛ اما این عامل نمی‌توانند به‌تنهایی قادر به ایجاد چنین تغییراتی در منطقه‌ی موردپژوهش باشد.

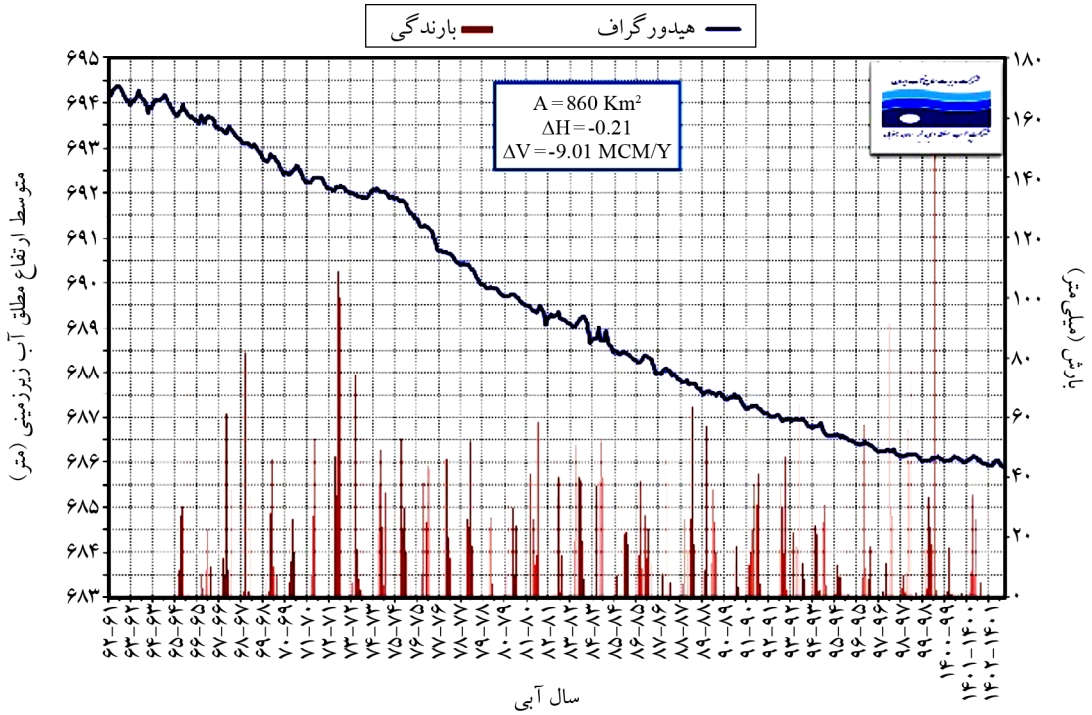
ارتباط‌سنجی الگوی سرعت قائم پوسته زمین با ساختارهای شناسایی شده در بخش شرقی فرازمین شتری نشان می‌دهد که این دو نوار فرونشست بر ساختارهای شناسایی شده منطبق می‌باشند، بدین گونه به نظر می‌رسد که این روندهای فرونشست از روندهای ساختاری تبعیت می‌نمایند.

اما این نرخ و میزان بالای این تغییرات به دلیل نبود دگرشکلی بین لرزه‌ای و فقدان زمین‌لرزه‌ای با بزرگی بالا سؤال‌برانگیز است؛ بنابراین در این پژوهش سعی در بررسی سایر عوامل غیرزمین‌ساختی مؤثر در نرخ بالای سرعت قائم در منطقه‌ی مورد پژوهش داریم؛ که این عوامل شامل اطلاعات چاه‌های پیزومتری دشت‌های طبس و بشرویه، لیتولوژی، شواهد رسوب‌گذاری- فرسایش و... می‌باشد.

