تصحیح اثر تأخیر تروپسفری در تداخل‌سنجی راداری با استفاده از مدل تحقیقاتی و پیش‌بینی آب و هوا (WRF)

محراب یوسفی*[۱]، مسعود مشهدی حسینعلی[۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
myousefi@mail.kntu.ac.ir

[۲] دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
hossainali@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۶، تاریخ تصویب دی ۱۳۹۶)

چکیده

تداخل‌سنجی راداری به عنوان یک تکنیک متداول امکان مطالعه تغییر شکل سطحی پوسته زمین را فراهم می‌کند. از محدودیت‌های این تکنیک، اثر تروپسفر بر روی فاز سیگنال راداری است که می‌تواند خطای بیشینه‌ای حدود ۱۰ تا ۱۴ سانتی‌متر را در برآورد جابجایی ایجاد نماید. یکی از روش‌هایی که به منظور تصحیح اتمسفری در تداخل‌سنجی راداری به کار گرفته می‌شود، استفاده از مدل‌های عددی پیش‌بینی آب و هوا است. در این تحقیق از مدل تحقیقاتی و پیش‌بینی آب و هوا (WRF) جهت کاهش اثر تروپسفری در تداخل‌سنجی تفاضلی استفاده گردید. منطقه شمال غرب ایران به عنوان منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شده و به منظور محاسبه تأخیر تروپسفری، روش ردیابی اشعه GP به کار گرفته شد. برای ارزیابی نتایج از یک روش نو با قابلیت اطمینان بالا استفاده گردید. در این روش تداخل‌نماهایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که فاز ناشی از جابجایی در آن‌ها نزدیک به صفر بوده و بیشترین سهم فاز موجود، مربوط به فاز تروپسفری است. به این ترتیب با اعمال تصحیحات می‌توان تغییرات فاز تداخل‌نما را با پارامتر RMS ارزیابی نمود. پس از محاسبه فاز ناشی از تأخیر تروپسفری، تصحیحات مورد نظر بر روی اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی راداری اعمال شد. نتایج بدست آمده نشان از عملکرد مثبت مدل WRF (با تفکیک مکانی‌های متفاوت) دارد. به طوری که، RMS بدست آمده برای تصحیح تروپسفری با مدل WRF، حذف یک خطای سیستماتیک از اندازه‌گیرهای تداخل‌نما را نشان می‌دهد. تصحیح تروپسفری با استفاده از مدل WRF با تفکیک مکانی ۱، ۳، ۹ و ۲۷ کیلومتر برای منطقه شهری تبریز به ترتیب با ۴۳، ۱۷، ۱۵ و ۴۷ درصد و برای منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه با ۱۷، ۱۴، ۱۵ و ۲۱ درصد بهبود RMS همراه بود.

واژگان کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، تصحیح تروپسفری، مدل هواشناسی عددی، مدل WRF، ردیابی اشعه

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

در دو دهه‌ی اخیر فعالیت‌های ژئوفیزیکی و ژئودتیکی بسیاری با استفاده از تداخل‌سنجی دهانه ترکیبی راداری[۱] صورت پذیرفته است [۱]. به طوری که، این تکنیک به یکی از روش‌های محبوب در پایش جابجایی‌های پوسته زمین ناشی از زلزله، فرونشست و دیگر عوامل تغییرشکل در بین محققین مطرح شده است [۲]. اما برای رسیدن به دقت‌های بالا، این روش با محدودیت‌هایی مواجه است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به تأخیر فاز در تروپسفر اشاره نمود که بر دقت اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی تفاضلی تأثیر بسزایی دارد [۳]. زِبکر[۲] اثبات کرد که بخش تروپسفر می‌تواند ۱۰ تا ۱۴ سانتی‌متر خطا در فاز تداخل‌سنجی ایجاد نماید [۴]. این اندازه از خطا در کاربردهای تعیین جابجایی پوسته‌ی زمین، مقدار قابل توجهی بوده و نتایج را کاملاً تحت تأثیر قرار می‌دهد.

