

آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین

سید ساسان بابایی^{۱*}، زهرا موسوی^۲، مه‌آسا روستایی^۳

^۱ کارشناس ارشد ژئودزی - گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان

s.sasan_babaei@znu.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده علوم زمین - دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه - زنجان

z.mousavi@iasbs.ac.ir

^۳ دکتری ژئوفیزیک - سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور - تهران

roostaei_mahasa@yahoo.com

چکیده

بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که یک قسمت بزرگی از دشت قزوین به علت برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی برای مقاصد کشاورزی، شرب و صنعتی با مسئله فرونشست مواجه است. لذا این پژوهش مطالعه‌ای روی مدل کردن الگو و نرخ فرونشست اتفاق افتاده در دشت قزوین بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری می‌باشد. به منظور آنالیز سری زمانی فرونشست اتفاق افتاده در این دشت، از آنالیز سری زمانی PS و SBAS استفاده نمودیم. داده‌های مورد استفاده شامل دو مجموعه داده مربوط به مدار پایین‌گذر ۱۹۲ و ۴۲۱ ماهواره انویست که بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ اخذ شده، می‌باشند. نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی تداخل-سنجی، یک فرونشست پیوسته و قابل ملاحظه‌ای را در این منطقه نشان می‌دهند. هر دو سری زمانی تداخل‌سنجی PS و SBAS ماکزیمم دامنه فرونشستی حدود ۳۰ تا ۳۵ میلی‌متر در سال را مشخص می‌کنند و این که نتایج هر دو روش همخوانی خیلی خوبی با همدیگر دارند. مقایسه بین وسعت و الگوی فرونشست اتفاق افتاده در این منطقه، حاصل از نتایج تکنیک تداخل‌سنجی راداری و موقعیت و تراکم چاه‌های برداشت آب‌های زیرزمینی در این دشت نشان می‌دهد که فرونشست درست در همان مناطقی که تراکم این چاه‌ها زیاد است، اتفاق افتاده است.

واژگان کلیدی: سری زمانی تداخل‌سنجی راداری، پراکنش‌کننده‌های دائمی، طول خط مبنای کوتاه، فرونشست، دشت قزوین

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

در دو دهه‌ی اخیر تکنیک تداخل‌سنجی راداری به عنوان ابزاری کارآمد و توانمند در مطالعه کلیه پدیده‌هایی که سبب تغییر شکل سطح زمین می‌شوند مطرح شده و به صورت قابل ملاحظه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است.

محاسبه جابه‌جایی‌های رخ داده در سطح زمین با استفاده از فناوری تداخل‌سنجی راداری شامل قابلیت‌های منحصر بفردی در ابعاد، هزینه، زمان و دقت نسبت به دیگر تکنیک‌های سنجش می‌باشد. تداخل‌سنجی راداری جابه‌جایی سطح زمین را با دقت ارتفاعی سانتی‌متر و قدرت تفکیک مکانی چند ده متر اندازه‌گیری می‌کند. با این تکنیک به صحت در حد میلی‌متر یا سانتی‌متر برای سرعت تغییر شکل زمین می‌توان دست یافت [۱-۳]. با این فناوری می‌توان حرکات و تغییرات ناشی از پدیده‌هایی مانند زمینلرزه، آتشفشان، یخچال‌ها، فرونشست، زمین‌لغزش و دیابیرهای نمکی و یا پدیده‌های نامنظم مانند خروج آب‌های زیرزمینی و نفت، آتش سوزی، سیلاب و انفجارات زیرزمینی را مطالعه کرد [۳-۵].

فرونشست سطحی زمین به خاطر استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی به عنوان یک مشکل بالقوه در بسیاری از مناطق دنیا در طول زمان، به رسمیت شناخته شده است. همچنین مسئله بیشتر برای مناطقی که تحت توسعه بوسیله آب‌های زیرزمینی‌اند مشاهده می‌شود. در ایران پدیده فرونشست زمین سابقه به نسبت طولانی (بیش از چند دهه) دارد. حاکم بودن شرایط اقلیمی خشک در اغلب نواحی داخلی ایران و تمرکز بهره‌برداری‌های روز افزون صنعتی، کشاورزی و مصارف آب شرب بر منابع آب زیرزمینی، زیرساخت مناسبی برای رویداد این پدیده فراهم آورده است. در ایران نزدیک به ششصد دشت وجود دارد که احتمال می‌رود بیش از نیمی از آن‌ها در معرض نشست باشند. در سال‌های اخیر فناوری تداخل‌سنجی رادار برای پایش فرونشست در برخی از این دشت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، به عنوان مثال؛ معتق و همکاران (۲۰۰۶) فرونشست در دره شهر مشهد را با تکنیک تداخل‌سنجی اندازه‌گیری کرده و یک محدوده‌ی فرونشسته کاسه‌ای بیضوی در شمال مشهد با ماکزیمم نرخ رشد سالانه ۲۸ تا ۳۰ سانتی‌متر در سال را شناسایی و علت رخ داد آن را استخراج بی‌رویه آب‌های زیر-زمینی این منطقه بیان نمودند [۶]. اندرسون و همکاران

(۲۰۰۸) فرونشست دشت کاشمر را با استفاده از ۲۲ تصویر ASAR برداشت شده بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ با روش تداخل‌سنجی متداول مطالعه نمود و فرونشستی به اندازه ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر در سال را برای این دشت برآورد نمودند [۷]. دهقانی و همکاران (۲۰۰۹) فرونشست دشت نیشابور را با استفاده از تصاویر راداری ASAR برداشت شده بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ را به روش SBAS مورد مطالعه قرار داده و ماکزیمم فرونشستی به اندازه‌ی ۱۹ سانتی‌متر برای این ناحیه برآورد کردند [۸]. در نهایت کریمزاده (۲۰۱۵) فرونشست حوضه‌ی تبریز را با ترکیب روش‌های PS و SBAS با استفاده از ۱۷ تصویر راداری ASAR بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ انجام داد و ماکزیمم فرونشستی به اندازه‌ی ۴۰ میلی‌متر را برآورد نمود [۹].

مادامی 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 به صورت رابطه زیر نوشته شود [۴]:

$$y = |a|e^{i\phi} \quad (1)$$

که در این رابطه؛ $|a|$ و ϕ به ترتیب دامنه، فاز و واحد موهومی می‌باشند. فاز تداخل‌سنجی $y_m \bar{y}_s$ (که زیرنویس 'm' نماینده تصویر اصلی و 's' نماینده تصویر فرعی^۲ می‌باشد) از ضرب مختلط تصویر اصلی با مزدوج مختلط تصویر فرعی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$y_m \bar{y}_s = |a_m|e^{i\phi_m} |a_s|e^{i\phi_s} = |a_m||a_s|e^{i(\phi_m - \phi_s)} \quad (2)$$

اختلاف فاز دو تصویر SAR به دست آمده محاسبه می‌شود و در نتیجه تداخل‌نگار^۳ تولید می‌شود. مؤلفه‌های اصلی سهیم در فاز تداخل‌نگار تولیدی عبارت‌اند از [۴]:

$$\phi_{\text{int}} = \phi_m - \phi_s = \phi_{\text{def}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{flat}} + \varepsilon_{\text{error}} \quad (3)$$

^۱ Master

^۲ Slave

^۳ Interferogram

همدیگر جمع کرده و تقسیم بر زمان کل تداخل نگارها می کردند [۱۵].

$$V_{\text{mean LOS velocity}} = \frac{\sum \phi_{\text{obs}}^k}{\sum t^k} \quad (4)$$

که در این فرمول $V_{\text{mean LOS velocity}}$ میانگین نرخ تغییر شکل اندازه گیری شده در واحد رادیان بر سال، ϕ_{obs}^k فاز مشاهده شده برای k تداخل نگار در واحد رادیان که در دوره زمانی t^k (برحسب سال) محاسبه شده است. در انجام عملیات تجمیع تداخل نگارها در صورت وجود مؤلفه خطا بر روی فاز تداخل نگار، با میانگین گیری که انجام می شود میزان این خطا تا حدودی تقلیل پیدا می کند.

۲-۲- الگوریتم خط مبنای کوتاه (SBAS)

روش SBAS برای تحلیل سری زمانی تداخل سنجی توسط براردینو^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۲ پیشنهاد شد. در سال ۲۰۱۰ هانگ^۲ و همکاران این روش را اصلاح و روش STBAS^۳ را ارائه دادند و در سال ۲۰۱۱ دویین^۴ و همکاران روش N-SBAS^۵ را مطرح نمودند [۱۴].

در روش SBAS تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می گیرند که مؤلفه ی قائم خط مبنای آن ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا باشد، همچنین خط مبنا زمانی^۶ آن ها نیز همزمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل نگارهایی تشکیل می شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخل نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه جایی هر پیکسل تخمین زده می شود [۱۶-۱۸].

برای درک بهتر روش محاسبه جابه جایی هر پیکسل در این روش، فرض کنید که تعداد $N+1$ تصویر راداری از یک منطقه که در بازه زمانی $(t_0, t_1, \dots, t_N)$ برداشت شد در اختیار داریم که تعداد تداخل نگارهای ایجاد شده از این تصاویر M عدد می باشد. فرض کنید که اختلاف فاز تولید شده برای یک پیکسل هم دوس با مختصات (x, r) در

مؤلفه فازی ϕ_{def} تغییر شکل های سطحی زمین به خاطر پروسه های طبیعی یا فعالیت های انسانی، ϕ_{topo} فاز ناشی از توپوگرافی، ϕ_{flat} فاز ناشی از مسطح بودن زمین و ϵ_{error} مؤلفه های فازی مزاحم در تداخل نگار (فاز اتمسفری، رمپ های مداری و باقی مانده فاز مربوط به نویز) می باشند.

۲- آنالیز سری زمانی تداخل سنجی

بعد از تولید تداخل نگارها و تصحیح آنها نسبت به خطاهای موجود در تداخل سنجی، یک مجموعه از تداخل نگارها از یک منطقه حاصل می شود که در بازه های زمانی مختلف می باشند. عدم همبستگی زمانی و مکانی بین تصاویر سبب می شود تا تقریباً هر تداخل نگار شامل مناطق بزرگی باشد که در آن ها همبستگی پایین است و اندازه گیری انجام شده در این مناطق قابل اطمینان نیست و یا اصلاً قابل انجام نیست. این محدودیت ها سبب می شود تا روش تداخل سنجی به تنهایی ابزاری کامل جهت نظارت و اندازه گیری اعوجاجات سطح زمین و تغییرات توپوگرافی نباشد [۱۰-۱۴].

