

# اهمیت مدل‌های ارتفاعی رقومی در دقت میدان‌های سرعت جابجایی InSAR

سعید حاجی آقاجانی\*<sup>۱</sup>، بهزاد وثوقی<sup>۲</sup>، زهرا موسوی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
s\_h\_aghajany@mail.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار گروه ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
vosoghi@kntu.ac.ir

<sup>۳</sup> دکتری مهندسی نقشه‌برداری - اداره ژئودینامیک - سازمان نقشه‌برداری کشور  
zahra.mousavi@gmail.com

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۳، تاریخ تصویب بهمن ۱۳۹۳)

## چکیده

امروزه مدل‌های ارتفاعی رقومی کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مقابله با سوانح طبیعی، آشکارسازی تغییرات، مدیریت منابع طبیعی، پروژه‌های مهندسی و... دارند. از جمله این کاربردها تصحیح توپوگرافی در تکنیک تداخل‌سنجی راداری است. در تکنیک تداخل-سنجی راداری به‌منظور یافتن بردار سرعت جابجایی لازم است میزان اختلاف فاز ناشی از توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی از اختلاف فاز بدست آمده از جفت تصویر راداری کسر گردد. به همین علت مدل ارتفاعی رقومی انتخابی و فاصله نمونه‌برداری آن در تداخل‌سنجی راداری از نکات مهم و قابل توجه است. هدف این مقاله مقایسه‌ی نقش دو مدل ارتفاعی SRTM با فاصله نمونه‌برداری ۹۰ متر و ASTER با فاصله نمونه‌برداری ۳۰ متر در بدست آوردن بردار سرعت جابجایی از طریق تصاویر راداری است. برای دستیابی به بردار سرعت جابجایی از تصاویر راداری در منطقه از روش پراکنش‌کننده‌های دائمی و روش خط مبنای کوتاه با دو مدل ارتفاعی ذکر شده استفاده گردید. در نهایت مشاهده شد که بیشترین تفاوت بین نتایج بدست آمده در مناطق با اختلاف ارتفاع بالا و در واقع حاشیه تصویر وجود دارد. برای دو مدل ارتفاعی در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی میزان ۰/۲ میلی‌متر اختلاف در بیشینه نرخ بالآمدگی و ۱/۱ میلی‌متر اختلاف در بیشینه نرخ فرونشست در راستای خط دید ماهواره مشاهده گردید و در روش خط مبنای کوتاه این میزان به ترتیب ۰/۴ و ۱ میلی‌متر بدست آمد. به منظور بررسی بهتر اختلاف بین نتایج، ۶ نقطه در منطقه مورد بررسی قرار گرفت که اختلاف بین نتایج در برخی نقاط به ۴ میلی‌متر نیز می‌رسید. این در حالی است که دقت روش‌های پراکنش‌کننده‌های دائمی و خط مبنای کوتاه در صورت انتخاب تصاویر و تداخل‌نماهای مناسب به ۱ میلی‌متر می‌رسد. به منظور بررسی معنادار بودن یا تصادفی بودن اختلافات از آزمون معناداری آماری با استفاده از میانگین نتایج استفاده گردید. نتیجه آزمون بیانگر معناداری آماری نتایج در سطح معنی‌دار ۱۰ درصد بود. در مناطق هموارتر نتایج حاصل از دو مدل ارتفاعی شباهت بسیار به یکدیگر دارند. در نتیجه در مناطق دارای توپوگرافی بالا، برای رسیدن به دقت مناسب، استفاده از مدل ارتفاعی هرچه دقیق‌تر، امری ضروری است.

**واژگان کلیدی:** مدل ارتفاعی - تصحیح توپوگرافی - بردار سرعت جابجایی - پراکنش‌کننده‌های دائمی - خط مبنای کوتاه - تداخل

سنجی راداری - SRTM - ASTER

## ۱- مقدمه

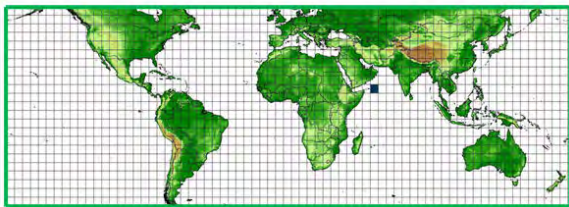
Envisat منطقه تبریز با بیشینه ارتفاع تقریبی ۳۰۰۰ و کمینه ارتفاع در حدود ۱۲۰۰ متر بکار گرفته شده است و در نهایت نتایج حاصل با استفاده از گزارشات ایستگاه‌های GPS<sup>۶</sup> مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مدل‌های ارتفاعی مورد بحث

در این قسمت به بررسی ویژگی‌های مدل‌های ارتفاعی بکار گرفته شده می‌پردازیم.

### ۲-۱- مدل ارتفاعی SRTM ۹۰ متری

این مدل ارتفاعی در سال ۲۰۰۰ توسط سازمان فضایی ناسا<sup>۷</sup> با پوشش جهانی ۸۰ درصد و فاصله نمونه-برداری ۳ ثانیه کمانی و یا ۹۰ متر بدست آمد و در سال ۲۰۰۳ عرضه شد. اکنون استفاده از آن برای تمامی کاربران در سرتاسر دنیا آزاد است. این مدل ارتفاعی بسته به ویژگی‌های ماهواره رادار در شیب‌ها دچار مشکل است و ممکن است مقادیر صحیحی در اختیار قرار ندهد. لازم به ذکر است که SRTM ۹۰ متری از مدار ۶۰ درجه شمالی تا ۵۶ درجه جنوبی را در برمی‌گیرد و برای سهولت کار و دریافت آسان‌تر در گریدهایی با ابعاد ۵ درجه و در بیضوی مبنای WGS84 تهیه شده است [۷].



شکل ۱- مدل ارتفاعی SRTM ۹۰ متری [۷]

لازم به ذکر است خطای ارتفاعی آن کمتر از ۱۶ متر و انحراف معیار اندازه‌گیری‌های آن حدود ۱۰ متر گزارش شده است. این مدل به دلیل آزاد بودن و دسترسی آسان بدون شک رایج‌ترین مدل ارتفاعی مورد استفاده در کشور است. انواع ۳۰ متری و ۱۰ متری این مدل نیز موجود است اما استفاده از آن‌ها برای همه کاربران آزاد نبوده و اطلاعات ارتفاعی مربوط به همه کشورها را نیز شامل نمی‌شود.

در سال‌های اخیر، استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری<sup>۱</sup> به منظور پایش دگرشکلی پوسته زمین رواج بسیار یافته و تلاش‌های بسیاری در جهت کاهش اثرات اضافی و بهبود نتایج حاصل از این تکنیک انجام گرفته است. از جمله این موارد می‌توان به بررسی میدان جابجایی توسط کمپس با استفاده از روش پراکنش‌کننده-های دائمی در سال ۲۰۰۵ اشاره کرد [۱]. در ادامه و در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ هورپر تکنیک نوینی در پردازش-های روش پراکنش‌کننده‌های دائمی ارائه کرد [۲ و ۳ و ۴]. پس از آن پژوهش‌های زیادی در زمینه بهبود نتایج حاصل از روش توسعه یافته پردازش‌های پراکنش‌کننده‌های دائمی انجام گرفت که بررسی میزان تاثیر توپوگرافی و بررسی مدل‌های ارتفاعی مفید و همچنین نحوه اثرگذاری لایه تروپوسفر در روش مذکور توسط الیوت در سال ۲۰۰۸ [۵] و ژولیوت در سال ۲۰۱۲ [۶] از پررنگ‌ترین آن‌ها بشمار می‌رود.

مهم‌ترین اثرات موجود در نتایج تداخل‌سنجی راداری عبارتند از خطای مداری، خطای ناشی از عبور سیگنال از جو و همچنین خطای ناشی از توپوگرافی منطقه.

در این مقاله به بررسی میزان تاثیر و اهمیت مدل ارتفاعی رقومی مورد استفاده در پردازش‌های تداخل-سنجی راداری پرداخته شده است. انتظار می‌رود دقت تصحیح خطای ناشی از توپوگرافی با دقت مدل ارتفاعی که به منظور کاهش این خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد و همچنین فاصله نمونه‌برداری آن مدل رابطه مستقیم داشته باشد.