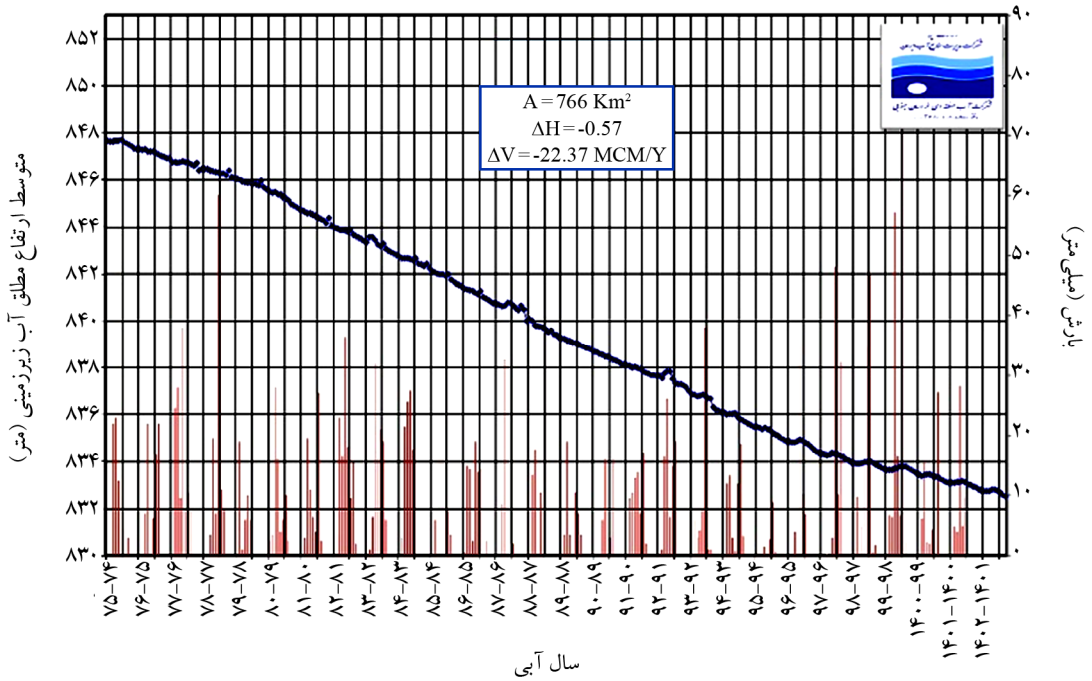
۴-۱-۴- اطلاعات چاه‌های پیزومتری

در مطالعات مربوط به فرونشست پایش تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی نقش بسیار مهمی دارد. از این‌رو، اطلاعات مربوط به تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در طی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۵ که از چاه‌های پیزومتری در دشت‌های طبس و بشرویه برداشت شده مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش نرخ و میزان فرونشست- فراخاست با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی از طریق اطلاعات چاه‌های پیزومتری و هیدروگراف‌های تهیه شده توسط شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. با توجه به هیدروگراف‌های نشان داده شد در شکل (۹) سطح آب در دشت طبس و بشرویه به ترتیب در سال ۲۰۱۵، ۶۸۶/۸ و ۸۳۶ متر بوده که در طی ۵ سال ۲۰۲۰ به ۶۸۶/۲ و ۸۳۴

متر کاهش یافته است؛ که نشان‌دهنده‌ی کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در طی این پنج سال هستیم. این کاهش تدریجی افت سطح آب‌های زیرزمینی در طی پنج سال می‌تواند به‌طور عمده به موضوع استحصال آب زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی، شرب و صنعتی باشد. از طرفی دیگر، با توجه به اینکه شهرهای طبس و بشرویه در دشت‌ها واقع شده‌اند و پست‌ترین نقطه از نظر ارتفاعی در مرکز دشت می‌باشد؛ و نظر به اینکه جریان آب از کوهپایه به سمت دشت است و میزان تغذیه بسیار بالاست برداشت بی‌رویه و



(الف) هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان دشت طبس



(ب) هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان بشرویه

شکل (۹): هیدروگراف آب‌های زیرزمینی.