در حال حاضر سه روش کلی جهت غلبه بر این محدودیت ها و تحلیل سری زمانی تداخل نگار وجود دارد که عبارتند از:

- Stacking
- SBAS (Small Baseline Subset)
- PS or PSI (Persistent Scatterer Interferometry)

که این سه، روش های پردازشی سری زمانی تداخل سنجی هستند. اساس کار آنها برآورد فاز تجمعی در زمان های تصویربرداری می باشد. علاوه بر این با میانگین گیری های موجود در الگوریتم این روش ها میزان مؤلفه های ایجاد کننده نویز در تداخل نگار (مؤلفه اتمسفری و مداری) تا حد زیادی تعدیل می شود.

۲-۱- تجمیع تداخل نگارها (Stacking)

پس از ایجاد یک مجموعه تداخل نگار، برای برآورد فاز تجمعی آن ها و بررسی سری زمانی مربوط به نرخ جابه جایی در طول مدت زمان برداشت تصاویر، تداخل نگارها را با همدیگر تجمیع می کردند، به این صورت که فازهای مربوط به پیکسل های یکسان در تداخل نگارها را با

^۱ Berardino

^۲ Hong

^۳ Small Temporal Baseline Subset

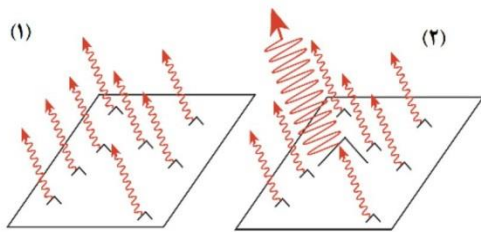
^۴ Doin

^۵ New SBAS

^۶ Temporal baseline

۳-۲- پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS)

عدم همبستگی مکانی و زمانی^۲ اغلب مانع می‌شود که تداخل‌سنجی SAR یک ابزار اجرایی برای پایش جابه‌جایی باشد. همچنین تأثیرات اتمسفر بشدت دقت نتایج را کاهش می‌دهد. میزان همبستگی سیگنال‌های رادار وابسته به توزیع پراکنده ساز^۳هایی است که داخل یک پیکسل قرار گرفته‌اند. اگر فاز یک پیکسل فقط توسط یک پراکنده ساز نقطه‌ای تعیین شود، مقدار ناهمبستگی صفر خواهد شد. اگر چه در سطوح واقعی چنین حالتی هرگز رخ نمی‌دهد، با این حال پیکسل‌هایی وجود دارند که شبیه پراکنده ساز نقطه‌ای عمل می‌کنند و ناهمبستگی را کاهش می‌دهند [۲۰].



شکل ۱- فاز بازگشتی از پیکسل بدون پراکنده ساز غالب (۱) و در حضور پراکنده ساز غالب (۲)

هدف روش PS-InSAR شناسایی پیکسل‌هایی از تصویر است که از این پس آن‌ها را PS می‌نامیم، که در بازه‌ی زمانی اخذ داده‌های مورد استفاده هم‌دوس باقی می‌مانند. اگر ابعاد PS کوچکتر از ابعاد سلول تفکیک باشد، که معمولاً نیز این چنین است، میزان هم‌دوسی این پیکسل‌ها، حتی برای تداخل‌نگارهای با طول مبنای بزرگتر از مقدار بحرانی مناسب است. به این ترتیب مجموعه داده‌های بیشتری را می‌توان جهت تداخل‌سنجی استفاده کرد و در مرحله آخر با حذف تأثیر اتمسفری می‌توان نتایج دقیق‌تری به دست آورد و تا حدودی، بر محدودیت‌های روش متداول تداخل-سنجی غلبه نمود و امکان اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی سطح زمین را حتی به میزان چند میلی‌متر دارد.

این تکنیک اولین بار توسط فریتی^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ ارائه شد، که در آن پژوهش جهت انتخاب نقاط کاندیدا، از شاخص پراکندگی دامنه (ADI)^۵، رابطه

تداخل‌نگار z که از دو تصویر راداری در زمان‌های t_A و t_B اخذ شده را به صورت زیر نوشت [۱۹].

$$\begin{aligned} \delta\phi_j(x,r) &= \phi(t_B, x, r) - \phi(t_A, x, r) \quad \forall j = 1, 2, \dots, M \\ &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)] + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp j}}{r \sin \theta} \Delta z(x, r) \\ &\quad + \frac{4\pi}{\lambda} [d_{\text{atm}}(t_B, x, r) - d_{\text{atm}}(t_A, x, r)] + n_j \end{aligned} \quad (5)$$

در این فرمول $B_{\perp j}$ اندازه خط مبنا عمودی^۱ برای تداخل‌نگار z ، $\Delta z(x, r)$ ارتفاع پیکسل نسبت به سطح فرانس، d_{atm} میزان جابه‌جایی رخ داده در فاز بخاطر اتمسفر و n_j مؤلفه نویز موجود در تداخل‌نگار می‌باشند. با فرض نادیده گرفتن اثر اتمسفر و نویز موجود در تداخل-نگارها و این که قسمت اول معادله ۵ را می‌توان به صورت زیر بنویسیم [۱۴].

$$\begin{aligned} \phi_{\text{def}} &= \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)] \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} \sum_{k=1}^{B-1} v_k v_{k+1} (t_{k+1} - t_k) \end{aligned} \quad (6)$$

که $v_k v_{k+1}$ سرعت بین زمان‌های k تا $k+1$ می‌باشد. برای هر پیکسل در تداخل‌نگار V ، برداری $k+1$ برای سرعت‌های متوالی بین تداخل‌نگارها و T برداری $M \times N$ برای هر فاصله زمانی بین تداخل‌نگارها می‌باشد. در نهایت ترکیب روابط ۵ و ۶ را می‌توان به صورت فرم ماتریسی زیر نوشت [۱۴].

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} T_{M \times N} & C_{M \times N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{N \times 1} \\ Z_{1 \times 1} \end{bmatrix} = [R_{M \times 1}] \\ C^T = \left[\frac{B_{\perp 1}}{r \sin \theta}, \frac{B_{\perp 2}}{r \sin \theta}, \dots, \frac{B_{\perp N}}{r \sin \theta} \right] \\ R^T = \left[\frac{\lambda}{4\pi} \delta_1, \frac{\lambda}{4\pi} \delta_2, \dots, \frac{\lambda}{4\pi} \delta_M \right] \end{cases} \quad (7)$$

اگر بین شبکه تداخل‌نگارها ارتباط پیوسته وجود داشته باشد در این صورت $M \geq N$ و مرتبه ماتریس T برابر N خواهد شد و فرم ماتریسی معادله ۷ از طریق سرشکنی کمترین مربعات قابل حل می‌باشد بنابراین سری زمانی نرخ جابه‌جایی برای هر پیکسل بدست می‌آید.

^۲ Temporal and Geometrical Decorrelation

^۳ Scatterer

^۴ Ferretti

^۵ Amplitude Dispersion Index

^۱ Perpendicular baseline

پس از تولید تداخل نگارها، فاز (فاز پیچیده^۵ یا بازبایی نشده) پیکسل X ام در تداخل نگار I ام را می توان به صورت زیر نوشت [۲۰، ۲۲].

$$\phi_{int,x,i} = \phi_{def,x,i} + \Delta\phi_{\epsilon,x,i} + \phi_{atm,x,i} + \Delta\phi_{orb,x,i} + \phi_{n,x,i} \quad (9)$$

در اینجا $\phi_{def,x,i}$ جابه جایی پیکسل X ام در راستای خط دید ماهواره، $\Delta\phi_{\epsilon,x,i}$ باقی مانده فاز توپوگرافی بخاطر خطا در مدل ارتفاع رقومی، $\phi_{atm,x,i}$ خطای فاز اتمسفری پیکسل X ام، $\Delta\phi_{orb,x,i}$ باقی مانده خطای مداری بخاطر دقیق نبودن اطلاعات مداری مورد استفاده و در نهایت $\phi_{n,x,i}$ نویز موجود در فاز پیکسل X ام، مانند نویز گرمایی یا خطا در ثبت هندسی می باشد.

ما پیکسل هایی را به عنوان PS در نظر می گیریم که مؤلفه $\phi_{n,x,i}$ به قدری کوچک باشد که سیگنال اصلی را نبوشاند. در فرمول ۹ فرض می کنیم که ترم های $\phi_{def,x,i}$ ، $\phi_{atm,x,i}$ و $\Delta\phi_{orb,x,i}$ در یک مقیاس طولی مشخص به اندازه L همبستگی مکانی دارند و ترم های $\Delta\phi_{\epsilon,x,i}$ و $\phi_{n,x,i}$ در این فاصله ناهمبسته اند. اگر موقعیت دیگر PS قبلا معلوم باشد، میانگین فاز آن ها که داخل یک دایره به مرکزیت پیکسل X ام و به شعاع L قرار دارند را محاسبه می کنیم [۲۰].

$$\bar{\phi}_{int,x,i} = \bar{\phi}_{def,x,i} + \bar{\phi}_{atm,x,i} + \Delta\bar{\phi}_{orb,x,i} + \bar{\phi}_{n,x,i} \quad (10)$$

که در این فرمول علامت بار نشان دهنده میانگین و $\bar{\phi}_{n,x,i}$ میانگین $\phi_n + \Delta\phi_{\epsilon}$ و فرض می شود مقدار کوچکی دارد. حال اگر معادله ۹ را از ۱۰ کم کنیم، خواهیم داشت [۲۰].

$$\phi_{int,x,i} - \bar{\phi}_{int,x,i} = \Delta\phi_{\epsilon,x,i} + \phi_{n,x,i} + \bar{\phi}'_{n,x,i} \quad (11)$$

در فرمول ۱۱ $\bar{\phi}'_{n,x,i}$ برابر $\bar{\phi}_n$ بعلاوه اختلاف بین مقدار میانگین فازهای $\phi_{def,x,i}$ ، $\phi_{atm,x,i}$ و $\Delta\phi_{orb,x,i}$ در مسیر دایره ای و مقدار آنها در پیکسل X ام می باشد. خطا در عدم صحت مدل ارتفاع رقومی متناسب است با مؤلفه

(۸) استفاده شد و بر این اساس، پیکسل های PS واقعی آن پیکسل هایی بودند که نرخ جابه جایی و تاریخچه فاز آن ها با یک مدل جابه جایی، که از قبل معلوم بوده، تطابق داشته باشند. شاخص پراکندگی دامنه، D_A به صورت زیر تعریف می شود [۲۰].

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (8)$$

که μ_A و σ_A به ترتیب انحراف معیار استاندارد و میانگین مقادیر دامنه در یک پنجره هستند. به طور کلی، تغییرات سطح زمین به صورت دائمی و نامنظم بوده و در مطالعات مربوط به تغییرات، الگوی زمانی تغییرات یک پدیده مجهول است، در نتیجه ما اطلاعاتی از مدل جابه جایی آن نداریم.

