نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۸
Vol.7, No.2, Summer 2019
۶۳-۸۱
مقاله پژوهشی

اهمیت طرح هندسی نقاط مرجع در برآورد تغییر شکل مطلق از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری

آرزو تقی‌بیگلو [1*]، بهزاد وثوقی [2]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئودزی- دانشکده مهندسی نقشه‌برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشیار گروه ژئودزی- دانشکده مهندسی نقشه‌برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۷

چکیده

دستیابی به تغییرشکل‌مطلق با استفاده از روش تداخل‌سنجی‌راداری، نیازمند معرفی یک نقطه یا ناحیه مرجع می‌باشد. در این پژوهش جهت معرفی این نقطه یا ناحیه و برآورد تغییرشکل‌مطلق، از ایستگاه‌های ژئودینامیک موجود در منطقه استفاده شد. باتوجه به این‌که هیچ‌یک از پراکنش‌گرهای دائمی، بر ایستگاه‌های ژئودینامیک منطبق نیستند؛ امکان معرفی یک پراکنش‌گر خاص به‌عنوان نقطه مرجع وجود ندارد. از این‌رو طرح‌های هندسی مختلفی از پراکنش‌گرها، به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و تاثیر انتخاب این طرح‌ها بر روی تغییرشکل مطلق بررسی شده است. این طرح‌ها شامل انتخاب نزدیک‌ترین پراکنش‌گر دائمی به هر ایستگاه ژئودینامیک، میانگین پراکنش‌گرهای دائمی موجود در فاصله مشخصی از ایستگاه‌ها، میانگین وزن‌دار تمامی پراکنش‌گرهای دائمی موجود در منطقه و درونیابی مقدار تغییرشکل در موقعیت ایستگاه‌های ژئودینامیک هستند. از طرفی برای مطالعه تاثیر شرایط فیزیکی و محل قرارگیری نقطه مرجع برروی تغییرشکل مطلق، پیاده‌سازی این طرح‌های هندسی بر روی هریک از ایستگاه‌های ژئودینامیک انجام شده است. نتایج حاصل، بیانگر تغییرشکل‌های مطلق متفاوت نسبت به نقاط مرجع مختلف، با به‌کارگیری طرح‌های هندسی مختلف می‌باشد. بیشترین خطای جذر میانگین مربعات برای اختلاف نتایج تداخل‌سنجی راداری و سیستم تعیین موقعیت جهانی در برآورد بردار سرعت مطلق ایستگاه‌های ژئودینامیک در راستای خط دید ماهواره، از انتخاب نزدیک‌ترین پراکنش‌گر دائمی به ایستگاه ژئودینامیک قله توچال به عنوان نقطه مرجع حاصل می‌شود که نزدیک به ۳/۵ میلی‌متر است. کمترین اختلاف نیز مربوط به معرفی میانگین وزن‌دار تمامی پراکنش‌گرهای دائمی به‌عنوان مرجع است که برای تمام ایستگاه‌های ژئودینامیک مقداری کمتر از ۱ میلی‌متر دارد.

کلیدواژه‌ها: تداخل‌سنجی‌راداری، تغییرشکل‌مطلق، قیود دیتوم، طرح هندسی نقاط مرجع.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، روبروی ساختمان اسکان، دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
تلفن : ۰۹۱۲۷۴۲۰۱۲۱

Email: taghibeigloo@email.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

۱- مقدمه

امروزه تداخل‌سنجی‌رادار ی[1] (*InSAR*) به‌جهت قدرت تفکیک[2] مکانی بالا و توانایی اخذ داده از راه دور روش بسیار موثری در اندازه‌گیری تغییرشکل سطح زمین محسوب می‌شود. نخستین بار شیوه محاسبه دگرشکلی[3] سطح زمین با به کارگیری تداخل‌سنجی راداری در راستای خط دید ماهواره با دقت کمتر از سانتی‌متر توسط گابریل[4] و همکاران در سال ۱۹۸۹ بیان شد و توسط مسونت[5] و همکاران در سال ۱۹۹۳ و زبکر[6] و همکاران در سال ۱۹۹۴ جهت دستیابی به دگرشکلی سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه لندر ز[7] به‌کارگرفته‌شد [۱،۲،۳و۴]. در دهه‌های اخیر تداخل‌سنجی راداری به عنوان روش موثری برای اندازه‌گیری دگرشکلی پوسته زمین ناشی از آتش‌فشانهای فعال، حرکات هم‌لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای، فرونشست و غیره شناخته شده‌است.

برخلاف‌این‌که تداخل‌سنجی‌راداری انقلابی در اندازه‌گیری دگرشکلی سطح زمین پدید آورد ولی با محدودیت‌هایی همچون، تغییر خواص پراکنشی سطح زمین در طول زمان، تاثیر شرایط جوی و خطاهای مداری و مدل ارتفاعی روبه‌رو بود. این محدودیت‌ها، دستیابی به دگرشکلی‌های کوچک را با مشکل مواجه می‌کردند. بنابراین جهت مقابله با این محدودیت‌ها روش‌هایی همچون پراکنش‌گرهای دائمی[8] (*PS*) و خط مبنای کوتاه[9] به‌کارگرفته شدند.

نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی‌راداری انعکاس‌دهنده تغییرشکل نسبی سطح زمین هستند، یعنی همواره نسبت به یک نقطه یا ناحیه مرجع برآورد می‌شوند [۵]. از این‌رو مقایسه آن‌ها با نتایج حاصل از سایر اندازه‌گیری‌های ژئودتیک مانند ترازیابی و مشاهدات سیستم ماهواره‌ای تعیین موقعیت جهانی[10] (*GNSS*) دشوار است. از سوی دیگر برخی از کاربردهای تداخل‌سنجی‌راداری مستلزم برآورد تغییرشکل مطلق هستند که قابل ارائه در یک چارچوب مرجع استاندارد[11] باشند و برقراری ارتباط بین این برآوردها و برآوردهای حاصل از سایر روش‌های ژئودتیک امکان‌پذیر باشد. از جمله این کاربردها می‌توان به تلفیق اندازه‌گیری‌های *GNSS* و *InSAR* به منظور برآورد میدان جابجایی سه‌بعدی اشاره نمود. این امر نیازمند برقراری ارتباط بین دیتوم محلی اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی راداری و یک دیتوم جهانی است. جهت برقراری این ارتباط می‌توان از نقطه‌ای که دارای بردار موقعیت و سرعت مشخص در یک چارچوب مرجع استاندارد است، به‌عنوان نقطه مرجع استفاده کرد [۵]. محل استقرار نقطه مرجع و ویژگی‌های آن می‌تواند تاثیر قابل توجهی برروی برآوردهای مطلق تغییرشکل داشته باشد. ماهاپاترا[12] در سال ۲۰۱۵، از ایستگاه‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی دائمی جهت تبدیل دیتوم محلی اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی راداری به یک دیتوم مرجع استاندارد استفاده کرد [۵]. او با نصب یک فرستنده و گیرنده ماهواره‌ای[13] در ایستگاه *GNSS*، مشاهدات تداخل سنجی راداری و *GNSS* را در یک نقطه و به‌طور هم‌زمان دریافت کرد و جهت دستیابی به میدان‌های تغییرشکل مطلق مورد استفاده قرار داد. ماهاپاترا این کار را برای سه ایستگاه *GNSS* انجام و نشان داد که با افزایش فاصله پراکنش‌گرها از نقطه مرجع، دقت آن‌ها کاهش می‌یابد. هانسن[14] نیز در سال ۲۰۰۴ مطالعه‌ای بر روی کیفیت مشاهدات تفاضلی دوگانه تداخل سنجی‌راداری انجام داد و نشان داد که همدوسی نقطه مرجع و فاصله آن از سایر پراکنش‌گرها بر روی دقت این مشاهدات موثر است [۶].

نظر به این‌که در بسیاری از مطالعات امکان نصب فرستنده و گیرنده ماهواره‌ای در ایستگاه‌های *GNSS* وجود ندارد و یا از تصاویر سال‌های گذشته که ایستگاه‌های *GNSS* فاقد چنین امکاناتی بودند، جهت مطالعه پدیده‌ای استفاده می‌گردد، در نتیجه هیچ پراکنش‌گری بر ایستگاه‌های *GNSS* در تصویر منطبق

[1] *Interferometry SAR*
[2] *Resolution*
[3] *Deformation*
[4] *Gabriel*
[5] *Massonnet*
[6] *Zebker*
[7] *Landers*
[8] *Persistent Scatterer (PS)*
[9] *Small Baseline (SB)*
[10] *Global Navigation Satellite System*
[11] *Standard Reference Frame*
[12] *Pooja S.Mahapatra*
[13] *Transponder*
[14] *Ramon F. Hanssen*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

نمی‌شود. بنابراین لازم است نقطه یا ناحیه‌ای حول این ایستگاه‌ها به‌عنوان مرجع انتخاب شود. در صورتی که نقطه (یا ناحیه) مرجع به درستی انتخاب نشود، خطایی ناشی از اختلاف جابجایی برآورد شده برای آن با جابجایی ایستگاه *GNSS* وارد نتایج می‌شود. با توجه به‌اینکه جابجایی همه پراکنش‌گرها نسبت به نقطه یا ناحیه مرجع محاسبه می‌شود، این خطا در برآورد جابجایی تمامی پراکنش‌گرها مشاهده می‌شود. ازاین‌رو در این پژوهش از طرح‌های هندسی مختلف نقاط مرجع جهت برآورد تغییرشکل مطلق استفاده شده و تاثیر این طرح‌ها بر روی تغییرشکل مطلق مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- برآورد تغییرشکل مطلق با انتخاب ناحیه مرجع مناسب

در این بخش، پیش از پرداختن به برآورد تغییرشکل مطلق با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، توضیح مختصری درمورد اصول این روش ارائه می‌شود.

۲-۱- اصول تداخل‌سنجی‌راداری

رادار با دهانه ترکیبی[1] (*SAR*) روشی است که جهت تولید تصاویر راداری با قدرت تفکیک مکانی بالا بااستفاده از داده‌های اخذ شده توسط دستگاه‌های راداری پهلونگر[2] که به وسیله هواپیما یا فضاپیما حمل می‌شوند، به‌کار گرفته می‌شود [۷]. دامنه یک تصویر راداری با دهانه ترکیبی[3] را می‌توان به عنوان خواص پراکنشی سطح زمین تفسیر کرد. مولفه فاز، میانگین وزن‌داری از تاخیر فاز بین ارسال و دریافت همه پراکنش‌گرهای داخل یک المان متناظر با پیکسل بر روی زمین است. در صورتی که خواص پراکنشی زمین در طول زمان تقریباً ثابت باقی بماند، می‌توان اختلاف فاز بین دو تصویر را به عنوان تغییر فاصله از دستگاه تا زمین در راستای برد تفسیر کرد. تداخل‌سنجی، فرایند ضرب یک تصویر مختلط *SAR* در مزدوج تصویر دیگر است. بنابراین تداخل‌نمای[4] حاصل، شامل اختلاف فاز بین تصاویر می‌باشد [۶و ۸]. از این پس در این مقاله از تداخل‌سنجی‌راداری با نام *InSAR* نیز یاد می‌شود. باید توجه داشت، با وجود اینکه در این روش یک تداخل‌نما می‌تواند بین دو تصویر اخذ شده در یک زمان با موقعیت‌های متفاوت تشکیل شود، زمانی که هدف، اندازه‌گیری دگرشکلی سطح زمین باشد، می‌بایست تصاویر در زمان‌های مختلف اخذ شوند [۹].