بالا با فرونشست زیادی همراه نمی‌شود؛ بنابراین نرخ و میزان بالای فرونشست در دشت‌های طبس و بشرویه تحت تأثیر چه عواملی می‌باشد؟

ارتباط‌سنجی الگوی سرعت قائم پوسته زمین با هیدروگراف آب‌های زیرزمینی آبخوان‌های دشت بشرویه و طبس نشان می‌دهد (شکل ۹). الگوی فرونشست تنها در مناطق شهری قابل مشاهده است و در دشت‌های بشرویه و طبس (بخش‌های شرقی و غربی فرازمین شتری) علی‌رغم برداشت بی‌رویه آب، به‌جای فرونشست، فراخاست ثبت شده است. لذا، این نتایج نشان می‌دهد الگوی سرعت قائم پوسته زمین در بخش‌های شرقی و غربی فرازمین شتری بیشتر تابع عوامل زمین‌شناسی (همچون جنس واحدهای رسوبی، نرخ فرسایش-رسوب‌گذاری) و تأثیر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی کمتر است. از این‌رو، این فرضیه شکل می‌گیرد که علاوه بر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی از آبخوان‌های دشت بشرویه و طبس عوامل زمین‌ساختی و سایر عوامل غیرزمین‌ساختی می‌تواند بر میزان الگوی تغییرات پوسته زمین تأثیرگذار باشند. این در حالی است که عباس‌پور و همکاران (Abbaspour et al., 2022) با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در دشت غربی فرازمین شتری (چین‌خوردگی و گسل‌های راندگی) برای بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۵ حداکثر سرعت قائم پوسته زمین را ۷/۱ میلی‌متر تخمین زده و بیشتر علت این تغییرات را عوامل غیرزمین‌ساختی همچون وقوع سیلاب‌های شدید فصلی و نشست رسوبات حمل شده توسط آنها در منطقه عنوان کرده است.

۵- بررسی عوامل غیرساختاری

نرخ و دامنه زیاد سرعت قائم در منطقه‌ی مورد پژوهش، در راستای گسل‌های راندگی جوان و دشت‌های طبس و بشرویه به دلیل عدم وقوع زمین‌لرزه‌ای با بزرگای زیاد در طی دوره‌ی زمانی مورد نظر که قادر به ایجاد چنین سرعت قائم در سطح زمین باشد (شکل ۴)، سؤال‌برانگیز است. از این‌رو، در این پژوهش به بررسی سایر عوامل که می‌توانند چنین سرعت قائمی را در سطح ایجاد کنند؛ پرداخته شد. اطلاعات چاه‌های پیزومتری دشت‌های طبس و بشرویه، لیتولوژی، نرخ و میزان رسوب‌گذاری- فرسایش می‌تواند از عوامل تأثیرگذار بر نرخ و میزان سرعت قائم باشند. به همین دلیل در ادامه به‌طور خلاصه به اثرات این عوامل بر میزان سرعت قائم می‌پردازد.

پویایی فرازمین شتری به‌عنوان یک سیمای زمین‌ساختی جوان عامل اصلی تأثیرگذار بر شکل‌گیری و توسعه‌ی سامانه‌های فرسایش- رسوب‌گذاری از جمله بادبزن‌ها و پادگانه‌های آبرفتی در منطقه است. سامانه‌های آبرفتی به‌عنوان جوان‌ترین پدیده‌های زمین‌شناختی از دو عامل مهم اقلیم و جنبش‌های زمین‌ساختی تأثیر می‌پذیرند؛ بنابراین می‌توان بر اساس تأثیرپذیری بادبزن‌ها و پادگانه‌های آبرفتی، نحوه فعالیت‌های زمین‌ساختی و احیاناً تغییرات آب و هوایی را دوره‌های گذشته بررسی نمود. شواهد ریخت‌زمین‌ساختی متعدد از جمله پادگانه‌های آبرفتی مرکب، دره‌های باریک و ژرف، چین‌های مرتبط با گسل‌های فعال در منطقه همگی حکایت از پویایی سامانه‌های تنش ترافشاری حاکم بر منطقه و فراخاست فرازمین شتری در راستای شاخه‌های فرعی گسل نای بند دارد. این فراخاست زمین‌ساختی سبب عملکرد سامانه‌های رودخانه‌ای، فرسایش و حمل رسوبات از کوهستان به دشت و رسوب آنها در منطقه شده است. از جمله شواهد ریخت‌زمین‌ساختی که نشان‌دهنده برخاست-فرسایش در منطقه‌ی مورد پژوهش است می‌توان به مجراهای کهن آب، دره‌های باریک و ژرف، مئاندری بودن رودخانه‌ها که این مئاندرها به دلیل فراخاست منطقه و فرسایش بستر رودخانه ژرفای زیادی دارند.