روش PS-InSAR سپس توسط کالسنٹی^۱ و همکاران توسعه یافت [۲۱]. پس از آن سیستم های دیگر پردازشی پراکنش کننده های دائمی توسط اشخاص دیگر ارائه شد. در تمامی این روش ها پراکنش کننده های دائمی بازتابنده های گوشه ای^۲ یا عوارض طبیعی با ویژگی های پراکنشی ثابت^۳ در طول زمان هستند که رفتار جابه جایی آن ها مشابه با مدل فرضی جابه جایی باشد [۲، ۱۱، ۱۳]. این روش ها به دو دلیل ممکن است با شکست روبرو شوند: اول اینکه، ترم نویز معمولاً در تصویر دامنه باید کوچک باشد، تا تعداد PS های بدست آمده کافی باشد، حداقل ۳ تا ۴ در PS در کیلومتر مربع مورد نیاز است. دومین محدودیت این است که یک مدل تقریبی از تغییرات زمانی تغییر شکل زمین مورد نیاز است تا بتوان سیگنال تغییرات را از سایر سیگنال های مزاحم مانند اتمسفر، توپوگرافی و سایر خطاهای فاز تفکیک کرد. به همین جهت هوپر^۴ در سال ۲۰۰۶ یک روش جدید PS-InSAR، StaMPS با قابلیت انتخاب پراکنش کننده های دائمی بدون نیاز به دانش اولیه مدل جابه جایی آن ها و حتی در مناطق فاقد بازتابنده های گوشه ای ارائه داد. در این روش، الگوریتم قادر بود تا نقاط PS بیشتری را در مناطق غیرشهری، که SNR (نسبت سیگنال به نویز) پایینی دارند، استخراج نماید. در زیر روند پردازشی StaMPS به صورت مختصر بیان شده است.

^۱ Colesanti

^۲ Corner Reflector

^۳ Coherent

^۴ Hooper

° Wrapp phase

خط مبنای عمودی $B_{\perp}$ است. بنابراین می‌توان آن را به صورت زیر نوشت [۲۰].

$$\Delta\phi_{e,x,i} = B_{\perp,x,i} K_{e,x} \quad (12)$$

که در رابطه بالا $K_{e,x}$ ثابت تناسب است. با جایگزینی رابطه ۱۲ در ۱۱ داریم.

$$\phi_{int,x,i} - \bar{\phi}_{int,x,i} = B_{\perp,x,i} K_{e,x} + \phi_{n,x,i} + \bar{\phi}'_{n,x,i} \quad (13)$$

با استفاده از تمامی تداخل‌نگارهای موجود می‌توان مقدار $K_{e,x}$ را برای پیکسل x ام با روش کمترین مربعات برآورد کنیم. یک کمیت کوهرنس زمانی γ_x از تغییرات فاز باقیمانده که معیاری است از PS بودن، در هر مرحله از تکرار محاسبه می‌شود [۲۰].

$$\gamma_x = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp \left\{ j \left(\phi_{int,x,i} - \bar{\phi}_{int,x,i} - \Delta\hat{\phi}_{e,x,i} \right) \right\} \right| \quad (14)$$

در رابطه بالا N تعداد تداخل‌نگارهای موجود و $\Delta\hat{\phi}_{e,x,i}$ برآورد محاسبه شده برای $\Delta\phi_{e,x,i}$ است. با فرض این که مقدار $\bar{\phi}'_{n,x,i}$ کوچک باشد بنابراین γ_x نشان دهنده پایداری فاز پیکسل x ام می‌باشد و می‌تواند معیاری برای شناسایی پیکسل‌های PS باشد. از نظر آماری پیکسل‌هایی که دارای مقدار بزرگتر γ_x باشند احتمال PS بودنشان افزایش می‌یابد بنابراین در یک فرآیند تکراری پیکسل‌هایی با مقدار بیشتر γ_x استخراج شده و بعد از انجام یک تست آماری روی مقادیر γ_x نهایی، پیکسل‌های PS اصلی شناسایی و بقیه کنار گذاشته می‌شوند و در نهایت رفتار فاز سری زمان جابه‌جایی این پیکسل‌ها بررسی می‌شود.

بنابراین در نهایت می‌توان گفت در روش StaMPS ابتدا کاندیدای پراکنش کننده‌ی دائمی^۲ بر پایه‌ی مقدار شاخص پراکندگی دامنه^۳ تعیین می‌شوند. پیکسل‌های پراکنش کننده‌ی دائمی نهایی براساس میزان استحکام فاز حاصل از آنالیز فاز انتخاب می‌شوند. در واقع پراکنش کننده‌های

دائمی پیکسل‌هایی هستند که سهم نويز آن‌ها بقدری کوچک باشد که سیگنال بطور کامل از بین نرود. سپس جهت به دست آوردن سیگنال جابه‌جایی، فاز پیکسل‌های پراکنش کننده‌ی دائمی باید بازبینی شود [۱۳، ۲۲].

۳- روش تحقیق

در این پژوهش با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی تداخل‌سنجی PS، SBAS به بررسی رفتار فرونشست دشت قزوین با استفاده از تصاویر سنجنده راداری ASAR سوار بر ماهواره انویست اخذ شده بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ پرداختیم. برای پیاده سازی هر یک از سری‌های زمانی یاد شده از نرم افزار کد باز StaMPS/MTI تحت سیستم عامل لینوکس استفاده شد [۲۰، ۲۲].

برای حذف اثر فاز ناشی از توپوگرافی از روی تداخل-نگارها مدل ارتفاع رقومی ماهواره راداری ناسا (SRTM) با قدرت تفکیک ۹۰ متر و همچنین برای حذف فاز ناشی از مسطح بودن زمین (کرویت) از اطلاعات دقیق مداری DEOS^۴ به صورت فایل‌های مداری ODR^۵ که فایل‌های باینری هستند [۲۳] و دربردارنده موقعیت‌های دقیق مداری ماهواره‌های ERS1/2 و Envisat می‌باشد، استفاده شده است. موقعیت‌های ماهواره در این فایل‌ها بصورت تابعی از زمان است که در هر ۶۰ ثانیه با طول کمانی به اندازه ۵/۵ روز، فاصله ۳/۵ روز و با همپوشانی ۲ روز بین آرک‌ها محاسبه شده است، استخراج این اطلاعات توسط نرم افزار Getorb صورت گرفت [۲۴].

در این پژوهش از داده‌های تمام تفکیک (FR) سنجنده مریس برای برآورد اثر بخار آب و تعدیل خطای فاز ناشی از تاخیر اتمسفر کمک گرفتیم. این داده‌ها از طریق سایت آرژانس فضایی اروپا سفارش داده شدند، که از بین مجموعه داده اخذ شده تنها از تصاویری با میزان پوشش آبری کمتر از ۳۰٪ استفاده شد (محصول بخار آب حاصل از این تصاویر، در مناطق آبری اعتبار ندارد) [۲۵]. برای پردازش داده‌های مریس و استخراج اطلاعات فاز مربوط به اثر اتمسفر در منطقه از نرم‌افزار TRAIN استفاده نمودیم. در نهایت به منظور کاهش نویز و افزایش

۴ Delft Institute for Earth-oriented Space Research
۵ Orbital Data Record

۱ Temporal coherence
۲ Persistent Scatterer Candidate
۳ Amplitude Dispersion Index

نسبت سیگنال به نویز در تداخل‌نگارهای تولید شده از روش فیلتر گلدشتاین استفاده شد [۲۶].

۴- دشت قزوین و مشکل فرونشست در آن

دشت قزوین در جنوب سلسله جبال البرز در مختصات جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۳ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. بیشینه ارتفاع حوضه برابر ۲۹۷۱ متر و کمینه آن برابر ۱۱۰۰ متر و متوسط ارتفاع آن برابر ۱۲۵۰ متر است. مساحت کل حوضه آبریز حدود ۹۵۰۱ کیلومتر مربع بوده که ۵۳۷۱ کیلومتر مربع (معادل ۵۶/۵ درصد) آن را ارتفاعات و حدود ۴۱۳۰ کیلومتر مربع (معادل ۴۳/۵ درصد) آن را دشت و باتلاق تشکیل داده است. شیب هیدرولیکی آن به سمت جنوب شرقی است و میانگین بارندگی سالانه آن ۲۸۴ میلی‌متر می‌باشد. مساحت این دشت معادل ۸۶۹۳ کیلومتر مربع بوده، که ۴۲۶۱ کیلومتر مربع آن را دشت و ۴۴۳۲ کیلومتر مربع آن را کوهستان تشکیل می‌دهد [۲۷].

دشت قزوین به صورت کاسه‌ای بوده که آب‌های زیر-زمینی و سطحی از همه جانب وارد آن می‌شوند و در نهایت در قسمت شرقی که سست‌ترین منطقه حوضه می‌باشد از یک معبر نمکی عبور کرده و در منطقه اشتهاورد به طرف کویر قم روان می‌شود. حرکت آب‌ها در این دشت کلاً از غرب به شرق و در ناحیه شمالی از شمال به جنوب و در ناحیه جنوبی از جنوب به شمال است. شیب عمومی دشت قزوین به سمت خاور بوده و در پای دامنه‌ها به میزان ۳ درصد و در مجاورت باتلاق در قسمت خاور به کمتر از ۱ درصد می‌رسد [۲۷].

این دشت یکی از مهم‌ترین دشت‌های کشور محسوب می‌شود که میزان تولیدات محصولات کشاورزی آن قابل توجه بوده و بیش از ۳ درصد از تولیدات کشور را دارا می‌باشد. در سال‌های آتی تَرَک و شکاف‌هایی در بخش‌هایی از جنوب و مرکز دشت که غالباً دارای آب و هوای بیابانی و خشک است، مشاهده گردیده که باعث تخریب واحدهای مسکونی و زمین‌های کشاورزی گردیده است. علت این عوارض استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی عنوان شده است. از آنجایی که یکی از شرایط ایجاد تَرَک و شکاف‌ها فرونشست و تراکم عمودی متفاوت ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی عنوان شده است. بنابراین جهت بررسی این پدیده و وضعیت

فرونشست دشت قزوین نیازمند اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی در این منطقه هستیم. همچنین با توجه به نبودن ایستگاه‌های دائم GPS و اطلاعات ترازبایی به‌روز از منطقه، عملاً امکان استفاده از این دو ابزار در منطقه وجود ندارد، لذا فناوری تداخل‌سنجی راداری می‌تواند به عنوان مناسب‌ترین ابزار برای پایش فرونشست این دشت به کار گرفته شود.