برخلاف این‌که تداخل‌سنجی‌راداری روش موثری جهت اندازه‌گیری دگرشکلی پوسته زمین است، معمولا هر تداخل‌نما دارای نواحی‌ای است که در آن نواحی سیگنال‌ها ناهمبسته می‌شوند و اندازه‌گیری را غیرممکن می‌سازند. اگر منطقه دارای پوشش گیاهی باشد یا فصول زیادی از سال پوشیده از برف باشد، تغییرات خواص پراکنشی با زمان منجر به کاهش همدوسی[5] می‌شود که این پدیده به‌عنوان ناهمبستگی زمانی[6] شناخته می‌شود [۱۰]. ناهمبستگی ممکن است از تغییر در هندسه تصویربرداری نیز ناشی شود. اگر خط مبنای عمودی بین موقعیت ماهواره در زمان اخذ تصاویر مختلف صفر نباشد، اختلاف در زاویه فرود[7] باعث کاهش همدوسی می‌شود. این پدیده را ناهمبستگی مکانی می‌نامند که با افزایش خط مبنای عمودی افزایش می‌یابد [۱۱]. علاوه‌بر این حتی در نواحی‌ای که اندازه‌گیری امکان‌پذیر است، سیگنال ناشی از دگرشکلی سطح زمین توسط نویز ناشی از تغییر خواص اتمسفری و عدم صحت مدار ماهواره و مدل ارتفاعی سطح زمین، تغییر می‌کند.

روش‌های تداخل‌سنجی چند زمانه[8] که شامل پردازش تصاویر اخذ شده در چند زمان مختلف هستند، راه‌حلی برای این مشکلات محسوب می‌شوند [۱]. دو روش رایج تداخل‌سنجی چندزمانه، پراکنش‌گرهای دائمی و خط مبنای کوتاه می‌باشند. روش خط مبنای کوتاه شامل تشکیل تعداد زیادی تداخل‌نما به روش متداول و معکوس کردن آن‌ها به منظور دستیابی به جابجایی‌شان در طول زمان است [۹]. روش پراکنش‌گرهای دائمی، شامل شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی است که خواص پراکنشی‌شان با گذشت زمان و در حالتی که از زوایای مختلف مشاهده می‌شوند، ثابت باقی می‌ماند.

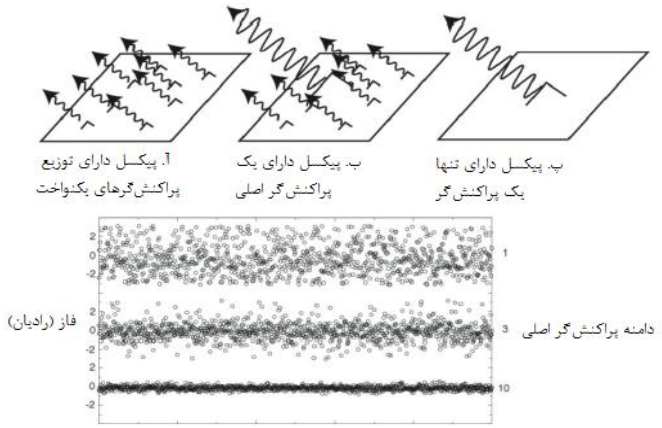
[1] *Synthetic Aperture Radar*
[2] *Side-looking*
[3] *SAR*
[4] *Interferogram*
[5] *Coherence*
[6] *Temporal decorrelation*
[7] *Incidence angle*
[8] *Multi-temporal InSAR*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

از این پس در این مقاله از پراکنش‌گرهای دائمی با عنوان PS یاد می‌شود.

در روش PS المان‌های قابل تفکیکی[1] که انعکاس یک پراکنش‌گر واحد، بخش اصلی پراکنش آن‌ها را تشکیل دهد، جستجو می‌شوند. اگر یک المان تنها دارای یک پراکنش‌گر باشد، هیچ بخشی از انعکاس آن در اثر تغییرات هندسه، ناهمبستگی مکانی یا ناهمبستگی زمانی از بین نخواهد رفت [۱۲].

شکل(۱) نتایج شبیه‌سازی انعکاس رادار در حالتی که پراکنش‌گرها به طور تصادفی جابه‌جا می‌شوند (تاثیر ناهمبستگی زمانی) را نشان می‌دهد. فاز و دامنه قسمت (آ) شکل(۱) معادل فاز و دامنه‌ای است که با به‌کارگیری روش تداخل‌سنجی متداول حاصل می‌شود. در این حالت تغییرات کوچک در هندسه دید یا حرکت تصادفی پراکنش‌کننده‌ها منجر به ناهمبستگی زمانی و مکانی می‌شود. درحالی‌که اگر مانند قسمت (پ) یک پراکنش‌گر واحد وجود داشته باشد، تنها یک انعکاس وجود خواهد داشت؛ درنتیجه ناهمبستگی اتفاق نمی‌افتد و فاز پیکسل تقریبا در طول زمان ثابت خواهد بود. در قسمت (ب) نیز اگرچه فاز نهایی را چندین پراکنش‌گر ارائه می‌دهند، اما فاز کاملا پایدار است. بنابراین پیکسل‌هایی با ویژگی‌های حالت دوم و سوم می‌توانند پراکنش‌گرهای دائمی باشند.



شکل ۱: پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی و فاز آن‌ها. پلات‌های پراکنش بالا، فاز مشاهده شده از یک پیکسل شامل پراکنش‌گرهایی با دامنه ۱، ۳ و ۱۰ برابر پراکنش‌گر زمینه را نشان می‌دهد [۱۲]

منشاء روش‌های اولیه PS روشی بود که توسط فرتی[2] و همکاران در سال ۲۰۰۰ ارائه شد [۱۳]. در این روش‌ها، برای جستجوی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی، ابتدا مجموعه اولیه‌ای از پیکسل‌های PS که دامنه تقریبا ثابتی دارند، شناسایی می‌شوند. سپس فاز هر پیکسل کاندیدا، با پیکسل‌های کاندیدای مجاور مقایسه می‌شود. تنها پیکسل‌هایی که تاریخچه فازشان منطبق بر یک مدل فرضی از تغییرشکل باشد، معتبر تلقی می‌شوند. در نهایت کاندیداهای معتبر با استفاده از آنالیز فاز جهت شناسایی تعداد بیشتری از پیکسل‌های PS به کار گرفته می‌شوند [۱۴].

در این روش‌ها پراکنش‌کننده‌های دائمی بازتابنده‌های گوشه‌ای[3] یا عوارض طبیعی با خواص پراکنشی ثابت هستند که رفتار جابجایی آن‌ها مشابه مدل فرضی جابجایی باشد. این روش‌ها برای مناطق شهری که سازه‌ها پراکنش‌کننده‌های مناسبی فراهم می‌کنند، عملکرد مناسبی دارند؛ اما مشکلی که با آن مواجه‌اند این است که سازه‌های دست‌ساز بشر، در تمامی مناطق زمین وجود ندارند. به‌علاوه در این روش‌ها، شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی، بر مبنای شباهت تاریخچه فاز آن‌ها به یک مدل فرضی تغییر شکل صورت می‌گیرد. درحالی‌که ویژگی‌های الگوی زمانی تغییرشکل یکی از اهداف مطالعه تغییرشکل است و معمولا چنین

[1] *Resolution elements*
[2] *Ferretti*
[3] *Corner reflector*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

الگویی در دسترس نمی‌باشد. از این رو در سال ۲۰۰۶ هوپر[1]، روش استنفورد برای PS[2] (استمپس[3]) را ارائه داد. این روش از همبستگی مکانی فاز تداخل‌نما جهت یافتن پیکسل‌هایی با پراکندگی فاز پایین در تمام نواحی حتی مناطق بدون ساختمان استفاده می‌کند و نیازی به دانش قبلی در ارتباط با تغییرشکل جهت شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی ندارد [۱۴]. در این روش ابتدا مجموعه‌ای اولیه از پیکسل‌ها با استفاده از آنالیز دامنه انتخاب می‌شوند؛ سپس پایداری فاز آن‌ها با به کارگیری آنالیز فاز، برآورد می‌شود. پایداری فاز تحت این فرض که تغییرشکل به صورت مکانی همبسته است، آنالیز می‌شود. در نتیجه واضح است که سیگنال مربوط به جابجایی انفرادی یک پراکنش‌گر ممکن است به عنوان نویز تلقی شود [۱۵].

۲-۲- میدان‌های جابجایی مطلق *InSAR*

در روش تداخل‌سنجی راداری، جهت دستیابی به جابجایی در امتداد خط دید ماهواره[4]، مشاهدات همواره نسبت به یک نقطه مرجع با موقعیت مشخص (و یا یک ناحیه مرجع) و یک اپک مرجع، انجام می‌شوند. درصورتی‌که مشاهدات به صورت تفاضلی یگانه (نسبت به زمان) انجام شود، با به‌کارگیری بردار وضعیت ماهواره طی زمان تصویربرداری و با در اختیار داشتن اطلاعاتی همچون مرکز ثقل داپلر، شعاع محلی زمین و ارتفاعات توپوگرافی، انتقال اندازه‌گیری‌های *InSAR* از مختصات‌های راداری به یک چارچوب مرجع زمینی[5] (*TRF*) امکان‌پذیر است. اما مدل‌های مداری دقت کافی جهت دستیابی به دقت ژئودتیک موردنیاز را ندارند. ازاین رو استفاده از مشاهدات تفاضلی دوگانه نسبت به یک نقطه (یا ناحیه) و یک اپک مرجع ضرورت می‌یابد[۵].

در صورتی‌که اندازه‌گیری‌های *InSAR* در یک سری زمانی مورد استفاده قرار گیرند، می‌توان جابجایی‌های تفاضلی دوگانه را به برآوردهای سرعت تفاضلی یگانه (تنها تفاضلی در حوزه مکان) تعمیم داد. مقدار جابجایی (یا سرعتی) که برای نقطه مرجع *InSAR* انتخاب می‌شود، می‌تواند اختیاری باشد. این مقدار اغلب به‌منظور سهولت تفسیر برآوردهای جابجایی به‌صورت قراردادی انتخاب می‌شود. برای نمونه، مقدار جابجایی (یا سرعت) صفر برای نقطه مرجع واقع در منطقه‌ای که پایدار فرض شده‌است، مدنظر قرار می‌گیرد. در صورت پایدار فرض نمودن یک منطقه، تفسیر نتایج تغییرشکل تابع این فرض خواهد بود. در این حالت برآورد تغییرشکل به صورت نسبی انجام می‌شود.

با وجود اینکه اغلب روش‌های تعیین‌موقعیت ژئودتیک، نسبی هستند، برخی کاربردها نیازمند برآوردهای جابجایی (یا سرعت) مطلق *InSAR* می‌باشند؛ یعنی برآوردهایی که قابلیت بیان شدن در یک *TRF* و درنتیجه مرتبط شدن با نتایج سایر روش‌ها را داشته باشند. هرگاه دو یا چند مجموعه از برآوردها در چارچوب‌های مرجع (یا دیتوم‌ها) متفاوتی بیان شوند، برقراری ارتباط میان دیتوم‌ها ضرورت می‌یابد [۱۶].

برآوردهای جابجایی (یا سرعت) *InSAR* از این جهت که همواره نسبت به یک نقطه (یا ناحیه) مرجع در تصاویر *SAR* تعیین می‌شوند، دارای دیتوم محلی هستند. جهت ارائه برآوردهای تغییرشکل استخراج شده از *InSAR* در یک *TRF*، می‌بایست دیتوم محلی آن‌ها با یک دیتوم جهانی مرتبط شود. در حالتی‌که پایش تغییرشکل یک‌بعدی (همچون برآورد جابجایی در راستای خط دید ماهواره) مدنظر قرارگیرد، چهارده پارامتر تعریف دیتوم شامل انتقال، دوران، مقیاس و مشتقات آن‌ها نسبت به زمان، به تنها یک پارامتر انتقال و مشتق آن کاهش می‌یابد [۵]. بنابراین دراختیار داشتن این دو پارامتر، لازمه برقراری ارتباط میان دیتوم محلی اندازه‌گیری‌های *InSAR* و یک *TRF* است. جابجایی تفاضلی دوگانه بدست آمده از *InSAR* در نقطه $P_1(x_1,y_1)$ و زمان t_1 نسبت به نقطه مرجع $P_0(x_0,y_0)$ و زمان مرجع t_0 توسط رابطه (۱) بیان می‌شود [۵].