به منظور بررسی تاثیر مدل ارتفاعی و فاصله نمونه-برداری آن در نتایج از دو مدل ارتفاعی SRTM<sup>۲</sup> با فاصله نمونه‌برداری ۹۰ متر و ASTER<sup>۳</sup> با فاصله نمونه‌برداری ۳۰ متر استفاده و همچنین برای بدست آوردن بردار سرعت جابجایی دو روش پراکنش‌کننده‌های دائمی<sup>۴</sup> و خط مبنای کوتاه<sup>۵</sup> برای تصاویر سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ ماهواره

<sup>۱</sup> InSAR

<sup>۲</sup> Satellite Radar Topography Mission

<sup>۳</sup> Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

<sup>۴</sup> Persist Scatterer

<sup>۵</sup> Small Baselines

<sup>۶</sup> Global Positioning System

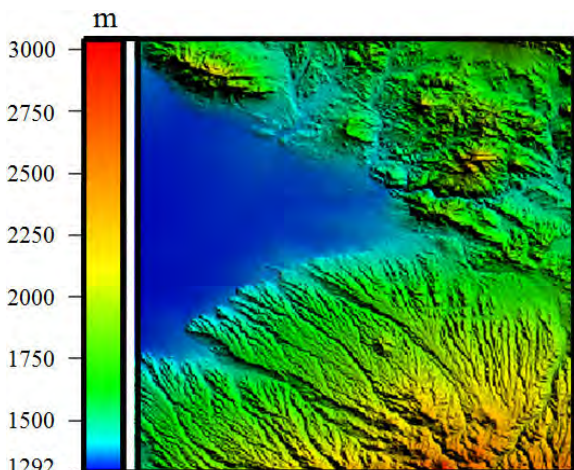
<sup>۷</sup> NASA

## ۲-۲- مدل ارتفاعی ASTER ۳۰ متری

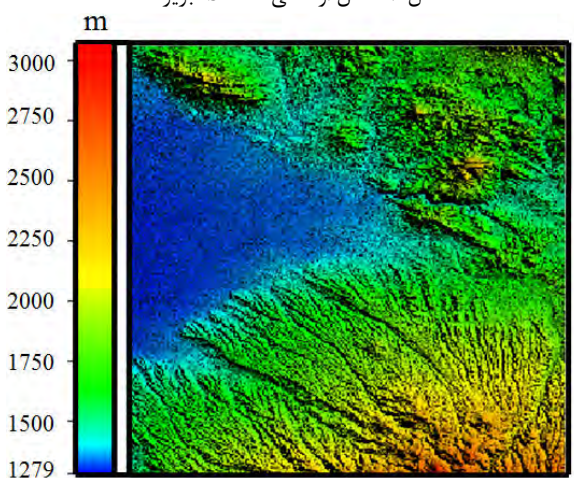
این مدل ارتفاعی در سال ۲۰۰۰ توسط ناسا با پوشش جهانی و فاصله نمونه برداری ۱ ثانیه کمانی و یا ۳۰ متر بدست آمد و در سال ۲۰۰۹ عرضه شد و بروزرسانی آن همچنان ادامه دارد. استفاده از آن برای همه کاربران آزاد نیست. این مدل در مناطقی که دارای پوشش ابری است اطلاعات دقیقی در اختیار قرار نمی دهد و برای آن مناطق از مقادیر بدست آمده از سایر مدل ها استفاده می کند. ASTER ۳۰ متری از مدار ۸۳ درجه شمالی تا ۸۳ درجه جنوبی را دربر می گیرد و برای سهولت کار در گریدهایی با ابعاد ۱ درجه و در بیضوی مبنای WGS84 تهیه و انحراف معیار اندازه گیری های آن بین ۷ تا ۱۴ متر گزارش شده است [۸].



شکل ۲- مدل ارتفاعی ASTER ۳۰ متری [۸]

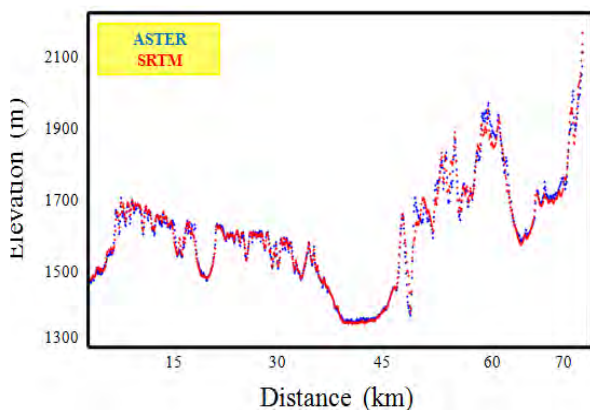


شکل ۳- مدل ارتفاعی SRTM تبریز



شکل ۴- مدل ارتفاعی ASTER تبریز

اختلاف کمینه ارتفاع در دو مدل برای منطقه تبریز که منطقه ای کوهستانی است حدود ۱۳ متر می باشد. به منظور مقایسه بهتر دو مدل ارتفاعی یک پروفیل مشترک بر روی دو مدل در نظر گرفتیم و ارتفاع نقاط در طول این پروفیل را در دو مدل ترسیم نمودیم. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می گردد در ارتفاعات بالاتر و مناطقی که ارتفاع نقاط با سرعت بیشتری تغییر می یابد تفاوت دو مدل ارتفاعی مورد نظر کاملاً محسوس است.



شکل ۵- تغییر ارتفاع نقاط پروفیل در نظر گرفته شده در دو مدل

## ۲-۳- مقایسه دو مدل ارتفاعی

در جدول ۱ ویژگی های این دو نوع مدل ارتفاعی ملاحظه می شود. نقشه ارتفاعی مستخرج از هر دو نوع مدل ارتفاعی مربوط به منطقه مورد مطالعه در تبریز نیز در شکل های ۳ و ۴ قابل مشاهده است. تفاوت دو مدل ارتفاعی در شکل کاملاً به چشم می رسد. مدل ارتفاعی ۳۰ متری به دلیل فاصله نمونه برداری کمتر اطلاعات بیشتری راجع به توپوگرافی منطقه در اختیار قرار می دهد و قابلیت اطمینان بیشتری را داراست.

جدول ۱- مقایسه ویژگی های دو مدل ارتفاعی

| ASTER          | SRTM           | خصوصیات            |
|----------------|----------------|--------------------|
| ۲۰۰۹           | ۲۰۰۳           | تاریخ انتشار       |
| ۳۰ متر         | ۹۰ متر         | فاصله نمونه برداری |
| ۷-۱۴ متر       | ۱۰ متر         | انحراف معیار       |
| مدار ۸۳- تا ۸۳ | مدار ۵۶- تا ۶۰ | میزان پوشش         |

### ۳- اصول تداخل‌سنجی راداری

هر تصویر راداری از دو سری اطلاعات به نام فاز و دامنه تشکیل شده است که تداخل‌سنجی راداری بر مبنای اطلاعات فاز تصاویر راداری صورت می‌گیرد. مسئله مورد توجه آن است که عوامل گوناگونی بر فاز بدست آمده از تصاویر راداری تاثیر گذارند. گذر سیگنال راداری از جو همچنین اثر تغییر شکل زمین، نویز، خطای مداری و بالاخره اثر مربوط به توپوگرافی منطقه باعث تغییر در عدد فاز پیکسل‌های یک تصویر راداری می‌گردد. اگر فاز دو تصویر راداری را از هم کسر کنیم آنگاه تصویری به نام تداخل‌نما خواهیم داشت که معادله فاز آن به شکل زیر است:

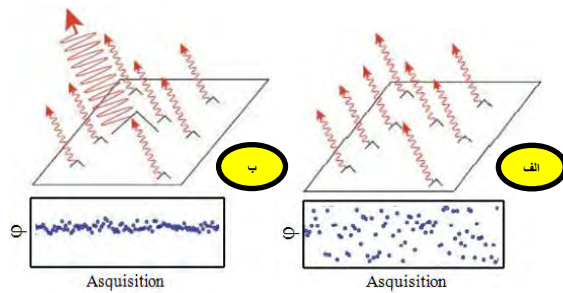
$$\varphi_{int} = \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{deformation} + \Delta\varphi_{atmosphere} + \Delta\varphi_{orbital} + \Delta\varphi_{noise} \quad (1)$$

واضح است که برای دستیابی به میزان تغییر شکل لازم است اختلاف فازهای ناشی از نویز، خطای مداری، جو و توپوگرافی از بین برود تا فاز تداخل‌نمای موجود، تنها ناشی از تغییر شکل زمین در بازه زمانی دو تصویر راداری باشد. روش اول برای انجام تصحیح توپوگرافی استفاده از تصویر سوم است. در این روش تصویر سوم به نحوی انتخاب می‌گردد که اختلاف فاز آن با یکی از تصاویر اول یا دوم تنها ناشی از اثر توپوگرافی منطقه باشد سپس این اثر از اختلاف فاز دو تصویر اول و دوم کسر می‌گردد تا اختلاف فاز ناشی از توپوگرافی منطقه تصحیح گردد. اما در برخی موارد ناچار به استفاده از روش دوم یعنی بکارگیری مدل ارتفاعی منطقه می‌باشیم. از جمله این موارد روش پراکنش‌کننده‌های دائمی است که بر مبنای پیکسل‌های دارای تراکنش ثابت می‌باشد و همچنین روش خط مبنای کوتاه که بر مبنای پیکسل‌های دارای تراکنش ثابت در فاصله زمانی دو تصویر معین است. در ادامه به بررسی روش‌های مذکور به منظور یافتن بردار سرعت جابجایی می‌پردازیم.

### ۳-۱- روش پراکنش‌کننده‌های دائمی

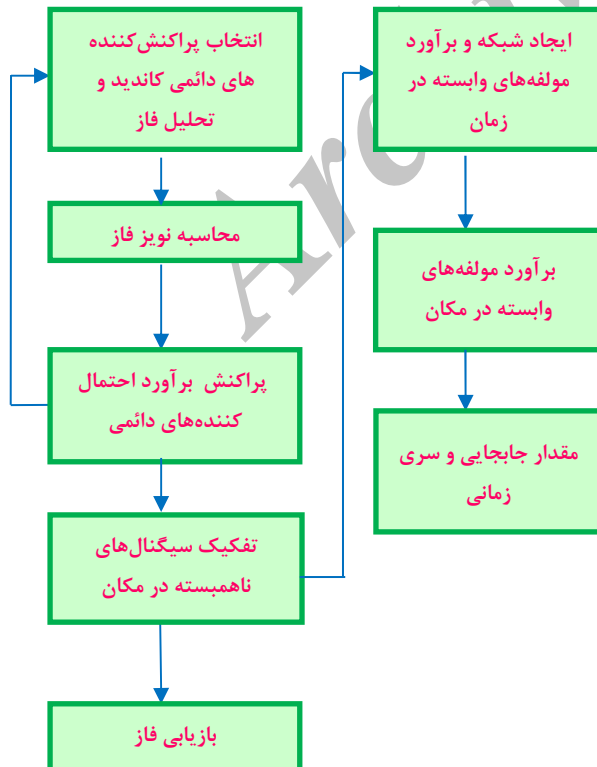
این روش بر مبنای استفاده از پراکنش‌کننده‌های دائمی است، از نقطه نظر فیزیکی این پراکنش‌کننده‌ها می‌توانند گوشه یک ساختمان، تنه درخت، تخته‌سنگ و... باشند.