شکل ۲- نمونه فرونشست اتفاق افتاده در دشت قزوین؛ فرونشست در اطراف شهرستان بوئین‌زهر (سمت چپ)، ترک دیوار که در اثر نشست حاصل شده در حوالی روستای خان‌آباد (سمت راست بالا)، لوله زایی در چاه علی نوروز ولدآباد (سمت راست پایین)

۵- داده‌های راداری مورد استفاده

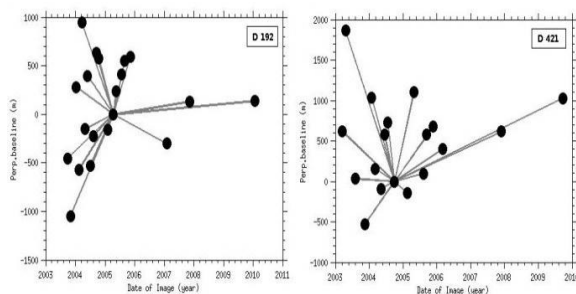
داده‌های راداری مورد استفاده، شامل دو مجموعه تصاویر سنجنده پیشرفته راداری پهلونگر با دریچه مصنوعی (ASAR) مربوط به مسیرهای پایین‌گذر^۱ ۱۹۲ و ۴۲۱ که بر روی ماهواره انویست قرار دارد، می‌باشند. داده‌ها توسط آژانس فضایی اروپا و از طریق وب سایت (<http://earth.esa.int>) در اختیار این پژوهش قرار گرفت. در نهایت ۲۰ تصویر راداری مدار پایین‌گذر متعلق به مسیر ۱۹۲ اخذ شده بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و ۱۹ تصویر راداری مدار پایین‌گذر متعلق به مسیر ۴۲۱ بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. مدار پایین‌گذر یعنی این که ماهواره مسیر کره زمین را از شمال شرقی به سمت جنوب غربی طی می‌کند و دید راداری ماهواره (آنتن) در این مسیر به سمت غرب می‌باشد. زاویه دید ماهواره برای هر دو مسیر در راستای مایل تقریباً ۲۳/۵ درجه می‌باشد. همچنین این تصاویر به صورت تصاویر مختلط منفردنگر (SLC) و در مُد IS2 با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر هستند.

^۱ Track

^۲ Descending

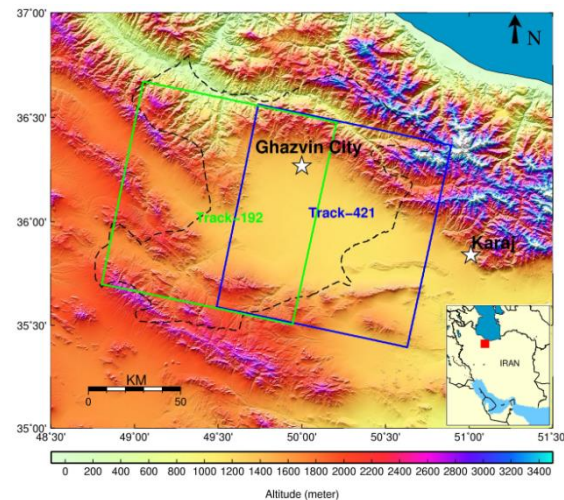
که در این فرمول‌ها ρ میزان همبستگی و اندیس c نشان دهنده مقدار بحرانی هر یک از پارامترها می‌باشد که با توجه به مجموعه داده‌های انتخابی مقادیر ثابت و مشخصی هستند. بنابراین تصویری به عنوان تصویر اصلی انتخاب می‌شود که مقدار $\sum_{i=1}^N \rho_{\text{total}}$ به ازای N تصویر موجود، بیشترین مقدار باشد.

بعد از انتخاب تصاویر اصلی، تعداد ۱۹ و ۱۷ تداخل-نگار به ترتیب برای مسیرهای ۱۹۲ و ۴۲۱ تشکیل شد.



شکل ۴- شبکه گراف ترسیم شده تداخل‌نگارهای ایجاد شده برای مسیرهای ۱۹۲ و ۴۲۱ است. نقاط سیاه نشان دهنده تصاویر و خطوط ارتباطی نشان دهنده تداخل‌نگار تولید شده بین جفت تصویر می‌باشد. در این گراف‌ها محور افقی زمان اخذ تصاویر و محور عمودی خط مبنا عمودی تصاویر را نسبت به تصویر اصلی نشان می‌دهد

در روش StaMPS از تحلیل دامنه و فاز برای شناسایی پیکسل‌های PS استفاده می‌شود. در ابتدا از شاخص پراکندگی دامنه، در تحلیل دامنه به منظور انتخاب PS های کاندیدا استفاده می‌شود که در این پژوهش حد آستانه استفاده شده برای پراکندگی دامنه 0.4 می‌باشد. PS های نهایی بر مبنای برآورد پایداری فاز از طریق تحلیل فاز انتخاب می‌شوند (فرمول ۱۴). به منظور بالا بردن دقت کار آن دسته از نقاطی که در مرحله اول (تحلیل دامنه) حذف می‌شوند نیز تحت تحلیل فاز قرار داده می‌شوند و از میان آن‌ها نقاطی را که بازپراکنش کننده دائمی هستند شناسایی می‌شوند، پیکسل‌هایی با فاز تصادفی شانس کمتری برای مقدار بالای γ_x دارند، بنابراین با استفاده از این روش حذف می‌شوند. مقدار حد آستانه γ^{thresh} را باید به گونه‌ای تعیین کرد که احتمال انتخاب پیکسل‌های PS واقعی را افزایش دهد و سهم پیکسل‌هایی که فاز تصادفی دارند و به اشتباه شناسایی شده‌اند کاهش یابد. در نهایت، PS ها براساس احتمال PS بودن که به کمک شاخص پراکندگی دامنه و کوه‌رنسی زمانی محاسبه می‌شوند، انتخاب می‌گردند.



شکل ۳- موقعیت منطقه مورد مطالعه با خط چین‌های سیاه مشخص شده است. کادرهای مستطیلی آبی و سبز به ترتیب وضعیت هر یک از مسیرهای ۴۲۱ و ۱۹۲ را نشان می‌دهند که بر روی مدل ارتفاع رقومی منطقه (SRTM) رسم شده‌اند

۶- روش StaMPS

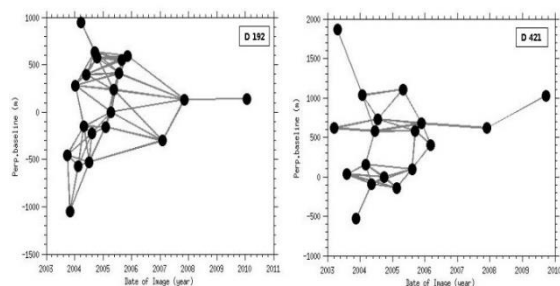
برای آنالیز سری زمانی تداخل‌نگارها به روش PS و SBAS در این پژوهش از روش StaMPS که توسط هوپر (۲۰۰۶) و با اید گرفتن از روش‌های قدیم PS و SBAS توسعه یافته، استفاده می‌شود. برای آنالیز سری زمانی به PS در روش StaMPS، ابتدا تداخل‌نگارها را نسبت به یک تصویر اصلی تشکیل می‌دهیم. لذا تصویر با تاریخ اخذ ۱۱-۲۰۰۴-۲۰۰۵ برای گذر ۱۹۲ و تصویر با تاریخ ۲۹-۲۰۰۴-۲۰۰۹ برای گذر ۴۲۱ به عنوان تصاویر اصلی در نظر گرفته و بقیه تصاویر نسبت به آن‌ها پردازش شدند تا تداخل‌نگارها تولید شوند. توجه شود که انتخاب تصاویر اصلی بر این اساس صورت گرفت که باید کمترین مقدار ناهمبستگی را داشته باشد، یعنی تصویر انتخاب شده نسبت به بقیه تصاویر دارای کمترین مقدار خط مبنای عمودی، زمانی و داپلر^۱ باشد [۲۰].

$$\rho_{\text{total}} = \rho_{\text{temporal}} + \rho_{\text{spatial}} + \rho_{\text{doppler}} + \rho_{\text{thermal}} \quad (15)$$

$$\approx \left[1 - f\left(\frac{T}{T_c}\right) \right] \left[1 - f\left(\frac{B_{\perp}}{B_{\perp c}}\right) \right] \left[1 - f\left(\frac{F_{\text{DC}}}{F_{\text{DCc}}}\right) \right] \rho_{\text{thermal}} \quad (16)$$

$$f(x) = \begin{cases} x & \text{for } x \leq 1 \\ 1 & \text{for } x > 1 \end{cases}$$

^۱ Doppler



شکل ۵- شبکه تداخل‌نگارهای ایجاد شده برای مدار پایین گذر مسیره‌های ۱۹۲ و ۴۲۱

تداخل‌نگارها در این روش باید به گونه‌ای تشکیل گردند که در انتها همگی آنها به نوعی با یکدیگر مرتبط باشند. در غیر این صورت در حل معادلات سرشکنی به منظور برآورد فاز دچار کمبود مرتبه می‌شویم. بنابراین در این پژوهش سعی بر آن شد که از یک شبکه زنجیره‌ای بین تصاویر با کمترین طول مبنای زمانی و مکانی استفاده شود که این زنجیره تمام تصاویر را به یکدیگر متصل می‌کند. تعداد تداخل‌نگارها برای مسیر ۱۹۲ برابر با ۶۲ و برای مسیر ۴۲۱ برابر با ۳۶ عدد می‌باشد.

روش SBAS که در نرم افزار StaMPS پیاده سازی و اجرا می‌شود همانند روش PS در ابتدا اقدام به شناسایی نقاط پراکنش‌کننده‌های دائمی می‌کند و سپس سری زمانی تداخل‌سنجی را تنها برای نقاط شناسایی شده به روش SBAS که در بخش ۲-۲ تئوری آن بیان شد انجام می‌دهد. تعداد نقاط پراکنش‌کننده پایدار که برای مسیر ۱۹۲ شناسایی شده است برابر با ۱۱۴۰۰۱ و برای مسیر ۴۲۱ تعداد این نقاط ۱۵۱۶۲۷ پراکنش‌گر می‌باشد.

به منظور بهبود دقت نتایج هر دو سری زمانی PS و SBAS را با یکدیگر ترکیب کردیم، با این کار پراکنش‌کننده‌های دائمی شناسایی شده در هر دو روش فوق با یکدیگر ترکیب شده و می‌توانند نتایج سری زمانی را بهبود ببخشند. روش ترکیب بین نتایج PS و SBAS دارای دو مزیت می‌باشد، اول این که تعداد پراکنش‌گرها را در بیشتر موارد افزایش می‌دهد و دوم این که نسبت سیگنال به نویز (SNR) نیز در این روش افزایش می‌یابد [۲۸].