رابطه(۱)

$$\Delta_p\Delta_t L=[L(P_1,t_1)-L(P_1,t_0)]-[L(P_0,t_1)-L(P_0,t_0)]$$

[1] *Hooper*
[2] *Stanford Method for PS*
[3] *StaMPS*
[4] *Line Of Sight (LOS)*
[5] *Terrestrial Reference Frame*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

در این رابطه، L نشانگر جابجایی در راستای خط دید ماهواره است. $L(P_0,t_1)$ را می‌توان به صورت رابطه (۲) نوشت:

$$L(P_0,t_1)=L(P_0,t_0)+v(P_0).(t_1-t_0) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه(۲) $v(P_0)$ سرعت نقطه مرجع با فرض جابجایی خطی بین تصاویر پایه[1] و پیرو[2] می‌باشد. کمیت موردنظر ما $[L(P_1,t_1)-L(P_1,t_0)]$ است که تغییرشکل مطلق نقطه P_1 بین اپک‌های t_0 و t_1 را نشان می‌دهد. با قرار دادن رابطه (۲) در رابطه (۱) می‌توان رابطه (۳) را نوشت:

$$[L(P_1,t_1)-L(P_1,t_0)]=\Delta_p\Delta_t L+v(P_0).(t_1-t_0) \quad \text{رابطه(۳)}$$

بنابراین تغییرشکل مطلق با استفاده از مشاهدات تفاضلی دوگانه *InSAR* ($\Delta_p\Delta_t L$) و سرعت نقطه مرجع قابل دستیابی است. *InSAR* قادر به تشخیص سرعت نقطه مرجع نیست [۵]. از این رو حرکات بزرگ مقیاسی که بر کل منطقه شامل نقطه مرجع تاثیر می‌گذارند، به‌هیچ وجه توسط *InSAR* قابل شناسایی نیستند و تنها حرکات محلی در برآوردهای تغییرشکل ظاهر می‌شوند. به‌منظور تعیین سرعت نقطه مرجع، دو روش مدنظر قرار می‌گیرد. روش ژئوفیزیکی که سرعت نقطه مرجع از دانش ژئوفیزیک به‌دست می‌آید [۱۷، ۱۸ و ۱۹]. در این حالت سرعت نقطه مرجع با استفاده از یک مدل جابجایی یا فرض پایداری سازه‌های مستحکم، معلوم تلقی می‌شود. بنابراین سرعت نقطه مرجع با انحراف معیار صفر تعیین می‌شود. این روش عینی نیست، یعنی مقدار خطایی که وارد نتایج می‌کند، مشخص نیست و کنترل و ارزیابی دقت آن دشوار است. از این رو حدود خطا باید محافظه‌کارانه انتخاب شود. روش دیگر، روش ژئودتیک است که سرعت نقطه مرجع با برقراری ارتباط بین نقطه مرجع *InSAR* و اندازه‌گیری‌های ژئودتیک دیگر مانند *GNSS* در یک *TRF* استاندارد برآورد می‌شود. جابجایی نقطه مرجع در امتداد خط دید ماهواره در یک *TRF* استاندارد، یک کمیت تصادفی است و خطاهای مربوط به آن دارای قابلیت انتشار هستند. بنابراین تمام جابجایی‌های بدست‌آمده از *InSAR* و دقت‌هایشان می‌توانند در همان *TRF* تعیین شوند [۵].

در این پژوهش از ایستگاه‌های ژئودینامیک موجود در منطقه جهت برآورد سرعت نقطه مرجع استفاده شده‌است.

۲-۳- انتخاب ناحیه مرجع

به‌منظور برقراری ارتباط بین دیتوم *InSAR* و اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های ژئودینامیک با استفاده از روش ژئودتیک، باید نقطه مرجع *InSAR* و ایستگاه ژئودینامیک موردنظر، سیگنال جابجایی یکسانی را منعکس کنند. انجام این امر به دو شیوه امکان‌پذیر است. روش اول انتخاب یک طرح هندسی مشخص از نقاط مرجع پیرامون محل آنتن *GNSS* است. در این حالت فرض می‌شود *PS* های مذکور، جابجایی مشابه با آنتن *GNSS* دارند. روش دیگر، قراردادن یک *PS* و آنتن *GNSS* در کنار یکدیگر است که نیاز به هیچ‌گونه فرضی درباره یکسان بودن سیگنال جابجایی اندازه‌گیری شده توسط دو روش ندارد.

در این پژوهش به علت عدم امکان قراردادن یک *PS* کنار آنتن *GNSS* از چهار شیوه متفاوت جهت انتخاب نقطه (یا ناحیه) مرجع استفاده شده‌است. این شیوه‌ها به استثنای شیوه دوم که توسط ماهاپاترا معرفی شده است، نوآوری این پژوهش می‌باشند. بدین‌ترتیب که ابتدا در ساده‌ترین حالت نزدیک‌ترین *PS* در مجاورت آنتن *GNSS* به عنوان نقطه مرجع در نظر گرفته شده و در غیاب هرگونه اطلاعاتی راجع به جابجایی نسبی ممکن بین آنتن *GNSS* و اطرافش، فرض شده که جابجایی نزدیک‌ترین *PS* با جابجایی اندازه‌گیری شده با *GNSS* برابر است. در این حالت ممکن است به دلیل خطای بالای برآورد تغییرشکل نزدیک‌ترین *PS* و یا فاصله زیاد آن از آنتن *GNSS*، اختلاف زیادی بین جابجایی اندازه‌گیری شده توسط آنتن *GNSS* و *InSAR* وجود داشته باشد. در این صورت این اختلاف باعث ایجاد خطایی به همین میزان در جابجایی تمامی *PS*های تصویر خواهد شد. در حالت دوم، *PS*های موجود در شعاع مشخصی از آنتن *GNSS*، به‌عنوان ناحیه مرجع درنظر گرفته شده و طبق فرض فوق، میانگین جابجایی آن‌ها با جابجایی حاصل از *GNSS* یکسان تلقی شده است. در این حالت تاثیر

[1] *Master*

[2] *Slave*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

اندازه‌گیری‌هایی که خطای زیادی دارند، کاهش می‌یابد. مشکل این روش این است که شعاع مناسب برای انتخاب ناحیه مرجع با توجه به پراکندگی *PS* ها اطراف آنتن *GNSS* و فاصله آن‌ها از یک‌دیگر متفاوت است و این امر انتخاب ناحیه مرجع را دشوار می‌کند. از سوی دیگر ممکن است تعدادی از *PS* ها در نزدیکی آنتن *GNSS* واقع شده باشند اما به دلیل همدوسی پایین یا داشتن میزان خطای بالا، برآورد تغییرشکل‌شان از صحت کافی برخوردار نباشد. از این رو در حالت سوم تمام *PS* های موجود در تصویر به‌صورت وزن‌دار به‌عنوان ناحیه مرجع در نظر گرفته شده و میانگین وزن‌دار جابجایی آن‌ها با جابجایی آنتن *GNSS* یکسان تلقی شده است. در این روش وزن‌دهی به *PS* ها به صورت رابطه (۴) انجام می‌گیرد.

$$W=\frac{1}{3}\left(\frac{1}{d^m}+\frac{1}{d^m}\frac{1}{1\text{-}coh}+\frac{1}{d^m}\frac{1}{e}\right) \qquad \text{رابطه(۴)}$$

در رابطه فوق d فاصله هر *PS* از آنتن *GNSS* است که به توان m رسیده است. coh میزان همدوسی هر *PS* و e مجموع خطاهای همبسته مکانی آن‌هاست. W نیز وزن نهایی هر پیکسل می‌باشد. لازم به ذکر است که فرایند نرمال سازی هر یک از مولفه های رابطه فوق با تقسیم کردن آن‌ها بر نرمشان، قبل از ورود به رابطه انجام شده است. در این رابطه توان m به گونه‌ای انتخاب می‌شود که وزن حاصل بهترین برآورد را برای نقطه‌ای که تغییرشکل مطلق آن با استفاده از *GNSS* معلوم است، ارائه دهد.

در حالت چهارم از روش درونیابی کریجینگ ساده جهت برآورد تغییرشکل در موقعیت آنتن *GNSS* بهره گرفته شده است. درونیابی کریجینگ روشی است که از سمی‌واریوگرام جهت وزن‌دهی به مشاهدات استفاده می‌کند. مدل سمی‌واریوگرام منعکس‌کننده همبستگی مکانی متغیرها است. سمی‌واریانس برای هر فاصله به‌عنوان نصف مربع اختلاف دو اندازه‌گیری که در آن فاصله واقع شده‌اند، تعریف می‌شود. مدل سمی‌واریوگرام رابطه سمی‌واریانس‌ها با فاصله را در حالتی که فاصله از صفر تا بیشترین فاصله ممکن در ناحیه مورد مطالعه تغییر می‌کند، نشان می‌دهد [۲۰]. در این روش، وزن‌ها به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که واریانس خطا کمینه شود؛ از این‌رو وزن‌ها به ساختار وابستگی مکانی متغیرها بستگی خواهند داشت [۲۱]. دلیل انتخاب این روش درونیابی، وزن‌دهی به نقاط با به‌کارگیری مدل متناسب با ساختار مکانی داده‌ها است [۲۲]. در این روش نحوه پراکندگی *PS* ها بسیار تاثیرگذار است. هرچه پراکندگی *PS* ها متراکم‌تر باشد و شباهت بیشتری به یک شبکه اندازه‌گیری منظم داشته باشد، نتایج بهتری حاصل می‌شود. از طرفی نتایج این روش درونیابی در حالت پراکندگی نامنظم و تراکم پایین *PS* ها وابستگی زیادی به انتخاب نوع سمی‌واریوگرام و مولفه‌های آن دارد.؛ بنابراین ممکن است نتایج به‌دست آمده از صحت کافی برخوردار نباشند.

۲-۴- برقراری ارتباط میان دیتوم‌ها

تئوری تبدیل همانندی[1] قابلیت انتقال برآوردهای تغییرشکل از یک دیتوم به دیتوم دیگر را دارد. اگر $\underline{y}_1$ بردار جابجایی m مولفه‌ای تعریف شده در دیتوم D_1 و $\underline{y}_2$ همان بردار جابجایی در دیتوم D_2 باشد، می‌توان انتقال از $\underline{y}_1$ به $\underline{y}_2$ را با تبدیل خطی همانندی مطابق با رابطه (۵) نمایش داد *[۵]*.

$$\underline{y}_2=S\underline{y}_1 \qquad \text{رابطه (۵)}$$

کیفیت مشاهدات نیز، توسط ماتریس‌های واریانس-کوواریانس Q_{y_1} و Q_{y_2} به‌صورت رابطه (۶) بیان می‌گردد.

$$Q_{y_2}=SQ_{y_1}S^T \qquad \text{رابطه (۶)}$$

شکل کلی تبدیل همانندی که ماتریس تبدیل S نامیده می‌شود، به‌صورت رابطه (۷) بیان می‌شود [۲۳،۲۴و۲۵].

$$S=I-H(D_2^TH)^{-1}D_2^T \qquad \text{رابطه (۷)}$$

در رابطه فوق I ماتریس همانی $m\times m$ و D_i ماتریس تعریف‌کننده دیتوم می‌باشد. برای نمونه رابطه (۸) در دو حالت دیتوم را تعریف می‌کند.

$$D_1^T\underline{y}_1=0 \quad \text{و} \quad D_2^T\underline{y}_2=0 \qquad \text{رابطه (۸)}$$

به منظور برآورد تغییرشکل یک‌بعدی *InSAR*، D_i یک بردار باینری با مقدار واحد برای نقطه (یا نقاط) مرجع است. بردار H نیز از قیود داخلی شبکه اندازه‌گیری که

[1] *Similarity transformation (S- transformation)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

طبق آن میانگین جابجایی‌ها، صفر در نظر گرفته می‌شود، به‌صورت $H=[1\ 1\ \dots\ 1]^T$ بدست می‌آید. چنین قیدی جهت تعیین دیتوم یک شبکه آزاد، ضروری است. در واقع H حالت کلی D_i است که در آن متوسط تمام جابجایی‌ها به عنوان مرجع تلقی می‌شود. با فرض یکسان بودن تغییرشکل اندازه‌گیری شده توسط آنتن *GNSS* و روش *InSAR* در نقطه (یا ناحیه) مرجع و همچنین با استفاده از تبدیل همانندی، فرایند برقراری ارتباط میان دیتوم اندازه‌گیری‌های *InSAR* و *GNSS*، طی گام‌های زیر انجام می‌شود [۵]:

۱- ابتدا نتایج *InSAR* با مرجع اولیه ($\underline{y}_{initial}$) به دیتوم دیگری (D_{trans}) که توسط نقطه (یا ناحیه مرجع) مطابق با ایستگاه *GNSS* تعریف می‌شود، طبق رابطه(۹) و رابطه (۱۰) انتقال می‌یابند.