روش‌های مختلفی جهت کاهش و حذف فاز تروپسفری تداخل‌سنجی راداری مطرح گردیده است. در همین راستا هانسن[۳] و فِیج[۴] (۱۹۹۶) استفاده از مدل ساستامواینن[۵] را جهت بررسی اثرات تروپسفر در مشاهدات تداخل‌سنجی راداری مطرح نمودند [۵]. سارتی[۶] و همکاران (۱۹۹۹) روش آنالیز همبستگی بین فاز تداخل‌نما و ارتفاع را جهت حذف اثرات جَوی ارائه کردند [۶]. بُک[۷] و ویلیامز (۱۹۹۷) با استفاده از تأخیرهای زنیتی بدست آمده از مشاهدات GPS و الگوریتم درونیابی کریجینگ[۸]، خطای ناشی از اثر تروپسفر بر روی تداخل‌نما را حذف نمودند [۷]. این روش نیازمند یک شبکه متراکم از ایستگاه‌های GPS است که اغلب چنین شبکه‌ای وجود ندارد [۲]. لی و همکاران (۲۰۰۳) با به‌کارگیری داده‌های اندازه‌گیری شده سنجنده مودیس[۹]، جهت تصحیح اثرات جَو در مناطق کوه اِتنا و لُس‌آنجلس[۱۰]، نتایج قابل توجهی را بدست آورد [۸]. مجدداً لی و همکاران (۲۰۰۶) امکان به‌کارگیری محصول بخار آب مادون قرمز نزدیک سنجنده مِریس[۱۱] را جهت تصحیح جَو اندازه‌گیری‌های ASAR[۱۲] مطرح نمودند [۹]. داده‌های مریس و مودیس هر دو تحت تأثیر ابرها بوده و مناطقی که ابر وجود دارد را پوشش نمی‌دهند [۲]. همچنین فاصله زمانی زیادی بین أخذ داده‌های سنجنده مودیس وجود دارد [۲]. از طرفی سنجنده مریس بر روی ماهواره ENVISAT نصب بوده و تنها هماهنگ با تصاویر ASAR أخذ می‌گردند، در حالی که مأموریت این ماهواره در آپریل سال ۲۰۱۲ به پایان رسید [۲].

حاجی‌آقاجانی و همکاران با استفاده از داده‌های آنالیز شده جهانی ERA-Interim با تفکیک مکانی ۰/۷۵ درجه، اثر تروپسفری در تداخل‌سنجی راداری در منطقه شمال غرب ایران را تصحیح نمود [۱۰].

از دیگر روش‌های مرسوم در این زمینه استفاده از مدل‌های عددی پیش‌بینی آب و هوا[۱۳] است. فُسترِ[۱۴] و همکاران (۲۰۰۶) از مدل‌های MM5[۱۵] جهت پیش‌بینی نقشه‌های تأخیر جَوی و تصحیح ۴۴ تداخل‌نمای مربوط به منطقه هاوایی استفاده کردند [۱۱]. از دیگر مدل‌های هواشناسی می‌توان به مدل تحقیقاتی و پیش‌بینی آب و هوا (WRF) اشاره نمود که مورد توجه محققین قرار دارد. مدل WRF-ARW نسل سوم از سیستم مدل‌سازی میان مقیاس[۱۶] است [۱۲]. این مدل، قابلیت تولید پارامترهای هواشناسی همزمان با أخذ تصاویر SAR با تفکیک مکانی بالا (کمتر از ۱ کیلومتر) را دارد [۱۳]. وِج و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل پیش‌بینی و تحقیقاتی WRF[۱۷] در ۴ دامنه با تفکیک مکانی‌های ۱۲، ۴، ۱ و ۰/۳ کیلومتر، تداخل‌نمای منطقه کوه اِتنا را تصحیح کردند. یون[۱۸] و همکاران (۲۰۱۵) با بخار آب بدست آمده از مدل WRFDA[۱۹] که قابلیت داده‌گواری پارامترهای تخمینی مدل WRF را داراست، به تصحیح جَوی تداخل‌نما پرداخت که نتایج قابل قبولی را در این تحقیق به همراه داشت [۲]. برای رسیدن به بهترین عملکرد در به‌کارگیری مدل WRF، باید بهبودهای بیشتری در زمینه داده‌های شرایط مرزی و اولیه مورد استفاده مدل صورت گیرد [۱۴].