بنابراین می‌توان با استفاده از تمام تصاویر راداری و بدون توجه به عدم همبستگی زمانی و مکانی، تداخل‌نماهایی تشکیل داد که فاز آن‌ها تنها در نقاط پراکنش‌کننده‌های دائمی قابل استفاده می‌باشد. در تکنیک پراکنش‌کننده‌های دائمی پیکسل‌هایی پراکنش‌کننده دائمی هستند که تاریخچه رفتار فاز آن‌ها منطبق بر یک مدل فرضی از چگونگی تغییر جابجایی در زمان می‌باشد. در روش پردازش پراکنش‌کننده‌های دائمی با استفاده از تحلیل فاز می‌توانیم بسیاری از نقاط پراکنش‌کننده دائمی را که حتی در مناطق غیر شهری قرار دارند مشخص نماییم [۹]. شکل ۶ تفاوت پیکسل‌های دارای تراکنش دائمی و پیکسل‌های دارای تراکنش غیر دائم را نشان می‌دهد.



شکل ۶- شبیه‌سازی فاز دریافتی. (الف) پراکنش غیردائم و (ب) پراکنش دائم [۱۰]

نمودار زیر مراحل پردازش الگوریتم پراکنش‌کننده‌های دائمی را نشان می‌دهد [۱۰].



نمودار ۱- مراحل پردازش در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی

۱ Interferogram

گرچه دقت بالاتر مدل باعث کاهش ابهام فاز می‌گردد. همچنین در مواقعی که تعداد تداخل‌نماها کمتر از ۱۲ عدد باشد وجود یک مدل ارتفاعی دقیق ضروری است [۱۲]. بطور کلی پایداری فاز یک پیکسل مشخص می‌کند که آن پیکسل پراکنش‌کننده دائمی هست یا خیر، ولی یک رابطه آماری بین پایداری دامنه و فاز وجود دارد که باعث می‌گردد استفاده از اطلاعات دامنه کمک بزرگی به کاهش تعداد پیکسل‌ها برای ورود به مرحله تحلیل فاز باشد. همچنین ویژگی‌های دامنه در برآورد احتمال این که پیکسل مورد نظر پراکنش‌کننده دائمی هست یا خیر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳].

### ۳-۲- روش خط مبنای کوتاه

الگوریتم‌هایی که امروزه برای پردازش چندین داده بکار گرفته می‌شوند به دو گروه بازپراکنش‌کننده‌های دائمی و خط مبنای کوتاه تقسیم می‌شوند. اگرچه ویژگی‌های پراکنش زمین واقعی معمولاً بین این دو قرار می‌گیرد. همانطور که می‌دانیم در یک تصویر راداری مقدار هر پیکسل مجموع همجسی<sup>۲</sup> از سهم تمام پراکنش‌کننده‌ها درون المان قدرت تفکیک زمینی می‌باشد. جابجایی نسبی این پراکنش‌کننده‌ها یا تغییر زاویه دید یا زاویه چرخش باعث می‌شود تا مجموع سهم پراکنش‌کننده‌ها متفاوت گردد که این اثر به عنوان اثر همبستگی شناخته می‌شود [۳]. برای آن دسته از المان‌های قدرت تفکیک که شامل هیچ پراکنش‌کننده غالبی نیستند تغییرات فاز به علت عدم همبستگی به قدری بزرگ است که سیگنال مورد نظر را مخفی می‌سازد. اگرچه با تشکیل تداخل‌نماها تنها میان تصاویری که بازه زمانی کوتاه و اختلاف کمی در زاویه دید و زاویه چرخش دارند عدم همبستگی کمینه می‌گردد و برای تعدادی از المان‌های قدرت تفکیک ممکن است به اندازه کافی کوچک باشد به طوری که سیگنال مورد نظر همچنان قابل شناسایی باشد. سپس عدم همبستگی با اعمال یک فیلتر طیفی در جهت رنج و آزیموت کاهش می‌یابد. پیکسل‌هایی که فاز آن‌ها پس از اعمال فیلتر مقدار کمی در بازه‌های زمانی کوتاه غیر همبسته می‌شود تارگت‌های روش خط مبنای کوتاه

فاز تداخل‌نماهای خام دارای مولفه‌ای است که مربوط به یکسان نبودن ایستگاه تصویربرداری دو تصویر پایه و پیرو می‌باشد. به این مؤلفه، مؤلفه هندسی فاز می‌گویند که این مؤلفه را در دو مرحله تصحیح می‌کنیم. ابتدا تداخل‌نما را مسطح می‌کنیم که شامل تصحیح فاز هر پیکسل است با این فرض که سطح پراکنش‌کننده بر روی یک بیضوی مرجع قرار گرفته است، سپس فاز مربوط به انحراف سطح واقعی زمین از سطح مرجع برآورد می‌شود. در این فرایند دو نوع خطا مربوط به زاویه دید و زاویه چرخش ایجاد می‌شود. برای پیکسل‌هایی که دارای پراکنش‌کننده معمولی هستند خطای زاویه دید کاملاً مربوط به خطای مدل ارتفاعی است ولی برای پیکسل‌های دارای پراکنش‌کننده دائمی سهم دیگری از خطا نیز که مربوط به اختلاف فاصله بین موقعیت واقعی پراکنش‌کننده غالب و نقطه‌ای که به عنوان مرکز پیکسل در نظر گرفته می‌شود است نیز وجود دارد. از این خطا با عنوان خطای موقعیت کسری از پیکسل یاد می‌شود. لازم به ذکر است در تداخل‌سنجی سنتی از خطای مربوط به زاویه چرخش صرف‌نظر می‌گردد زیرا اختلاف زاویه چرخش دو تصویر راداری با اعمال فیلتر در جهت آزیموت حذف می‌گردد اما باید در نظر داشت که این امر منجر به کاهش قدرت تفکیک مکانی می‌گردد و در پردازش با استفاده از پراکنش‌کننده‌های دائمی قدرت تفکیک مکانی باید تا حد امکان بالا باشد.

در پردازش پراکنش‌کننده‌های دائمی، خطای زاویه دید از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۱]:

$$\Delta \theta = \frac{\Delta h \sin(\theta_i) + \xi \cos(\theta_i)}{r} \quad (2)$$

که در آن:

$\Delta h$ : مقدار خطا در ارتفاع

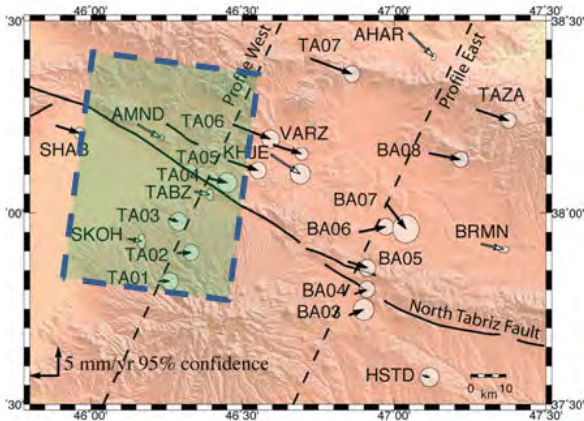
$\xi$ : فاصله افقی مرکز اصلی فاز تا وسط پیکسل در جهت رنج

$\theta$ : زاویه تابش

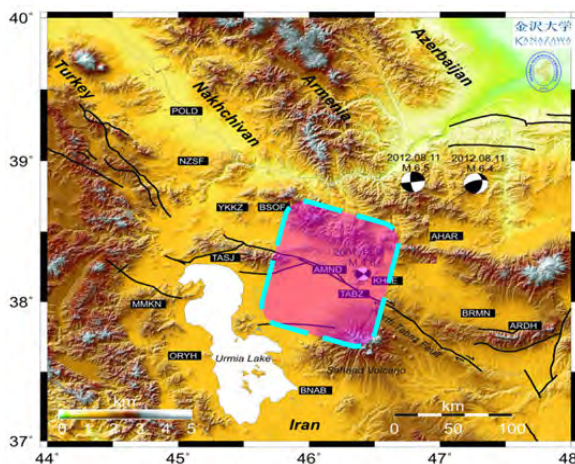
$r$ : فاصله رادار تا سطح زمین

بنابراین حتی اگر مدل ارتفاعی مورد استفاده دارای دقت ۱۰۰٪ باشد هنوز خطای موقعیت کسری از پیکسل وجود دارد. از آنجا که خطای زاویه دید در هنگام پردازش پراکنش‌کننده‌های دائمی برآورد می‌شود دقت مدل ارتفاعی در جهت برآورد این خطا معمولاً مهم نیست.