رابطه (۹) $$S_{trans}=I-H(D_{trans}^{T}H)^{-1}D_{trans}^{T}$$

رابطه (۱۰) $$\underline{y}_{trans}=S_{trans}\underline{y}_{initial}$$

در رابطه (۹) مقادیر واحد مطابق با *PS* (ها) مرجع برای D_{trans} در نظر گرفته می‌شود. در صورتی‌که میانگین وزن‌دار تمامی *PS* ها به عنوان ناحیه مرجع معرفی شود یا از روش درونیابی کریجینگ استفاده شود، وزن هریک از *PS*ها در D_{trans} جایگذاری می‌شود. ماتریس واریانس-کوواریانس برآوردهای تغییرشکل نیز به‌صورت

رابطه(۱۴)
$$\underline{d}_r=\underline{d}_u\cos(\theta_{inc})-\sin(\theta_{inc})[\underline{d}_n\cos(\alpha_h-\frac{3\pi}{2})+\underline{d}_e\sin(\alpha_h-\frac{3\pi}{2})]$$

در رابطه (۱۴)، θ_{inc} زاویه فرود، α_h آزیموت مسیر ماهواره، $\underline{d}_r$ بردار جابجایی در راستای خط دید ماهواره، $\underline{d}$ بردار جابجایی با مولفه های شمالی ($\underline{d}_n$)، شرقی ($\underline{d}_e$) و ارتفاعی ($\underline{d}_u$) است که به امتداد خط دید ماهواره تصویر شده‌است.

۲-۵- تاثیر نقطه مرجع بر روی دقت نتایج

برآورد کیفیت اندازه‌گیری‌های *InSAR* نسبت به سایر روش‌های ژئودتیک دشوار است. دلیل این امر وابستگی دقت این اندازه‌گیری‌ها به ویژگی‌های فیزیکی پراکنش‌گرهاست. از این‌رو اغلب، تفسیر کیفیت نتایج *InSAR* به صورت بصری یا با استفاده از دانش قبلی در رابطه با نحوه تغییرشکل انجام می‌گیرد. هانسن[1] در رابطه(۱۱) حاصل می‌شود. این ماتریس نشان‌دهنده تغییر ماتریس واریانس-کوواریانس اولیه مشاهدات *InSAR* ناشی از تغییر دیتوم، می‌باشد.

رابطه (۱۱) $$Q_{y_{trans}}=S_{trans}Q_{y_{initial}}S_{trans}^{T}$$

۲- سپس نتایج انتقال یافته *InSAR* ($\underline{y}_{trans}$) طبق رابطه (۱۲)، با افزودن برآوردهای *GNSS* در نقطه (یا ناحیه) مرجع، به برآوردهای تمام *PS* ها و انتشار خطاهای هر دو روش به یک *TRF* استاندارد مرتبط می‌شوند.

رابطه (۱۲) $$\underline{y}_{TRF}=\underline{y}_{trans}+H\underline{y}_{GNSS}$$

در رابطه (۱۲)، $\underline{y}_{GNSS}$ اندازه‌گیری جابجایی (یا سرعت) توسط سیستم تعیین موقعیت جهانی در یک *TRF* استاندارد است. با انتشار خطای کمترین مربعات خطی، ماتریس واریانس-کوواریانس $\underline{y}_{TRF}$ ($Q_{y_{TRF}}$) مطابق رابطه (۱۳) حاصل می‌شود.

رابطه (۱۳) $$Q_{y_{TRF}}=Q_{y_{trans}}+HQ_{y_{GNSS}}H^{T}$$

در رابطه (۱۳)، $Q_{y_{GNSS}}$ ماتریس واریانس-کوواریانس اندازه‌گیری‌های *GNSS* است.

ذکر این نکته لازم است که جهت استفاده از اندازه‌گیری‌های *GNSS* ابتدا می‌بایست این اندازه‌گیری‌ها به راستای خط دید ماهواره تصویر شوند. این امر با استفاده از رابطه (۱۴) صورت می‌گیرد [۲۶].

سال ۲۰۰۴، تفسیر تداخل‌نماها را با استفاده از مدل ریاضی ارائه داد.

مشاهدات فاز *InSAR* تصادفی هستند و مکررا دارای توزیع نرمال فرض شده‌اند[۶و۲۶]. بنابراین جابجایی‌های برآورد شده به این روش نیز تصادفی می‌باشند. دقت این جابجایی‌ها را می‌توان با استفاده از ماتریس واریانس-کوواریانس آن‌ها توصیف کرد. در روش پراکنش‌گرهای دائمی، جابجایی یک پراکنش‌گر خاص فقط دارای واریانس نیست، بلکه دارای کوواریانس در حوزه زمان- مکان نیز هست که در نتیجه‌ی خطاهایی همچون خطاهای اتمسفری و مداری اتفاق می‌افتد.

اختلاف فاز بین دو نقطه که یک مشاهده تفاضلی دوگانه است، به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود [۶].

[1] *Ramon Hanssen*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

رابطه(۱۵) $\phi_{12}^{12}=\mathrm{w}\{\mathrm{w}\{(\phi_1^1-\phi_1^2)\}-\mathrm{w}\{(\phi_2^1-\phi_2^2)\}\}$

در رابطه (۱۵) اندیس‌های پایین نشانگر موقعیت پیکسل‌ها (اندیس ۱ برای نقطه مرجع و اندیس ۲ برای نقطه اندازه‌گیری) و اندیس‌های بالا نشانگر زمان تصویربرداری (اندیس ۱ برای تصویر پایه و اندیس ۲ برای تصویر پیرو) می‌باشند.w نیز عملگر بازیابی فاز است. با فرض اینکه بازیابی فاز بدون خطا انجام گیرد، می‌توان ماتریس واریانس-کوواریانس مشاهدات فاز را به صورت روابط (۱۶) و (۱۷) نمایش داد [۶].

در این روابط $\sigma^2_{\phi_j^i}$ واریانس یک مشاهده فاز شامل نویز گرمایی، نویز پراکنشی و سیگنال اتمسفری و مداری می‌باشد. $\sigma_{\phi_1^1,\phi_1^2}$ و $\sigma_{\phi_2^1,\phi_2^2}$ به ترتیب کوواریانس در نقطه مرجع و نقطه اندازه‌گیری بین دو زمان تصویربرداری (زمان پایه و پیرو) هستند. همدوسی بیشترین تاثیر را بر روی این کوواریانس‌ها دارد. افزایش همدوسی منجر به شباهت بیش‌تر و درنتیجه کوواریانس بزرگ‌تر می‌شود. بنابراین کوواریانس‌های مذکور، تابعی از همدوسی می‌باشند. $\sigma_{\phi_1^1,\phi_2^1}$ و $\sigma_{\phi_1^2,\phi_2^2}$ نمایانگر کوواریانس بین موقعیت نقطه مرجع و نقطه اندازه‌گیری به‌ترتیب در زمان اخذ تصویر پایه و پیرو هستند. این مقادیر، وابسته به سیگنال اتمسفر و باقیمانده مداری و در نتیجه تابعی از فاصله بین دو نقطه می‌باشند. با استفاده از قانون انتشار خطاها می‌توان ماتریس واریانس-کوواریانس میدان سرعت را نیز بدست آورد.

با توجه به رابطه (۱۷) دقت مشاهدات با افزایش همدوسی نقطه مرجع و کاهش فاصله نقطه اندازه‌گیری از نقطه مرجع، افزایش می‌یابد. بنابراین PS هایی که به نقطه مرجع نزدیک‌تر باشند، واریانس‌های کوچک‌تری خواهند داشت.

رابطه(۱۶)

$$\sigma^2_{\phi_{12}^{12}}=\begin{bmatrix}1 & -1 & -1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma^2_{\phi_1^1} & & & sym\\ \sigma_{\phi_1^1,\phi_1^2} & \sigma^2_{\phi_1^2} & & \\ \sigma_{\phi_1^1,\phi_2^1} & 0 & \sigma^2_{\phi_2^1} & \\ 0 & \sigma_{\phi_1^2,\phi_2^2} & \sigma_{\phi_2^1,\phi_2^2} & \sigma^2_{\phi_2^2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\-1\\-1\\1\end{bmatrix}$$

رابطه(۱۷)

$$\sigma^2_{\phi_{12}^{12}}=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sigma^2_{\phi_j^i}-2(\sigma_{\phi_1^1,\phi_1^2}-\sigma_{\phi_1^1,\phi_2^1}-\sigma_{\phi_1^2,\phi_2^2}-\sigma_{\phi_2^1,\phi_2^2})$$

شکل(۲) میزان همدوسی پراکنش‌گرهای دائمی موجود در تصویر را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ایستگاه تهران از همدوسی بیش‌تری نسبت به سایر ایستگاه‌ها برخوردار است. با توجه به رابطه (۱۳)، پس از انتقال اندازه‌گیری‌ها به یک TRF استاندارد، دیگر عامل موثر بر روی دقت اندازه‌گیری‌های $InSAR$، دقت مشاهدات $GNSS$ می‌باشد. مشاهدات $GNSS$ که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند، دارای دقت‌های نزدیک به هم و کمتر از یک میلی‌متر می‌باشند؛ از این رو انتظار نمی‌رود که این عامل تاثیر چندانی در انتخاب نقطه مرجع مناسب داشته باشد.

۳- منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

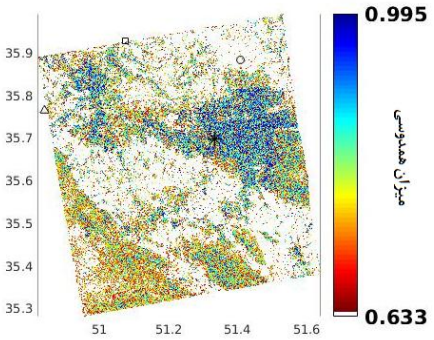
محدوده مورد مطالعه ناحیه‌ای بین طول جغرافیایی ۵۰٫۸ تا ۵۱٫۶ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵٫۳ تا ۳۶ درجه شمالی می‌باشد که در شکل (۳) نمایش داده شده است. در این پژوهش شانزده تصویر راداری توسط سنجنده ایسار[۱] ماهواره انویست[۲] (دارای طول موج ۵۶ میلی‌متر) مورد استفاده قرارگرفته‌اند. این تصاویر مربوط به مسیر بالاگذر[۳] ۴۱۴ طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ می‌باشند. اطلاعات مربوط به خط مبنای مکانی و زمانی این تصاویر در شکل (۴) نمایش داده شده است[۲۷].