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش به اهمیت تفکیک فرآیندهای زمین‌ساختی و غیر زمین‌ساختی در تحلیل سرعت قائم پوسته زمین یک منطقه مانند دشت طبس و بشرویه (به‌عنوان یک مطالعه موردی) می‌پردازد. بر اساس نقشه به‌دست‌آمده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، ملاحظه شد که دشت طبس و بشرویه، سرعت قائم زمین‌ساختی شدیدی را نشان می‌دهد. بر مبنای پروفیل‌های تغییرات ارتفاعی ترسیم شده در راستای عمود بر گسل‌ها و

دشت‌های طبس و بشرویه منطقه مورد پژوهش، بیشترین میزان سرعت قائم سطح زمین در بازه‌ی زمانی مورد نظر ۲۰۲۰-۲۰۱۵ به میزان ۵/۲ میلی‌متر مربوط به گسل اسفندیار می‌باشد؛ و همچنین میزان فرونشست در دشت‌های طبس و بشرویه بیشتر منحصر به نوارهای با امتدادهای شمالی- جنوبی (بشرویه) و شمال غرب- جنوب شرق (طبس) با نرخ تقریباً ۴- تا ۳۷- میلی‌متر در طی بازه زمانی مورد نظر می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نرخ و دامنه زیاد سرعت قائم را به فرآیندهای غیرزمین‌ساختی (مانند نرخ بالای رسوب‌گذاری و فرسایش در اثر وقوع سیلاب‌های فصلی) و نقش ناچیز و پیوسته فعالیت‌های تکتونیکی مرتبط می‌داند. شواهد ریخت زمین‌ساختی قابل توجهی در منطقه وجود دارد که بر فراخاست زمین ساختی منطقه تأکید دارد. از شواهد ریخت‌زمین‌ساختی مشاهده شده در منطقه می‌توان به موارد متعددی اشاره کرد. مواردی همچون: مئاندرهای موجود در مسیر جریان رودخانه که به دلیل فراخاست ناحیه و فرسایش بستر جریان، ژرفای زیادی دارند؛ رودخانه‌های منحرف شده و سربریده دره‌های باریک و ژرف همگی بر فراخاست منطقه تأکید دارند.

مراجع References

Abbaspour, R., Mousavi, M., Khatib, M.M., & Rashidi, A. (2022). Monitoring the rate of vertical changes of the ground surface using radar interferometry technique and c-band time series; study area: western part of horst shotori (East of Tabas). *Bulletin of Earthquake Science and Engineering, 9*(3), 1-17 (in Persian).

Alipour, S., Motgah, M., Sharifi, M.A., & Walter, T.R. (2008). November. InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran. *In 2008 Second Workshop on Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas*, 1-5.

Amelung, F., Jónsson, S., Zebker, H., & Segall, P. (2000). Widespread uplift and 'trapdoor'faulting on Galapagos volcanoes observed with radar interferometry. *Nature*, *407*(6807), 993-996, https://doi.org/10.1038/35039604

Amighpey, M., & Arabi, S. (2016). Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *4*, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2016.04.001

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *40*(11), 2375-2383.