<sup>۱</sup> Coherent

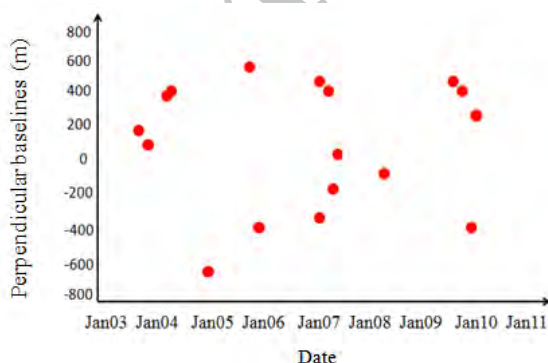


شکل ۷- نقشه ایستگاه‌های GPS و شبکه‌های CGPS موجود در منطقه مورد مطالعه [۱۵]



شکل ۸- منطقه مورد مطالعه

برای محدوده ذکر شده تعداد ۱۷ تصویر راداری از مسیر ۴۹ ماهواره Envisat بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ موجود است که فواصل زمانی و مکانی آن‌ها در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۹- اختلاف زمانی و مکانی تصاویر مسیر ۴۹

هستند. این پیکسل‌ها پیکسل‌های با پراکنش مقطعی<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند [۱]. باید توجه داشته باشیم که برای آن دسته از پیکسل‌هایی که شامل یک پراکنش‌کننده دائمی منفرد می‌باشند تاثیر اعمال فیلتر در جهت رنج و آزیموت ممکن است باعث افزایش عدد همبستگی به علت افزایش قدرت تفکیک گردد. با این حال برای بسیاری از پیکسل‌ها با پراکنش‌کننده دائمی ممکن است عدم همبستگی همچنان به اندازه کافی کوچک باشد بطوری که بتوان آن‌ها را هم به عنوان پیکسل‌های با پراکنش مقطعی در نظر گرفت. بنابراین این دو نوع پیکسل‌ها از دو مجموعه متمایز اما پوشش‌دار تشکیل شده‌اند. در رابطه با مزایا و معایب دو تکنیک باز پراکنش‌کننده دائمی و خط مبنای کوتاه می‌توان گفت اگرچه آن‌ها برای مدل‌ها و شیوه‌های متفاوت پراکنش زمین بهینه‌سازی شده‌اند اما در حقیقت مکمل یکدیگرند. روش پراکنش‌کننده‌های دائمی بیشتر در مناطق شهری و روش خط مبنای کوتاه بیشتر در مناطق غیر شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴].

#### ۴- منطقه مطالعاتی و تصاویر مورد استفاده

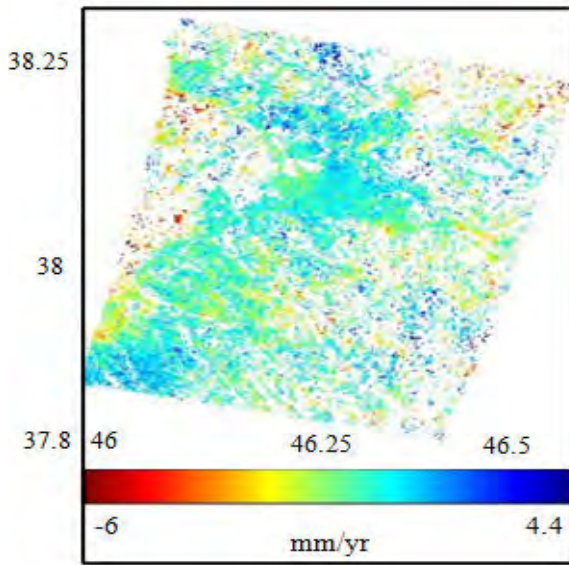
محدوده مورد مطالعه این مقاله ناحیه بین طول جغرافیایی ۴۶ تا ۴۶/۶ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷/۷۵ تا ۳۸/۳ درجه شمالی می‌باشد. از جمله عوارض طبیعی موجود در منطقه، آتشفشان سه‌هند است. وجود چشمه‌های آب گرم در این منطقه آتشفشانی دلالت بر وجود شکستگی‌ها و گسل‌ها در منطقه دارد. گسل تبریز که جزو مهم‌ترین پدیده‌های ژئودینامیکی کشور است در این منطقه واقع گردیده که محل عبور آن در شکل ۸ ملاحظه می‌شود. ریتزا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ با استفاده از تداخل سنجی راداری و با استفاده از تصاویر راداری و گزارشات دریافتی از ایستگاه‌های GPS موجود، به بررسی میدان سرعت جابجایی در این منطقه پرداختند [۱۵].

#### ۱-۴- پردازش پراکنش‌کننده‌های دائمی و نتایج آن

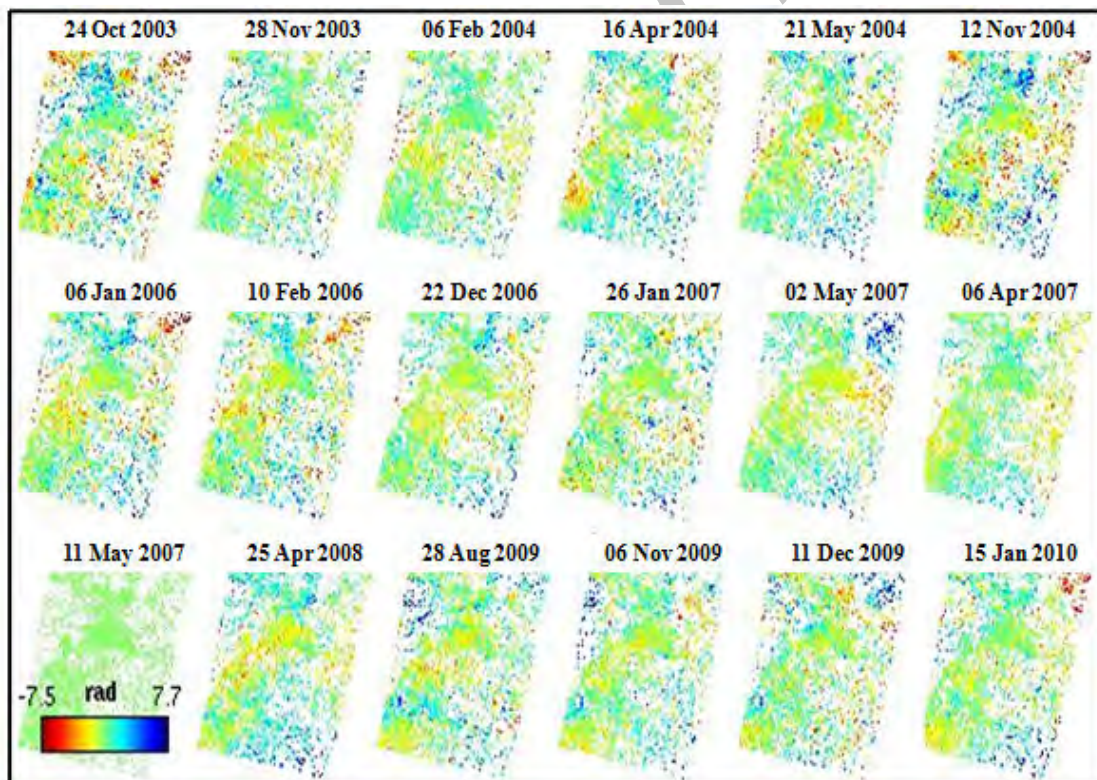
بدست آمد. در ادامه نتایج بدست آمده را مشاهده کرده و به تحلیل و بررسی آن‌ها خواهیم پرداخت.

پردازش‌ها را با در نظر گرفتن ناحیه مذکور از کل تصاویر انجام می‌دهیم و در مرحله معرفی مدل ارتفاعی یکبار از مدل SRTM و یکبار از مدل ASTER استفاده می‌کنیم. در مرحله تعیین پارامترها برای انتخاب پراکنش‌کننده‌های دائمی حد آستانه شاخص پراکنندگی دامنه را  $0/4$  در نظر گرفته و منطقه را به ۶ بخش یعنی ۳ بخش در راستای رنج و ۲ بخش در راستای آزیموت تقسیم کرده و همبستگی پیکسل‌ها در راستای رنج را برابر ۵۰ و در راستای آزیموت برابر ۲۰۰ در نظر گرفتیم و همچنین بیشینه خطای توپوگرافی مجاز را برابر ۱۰ متر تعیین کردیم.

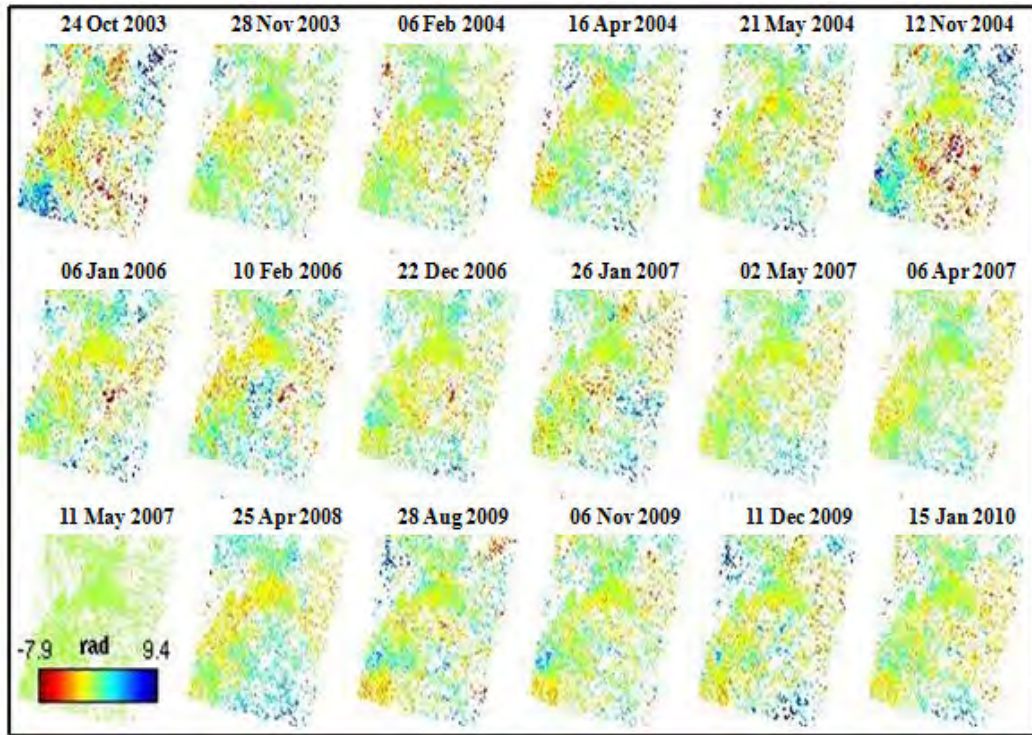
در نهایت برای تکنیک پراکنش‌کننده‌های دائمی دو سری نتایج که مربوط به دو نوع مدل ارتفاعی هستند