به‌منظور کاهش اثر فاز ناشی از توپوگرافی از مدل ارتفاعی رقومی[۴] استر[۵] که با فاصله نمونه‌برداری یک

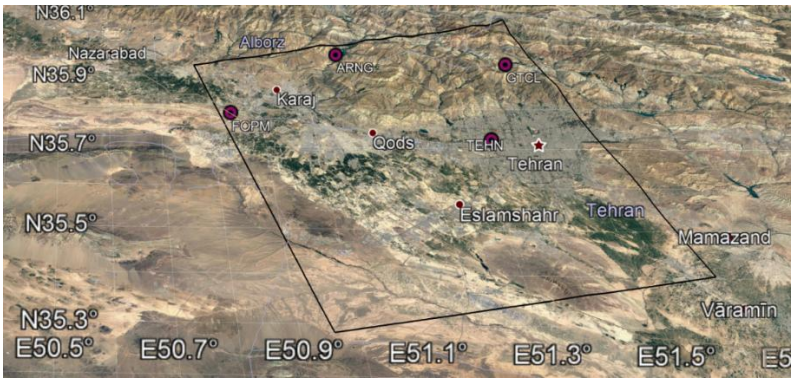
[1] *ASAR*
[2] *ENVISAT*
[3] *Ascending*
[4] *Digital Elevation Model (DEM)*
[5] *ASTER*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

ثانیه کمانی (یا ۳۰ متر) توسط ناسا تهیه شده، استفاده شده است. ارتفاعات این مدل در بیضوی مرجع *WGS84* تهیه و انحراف معیار اندازه‌گیری‌های آن بین ۷ تا ۱۴ متر گزارش شده است. همچنین جهت کاهش اثر فاز ناشی از کرویت زمین، از فایل‌های مداری *ODR*[1] (اطلاعات مداری محاسبه شده توسط دانشگاه دلف) استفاده شده است *[۲۸]*.در منطقه مورد مطالعه چهار ایستگاه دائم ژئودینامیک موجود است که بردار موقعیت، سرعت و دقت آن‌ها توسط سازمان نقشه‌برداری کشور در اختیار قرار گرفته است. ایستگاه‌های ارنگه[2] در مجاورت روستای ارنگه واقع در ۱۸ کیلومتری شهرستان کرج (شکل ۵-الف)، فرودگاه پیا م[3] در فرودگاه بین‌المللی پیام مابین دامنه رشته‌کوه‌های البرز و ماهدشت کرج (شکل ۵-ب)، قله توچال[4] در قله توچال واقع در شمال تهران (شکل ۵-پ) و تهران[5] در سازمان نقشه‌برداری کشور (شکل ۵-ت) قرار گرفته‌اند.



شکل ۲: میزان همدوسی *PS* ها. علامت‌های □ ○ Δ ✕ به‌ترتیب نشانگر ایستگاه‌های ژئودینامیک ارنگه، قله توچال، فرودگاه پیام و تهران می‌باشند.

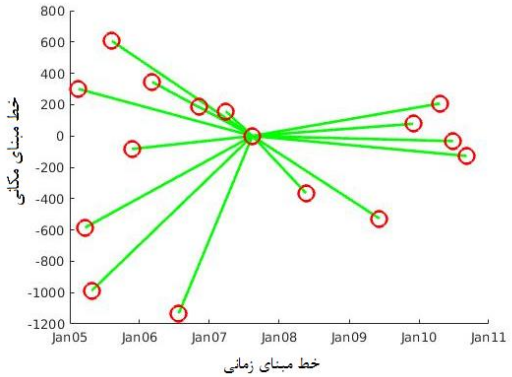


شکل ۳: منطقه مطالعاتی و ایستگاه‌های ژئودینامیک موجود در منطقه

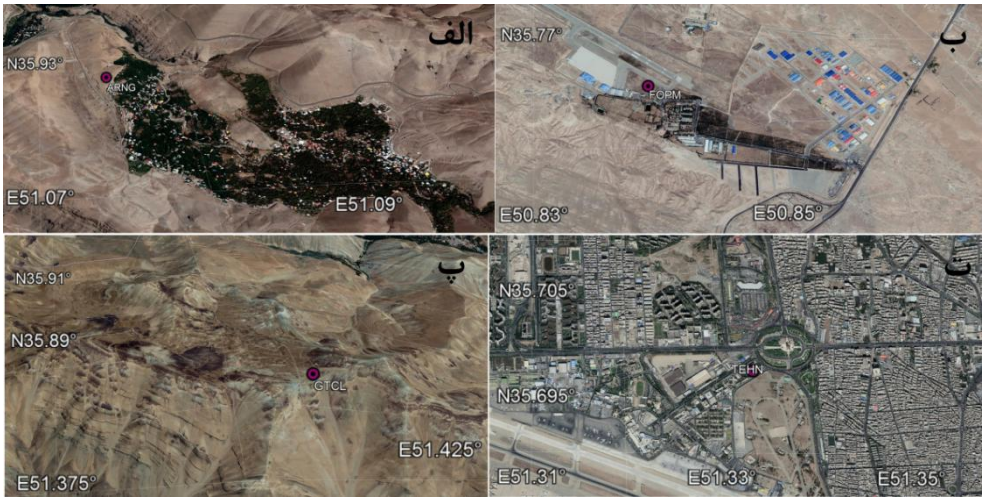
.

[1] *Orbital Data Record*
[2] *ARNG*
[3] *FOPM*
[4] *GTCL*
[5] *TEHN*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]



شکل ۴: خط‌مبنای مکانی و زمانی تصاویر



شکل ۵: موقعیت الف) ایستگاه ارنگه ب) ایستگاه فرودگاه پیام پ) ایستگاه قله توچال ت) ایستگاه تهران

۴- پردازش و نتایج

در این بخش به پردازش‌های انجام شده جهت دستیابی به تغییرشکل مطلق و نتایج آن پرداخته می‌شود.

۴-۱- پردازش‌های *InSAR* جهت دستیابی به میدان‌های جابجایی نسبی

در این پژوهش پردازش‌های تداخل‌سنجی‌راداری بااستفاده از نرم‌افزار *StaMPS* انجام گرفت. تصویر مربوط به تاریخ ۱۴ آگوست ۲۰۰۷ با بیشینه‌سازی همبستگی مکانی، زمانی و داپلر به عنوان تصویر پایه انتخاب شد. سپس تصاویر نسبت به یکدیگر ثبت هندسی گردیده و تداخل‌نماها تشکیل شدند. همچنین به‌منظور افزایش تعدادپراکنش‌کننده‌های‌دائمی فرایند بیش‌نمونه‌برداری[1] با ضریب ۲ در هر دو راستای برد و آزیموت انجام شد. جهت اصلاح فاز تداخل‌نما، تصحیح هندسی فاز در دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول که شامل مسطح‌سازی تداخل‌نماهاست، فاز هر پیکسل به گونه‌ای اصلاح شد که گویی پراکنش‌گرها بر روی بیضوی مرجع *WGS84* واقع شده‌اند. سپس فاز ناشی از اختلاف سطح زمین واقعی و بیضوی مرجع با استفاده از مدل ارتفاعی دیجیتال برآورد شد. پس از تصحیح هندسی فاز تداخل‌نماها، فرایند زمین مرجع کردن آن‌ها با استفاده ازپارامترهای مداری و مدل ارتفاعی دیجیتال انجام شد.

جهت انتخاب *PS*ها ابتدا مجموعه‌ای از پیکسل‌ها براساس آنالیز دامنه‌شان انتخاب شدند. حداکثر پراکندگی دامنه برای انتخاب این پیکسل‌ها، ۰٫۴ در نظر گرفته شد. سپس پایداری فاز این پیکسل‌ها با به‌کارگیری آنالیز فاز برآورد شد. مشاهدات فاز پیکسل‌های کاندیدا در یک شبکه با فواصل ۵۰ متری

[1] *Over sampling*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

باز نمونه‌برداری شدند و یک فیلتر میان‌گذر[1] شامل یک فیلتر فاز تطبیقی[2] ترکیب شده با یک فیلتر پایین‌گذر[3] در حوزه فرکانس به این مشاهدات اعمال شد. پس از اعمال فیلتر، پیکسل‌های دارای کمترین نویز باقیمانده انتخاب شدند و ۱۲۱۵۸۵۰ پیکسل به‌عنوان پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی معرفی شدند.

در ادامه عملیات بازیابی فاز در دو مرحله تحت عنوان بازیابی زمانی و مکانی فاز[4] انجام شد. با توجه به این‌که فاز پیکسل‌ها پس از بازیابی نیز تحت تاثیر خطاهای مربوط به تاخیر اتمسفری، دقیق نبودن مدار ماهواره، توپوگرافی و غیره است و بخش همبسته مکانی این خطاها، ناهمبسته در زمان فرض می‌شود؛ خطاهای همبسته مکانی با استفاده از یک فیلتر بالاگذر در حوزه زمان و یک فیلتر پایین‌گذر در حوزه مکان برآورد شدند. با کم کردن این خطاها از فاز بازیابی شده، فاز مربوط به تغییرشکل سطح زمین حاصل شد. خطاهای ناهمبسته مکانی نیز به عنوان نویز مدلسازی شدند.

شکل(۶) نشان‌دهنده سری زمانی جابجایی با حذف خطای مداری و اتمسفری تصویر پایه، خطای مربوط به مدل ارتفاعی دیجیتال و رمپ‌های مداری است. شکل(۷) نیز میدان سرعت را با حذف خطای مربوط به مدل ارتفاعی دیجیتال و رمپ‌های مداری نمایش می‌دهد. اندازه‌گیری‌ها در هر دو مورد در دیتوم محلی *InSAR* انجام گرفته‌اند.

۴-۲- محاسبه تغییرشکل مطلق

همان‌طور که در بخش دوم بیان شد، مشاهدات تفاضلی‌دوگانه *InSAR* با انتخاب یک نقطه (یا ناحیه) مرجع با موقعیت و سرعت معین در یک چارچوب مرجع زمینی، به مشاهدات تفاضلی تنها نسبت به زمان، تبدیل می‌شوند. از طرفی با محاسبه میدان سرعت به‌جای میدان جابجایی، تفاضل نسبت به زمان هم از بین می‌رود و می‌توان مشاهدات را مستقل از نقطه و اپک مرجع تفسیر کرد. از این‌رو در این پژوهش به برآورد میدان سرعت مطلق *InSAR* پرداخته شده است.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، هدف این پژوهش دستیابی به طرح هندسی مناسب نقاط مرجع *InSAR* جهت برآورد هرچه صحیح‌تر تغییرشکل مطلق می‌باشد.

از این رو مطابق توضیحات بخش (۲-۳) از چهار روش جهت انتخاب ناحیه مرجع استفاده شده و این روش‌ها بر هر چهار ایستگاه ژئودینامیک اعمال شده‌اند. این روش‌ها به‌طور خلاصه عبارتند از: ۱- درونیابی ۲- انتخاب *PS* های موجود در شعاع یک کیلومتری ایستگاه ۳- انتخاب نزدیکترین *PS* به ایستگاه ۴- انتخاب تمامی *PS* های موجود در تصویر به‌صورت وزن‌دار.