با انجام این عملیات بر روی نتایج بدست آمده از روش‌های قبل تعداد پراکنش‌کننده‌های دائمی برابر با ۲۴۵۹۲۴ و ۲۹۳۳۲۶ عدد به ترتیب برای مسیر ۱۹۲ و ۴۲۱ استخراج شد.

بنابراین در منطقه مطالعاتی ۲۰۴۸۷۳ و ۳۲۶۶۷۳ نقطه به عنوان بازپراکنش‌کننده دائمی به ترتیب برای مسیره‌های ۱۹۲ و ۴۲۱ شناسایی شدند و مقدار γ^{thresh} برابر ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شد.

زمانی که نقطه پراکنش‌کننده پایدار (Stable point) از ترکیب هر دو روش شاخص پراکنندگی دامنه و پایداری فاز (SP=PS+SDFP) شناسایی شدند، فاز آن‌ها نسبت به خطای زاویه دید ناهمبسته در مکان با کم کردن مقادیر تخمین زده شده (معادله ۱۲) تصحیح می‌شود. سپس عمل بازیابی فاز در دو مرحله تحت عنوان بازیابی فاز زمانی و مکانی انجام می‌گیرد (3D unwrap method). نویز مربوط به سری زمانی اختلاف فاز پیکسل‌های همسایه با استفاده از فیلتر پایین‌گذر قبل از عمل بازیابی فاز کم می‌شود. در مرحله آخر، مولفه‌های همبسته و نیز ناهمبسته در مکان و زمان از جمله خطای زاویه دید، خطای اتمسفر و خطای مداری که سیگنال اصلی را ماسک می‌کنند تعدیل شده و عملیات فازبازیابی دوباره با دقت بیشتری انجام می‌شود. در نهایت از جابه‌جایی بدست آمده در راستای خط دید ماهواره برای هر تداخل‌نگار به منظور برآورد نرخ سری زمانی جابه‌جایی و تغییر شکل (MLV)^۱ رخ داده برای هر کاندیدای PS استفاده شد.

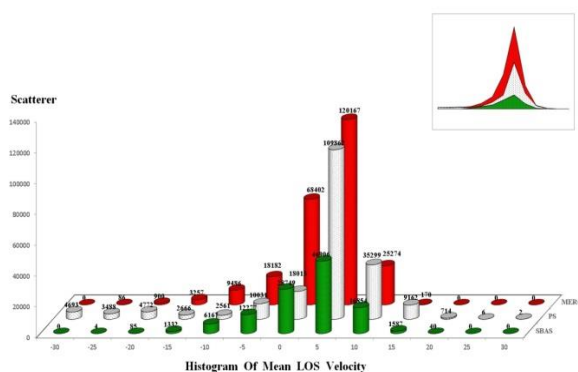
در پردازش و تحلیل سری زمانی SBAS به روش StaMPS همانگونه که در بخش ۲-۲ گفته شد، یک شبکه تداخل‌نگار ایجاد می‌شود، به نحوی که برای تشکیل هر تداخل‌نگار از جفت تصویری استفاده می‌شود که دارای کمترین طول خط مبنا از نظر زمانی و مکانی باشند. در این روش به منظور آنکه از ایجاد خط مبنای مکانی بلند که موجب بروز خطای توپوگرافی بیشتر در فازها می‌شود جلوگیری شود، به جای آنکه تداخل‌نگارها تنها نسبت به یک مرجع تشکیل شوند، در میان آن دسته از تصاویری که دارای خط مبنای زمانی و مکانی کوتاه‌تری هستند تشکیل می‌گردند.

^۱ Mean Line of sight Velocity

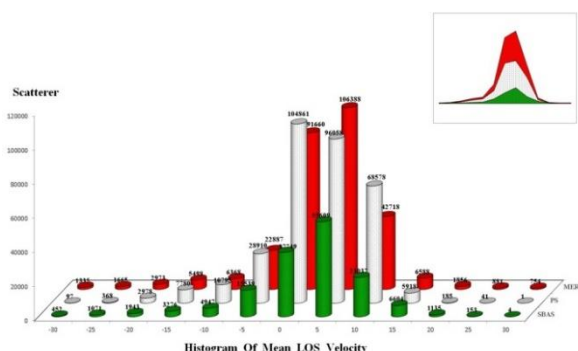
جدول ۱- اطلاعات مربوط به تعداد پراکنش‌گرهای پایدار شناسایی شده در روش‌های مختلف

روش تحلیل سری زمانی	Track 192	Track 421
PS	۲۰۴۸۷۳	۳۲۶۶۷۳
SBAS	۱۱۴۰۰۱	۱۵۱۶۲۷
MERGE PS & SBAS	۲۴۵۹۲۴	۲۹۳۳۲۶

در گراف‌های زیر تعداد نقاط پراکنش کننده دائمی شناسایی شده در مناطق با نرخ جابه‌جایی متفاوت برای هر سه روش ترسیم شده است. همان‌گونه که در نمودارهای مربوط به شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، در بیشتر کلاس‌های مربوط به جابه‌جایی سطح زمین (محور افقی) تعداد پراکنش‌کننده‌های شناسایی شده در روش ترکیبی افزایش یافته (ستون‌های قرمز) که این خود متناظر با افزایش دقت برآورد شده از سری زمانی تغییرات منطقه خواهد شد.



شکل ۶- مقایسه بین تعداد پراکنش‌گرهای دائمی نسبت به نرخ جابه‌جایی مربوط به مسیر ۱۹۲



شکل ۷- مقایسه بین تعداد پراکنش‌گرهای دائمی نسبت به نرخ جابه‌جایی مربوط به مسیر ۴۲۱

۷- نرخ جابه‌جایی نهایی مسیرهای ۱۹۲ و ۴۲۱ بعد از حذف مؤلفه‌های خطا

تا اینجا میدان جابه‌جایی و تغییرشکل را برای دشت قزوین در حضور سایر خطاها (فاز باقیمانده توپوگرافی، رمپ‌های مداری^۱، خطای تأخیر فاز اتمسفری) محاسبه شد. برای روش PS دامنه این تغییرات بین (۱۶ تا ۴۰-) میلی‌متر در سال و برای روش SBAS مقدار آن در بازه (۱۶ تا ۱۹-) میلی‌متر در سال و در نهایت در روش ترکیبی این مقدار بین (۹ تا ۲۳-) برای داده‌های مسیر ۱۹۲ برآورد شد.

جابه‌جایی‌های محاسبه شده در راستای خط دید ماهواره می‌باشند که باید در راستای قائم تصویر شوند ولی چون جابه‌جایی در راستای افقی برای منطقه مطالعاتی اندک است و حساسیت رادار بیشتر نسبت به جابه‌جایی-های عمودی می‌باشد، بنابراین فرض می‌شود که تمام جابه‌جایی در راستای عمودی است. بنابراین جابه‌جایی‌های با مقادیر منفی نشان دهنده سیگنال فرونشست می‌باشند. با توجه به بازه جابه‌جایی استخراج شده برای هر کدام از روش‌ها بیشترین نرخ فرونشست تخمین زده شده به اندازه ۴۰ میلی‌متر در سال مربوط به روش PS و کمترین آن به اندازه ۱۹ میلی‌متر در سال مربوط به روش SBAS برآورد شد، که البته هنوز سهم قابل توجهی از مؤلفه‌های خطا (فاز باقی‌مانده توپوگرافی، رمپ‌های مداری، خطای اتمسفری) در تخمین جابه‌جایی روی نتایج وجود دارد که باید تخمین زده شده و از نتایج حذف شوند. برای حذف این خطاها به ترتیب زیر عمل شد.

فاز باقیمانده توپوگرافی به علت خطا در مدل ارتفاع رقومی و دقیق نبودن آن در مرحله حذف اثر فاز توپوگرافی از تداخل‌نگارها اتفاق می‌افتد. برای حذف این خطا از فیلتر پایین‌گذر در زمان برای تصویر اصلی و فیلتر بالاگذر در زمان برای تصاویر فرعی استفاده کردیم. بعد از تصحیح این خطا، برای روش PS دامنه تغییرات بین (۱۵ تا ۳۸-) میلی‌متر در سال و برای روش SBAS مقدار آن در بازه (۱۱ تا ۲۲-) میلی‌متر در سال و در نهایت در روش ترکیبی این مقدار بین (۱۰ تا ۲۳-) حاصل شد.

^۱ Orbital ramp

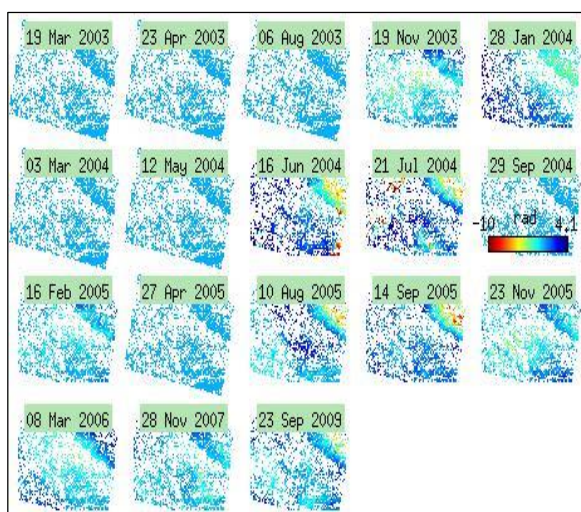
بین (۱۴ تا ۲۶-) میلی‌متر در سال و برای روش SBAS مقدار آن در بازه (۲۰ تا ۳۴-) میلی‌متر در سال و در نهایت در روش ترکیبی این مقدار بین (۳۹ تا ۳۸-) می‌باشد.

با توجه به نتایج بدست آمده برای تصاویر پردازش شده این مسیر، بخش عمده فرونشست در قسمت مرکزی و جنوبی دشت قزوین رخ داده و علاوه بر این یک همپوشانی خیلی خوبی با نتایج بدست آمده از مسیر ۱۹۲ دارند.

بعد از حذف سهم فاز باقیمانده توپوگرافی از نتایج اولیه حاصل شده، برای روش PS دامنه تغییرات بین (۱۴ تا ۲۶-) میلی‌متر در سال و برای روش SBAS مقدار آن در بازه (۲۰ تا ۳۳-) میلی‌متر در سال و در نهایت در روش ترکیبی این مقدار بین (۳۹ تا ۳۹-) حاصل شد.