Copley, A. (2014). Postseismic afterslip 30 years after the 1978 Tabas-e-Golshan (Iran) earthquake: observations and implications for the geological evolution of thrust belts. *Geophysical Journal International*, *197*(2), 665-679. https://doi.org/10.1093/gji/ggu023

Dehghani, M., Valadan Zoej, M.J., Entezam, I., Mansourian, A., & Saatchi, S. (2009). InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. *Geophysical Journal International*, *178*(1), 47-56. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04135.x

Deng, H., Wu, L. Z., Huang, R. Q., Guo, X. G., & He, Q. (2016). Formation of the Siwanli ancient landslide in the Dadu River, China. *Landslides*, *14*(1), 385-394. https://doi.org/10.1007/s10346-016-0756-9

Doin, M.-P., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Lodge, F., Ducret, G., & Grandin, R. (2011), Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: the Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data. In *Proceedings of the European Space Agency (ESA) "Fringe" Symposium*, Frascati, Italy.

Dong, S., Samsonov, S., Yin, H., Ye, S., & Cao, Y. (2014). Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method. *Environmental Earth Sciences*, *72*, 677-691.

East Newspaper (1391). Soil subsidence in Iran is 9 times more critical than other countries, No (1386), pp. 11 (in Persian).

Hong, S. H., Wdowinski, S., Kim, S. W., & Won, J. S. (2010). Multi-temporal monitoring of wetland water levels in the Florida Everglades using interferometric synthetic aperture radar (InSAR). *Remote Sensing of Environment*, *114*(11), 2436-2447.

Jung, H.S., Lee, C.W., Park, J.W., Kim, K.D., & Won, J.S. (2008). Improvement of small baseline subset (SBAS) algorithm for measuring time-series surface deformations from differential SAR interferograms. *Korean Journal of Remote Sensing, 24*(2), 165-177.

Kiseleva, E., Mikhailov, V., Smolyaninova, E., Dmitriev, P., Golubev, V., Timoshkina, E., Hooper, A., Samiei-Esfahany, S., & Hanssen, R. (2014). PS-InSAR monitoring of landslide activity in the Black Sea coast of the Caucasus. *Procedia Technology, 16*, 404-413.

Larson, K., Başagaoglu, H., & Mariño, M. (2001). Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model. *Journal of Hydrology*, 242(1-2), 79-102. https://doi.org/10.1016/s0022-1694(00)00379-6

Lashkaripur, Gh. R., Bagherian klat, A., Ghafouri, M., & Pejman, H. (2006). Investigating subsidence and cracks in Sabzevar plain. *The Eighth Conference of the Association Geological Engineering and Iran's Environment*, University of Mashhad Ferdowsi (in Persian).

Lee, C.-W., Lu, Z., Jung, H.-S., Won, J.-S., & Dzurisin, D. (2010). Surface deformation of Augustine Volcano, 1992-2005, from multiple-interferogram processing using a refined small baseline subset (SBAS) interferometric synthetic aperture radar (InSAR) approach, Chapter 18. In J. Power, M.L. Coombs, & J.T. Freymueller (Eds.), The 2006 Eruption of Augustine Volcano, 453-465, Alaska, U.S.

Li, T., Liu, J., & Liao, M. (2005). Land subsidence monitoring with Envisat and ERS-1/2 satellites. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE.* https://doi.org/10.1117/12.655028

Morishita, Y., Lazecky, M., Wright, T.J., Weiss, J.R., Elliott, J.R., & Hooper, A. (2020). LiCSBAS: an open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor. *Remote Sensing, 12*(3), 424. https://doi.org/10.3390/rs12030424

Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T.R., Wetzel, H.U., Zschau, J., & Arabi, S. (2007). Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International, 168*(2), 518-526. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03246.x

Samsonov, S. (2010). Topographic correction for ALOS PALSAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48*(7), 3020-3027.

Sharifi Kia, M.R. (2012). Determining and range of subsidence using the Nough-Behrman radar interferometry method. *Journal of Space Planning and Preparation, 16*, 55-77 (in Persian).

Sousa, J.J., Hooper, A.J., Hanssen, R.F., Bastos, L.C., & Ruiz, A.M. (2011). Persistent Scatterer InSAR: A comparison of methodologies based on a model of temporal deformation vs. spatial correlation selection criteria. *Remote Sensing of Environment, 115*(10), 2652-2663.

Zhou, G., An, W., Yang, J., & Zhong, H. (2011). A visualization method for SAR images. *In 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 374-377.