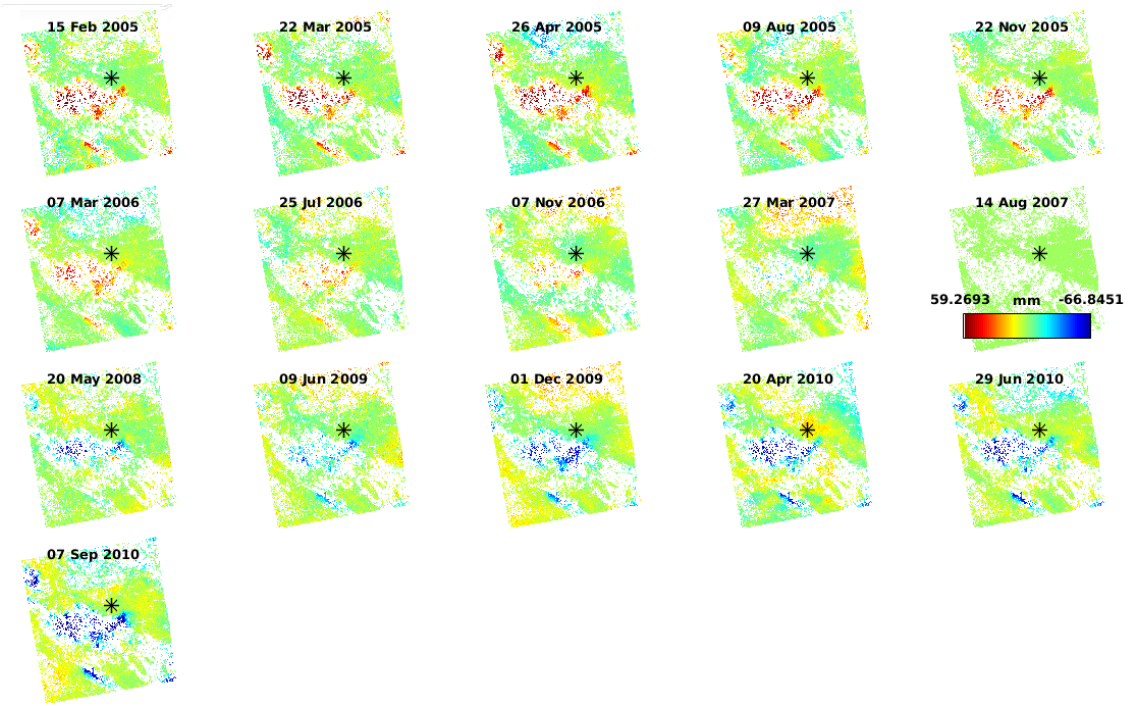
در روش چهارم مطابق رابطه (۴) می‌بایست توان m (مربوط به فاصله بین آنتن *GNSS* و هر *PS*) به بهترین شکل ممکن انتخاب شود. جهت نمایش تاثیر این توان بر روی برآوردهای تغییرشکل و انتخاب توان مناسب، میدان سرعت برآورد شده برای هر ایستگاه *GNSS* با استفاده از توان‌های ۱ تا ۳۰ در محاسبه وزن هر *PS* در محاسبه تغییرشکل نقطه مرجع و همچنین با در نظر گرفتن *PS* های موجود در شعاع یک کیلومتری تا ۱۵۰ کیلومتری (شامل تمام *PS* ها) هر ایستگاه، در شکل(۸) نمایش داده شده است. با استفاده از این نمودارها می‌توان به‌توان مناسب جهت تعیین بهترین طرح هندسی نقاط مرجع دست یافت. هرچه میدان سرعت برآورد شده با استفاده از نقاط مرجع، به میدان سرعت حاصل از *GNSS* در هر ایستگاه نزدیک‌تر باشد، نشان‌گر این است که از توان مناسب‌تری جهت وزن‌دهی به نقاط مرجع استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، برای توان‌های پایین‌تر با محدود کردن ناحیه مرجع، میدان سرعت دچار تغییرات فراوانی می‌گردد. اما برای توان‌های بالا انتخاب ناحیه مرجع به صورت محدود تاثیر چندانی بر نتایج ندارد. این بدین معنی است که اگر توان کوچکی انتخاب شود، جهت تعیین تغییرشکل ناحیه مرجع، حتما باید از تمامی *PS* های موجود در تصویر استفاده گردد. علاوه بر این، با استفاده از شکل (۸) می‌توان حساسیت هر ایستگاه به توان مورد استفاده را بررسی کرد. میدان سرعت ایستگاه تهران با به‌کارگیری توان‌های مختلف حدود یک میلی‌متر تغییر می‌کند و کم‌ترین حساسیت را نسبت به انتخاب توان نشان می‌دهد. بیشترین تغییر نیز مربوط به ایستگاه قله

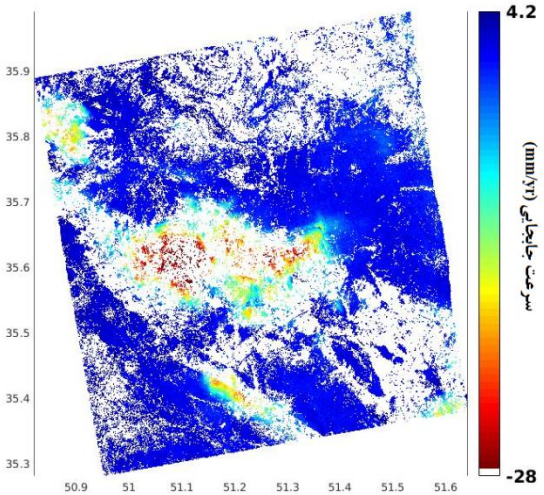
[1] *Band-pass filter*
[2] *Adaptive phase filter*
[3] *Low-pass filter*
[4] *3D unwrap method*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

توچال می‌باشد که حدود ۴ میلی‌متر است. بدین ترتیب می‌توان با انتخاب توان مناسب، روش چهارم را به‌بهترین شکل جهت انتخاب طرح هندسی نقاط مرجع به‌کار گرفت.



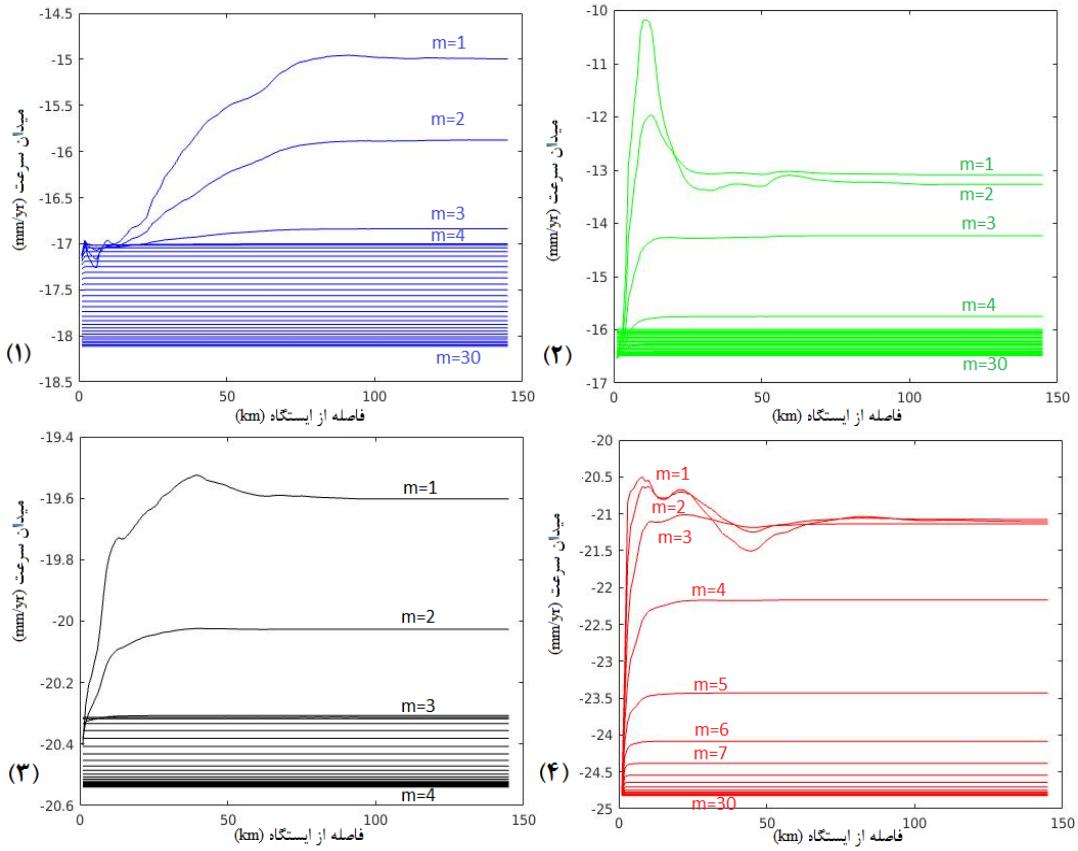
شکل ۶: سری زمانی جابجایی‌های بدست آمده از *InSAR*



شکل ۷: میدان سرعت بدست آمده از *InSAR*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]



شکل ۸: میدان سرعت برآورد شده برای ایستگاه‌های ۱- ارنگه ۲- فرودگاه پیام ۳- تهران ۴- قله توچال. محور افقی نشانگر فاصله از ایستگاه و محور عمودی میدان سرعت است. نمودارهای هر ایستگاه از بالا به پایین مربوط‌به توان‌های ۱ تا ۳۰ می‌باشند.

میدان‌های سرعت مطلق حاصل از اعمال این روش‌ها در شکل (۹) نمایش داده شده‌اند و ستون‌های این شکل با همین ترتیب نشانگر روش‌های مختلف در انتخاب طرح‌های هندسی نقاط مرجع می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود، اختلاف بازه نرخ فرونشست در راستای خط دید ماهواره با به‌کارگیری طرح‌های هندسی متفاوت نقاط مرجع به ۶٫۱ میلی‌متر می‌رسد. بنابراین انتخاب طرح هندسی مناسب نقاط مرجع جهت برآورد میدان سرعت مطلق با صحت بالا نکته‌ای حائز اهمیت می‌باشد.

شکل (۱۰) اختلاف برآوردهای سرعت مطلق *InSAR* با برآوردهای سرعت مطلق *GNSS* در ایستگاه‌های ژئودینامیک را نشان می‌دهد. به‌منظور به‌دست آوردن این اختلافات از درونیابی کریجینگ برای دستیابی به برآوردهای سرعت *InSAR* در موقعیت ایستگاه‌های ژئودینامیک استفاده شده است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خطا در اکثر موارد مربوط به روش سوم است که نزدیک‌ترین *PS* به ایستگاه ژئودینامیک به‌عنوان نقطه مرجع در نظر گرفته شده است. نتایج این روش تا حد زیادی اتفاقی است و در موارد نادری برآوردهایی با صحت بالا دارد اما بیشتر برآوردهای آن دارای خطای زیادی بوده و در حالت کلی روش قابل اطمینانی نیست. احتمال خطای این روش با افزایش فاصله نزدیک‌ترین *PS* از ایستگاه، افزایش می‌یابد. چنان‌که بدترین نتایج را برای ایستگاه قله توچال که *PS* ها در دورترین حالت نسبت به آن قرار گرفته‌اند، ارائه داده است. این روش بیش‌ترین وابستگی را به مکان ایستگاه ژئودینامیک دارد، زیرا مهم‌ترین عامل موفقیت این روش، کم بودن فاصله نزدیک‌ترین پراکنش‌گر دائمی از ایستگاه ژئودینامیک می‌باشد.