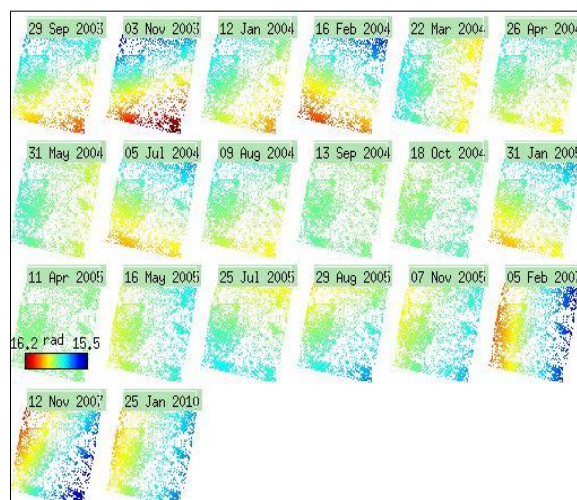
با حذف فاز مداری از روی نتیجه سری زمانی تداخل-سنجی که قبلاً نسبت به باقیمانده فاز توپوگرافی تصحیح شده بودند، دامنه تغییرات میدان جابه‌جایی دستخوش تغییر شد. برای روش PS دامنه تغییرات بین (۱۵ تا ۲۶-) میلی‌متر در سال و برای روش SBAS مقدار آن در بازه (۱۹ تا ۳۵-) میلی‌متر در سال و در نهایت در روش ترکیبی این مقدار بین (۱۴ تا ۳۹-) حاصل شد.

با تصحیحی که توسط داده‌های مریس بر روی نتایج انجام گرفت میدان جابه‌جایی نهایی که نسبت به باقیمانده فاز توپوگرافی، رمپ‌های مداری قبلاً تصحیح شده بود به دامنه تغییرات نهایی بین (۱۵ تا ۲۷-) برای روش PS و به مقدار (۲۰ تا ۳۵-) برای روش SBAS اصلاح شد.



شکل ۹- تداخل‌نگارهای تشکیل شده با تصاویر مریس برای حذف اثر فاز ناشی از تأخیر اتمسفری در روش PS

خطای مداری به علت دقیق نبودن اطلاعات مدارهای مورد استفاده در تشکیل تداخل‌نگارها ایجاد شده و به صورت رمپ‌هایی در راستای آزمون‌های بر روی نتایج تأثیر می‌گذارد. این خطا با برآزش یک رویه درجه یک به مناطقی که فاقد جابه‌جایی هستند در هر تداخل‌نگار مدل سازی شد و از تداخل‌نگار مورد نظر کم شد. با حذف رمپ‌های مداری برای روش PS دامنه تغییرات بین (۱۲ تا ۲۲-) میلی‌متر در سال و برای روش SBAS مقدار آن در بازه (۱۱ تا ۱۴-) میلی‌متر در سال و در نهایت در روش ترکیبی این مقدار بین (۹ تا ۱۶-) حاصل شد.



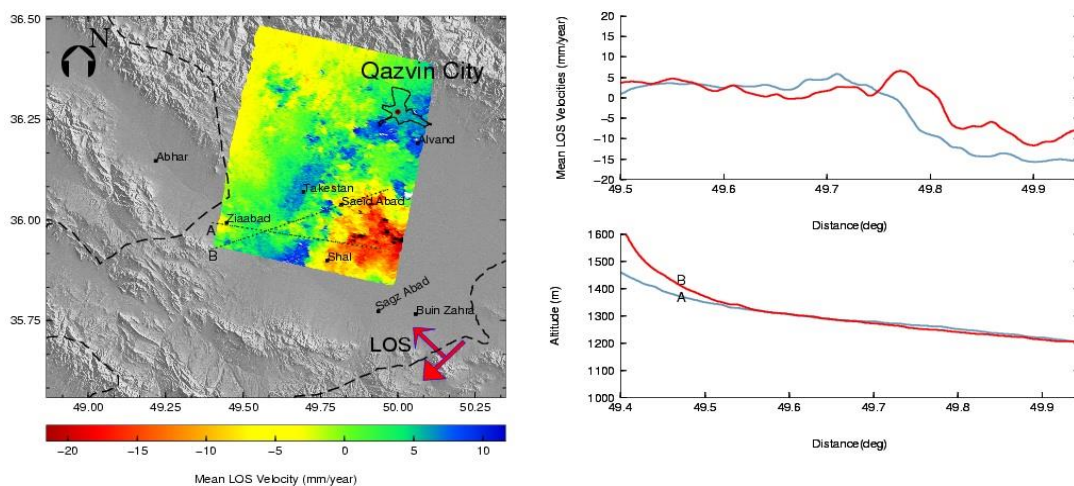
شکل ۸- نمونه‌ای از رمپ‌های مداری استخراج شده برای هر تداخل-نگار در روش PS

خطای فاز اتمسفری^۱ به علت تغییر در ویژگی‌های پراکنشی محیط در دو زمان متفاوت تصویربرداری ایجاد می‌شود و می‌تواند سیگنال اصلی را مخدوش کند. برای حذف این خطا روش‌های مختلفی وجود دارد که در این پژوهش همان گونه که در بخش ۳ گفته شد از داده‌های تمام تفکیک (FR) سنجنده مریس برای برآورد اثر بخار آب و تعدیل خطای فاز ناشی از تأخیر اتمسفر کمک گرفتیم. با حذف فاز اتمسفری از روی نتایج این مسیر دامنه تغییرات نهایی بین (۷ تا ۲۳-) برای روش PS و به مقدار (۹ تا ۲۵-) برای روش SBAS اصلاح شد.

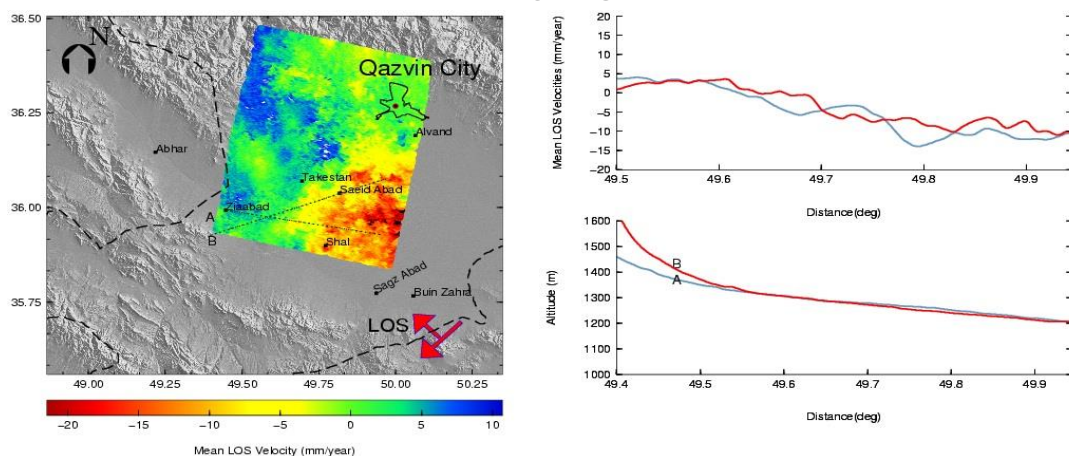
نتایج اولیه پردازش داده‌های مسیر ۴۲۱ در حضور سایر خطاها (فاز باقیمانده توپوگرافی، رمپ‌های مداری، خطای اتمسفری) محاسبه شد. برای روش PS دامنه این تغییرات

^۱ Atmospheric Phase Screen (APS)