شکل ۱۰- نرخ جابجایی مربوط به مدل ارتفاعی SRTM



شکل ۱۱- سری زمانی مربوط به مدل ارتفاعی SRTM

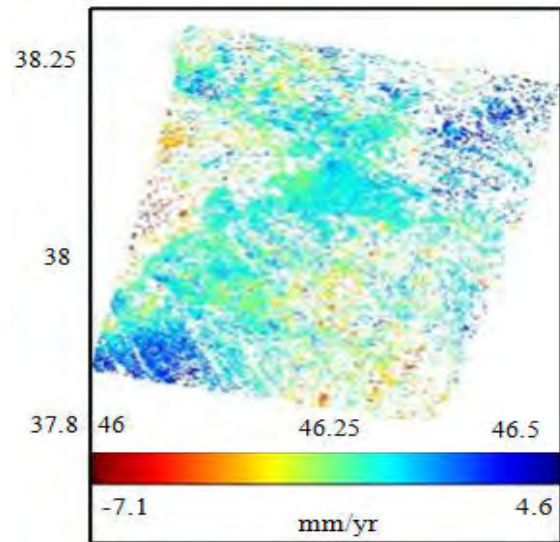


شکل ۱۲- سری زمانی مربوط به مدل ارتفاعی ASTER

#### ۲-۴- پردازش خط مبنای کوتاه و نتایج آن

در این مرحله از پردازش منطقه را به ۶ بخش تقسیم کرده و شاخص پراکندگی دامنه را برابر  $0.6$  و همبستگی پیکسل‌ها در راستای رنج برابر  $0.5$  و در راستای آزیموت برابر  $0.2$  و بیشینه خطای توپوگرافی را مانند قبل  $10$  متر در نظر گرفتیم. شایان ذکر است افزایش میزان همبستگی در راستاهای آزیموت و رنج همچنین افزایش شاخص پراکندگی دامنه تا حد  $0.42$  و یا حتی بیشتر ممکن است باعث افزایش تعداد پراکنش‌کننده‌های انتخابی گردد اما در عین حال ممکن است نویز را به حدی افزایش دهد که قابلیت اطمینان نتایج کاهش یابد.

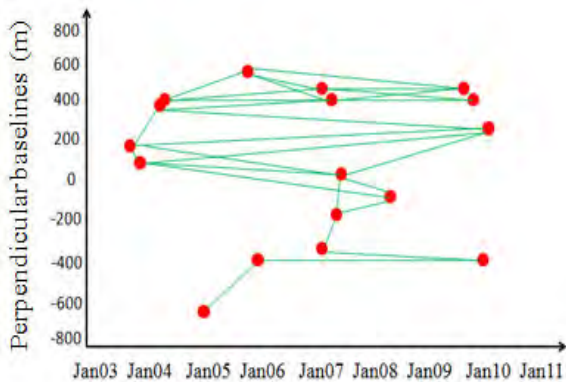
تداخل‌نماهای مورد نظر با طرح موجود در شکل زیر و بر اساس بیشترین همبستگی و کمترین نویز و خط مبنای مکانی کمتر از  $300$  متر انتخاب شده‌اند. از یکی از تصاویر بدلیل اختلاف مکانی و زمانی زیاد و نویز بالا در این پردازش استفاده نشده است.



شکل ۱۳- نرخ جابجایی مربوط به مدل ارتفاعی ASTER

جدول ۲- مقایسه نتایج روش پراکنش‌کننده‌های دائمی

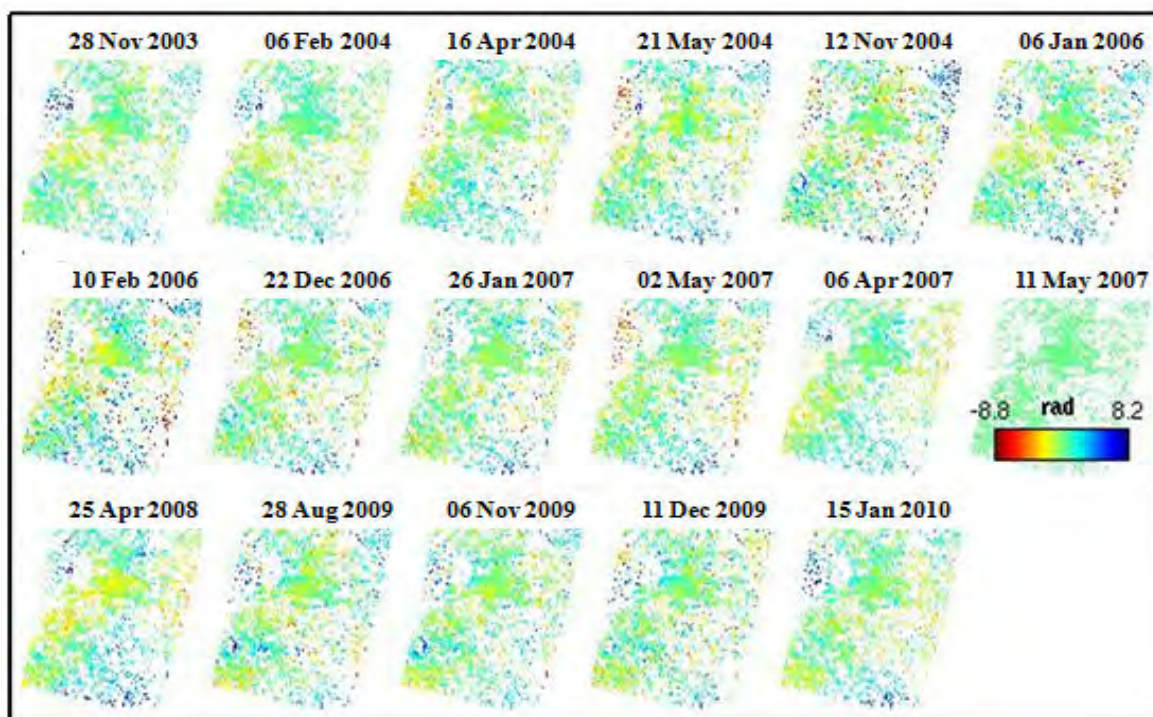
| ASTER                  | SRTM                  | نتایج                                   |
|------------------------|-----------------------|---|
| ۱۰متر                  | ۱۰متر                 | حد مجاز خطای توپوگرافی در نظر گرفته شده |
| ۱۳۱۴۷۴                 | ۱۳۶۸۷۵                | تعداد پراکنش‌کننده‌های دائمی تعیین شده  |
| ۴/۶<br>میلیمتر بر سال  | ۴/۴<br>میلیمتر بر سال | بیشینه نرخ بالآمدگی                     |
| -۷/۱<br>میلیمتر بر سال | -۶<br>میلیمتر بر سال  | بیشینه نرخ فرونشست                      |



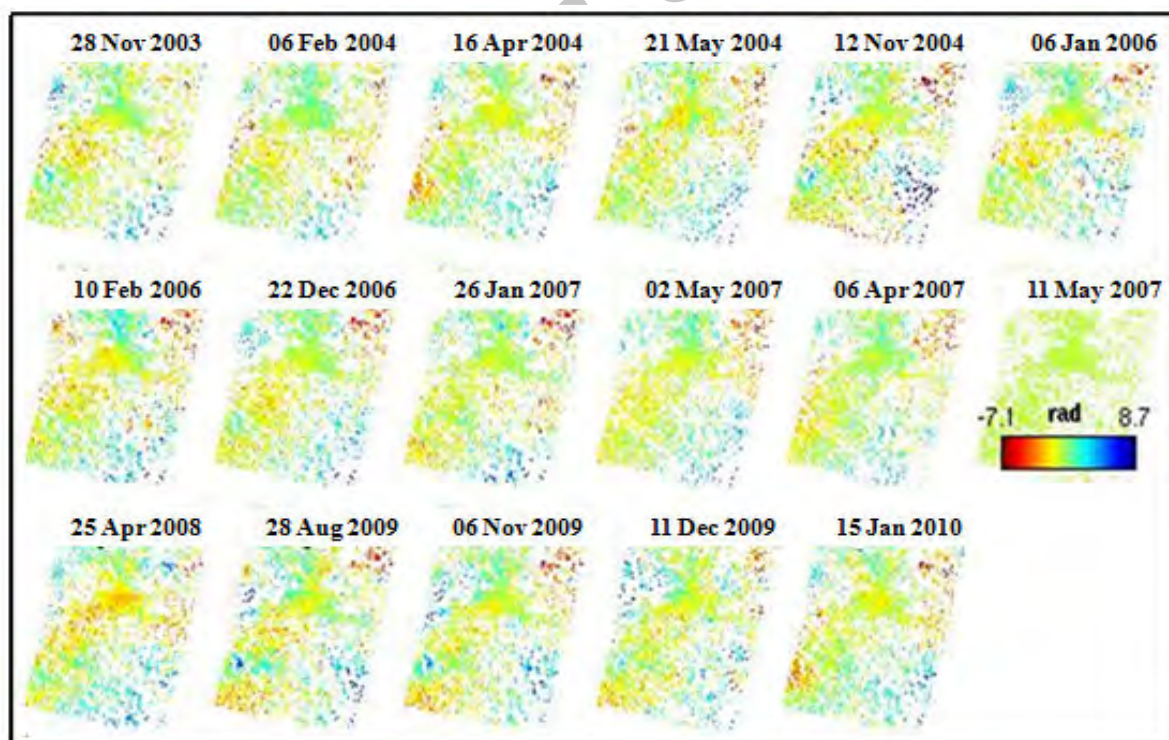
شکل ۱۴- طرح تداخل‌نماها



سری‌های زمانی محاسبه شده برای روش خط مبنای کوتاه در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ قابل ملاحظه است.