روش دوم که در آن از *PS* های موجود در شعاع یک کیلومتری ایستگاه به عنوان ناحیه مرجع استفاده شده است، نیز تا حد زیادی به تراکم *PS* ها اطراف ایستگاه ژئودینامیک بستگی دارد. این روش هم بدترین نتایج را نسبت به ایستگاه قله توچال که *PS* ها کم‌ترین تراکم را اطراف آن دارند، ارائه می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

بهترین نتایج در بیشتر موارد مربوط به روش چهارم است که تمام *PS* های تصویر به‌صورت وزن‌دار به‌عنوان ناحیه مرجع تلقی شده‌اند. این روش نسبت به سایر روش‌ها وابستگی کم‌تری به مکان ایستگاه ژئودینامیک دارد؛ زیرا در آن از تمامی پراکنش‌گرهای دائمی موجود در منطقه استفاده می‌شود. در برخی موارد نیز روش اول که از درونیابی کریجینگ استفاده می‌کند، نتایج بهتری ارائه داده است. نتایج این روش تا حد زیادی به سمی‌واریوگرام انتخاب شده و مولفه‌های آن وابسته‌اند. علاوه بر این تراکم پراکنش‌گرهای دائمی اطراف ایستگاه ژئودینامیک در نتایج این روش تاثیر چشم‌گیری دارد. از این رو انتخاب مکان ایستگاه ژئودینامیک در این روش از اهمیت زیادی برخوردار است. این روش نسبت به ایستگاه قله توچال برآوردهای دقیقی دارد ولی نسبت به ایستگاه فرودگاه پیام دقت بسیار پایینی دارد و برآوردهایش کاملا به برآوردهای روش سوم منطبق شده است. بنابراین استفاده از آن در حالتی‌که امکان صحت‌سنجی دقیق برآوردها وجود نداشته باشد، توصیه نمی‌شود.

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، ایستگاه‌های ارنگه و فرودگاه پیام که فاصله کم‌تری از هم دارند، برآوردهای دقیق‌تری از یک‌دیگر ارائه می‌دهند. این مسأله در مورد ایستگاه‌های قله توچال و تهران نیز صدق می‌کند. بنابراین تاثیر فاصله هر *PS* از نقطه (یا ناحیه) مرجع در برآورد تغییرشکل مطلق آن تایید می‌شود.

شکل (۱۱) خطای جذر میانگین مربعات[1] *(RMSE)* را برای هر چهار ایستگاه نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حالتی‌که از روش دوم و سوم استفاده شده است، نتایج نسبت به ایستگاه‌های مختلف، تفاوت زیادی دارند. هر دو روش مذکور نسبت به ایستگاه قله توچال ضعیف‌ترین نتایج را ارائه می‌دهند که مقدار *RMSE* آنها نزدیک به ۳٫۵ میلی‌متر است. این امر از پراکندگی نامناسب *PS* ها اطراف این ایستگاه ناشی می‌شود. بنابراین زمانی‌که از این دو روش جهت محاسبه تغییرشکل مطلق استفاده شود، انتخاب نقطه (یا ناحیه) مرجع با دقت و حساسیت بالا ضرورت می‌یابد.

در حالتی که از روش اول و چهارم استفاده شده است، برآوردهای میدان سرعت مطلق نسبت به ایستگاه‌های مختلف بسیار به هم نزدیک‌اند و تفاوت *RMSE* شان کم‌تر از ۰/۵ میلی‌متر است. این برآوردها دارای *RMSE* کم‌تر از یک میلی‌متر می‌باشند. در این حالت که دقت نتایج نسبت به ایستگاه‌های مختلف، تفاوت زیادی ندارند، بهتر است از ایستگاهی که به مرکز تصویر نزدیک‌تر است، استفاده شود تا میدان سرعت مطلق تمامی *PS* ها از صحت کافی برخوردار باشند.

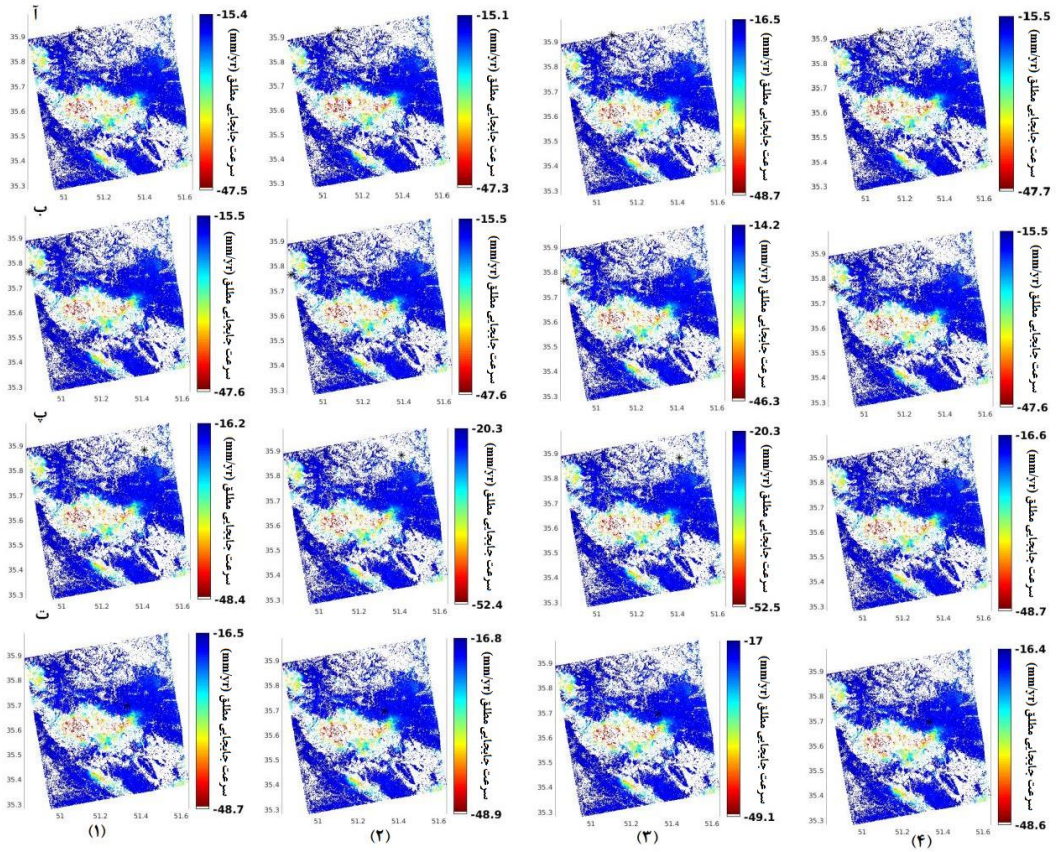
سرانجام از هر چهار ایستگاه جهت انتخاب طرح هندسی نقاط مرجع، به صورت وزن‌دار استفاده شده است. در این حالت وزن نقاط مرجع با توجه به فاصله‌شان از هر پراکنش‌گر تعیین می‌شود. در نتیجه نقاط مرجع نزدیک‌تر، تاثیر بیشتری در برآورد میدان سرعت هر *PS* خواهند داشت. مزیت این روش، این است که به دلیل استفاده از نقاط مرجع هر چهار ایستگاه، این نقاط پراکندگی بیشتری در کل تصویر دارند. در نتیجه تاثیر فاصله بین نقاط مرجع و سایر پراکنش‌گرها در برآورد میدان سرعت آن‌ها کاهش می‌یابد. شکل (۱۲) نتایج حاصل از این روش را نمایش می‌دهد.

همانطور که در شکل (۱۲-ب) مشاهده می‌شود، در این حالت اختلاف میدان‌های سرعت مطلق برآورد شده برای ایستگاه‌های ژئودینامیک با میدان‌های سرعت مطلق حاصل از *GNSS* کم‌ترین مقدار را نسبت به حالت‌های قبل دارد. از این رو انتظار می‌رود، میدان سرعت مطلق تمامی پراکنش‌گرهای موجود در تصویر با صحت بیش‌تری تعیین شده باشند.

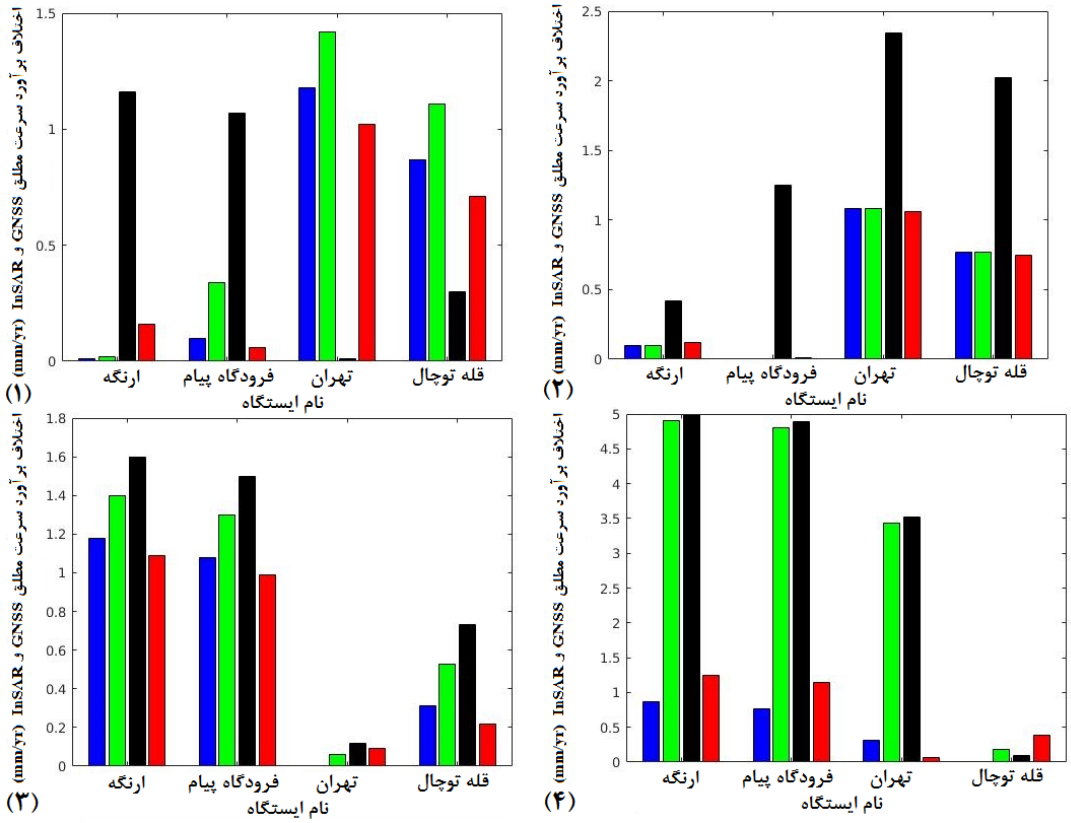
[1] *Root Mean Square Error*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

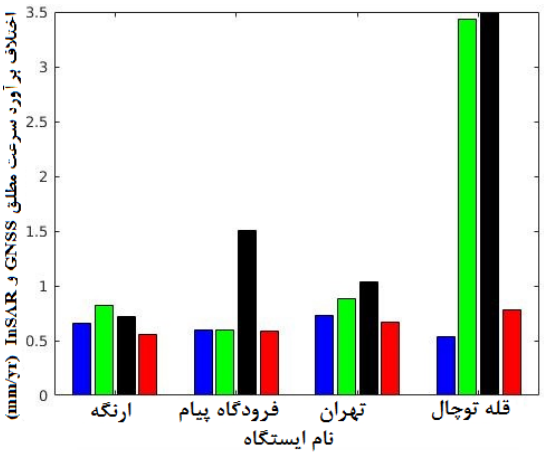


شکل ۹: میدان سرعت مطلق نسبت به ایستگاه‌های آ- ارنگه، ب- فرودگاه پیام، پ- قله توچال ت- تهران. ستون‌های ۱ تا ۴ نشان‌دهنده روش‌های اول تا چهارم‌اند. علامت * در تصاویر نشانگر نقطه یا ناحیه مرجع است.