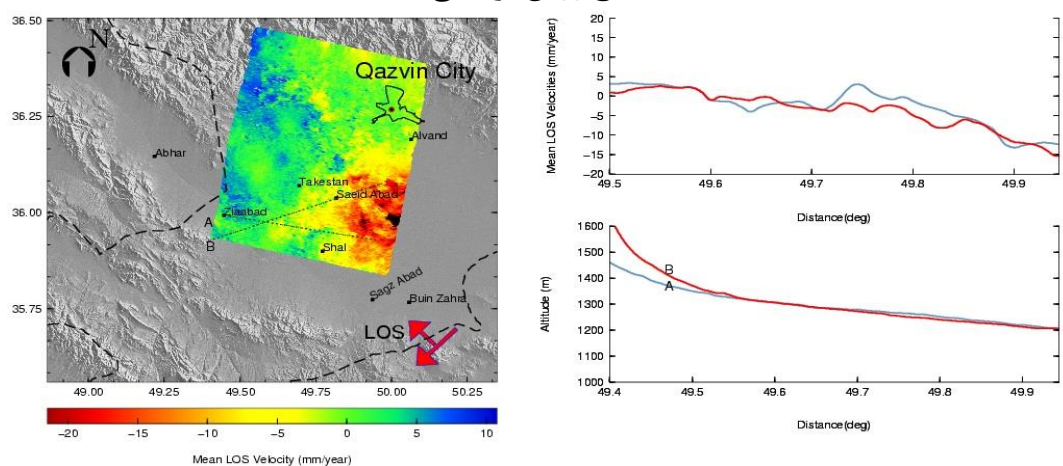
نتایج روش PS



نتایج روش SBAS

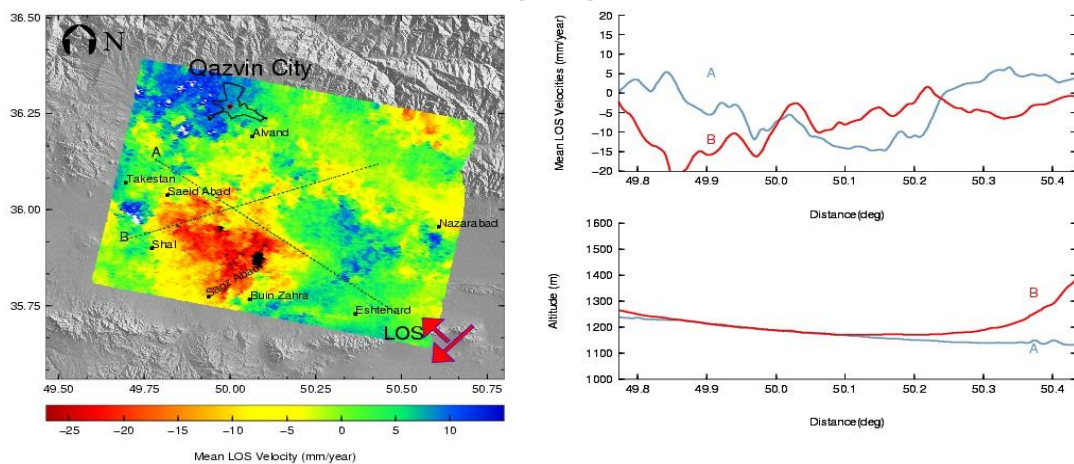


نتایج روش ترکیبی

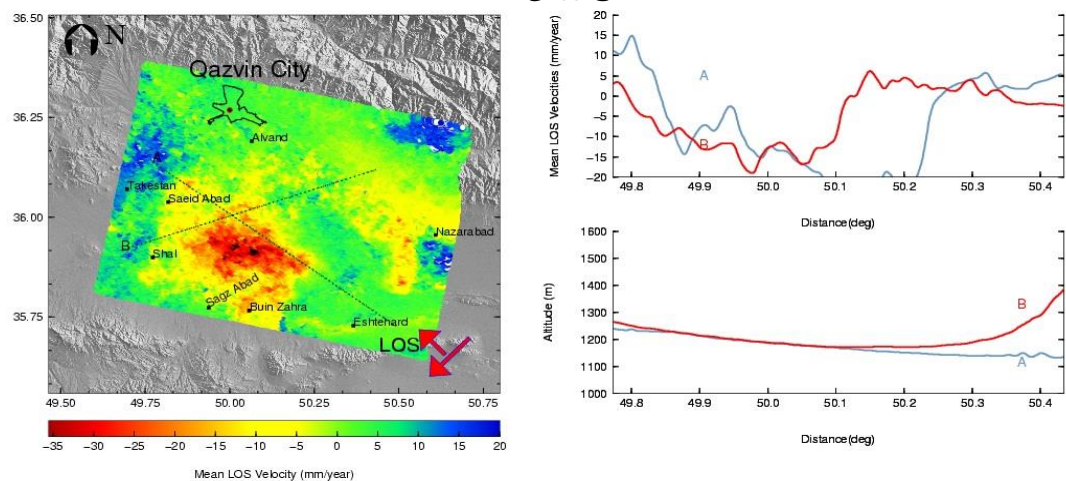


شکل ۱۰- میدان و نرخ جابه‌جایی محاسبه شده پس از حذف فاز باقیمانده توپوگرافی، فاز ناشی از رمپ‌های مداری و فاز اتمسفری برای داده‌های مسیر ۱۹۲ در روش آنالیز سری‌های زمانی تداخل‌سنجی؛ پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS)، طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و روش ترکیبی. دو نمودار در سمت چپ هر شکل به ترتیب از بالا به پایین، نمودار نرخ تغییر شکل و نمودار تغییرات ارتفاعی را در راستای دو پروفیل A و B در شکل سمت راست نشان می‌دهند

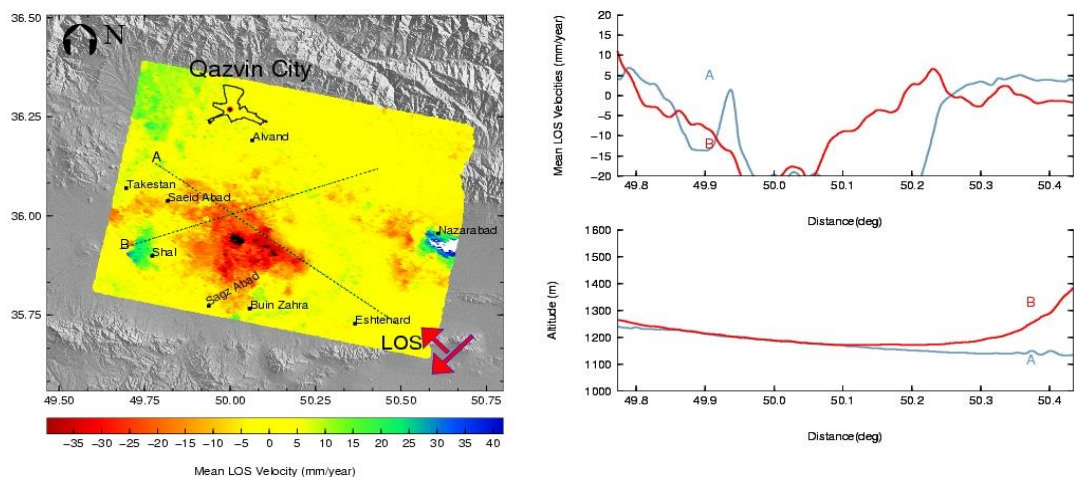
نتایج روش PS



نتایج روش SBAS



نتایج روش ترکیبی



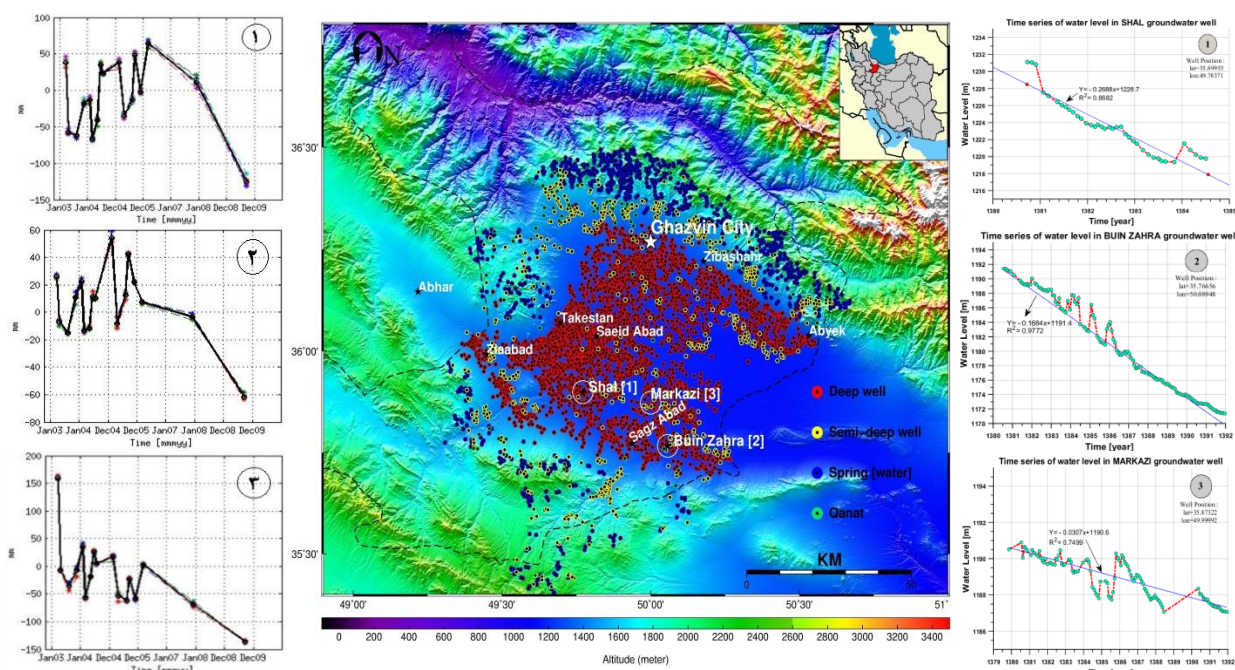
شکل ۱۱- میدان و نرخ جابه‌جایی محاسبه شده پس از حذف فاز باقیمانده توپوگرافی، فاز ناشی از رمپ‌های مداری و فاز اتمسفری برای داده‌های مسیر ۴۲۱ در روش آنالیز سری‌های زمانی تداخل‌سنجی؛ پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS)، طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و روش ترکیبی. دو نمودار در سمت چپ هر شکل به ترتیب از بالا به پایین، نمودار نرخ تغییر شکل و نمودار تغییرات ارتفاعی را در راستای دو پروفیل A و B در شکل سمت راست نشان می‌دهند

۸- تحلیل و آنالیز نتایج

همانگونه که از مشاهدات میدانی و اطلاعات موجود از افت سطح آب‌های زیرزمینی دشت قزوین، انتظار داشتیم پس از پردازش تصاویر راداری با استفاده از الگوریتم سری زمانی تداخل‌سنجی PS و SBAS، منطقه‌ی وسیعی از جنوب دشت قزوین در دوره زمانی بین ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ دارای رفتار فرونشست بود.

ماکزیمم نرخ فرونشستی که پس از پردازش با سری زمانی PS بدست آمد چیزی حدود ۳۷- و ۳۲- میلی‌متر در سال، به ترتیب برای مسیرهای ماهواره‌ای ۱۹۲ (در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰) و ۴۲۱ (در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا

۲۰۰۹) بود، همچنین ماکزیمم نرخ فرونشستی که توسط الگوریتم سری زمانی SBAS حاصل شده برابر ۲۱- و ۳۴- میلی‌متر در سال، به ترتیب مربوط به مسیر ۱۹۲ (در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰) و ۴۲۱ (در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹) بود. این نتایج همخوانی و همپوشانی نسبتاً خوبی با همدیگر داشتند که می‌توانند صحت فرونشست بدست آمده را تایید کنند. با توجه به شکل ۱۲ پر واضح است که منطقه فرونشست بیشتر در مکان‌هایی که تراکم چاه‌های عمیق برای برداشت آب‌های زیرزمینی برای مقاصد مختلف، بیش از سایر مناطق است، اتفاق افتاده است.



شکل ۱۲- سری زمانی فرونشست در سه نقطه شال (۱)، بوئین زهرا (۲)، و مرکزی (۳) در ناحیه فرونشست (نمودارهای سمت چپ)، در هر شکل رنگ‌های مختلف سری زمانی نقاط PS مختلف را در آن نقطه نشان می‌دهند که میانگین تغییرات‌شان با رنگ سیاه مشخص شده است. سری زمانی تغییرات تراز سطح آب اندازه‌گیری شده با چاه‌های پیزومتری در همان سه نقطه (نمودارهای سمت راست) و نقشه پراکندگی منابع آبی در دشت قزوین (شکل وسط)

فرونشست عمدتاً در نواحی بیابانی و قسمت‌هایی که بیشتر آب‌های مورد استفاده را آب‌های زیرزمینی تشکیل می‌دهند، اتفاق افتاده است. از جمله‌ی مناطقی که فرونشست در آن‌ها رخ داده می‌توان به شمال شهرستان بوئین‌زهرا، مناطق اطراف شهرستان شال، مناطق کشاورزی و باغات شهرستان تاکستان، مناطقی از شهرستان آبیک و نظرآباد (کرج) اشاره نمود. مقایسه سری زمانی فرونشست و افت تراز سطح آب در چاه‌های پیزومتری مناطق ۱، ۲ و ۳ گویای ارتباط مستقیم بین این دو پدیده می‌باشد (شکل ۱۲).