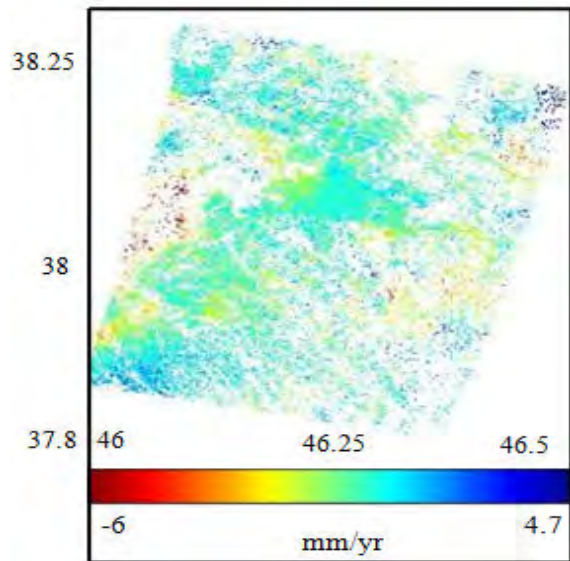


شکل ۱۵- سری زمانی مربوط به مدل ارتفاعی SRTM

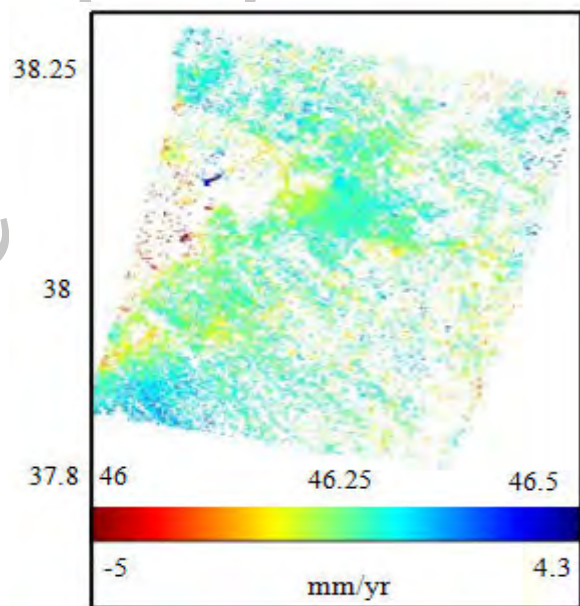


شکل ۱۶- سری زمانی مربوط به مدل ارتفاعی ASTER

میانگین نرخ جابجایی‌های بدست آمده نیز در شکل-های زیر ملاحظه می‌شود.



شکل ۱۷- نرخ جابجایی مربوط به مدل ارتفاعی SRTM



شکل ۱۸- نرخ جابجایی مربوط به مدل ارتفاعی ASTER

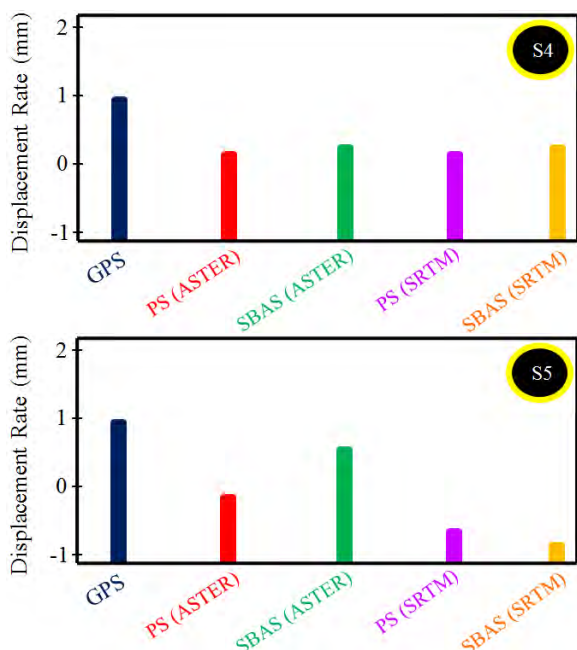
#### ۳-۴- تحلیل نتایج حاصل

با بررسی نتایج بدست آمده از روش پراکنش‌کننده‌های دائمی و با توجه به یکی بودن سیستم‌های مبنای GPS و تصاویر راداری ملاحظه می‌شود میانگین نرخ جابجایی ناشی از دو مدل ارتفاعی در مقدار بیشینه، ۰/۲ میلیمتر بر سال و در مقدار کمینه، ۱/۱ میلیمتر بر سال اختلاف دارند. لازم به ذکر است این مقادیر در راستای خط دید ماهواره می‌باشند. در نواحی مرکز تصویر که سیگنال

نکتونیک در آن موجود است اختلاف ناچیزی در نتایج مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن این موضوع که تمامی شرایط پردازش برای دو مدل ارتفاعی یکسان بوده و به تبع آن خطای باقیمانده مداری و خطای جو موجود در نتایج هم برابر است، دلیل این اختلاف را می‌توان اختلاف ناچیز ارتفاع در آن ناحیه و به تبع آن نزدیکی خطای باقیمانده ارتفاعی در دو مدل دانست. نکته دیگری که در این نتایج باید مورد توجه قرار گیرد تعداد پراکنش‌کننده-هاست که در حالت استفاده از دو مدل اختلافی در حدود ۵۰۰۰ عدد دارند که این اختلافات در نواحی با توپوگرافی بالا مشاهده می‌گردد. با بررسی نتایج بدست آمده از روش خط مبنای کوتاه اختلاف ۰/۴ میلیمتر بر سال در مقدار بیشینه و ۱ میلیمتر بر سال در مقدار کمینه به چشم می‌رسد که در این روش نیز اختلاف چشم‌گیری در نواحی مرکزی که اختلاف ارتفاع کمتری دارند مشاهده نمی‌گردد. تعداد پراکنش‌کننده‌های دائمی در این روش برای دو مدل حدود ۲۰۰ عدد اختلاف دارند که نسبت به اختلاف موجود در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی میزان بسیار کمتری است. این اختلاف نیز مانند قبل در نواحی با توپوگرافی بالا ملاحظه می‌گردد. نکته مورد توجه دیگر تفاوت تعداد پراکنش‌کننده‌ها در مناطق دارای اختلاف ارتفاع بالا و مناطق دارای اختلاف ارتفاع پایین است. همانطور که در تمامی نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود در حواشی منطقه که اختلاف ارتفاع بالاتری وجود دارد تعداد پراکنش‌کننده‌های دائمی و مقطعی نسبت به منطقه مرکزی که اختلاف ارتفاع پایینی در آن وجود دارد بسیار کمتر است.

در ادامه با استفاده از گزارشات ایستگاه‌های GPS و میزان جابجایی آن‌ها در بازه زمانی مورد نظر به بررسی دقت نتایج حاصل می‌پردازیم. برای بررسی نتایج و میزان تاثیر مدل ارتفاعی در میدان‌های سرعت جابجایی بدست آمده از تداخل‌سنجی راداری از ۵ ایستگاه موجود در منطقه استفاده کردیم. این ایستگاه‌ها در مناطقی با سه نوع توپوگرافی متفاوت با یکدیگر قرار گرفته‌اند. ایستگاه-های ۱، ۲ و ۳ در منطقه‌ای نیمه کوهستانی، ایستگاه ۴ در منطقه‌ای مسطح و ایستگاه ۵ در منطقه‌ای کوهستانی واقع شده‌اند.

برای بدست آوردن نرخ جابجایی محل استقرار ایستگاه‌های GPS از روی نتایج تداخل‌سنجی راداری



شکل ۱۹- مقایسه بین نتایج روش‌های مختلف در ۵ ایستگاه GPS

همانطور که ذکر شد ایستگاه شماره ۱ در منطقه‌ای نیمه کوهستانی و مسکونی واقع گردیده است به همین دلیل طبق انتظار روش پراکنش‌کننده‌های دائمی نتایج بهتری نسبت به روش خط مبنای کوتاه ارائه داده‌اند. نتایج مربوط به دو مدل ارتفاعی در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی اختلاف بسیار ناچیزی با یکدیگر دارند و این در حالی است که نتایج بدست آمده از دو مدل در روش خط مبنای کوتاه نه تنها تفاوت بیشتری با جابجایی بدست آمده از ایستگاه GPS بلکه با یکدیگر نیز اختلاف بیشتری دارند. این تفاوت را می‌توان به اثرات خارجی موجود در تداخل‌نماهای در نظر گرفته شده برای پردازش خط مبنای کوتاه نسبت داد. استفاده از مدل ارتفاعی ASTER در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی ۲۵٪ و در روش خط مبنای کوتاه تا ۳۰٪ باعث بهبود نتایج شده است. منظور از درصد بهبود نتایج، استفاده از رابطه زیر است:

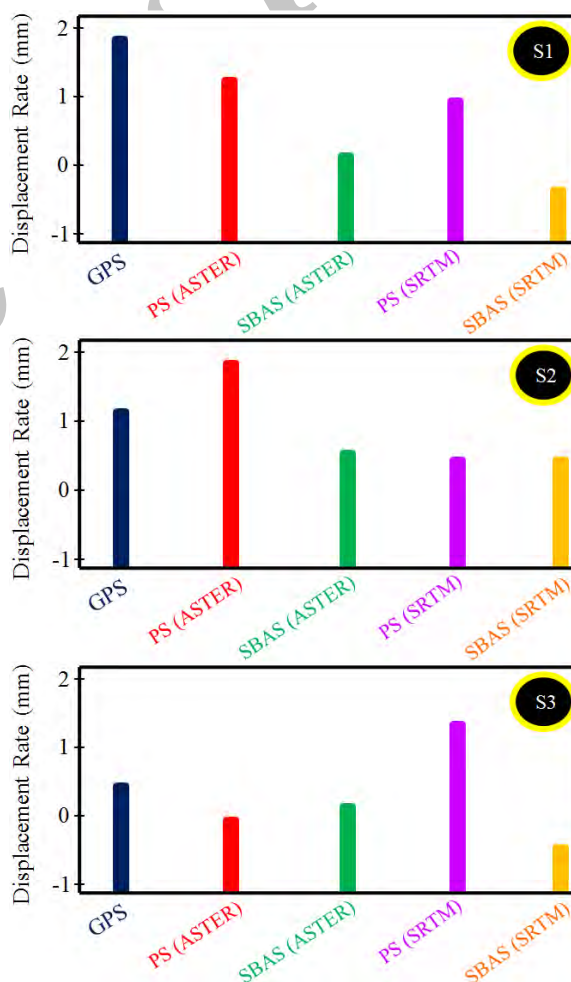
$$\text{percent} = \frac{|SRTM - GPS| - |ASTER - GPS|}{|GPS|} \times 100 \quad (3)$$

نسبت اختلاف فاصله نتایج دو مدل ارتفاعی از گزارش ایستگاه GPS به اندازه جابجایی گزارش شده توسط ایستگاه GPS است، که اگر نتیجه مربوط به مدل ارتفاعی دقیق‌تر به گزارشات GPS، نزدیک‌تر از نتیجه مربوط به مدل ارتفاعی با فاصله نمونه‌برداری بیشتر باشد، درصد

مختصات مورد نظر را به عنوان مرکز مربعی به ضلع ۱۰ پیکسل یا حدود ۴۰ متر در نظر گرفته و به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر درونیابی کریجینگ را برای پراکنش‌کننده‌های موجود در مربع بکار گرفتیم.

جدول ۳- مقایسه نتایج روش خط مبنای کوتاه

| ASTER              | SRTM               | نتایج                                   |
|--------------------|--------------------|---|
| ۱۰ متر             | ۱۰ متر             | حد مجاز خطای توپوگرافی در نظر گرفته شده |
| ۹۲۵۴۰              | ۹۲۷۸۶              | تعداد پراکنش‌کننده‌های دائمی تعیین شده  |
| ۴/۷ میلیمتر بر سال | ۴/۳ میلیمتر بر سال | بیشینه نرخ بالاآمدگی                    |
| -۶ میلیمتر بر سال  | -۵ میلیمتر بر سال  | بیشینه نرخ فرونشست                      |



بهبود نتایج عددی مثبت خواهد بود و اگر دورتر باشد درصد بهبود نتایج عددی منفی می‌شود.

محل ایستگاه شماره ۲ نیز مانند ایستگاه ۱، منطقه‌ای کوهستانی بوده ولی دارای ارتفاعات و پستی بلندی‌های بیشتری است. بازهم طبق انتظار دقیق‌ترین نتیجه مربوط به روش پراکنش‌کننده‌های دائمی و مدل ارتفاعی ASTER است. به دلیل افزایش پستی بلندی‌ها نسبت به محل ایستگاه قبل، مدل ارتفاعی SRTM توانایی کمتری در تصحیحات توپوگرافی داشته و نتیجه بدست آمده از آن اختلاف بیشتری با نتایج مدل ASTER نسبت به ایستگاه شماره ۱ دارد.

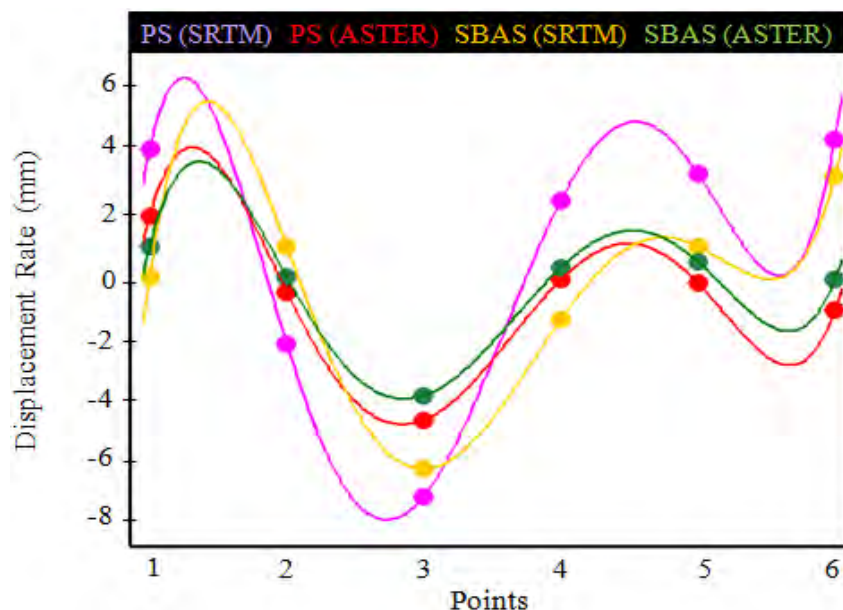
مشخصات جغرافیایی ایستگاه ۳ نیز تقریباً با ۲ ایستگاه قبل یکسان است ولی برخلاف ایستگاه ۱ مسکونی نمی‌باشد. همانطور که از نتایج مشخص است، دقت روش خط مبنای کوتاه در حالت استفاده از مدل ارتفاعی ASTER بیشتر از سایر روش‌هاست و دلیل آن را می‌توان غیر شهری بودن منطقه و در نتیجه کمبود یا عدم دقت در پراکنش‌کننده‌های دائمی دانست. توپوگرافی بالای منطقه باعث ایجاد تفاوتی زیاد در نتایج ناشی از دو مدل ارتفاعی گردیده است که این تفاوت به دلایل ذکر شده در روش پراکنش‌کننده دائمی بیشتر است. در ایستگاه شماره ۲ استفاده از مدل ارتفاعی ASTER در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی ۲۶٪ و در روش خط مبنای کوتاه تا ۳۳٪ و در ایستگاه شماره ۳ در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی ۴۲٪ و در روش خط مبنای کوتاه تا ۲۷٪ نتایج را بهبود بخشیده است.

برخلاف ۳ ایستگاه قبل منطقه مربوط به محل ایستگاه شماره ۴ مسطح بوده و از توپوگرافی زیادی برخوردار نیست و منطقه‌ای شهری نیز نمی‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد نتایج بدست آمده بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشند و به دلیل مسطح بودن منطقه، نتایج ناشی از دو مدل ارتفاعی تفاوت بسیار کمی دارند. همچنین روش خط مبنای کوتاه به دلیل غیر شهری بودن

منطقه، دقت بیشتری را ارائه کرده است. در این ایستگاه استفاده از مدل ارتفاعی با فاصله نمونه‌برداری کمتر در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی ۳۰٪ و در روش خط مبنای کوتاه تا ۳٪ دقت نتایج را افزایش داده است.

در نهایت نتایج مربوط به ایستگاه شماره ۵ را بررسی می‌کنیم. منطقه مربوطه کاملاً کوهستانی بوده و در دامنه آتشفشان سهند واقع گردیده است. توپوگرافی بالای منطقه و غیر شهری بودن آن نتایج را به شدت تحت تاثیر خود قرار داده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد نتایج مربوط به مدل ارتفاعی SRTM دقت پایینی دارند و این به دلیل بالا بودن میزان خطای باقیمانده ناشی از تصحیح اثر توپوگرافی و عدم توانایی مدل ارتفاعی در تصحیح هرچه بهتر و دقیق‌تر است. به دلیل غیر شهری بودن منطقه و عدم وجود پراکنش‌کننده‌های دائمی با تراکم و دقت بالا روش پراکنش‌کننده‌های دائمی در حالت استفاده از مدل ارتفاعی ASTER نیز جواب مناسبی به دست نداده است و دقیق‌ترین نتیجه بدست آمده برای این ایستگاه مربوط به روش خط مبنای کوتاه در حالت استفاده از مدل ارتفاعی ASTER می‌باشد. استفاده از مدل ارتفاعی ASTER در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی ۲۳٪ و در روش خط مبنای کوتاه تا ۵۳٪ نتایج را بهبود داده است. با تفسیر نمودارها می‌توان به اهمیت تاثیر فاصله نمونه‌برداری مدل ارتفاعی در نتایج بدست آمده

از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به ویژه در مناطق کوهستانی پی برد. نکته‌ای که باید مد نظر قرار داد آن است که ایستگاه‌های GPS معمولاً در مناطقی قرار دارند که اختلاف ارتفاع اطراف آن‌ها کم است و در نتیجه نتایج بدست آمده از دو مدل ارتفاعی در محل این ایستگاه‌ها دارای اختلاف کمی هستند. در نتیجه به منظور مقایسه بهتر نتایج دو روش تعداد ۶ نقطه در اطراف منطقه و در نواحی دارای اختلاف ارتفاع زیاد در نظر گرفتیم و نرخ جابجایی بدست آمده را در این نقاط با یکدیگر مقایسه کردیم که نتایج آن در شکل ۲۰ به چشم می‌رسد.