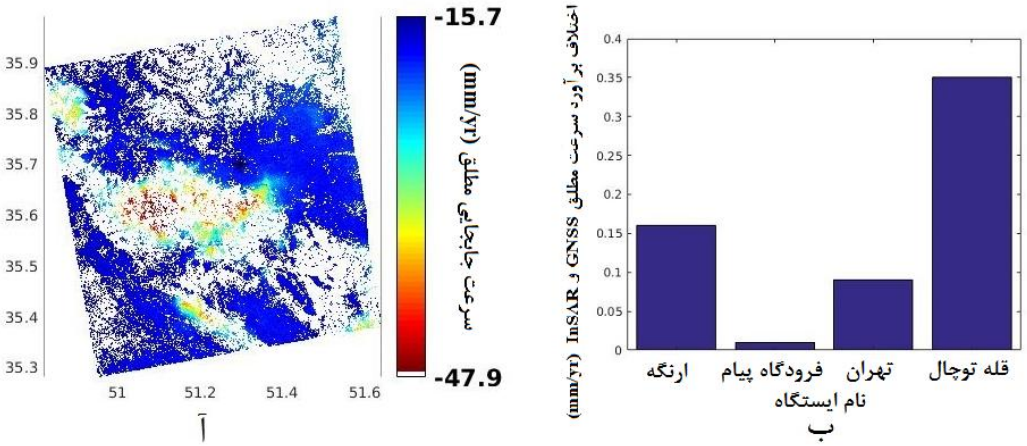


شکل ۱۰: اختلاف برآوردهای سرعت مطلق *InSAR* و *GNSS* نسبت به ایستگاه‌های ۱- ارنگه ۲- فرودگاه پیام ۳- تهران ۴- قله توچال. نمودارهای آبی، سبز، مشکی و قرمز به‌ترتیب نشان‌دهنده روش‌های اول تا چهارم هستند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]



شکل ۱۱: خطای *RMSE* ایستگاه‌های ژئودینامیک. نمودارهای آبی، سبز، مشکی و قرمز به‌ترتیب نشان‌دهنده روش‌های اول تا چهارم هستند.



شکل ۱۲: آ- میدان سرعت مطلق و ب- اختلاف برآوردهای سرعت *InSAR* و *GNSS* نسبت به هر چهار ایستگاه ژئودینامیک

۵- نتیجه‌گیری

برآوردهای تغییرشکل *InSAR* از این جهت که همواره نسبت به یک نقطه مرجع تعیین می‌شوند، دارای دیتوم محلی هستند. باوجوداین‌که اغلب روش‌های تعیین موقعیت ژئودتیک، نسبی هستند، برخی کاربردها نیازمند برآوردهای تغییرشکل مطلق *InSAR* می‌باشند. جهت ارائه برآوردهای تغییرشکل استخراج شده از *InSAR* در یک *TRF* استاندارد، می‌بایست دیتوم محلی آن‌ها با یک دیتوم جهانی مرتبط شود. برای انجام این امر می‌توان از دو روش ژئوفیزیکی و ژئودتیکی استفاده کرد. در این پژوهش روش ژئودتیک به کار گرفته شده و به منظور پیش‌برد آن از چهار ایستگاه ژئودینامیک موجود در منطقه، با بردار موقعیت و سرعت معین استفاده شده است.

جهت محاسبه میدان سرعت مطلق ابتدا نزدیک‌ترین *PS* به هر ایستگاه به عنوان نقطه مرجع و سپس *PS*های موجود در شعاع یک کیلومتری هر ایستگاه به‌عنوان ناحیه مرجع انتخاب شدند. برآوردهای سرعت مطلق *InSAR* با استفاده از این دو روش اختلاف زیادی با برآوردهای سرعت مطلق *GNSS* در موقعیت ایستگاه‌های ژئودینامیک داشتند. همچنین دقت نتایج این دو روش نسبت به ایستگاه‌های ژئودینامیک مختلف، تفاوت زیادی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

داشت که این امر نشان‌دهنده ضرورت انتخاب نقطه (یا ناحیه) مرجع با دقت و حساسیت بالا، هنگام استفاده از آن‌ها است.

در ادامه از درونیابی کریجینگ جهت تعیین میدان سرعت در موقعیت ایستگاه‌های ژئودینامیک به عنوان نقطه مرجع و همچنین از تمام *PS* های موجود در تصویر به‌صورت وزن‌دار به عنوان ناحیه مرجع استفاده شد.

وزن‌دهی به *PS*ها باتوجه به فاصله آن‌ها از ایستگاه‌های ژئودینامیک، میزان همدوسی آن‌ها و خطاهای همبسته مکانی‌شان صورت گرفت. اختلاف برآوردهای سرعت مطلق *InSAR* و *GNSS* در موقعیت ایستگاه‌های ژئودینامیک با به‌کارگیری این دو روش نسبت به بیشتر ایستگاه‌ها کمتر از یک میلی‌متر به‌دست آمد. از سوی دیگر دقت نتایج این دو روش نسبت به ایستگاه‌های ژئودینامیک مختلف، تفاوت زیادی نداشت. بنابراین با به‌کارگیری این روش‌ها خطای برآورد میدان‌های سرعت مطلق در اثر استفاده از نقطه مرجع با شرایط نامناسبی همچون همدوسی و تراکم *PS* پایین اطراف نقطه مرجع کاهش می‌یابد.

در صورت امکان استفاده از چند ایستگاه ژئودینامیک برای تعیین طرح هندسی نقاط مرجع، انتظار می‌رود میدان‌های سرعت حاصل دقیق‌تر باشند. برای تحقیق این موضوع از طرح هندسی نقاط مرجع هر چهار ایستگاه ژئودینامیک موجود در منطقه به صورت وزن‌دار بهره گرفته شد. در این حالت اختلاف میدان‌های سرعت حاصل برای این ایستگاه‌ها با میدان‌های سرعت حاصل از *GNSS* بسیار کوچک بود. بیشترین اختلاف ۳۵٪ میلی‌متر برای ایستگاه قله توچال و کم‌ترین اختلاف حدود ۰٫۰۲ میلی‌متر برای ایستگاه فرودگاه پیام به‌دست آمد.

سپاسگزاری

مولفان این مقاله از آژانس فضایی اروپا جهت در اختیار قرار دادن تصاویر *Envisat ASAR* و از سازمان نقشه‌برداری کشور جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های ژئودینامیک منطقه نهایت تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

[1] A. Hooper, "A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches," Geophysical Research Letters, vol. 35, 2008.

[2] A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, and H. A. Zebker, "Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry," Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol. 94, pp. 9183-9191, 1989.

[3] D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl, et al., "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry," Nature, vol. 364, pp. 138-142, 1993.

[4] H. A. Zebker, P. A. Rosen, R. M. Goldstein, A. Gabriel, and C. L. Werner, "On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake," Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol. 99, pp. 19617-19634, 1994.

[5] P. S. Mahapatra, "Geodetic network design for InSAR: Application to ground deformation monitoring," TU Delft, Delft University of Technology, 2015.

[6] R. F. Hanssen, "Stochastic modeling of time series radar interferometry," in Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004 IEEE International, 2004, pp. 2607-2610.

[7] J. C. Curlander and R. N. McDonough, Synthetic aperture radar: John Wiley & Sons New York, NY, USA, 1991.

[8] P. A. Rosen, S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodriguez, et al., "Synthetic aperture radar interferometry," Proceedings of the IEEE, vol. 88, pp. 333-382, 2000.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

[9] A. Hooper, D. Bekaert, K. Spaans, and M. Arıkan, "Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation," Tectonophysics, vol. 514, pp. 1-13, 2012.

[10] F. K. Li and R. M. Goldstein, "Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, pp. 88-97, 1990.

[11] H. A. Zebker and J. Villasenor, "Decorrelation in interferometric radar echoes," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 30, pp. 950-959, 1992.

[12] H. Zebker, P. Shankar, and A. Hooper, "InSAR remote sensing over decorrelating terrains: Persistent scattering methods," in Radar Conference, 2007 IEEE, 2007, pp. 717-722.

[13] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 38, pp. 2202-2212, 2000.

[14] A. J. Hooper, Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation, 2006.

[15] J. J. Sousa, A. J. Hooper, R. F. Hanssen, L. C. Bastos, and A. M. Ruiz, "Persistent scatterer InSAR: a comparison of methodologies based on a model of temporal deformation vs. spatial correlation selection criteria," Remote Sensing of Environment, vol. 115, pp. 2652-2663, 2011.

[16] R. Rummel and P. Teunissen, "Height datum definition, height datum connection and the role of the geodetic boundary value problem," Journal of Geodesy, vol. 62, pp. 477-498, 1988.

[17] N. Adam, M. Eineder, N. Yague-Martinez, and R. Bamler, "High resolution interferometric stacking with TerraSAR-X," in Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International, 2008, pp. II-117-II-120.

[18] O.-I. Kwoun, Z. Lu, C. Neal, and C. Wicks Jr, "Quiescent deformation of the Aniakchak Caldera, Alaska, mapped by InSAR," Geology, vol. 34, pp. 5-8, 2006.

[19] L. Liu, T. Zhang, and J. Wahr, "InSAR measurements of surface deformation over permafrost on the North Slope of Alaska," Journal of Geophysical Research: Earth Surface, vol. 115, 2010.

[20] Z. Sen, "Cumulative semivariogram models of regionalized variables," Mathematical Geology, vol. 21, pp. 891-903, 1989.

[21] T. Hengl, G. B. Heuvelink, and D. G. Rossiter, "About regression-kriging: from equations to case studies," Computers & geosciences, vol. 33, pp. 1301-1315, 2007.

[22] A. Setianto and T. Triandini, "Comparison of kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis," Journal of Applied Geology, vol. 5, 2013.

[23] W. Baarda, "S-Transformations and criterion matrices, vol 5 of Publications on Geodesy, New Series," Netherlands Geodetic Commission, Delft, vol. 2, 1981.

[24] S. Kuang, Geodetic network analysis and optimal design: concepts and applications: Ann Arbor PressInc, 1996.

[25] P. Teunissen, "Zero order design: generalized inverses, adjustment, the datum problem and S-transformations," in Optimization and design of geodetic networks, ed: Springer, 1985, pp. 11-55.

[26] R. F. Hanssen, Radar interferometry: data interpretation and error analysis vol. 2: Springer Science & Business Media, 2001.

[27] https://earth.esa.int/web/guest/asar-image-mode-single-look-complex-1616.

[28] http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.7 No.2, Summer 2019

Research Paper

The importance of the geometric design of reference points in estimating absolute deformation from InSAR observations

Arezoo Taghibeiglu [1]*, Behzad Voosoghi [2]

1- MSc. Graduate of geodesy, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2- Associate professor in Department of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Eng., K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Attainment of absolute deformation using Synthetic aperture radar interferometry (InSAR) requires the introduction of a reference point or area. In this study, geodynamic stations have been used to introduce this point or area and determine the absolute deformation. But considering that none of the permanent scatterers (PS) matches the geodynamic stations, there is no possibility of introducing a particular PS as the reference point. Hence, various geometric designs of scatterers were considered as reference and the influence of these designs on absolute deformation estimations was investigated. These designs include selecting the nearest PS to each geodynamic station, the average of permanent scatterers at a specific distance from the stations, the weighted average of all the permanent scatterers in the region and interpolation of deformation in the position of the stations. Furthermore, in order to investigate the effect of physical conditions and location of the reference points on absolute deformation, these designs were implemented on each of the geodynamic stations. The results indicate different absolute deformations relative to different reference points and using different geometric designs. The maximum root mean square error (RMSE) of the difference between InSAR and GNSS results of the geodynamic stations absolute velocity field along the line of sight is obtained by selecting the nearest PS to GTCL station as the reference point, which is about 3.5 millimeters. Also the least RMSE is obtained by selecting weighted average of all permanent scatterers as reference which is less than 1 millimeter for all of the geodynamic stations.

Key words: *InSAR, absolute deformation, Datum connection, geometric designs of the reference points*

Correspondence Address*: Department of Geodesy,Faculty of Geodesy and Geomatics Eng., K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran*
Tel*: +989127420121*
Email: *taghibeigloo@email.kntu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.29252/jgit.7.2.63]