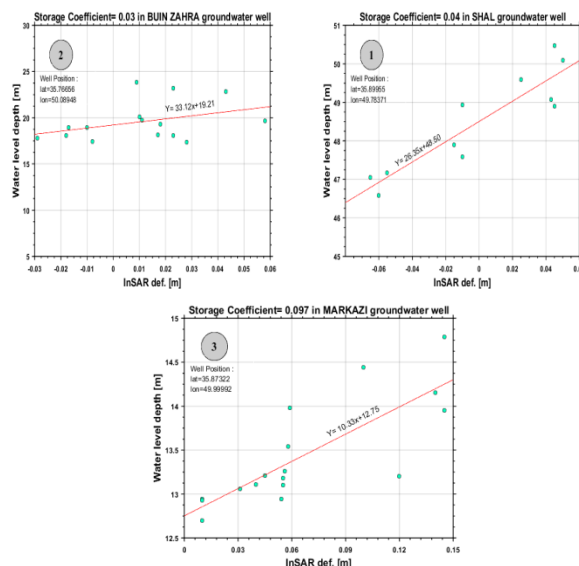
برای مقایسه غیر مستقیم نتایج سطحی (فرونشست) و زیر سطحی (تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی) در مطالعات مختلف استفاده از یک مدل تک بعدی را پیشنهاد داده‌اند که این مدل ارتباط بین فرونشست سطح زمین و ویژگی‌های سیستم آبخوان در منطقه را تعیین می‌کند. این مدل ارتباط بین دو پارامتر ذکر شده را با استفاده از ضریب نگهداری (Storage coefficient) بیان می‌کند که این ضریب برابر با معکوس شیب خط بین تغییرات عمق سطح آب چاه نسبت به فرونشست سطح زمین در محل چاه می‌باشد.

۹- نتیجه گیری

بررسی های میدانی صورت گرفته نشان می دهد که دشت قزوین به دلیل استخراج بیش از حد آب های زیرزمینی دچار فرونشست شده است. در این مطالعه، قابلیت روش تحلیل سری های زمانی تداخل سنجی PS و SBAS در تعیین نرخ و الگوی منطقه تحت تأثیر فرونشست در دشت قزوین به تصویر کشیده شده است.

داده های راداری مورد استفاده، شامل دو مجموعه داده سنجنده ENVISAT ASAR مربوط به گذر پایین مسیر ۱۹۲ و ۴۲۱ می باشند، که پردازش سری های زمانی PS و SBAS روی آن ها صورت گرفت، بعد از حذف منابع خطا از روی نتایج این سری های زمانی مشخص شد که فرونشستی پیوسته و قابل ملاحظه ای در این منطقه در حال اتفاق افتادن می باشد. هر دو سری زمانی تداخل سنجی PS و SBAS ماکزیمم دامنه فرونشستی حدود ۳۰ تا ۳۵ میلی متر در سال را مشخص می کنند و نتایج هر دو روش همخوانی خیلی خوبی با همدیگر دارند. مقایسه بین وسعت و الگوی فرونشست اتفاق افتاده در این منطقه، حاصل از نتایج تکنیک تداخل سنجی راداری و موقعیت و تراکم چاه های برداشت آب های زیرزمینی در این دشت نشان می دهد که فرونشست درست در همان مناطقی که تراکم این چاه ها زیاد است، اتفاق افتاده است.

فرونشست عمده در نواحی بیابانی و قسمت هایی که بیشتر آب های مورد استفاده را آب های زیرزمینی تشکیل می دهند، اتفاق افتاده است. از جمله ای مناطقی که فرونشست در آن ها رخ داده می توان به شمال شهرستان بوئین زهرا، مناطق اطراف شهرستان شال، مناطق کشاورزی و باغات شهرستان تاکستان، مناطقی از شهرستان آبیک و نظرآباد (کرج) اشاره نمود. سری های زمانی تغییرات سطحی مربوط به نواحی که در آن ها فرونشست رخ داده نشان می دهد که در سال های اخیر روند فرونشست منطقه سرعت بالایی پیدا کرده و در حال رشد می باشد. بنابراین برای جلوگیری از سرعت رشد این پدیده در این مناطق و خسارت به ساختار زیربنایی و تحمیل هزینه های اقتصادی زیاد نیازمند مدیریت درست برداشت از منابع آب های زیرزمینی و سایر عوامل تأثیرگذار در فرونشست زمین هستیم.



شکل ۱۳- محاسبه ضریب نکه داری برای چاه های ۱، ۲ و ۳

نتایج بدست آمده برای ضریب نکه داری نشان می دهد که بزرگترین مقدار مربوط به چاه پیزومتری شماره ۳ در مرکز منطقه فرونشست می باشد.

جدول ۲- اطلاعات مربوط به میزان نشست، تغییرات سطح آب و ضریب نکه داری در سه نمونه از چاه های پیزومتری حفر شده در ناحیه

شماره چاه	بازه زمانی	فرونشست سطحی (m)	افت سطح آب چاه (m)	ضریب نکه داری
۱	۲۰۰۳-۲۰۰۵	۰٫۲	۴٫۱	۰٫۰۴
۲	۲۰۰۳-۲۰۱۰	۰٫۰۸۵	۱۶٫۰۸	۰٫۰۳
۳	۲۰۰۳-۲۰۰۹	۰٫۳	۲٫۷۲	۰٫۰۹

نرخ سرعت محاسبه شده برای چاه های پیزومتر به ترتیب برای چاه های ۱، ۲ و ۳ برابر با ۱۵، ۱۰ و ۳۲ میلی متر در سال برآورد شد. در چاه شماره ۲ علارغم تغییرات ۱۶ متری عمق سطح آب شاهد فرونشست کمی نسبت به دو ناحیه دیگر هستیم (ضریب نکه داری کوچک) بنابراین در اینجا عوامل دیگری مانند دانه بندی خاک می تواند در نشست زمین موثر بوده باشد. علاوه بر این در چاه شماره ۳ با وجود افت کم سطح آب فرونشست بالایی رخ داده در اینجا ضریب نکه داری دارای بیشترین مقدار است. بنابراین مقایسه بین نتایج نشان می دهد که با استفاده از مقدار ضریب نکه داری بدست آمده می توان رفتار سیستم آبخوان در ارتباط با تغییرات سطحی را تا حدود زیادی پیش بینی کرد.

سپاسگزاری

سازمان با شماره اختصاصی C1P.7023 و همچنین
استانداری قزوین و شرکت منابع پایه آب تهران به جهت
همکاری‌های انجام شده تشکر و قدردانی می‌کنند.

مؤلفان این مقاله از آژانس فضایی اروپا به خاطر در
اختیار دادن تصاویر اتمسفری MERIS و داده‌های راداری
ENVISAT ASAR پس از تنظیم و ارائه پروپوزال به این

مراجع

- [1] Bamler, R., Principles of synthetic aperture radar. *Surveys in Geophysics*, 2000. 21(2-3): p. 147-157.
- [2] Ferretti, A., C. Prati, and F.L. Rocca. Permanent scatterers in SAR interferometry. in *Remote Sensing*. 1999. International Society for Optics and Photonics.
- [3] Massonnet, D. and K.L. Feigl, Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *REVIEWS OF GEOPHYSICS-RICHMOND VIRGINIA THEN WASHINGTON-*, 1998. 36: p. 441-500.
- [4] Strozzi, T., et al., Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2002. 40(11): p. 2384-2391.
- [5] Zisk, S., A new, earth-based radar technique for the measurement of lunar topography. *The moon*, 1972. 4(3-4): p. 296-306.
- [6] Motagh, M., et al., Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 2007. 168(2): p. 518-526.
- [7] Anderssohn, J., et al., Land subsidence pattern controlled by old alpine basement faults in the Kashmar Valley, northeast Iran: results from InSAR and levelling. *Geophysical Journal International*, 2008. 174(1): p. 287-294.
- [8] Dehghani, M., et al., InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. *Geophysical Journal International*, 2009. 178(1): p. 47-56.
- [9] Karimzadeh, S., Characterization of land subsidence in Tabriz basin (NW Iran) using InSAR and watershed analyses. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2015: p. 1-15.
- [10] Alipour, S., et al. InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran. in *Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas*,. Second Workshop on IEEE. 2008.
- [11] Kiseleva, E., et al., PS-InSAR monitoring of landslide activity in the Black Sea coast of the Caucasus. *Procedia Technology*, 2014. 16: p. 404-413.
- [12] Li, T., J. Liu, and M. Liao. Land subsidence monitoring with Envisat and ERS-1/2 satellites. in *MIPPR 2005 SAR and Multispectral Image Processing 2005*. International Society for Optics and Photonics.
- [13] Sousa, J.J., et al., Persistent scatterer InSAR: a comparison of methodologies based on a model of temporal deformation vs. spatial correlation selection criteria. *Remote Sensing of Environment*, 20: (10)115. 11p.2652-2663.
- [14] Zhou, Z., The applications of InSAR time series analysis for monitoring long-term surface change in peatlands. 2013, University of Glasgow.
- [15] Samsonov, S., Topographic correction for ALOS PALSAR interferometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2010. 48(7): p. 3020-3027.
- [16] Dong, S., et al., Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method. *Environmental earth sciences*, 2014. 72(3): p. 677-691.
- [17] Jung, H.-S., et al., Improvement of small baseline subset (SBAS) algorithm for measuring time-series surface deformations from differential SAR interferograms. *Korean Journal of Remote Sensing*, 2008. 24(2): p. 165-177.
- [18] Lee, C.-W., et al., Surface deformation of Augustine Volcano, 1992–2005, from multiple-interferogram processing using a refined small baseline subset (SBAS) interferometric synthetic aperture radar (InSAR) approach. *The*, 2006: p. 453-465.
- [19] Berardino, P., et al., A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2002. 40(11): p. 2375-2383.

- [20] Hooper, A.J., Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation. 2006.
- [21] A., E.K.n.A.V.M.n.A.E.S.n.A.P.D.n.A.V.G.n.A.E.T.n.A., PS-InSAR Monitoring of Landslide Activity in the Black Sea Coast of the Caucasus. Procedia Technology, 2014.
- [22] Hooper, A., P. Segall, and H. Zebker, Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 2007. 112(B7).
- [23] Envisat precise orbits (EIGEN-CG03C orbits). summer of 2006; Available from: <http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/orbits/>.
- [24] Delft Orbits. 25 Nov 2008; Available from: <http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/tools/getorb/>.
- [25] Li, Z., Correction of atmospheric water vapour effects on repeat-pass SAR interferometry using GPS, MODIS and MERIS data. Doctor of Philosophy, University of London, 2005.
- [26] Ferretti, A., et al., InSAR Principles-Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. Vol. 19. 2007.
- [27] aquifer, E., Model of exploitation of surface and underground water resources Qazvin Plain. 1390: Regional Water Organization of Qazvin.
- [28] Bouraoui, S., Time series analysis of SAR images using persistent scatterer (PS), small baseline (SB) and merged approaches in regions with small surface deformation. 2013, Université de Strasbourg.