شکل ۲۰- مقایسه بین نتایج روش‌های مختلف در نقاط در نظر گرفته شده. منحنی‌های برازش داده شده بر اندازه‌گیری‌ها از درجه ۵ می‌باشند. انتخاب این درجه از منحنی. به دلیل آن بود که این درجه از منحنی بهتر از سایر درجات تفاوت بین این نتایج را نشان می‌دهد.

جدول ۴- پارامترهای آماری مربوط به نتایج. وریانس بر حسب مجذور میلیمتر بر سال و سایر پارامترها بر حسب میلیمتر بر سال می‌باشند.

| روش  | مدل ارتفاعی رقومی | میانگین | انحراف معیار | وریانس |
|------|-------------------|---------|--------------|--------|
| PS   | SRTM              | ۰٫۹۶    | ۴٫۶۴         | ۲۱٫۵۷  |
| PS   | ASTER             | -۰٫۶۶   | ۲٫۱۹         | ۴٫۸۱   |
| SBAS | SRTM              | -۰٫۳۰   | ۳٫۲۷         | ۱۰٫۷۱  |
| SBAS | ASTER             | ۰٫۲۶    | ۱٫۷۷         | ۳٫۱۵   |

SRTM در سطح اطمینان ۱۰ درصد معنادار است. با توجه به اختلاف موجود بین نتایج که در برخی نقاط تا ۴ میلیمتر بر سال مشاهده می‌شود و از آنجا که دقت روش‌های پراکنش‌کننده‌های دائمی و خط مبنای کوتاه در محاسبه میدان سرعت جابجایی در صورت انتخاب مناسب تصاویر و تداخل‌نماها به ۱ میلیمتر بر سال نیز می‌رسد [۱۳]، اختلاف بدست آمده غیر قابل چشم‌پوشی است. در کل می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل ارتفاعی رقومی با فاصله نمونه‌برداری کمتر در مناطق با اختلاف ارتفاع زیاد نقش بسزایی در نتایج داراست.

## ۵- نتیجه‌گیری

جمع‌بندی نتایج نمایانگر آن است که با حرکت از مرکز تصویر به سمت حواشی و در نتیجه افزایش اختلاف ارتفاع در منطقه، تفاوت بین نتایج حاصل از ۲ مدل ارتفاعی نیز بیشتر می‌گردد. اختلاف نتایج در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی بیشتر از روش خط مبنای کوتاه است. در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی میزان ۰/۲ میلیمتر بر سال اختلاف در بیشینه نرخ بالآمدگی و ۱/۱ میلیمتر بر سال اختلاف در بیشینه نرخ فرونشست مشاهده گردید و در روش خط مبنای کوتاه این میزان به ترتیب ۰/۴ میلیمتر بر سال و ۱ میلیمتر بر سال بود. مقایسه نتایج بدست آمده با گزارشات ایستگاه‌های GPS

پارامترهای آماری مربوط به نتایج بدست آمده نیز در جدول ۴ ملاحظه گردید. شکل ۲۰ بخوبی نشان‌دهنده اهمیت انتخاب مدل ارتفاعی رقومی مناسب به منظور پردازش‌های راداری است. بدلیل آنکه نقاط انتخابی در مناطق غیر شهری می‌باشند، نتایج روش خط مبنای کوتاه قابلیت اطمینان بیشتری دارند همچنین ملاحظه می‌گردد که نتایج مربوط به استفاده از مدل ارتفاعی با فاصله نمونه‌برداری بیشتر اختلاف و فاصله زیادی با نتایج دیگر دارند. استفاده از روش خط مبنای کوتاه تا حدودی از خطای مربوط به مدل ارتفاعی با فاصله نمونه‌برداری بیشتر کاسته است و نتایج آن را به نتایج مربوط به مدل ارتفاعی با فاصله نمونه‌برداری کوتاه‌تر نزدیک‌تر ساخته است. به منظور بررسی معنادار بودن اختلاف بدست آمده از آزمون آماری T تک نمونه‌ای با استفاده از میانگین استفاده گردید. در نتیجه این آزمون مشخص شد که اختلاف بین نتایج مربوط به مدل ارتفاعی ASTER و مدل ارتفاعی

۶ نقطه انتخاب شده استفاده کردیم. پارامترهای آماری نتایج مربوط به ۶ نقطه بررسی گردید که اختلاف بین نتایج در برخی نقاط به ۴ میلیمتر بر سال نیز می‌رسید. این در حالی است که دقت روش‌های پراکنش‌کننده‌های دائمی و خط مبنای کوتاه در صورت انتخاب تصاویر و تداخل‌نماهای مناسب به ۱ میلیمتر بر سال نیز می‌رسد. نتیجه آزمون معناداری اختلاف نتایج نیز که با استفاده از میانگین نتایج بدست آمده صورت گرفت، حاکی از تفاوت معنادار نتایج در سطح معنی‌دار ۱۰ درصد بود. در نتیجه استفاده از مدل ارتفاعی با فاصله نمونه‌برداری کمتر در مناطق دارای اختلاف ارتفاع زیاد نقش تعیین‌کننده‌ای در نتایج دارد.

نشان داد که در نواحی با توپوگرافی بالا در حالت استفاده از مدل ارتفاعی دقیق‌تر تا ۴۲ درصد بهبود نتایج در روش پراکنش‌کننده‌های دائمی و ۵۳ درصد بهبود نتایج در روش خط مبنای کوتاه نسبت به حالت استفاده از مدل ارتفاعی با دقت کمتر وجود دارد. بین نتایج ایستگاه شماره ۴ که در منطقه هموارتری بود اختلاف بسیار کمی در نتایج بدست آمده مشاهده شد تا حدی که در روش خط مبنای کوتاه استفاده از مدل ارتفاعی دقیق‌تر تنها ۳٪ دقت نتایج را افزایش داد. به بیان دیگر با افزایش توپوگرافی منطقه میزان نیاز به مدل ارتفاعی دقیق‌تر و اهمیت استفاده از آن بیشتر می‌گردد ولی در مناطق مسطح تفاوت چندانی میان نتایج مشاهده نشده و دقت بالاتر مدل ارتفاعی ASTER تاثیر بسزایی در بهبود نتایج ندارد. با توجه به این موضوع که توپوگرافی اطراف ایستگاه‌های GPS تغییرات زیادی ندارد به منظور مقایسه بهتر نتایج از

## مراجع

- [1] Kampes B M.(2005). Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry, PHD Thesis, Delft University of Technology.
- [2] Hooper A.(2006). Persistent scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation. PhD thesis, Stanford University.
- [3] Hooper A, Segall P, Zebker H.(2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos, Journal of Geophysical Research. , 112, B07407.
- [4] Hooper A,Zebker H.(2007). Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series, Optical Society of America, Vol. 24, No. 9, pp. 2737–2747.
- [5] Elliott J,R. Biggs, J Parsons, B Wright, T J. 2008. InSAR slip rate determination on the Altyn Tagh Fault, northern Tibet, in the presence of topographically corre-lated atmospheric delays. Geophysical Research LETTERS ,35, L12309.
- [6] julivet,R,Grandin,R,Lassere C.(2011). Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 38, L17311.
- [7] <http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>.
- [8] <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp>.
- [9] Daniel R.C, Maisons C, Carnec S, Mouelic L, Hosford S.(2003). Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement, Remote Sensing of Environment, 88: 468-478.
- [10] Colesanti C, Ferretti A, Novali F, Prati C, Rocca F.(2003). SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, Nov. 7, pp. 1685 – 701.
- [11] Ferretti A, Prati C, Rocca F.(2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 1, pp. 8–20.

- [12] Hooper A, Zebker H, Segall P, Kampes B.(2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letter*, Vol. 31, pp. 611-615.
- [13] Hanssen R.(2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.
- [14] Zebker H.A,Villasenor. J.(1992). Decorrelation in interferometric radar echoes, *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No. 5, pp. 950-959.
- [15] M Rizza,P Vernant,J F Ritz,M Peyret,H Nankali,H Nazari,Y Djamour, R Salamati,F Tavakoli,J Chery,S A Mahan,FMasson.(2013).Morphotectonic and geodetic evidence for a constant slip-rate over the last 45 kyr along the Tabriz fault (Iran),*Geophysical journal internationall*, Vol. 199, No. 1, pp. 25-37.
- [16] Colesanti C, Ferretti A, Prati C, Rocca F.(2003).Monitoring landslides and tectonic motions with the permanent scatterers technique, *Eng. Geol*, Vol. 68 No. 1-2, pp. 3 –14.
- [17] Hooper A.(2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches, *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L16302.
- [18] Hooper A,Zebker H.(2007). Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series, *Optical Society of America*, Vol. 24, No. 9, pp. 2737–2747.
- [19] Motagh M, Hoffmann J, Kampes B, Baes M , Zschau J, 2007. Strain accumulation across the Gazikoy–Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements. *Earth and Planetary Science Letters* 255, 432–444.
- [20] Samiei Esfahani S.(2008).Persistent Improving Persistent Scatterer Interferometry for Deformation Monitoring (Case study on Gardanne mining site). MS.c thesis, Delft University of Technology.
- [21] Wiesmann, A , Wegmuller U , Werner C,Strozzi T.(2003). Subsidence monitoring over oil fields with L-band SAR interferometry, *Geoscience and Remote Sensing Symposium.IGARSS apos; 03.Proceedings. 2003 IEEE International*,Vol.3, pp.1546-1548.