Zhou, Y., Walker, R.T., Hollingsworth, J., Talebian, M., Song, X., & Parsons, B. (2016). Coseismic and postseismic displacements from the 1978 Mw 7.3 Tabas-e-Golshan earthquake in eastern Iran. *Earth and Planetary Science Letters, 452*, 185-196. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.07.038

Zhou, Z. (2013). *The Applications of InSAR Time Series Analysis for Monitoring Long-Term Surface Change in Peatlands.* Doctoral Dissertation, University of Glasgow.

واژه‌نامه

۱- فرازمین شتری	Horst Shotori
۲- پراکنش کننده‌های دائمی	Persistent Scatterer Interferometry
۳- الگوریتم خط مبنای کوتاه	Small Baseline Subset
۴- تداخل‌نگارهای بازیابی شده	Unwrapped Interferogram
۵- همدوستی	Coherence
۶- برش	Clip
۷- یک وارونگی خط مبنای کوتاه	Small Baseline (SB)
۸- الگوریتم خط مبنای زمانی و مکانی کوتاه	New Small Baseline Subset (NSBAS)
۹- روش خط مبنای زمانی کوتاه	Small Temporal Baseline Subset (STBS)

Investigating the Effect of Structural and Non-Structural Factors on Vertical Changes of the Earth's Surface with a Special Look at the Subsidence of Bushroyeh and Tabas Cities Using Radar Interferometry Technique

Razieh Abbaspour[1], Seyed Morteza Mousavi[2*], Ahmad Rashidi[3] and Mohammad Mehdi Khatib[4]

1. Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Earth Science, University of Birjand, Birjand, Iran
2. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Science, University of Birjand, Birjand, Iran, *Corresponding Author, email: mmoussavi@birjand.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Earthquake Research, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
4. Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Science, University of Birjand, Birjand, Iran

The plains of Tabas and Bushroyeh are located in the western and eastern parts of horst Shotori, respectively, especially around the cities of Tabas and Bushroyeh, which have suffered subsidence during the past few decades. One of the most widely used and least expensive methods in monitoring the vertical changes of the earth's crust (subsidence-uplift) is the radar interferometry technique. It is an effective technique with an extensive coverage in showing the changes in the earth's surface with high resolution. In this research, the plains of Tabas and Bushroyeh were selected in order to determine the pattern of vertical changes and measure its relationship with the main and active structures of the region and the overdrafting from the aquifers of Tabas and Bushroyeh in a 5-year period (2015-2020). In order to determine the relationship between the pattern of vertical changes of the earth's crust and the results of the radar interferometric technique by benefiting from the integration of structural information and the drop in the level of underground water during the desired period of time. The results of this research show that parts of the research area are rising more than 5.2 mm in the direction of the Esfandiar fault, while the subsidence in these unique plains is in two bands with an almost north-south and northwest-southeast direction. More than -37 mm during the desired period. The correlation of the pattern of vertical changes of the earth's crust with the main and active structures of the region shows that the two subsidence bands coincide with the faults identified in the region. Also, correlation measurement of the pattern of vertical changes of the earth's crust with the drop of the underground water level of Tabas and Bushroyeh aquifers shows that the uplift pattern in some areas of the region. In this way, these results show that the pattern of vertical changes in Bushroyeh plain is mostly subject to structural factors. And it is possible to consider the subsidence around the poems of Bushroyeh and Tabas under the influence of structural factors and to a greater extent subject to non-territorial factors such as the lithology of seasonal floods and indiscriminate harvesting and successive droughts. The high rate and range of changes in the western and east part of the Shotori Plateau, especially in folds and young thrust faults, due to the low rate of inter-seismic deformation and the absence of high-magnitude earthquakes in the time period of the interpretation of the images used in this study, is an important non-tectonic reason. The absence of high magnitude earthquakes in the interpretation period of the images used in this study has an important non-tectonic reason. In the region, a very influential factor in the formation of such changes is the occurrence of severe seasonal floods and the deposition of sediments carried by them in the region.

Keywords: Radar Interferometry, Vertical Changes, Horst Shotori, Subsidence, Tabas, Bushroyeh.