۱ Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)
۲ Zebker
۳ Hanssen
۴ Feijt
۵ Saastamoinen
۶ Sarti
۷ Bock
۸ Kriging
۹ MODIS
۱۰ Los Angeles
۱۱ MERIS
۱۲ Advanced Synthetic Aperture Radar
۱۳ Numerical Weather Prediction Model
۱۴ Foster
۱۵ Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model
۱۶ Mesoscale
۱۷ Weather Research and Forecasting
۱۸ Yun
۱۹ Weather Research and Forecasting Data Assimilation

۲- اثراتمسفر بر فاز تداخل‌نما[۱]

فاز اندازه‌گیری شده توسط InSAR، تحت تأثیر عوامل مختلفی اعم از توپوگرافی، انحنای زمین، جابجایی سطح، اتمسفر و نویز است و آن را می‌توان به صورت ترکیب خطی عوامل ذکر شده نوشت [۲, ۱۵-۱۷]:

$$\phi_{InSAR} = \phi_{topo} + \phi_{orb} + \phi_{defo} + \phi_{atm} + \phi_{noise} \qquad (۱)$$

که در آن، ϕ_{InSAR} اختلاف فاز تداخل‌سنجی بین دو تصویر راداری است. همچنین ϕ_{topo} فاز ناشی از توپوگرافی منطقه بوده که با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی می‌توان اثر آن را حذف نمود [۱۸]. ϕ_{orb} فاز ایجاد شده به دلیل انحنای زمین است و با استفاده از اطلاعات مداری دقیق حذف می‌گردد [۲]. ϕ_{noise} فاز نویز است (که عمدتاً ناشی از ناهمبستگی سیگنال InSAR، ایجاد شده توسط پوشش گیاهی و یا تغییرات محیطی سطح زمین می‌باشد). برای کاهش فاز نویز نیز از فیلتر گلدشتاین[۲] استفاده می‌شود [۳]. با حذف ترم‌های فوق، تنها دو ترم فاز جابجایی (ϕ_{defo}) و فاز اتمسفر (ϕ_{atm}) باقی می‌ماند. واضح است که برای رسیدن به فاز جابجایی می‌بایست فاز ناشی از اتمسفر را حذف نمود [۲].

۳- مدل تحقیقاتی و پیش‌بینی آب و هوا (WRF)

مدل WRF یک سامانه پیش‌بینی عددی وضع هوا (NWP[۳]) و شبیه‌سازی جو است که برای کاربردهای پژوهشی و عملیاتی طراحی گردیده است [۱۲]. طراحی این مدل، نتیجه تلاش نهادهایی از جمله مرکز ملی تحقیقات جوی (NCAR[۴])، بخش هواشناسی ریزمقیاس و میان-مقیاس NCAR موسوم به MMM[۵]، اداره اقیانوس‌شناسی و جوی (NOAA[۶])، مرکز پیش‌بینی محیطی (NCEP[۷]) و دیگر مراکز مربوطه می‌باشد و در حال حاضر در NCEP به طور کامل عملیاتی شده است [۱۹]. هسته دینامیکی WRF مبنی بر حل‌کننده اویلری برای فشرده‌سازی کامل معادلات غیرهیدرواستاتیک و همچنین دارای قابلیت به کارگیری معادلات هیدرواستاتیک است.

۴- محاسبه تأخیر تروپسفری

فاز اتمسفر مؤثر در تداخل‌سنجی راداری را می‌توان به دو بخش تروپسفر و یونسفر تقسیم نمود و به صورت زیر نشان داد [۳]:

$$\phi_{atm} = \phi_{trop} + \phi_{iono} \qquad (۲)$$

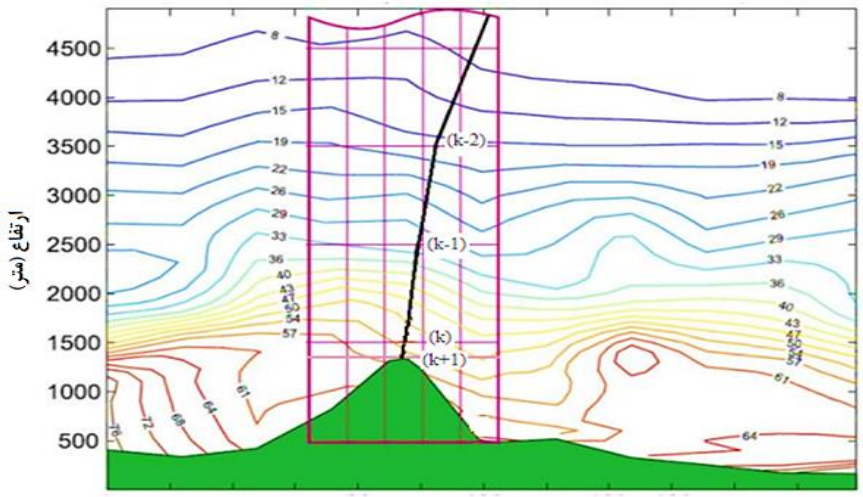
به طوری که، ϕ_{trop} فاز ناشی از بخش تروپسفر و ϕ_{iono} فاز ایجاد شده توسط یونسفر است. از آنجا که سیستم InSAR از امواج راداری ماکروویو برای تصویربرداری استفاده می‌نماید، این امواج به دلیل شرایط فرکانسی ویژه، کمترین تأثیر را از یونسفر می‌پذیرند به طوری که می‌توان اثر آن را نادیده گرفت [۳]. اما بخش تروپسفر جَو به دلیل تغییرات زیاد در دو حوزه مکان و زمان اثر غیرقابل انکاری بر روی فاز تداخل‌نما ایجاد می‌کند [۳]. در این تحقیق جهت محاسبه تأخیر تروپسفری از روش ردیابی اشعه استفاده گردیده است [۲۰].

۴-۱- روش ردیابی اشعه

از آنجا که هندسه تصویربرداری SAR به صورت تصویربرداری مایل است، در نتیجه می‌بایست تأخیر تروپسفری در راستای خط دید ماهواره محاسبه گردد. روش مرسوم در تحقیقات انجام شده در زمینه تصحیح تروپسفری تداخل‌سنجی راداری، محاسبه تأخیر زنیتی تروپسفر و تبدیل آن به تأخیر مایل با استفاده از تابع نگاشت است. استفاده از تابع نگاشت باعث ایجاد خطا در محاسبات می‌گردد. به این منظور از روش ردیابی اشعه استفاده می‌گردد.

---

۱ Interferogram
۲ Goldstein
۳ Numerical Weather model Prediction
٤ National Center for Atmospheric Research
٥ Mesoscale and Microscale Meteorology
٦ National Oceanic and Atmospheric Administration
۷ National Centers for Environmental Prediction



شکل۱- محل قرارگیری یک نقطه‌ی زمینی بین سطوح مدل عددی پیش‌بینی آب و هوا
منحنی میزان‌ها، مقادیر قابلیت انکسار تَر را نمایش می‌دهند [۲۱]

در این روش به جای محاسبه تأخیر تروپسفری در راستای قائم و سپس تبدیل آن به تأخیر مایل، طی یک روند تکرار شونده، مسیر سیگنال در راستای مایل بدست آمده و تأخیر تروپسفری مایل[۱] در طول مسیر سیگنال محاسبه می‌گردد. بنابراین، دستیابی به مسیر دقیق امواج برای مدل کردن تأخیر مایل با به کارگیری متغیرهای مدل حالت امری ضروری است. با توجه به این موضوع وظیفه‌ی مهم روش ردیابی اشعه، تعیین مسیر سیگنال از میان یک شبکه مدل، با دقت مناسب است [۲۲-۲۴].

دو روش برای تعیین مسیر موج وجود دارد. روش اول موسوم به حداقل زمان سفر[۲] (LTT) [۲۵-۲۷] و روش دوم تقریب مسیر هندسی[۳] (GP) است. روش LTT از دقت بالاتری برخوردار است اما روش GP سرعت بالاتری در محاسبات دارد [۲۰, ۲۸].

در این تحقیق از روش تقریب مسیر هندسی (GP) استفاده شده است. در این روش فرض بر این است که اثر تروپسفری روی مسیر سیگنال می‌تواند با اصلاح مسیر هندسی مستقیم بین ماهواره و سطح زمین محاسبه شود [۲۰]. با استفاده از مسیر هندسی و زوایای زنیتی و آزیموت هندسی بین نقطه زمینی و ماهواره، مسیر سیگنال تعیین شده و تأخیر مایل تروپسفری محاسبه می‌گردد [۲۰].

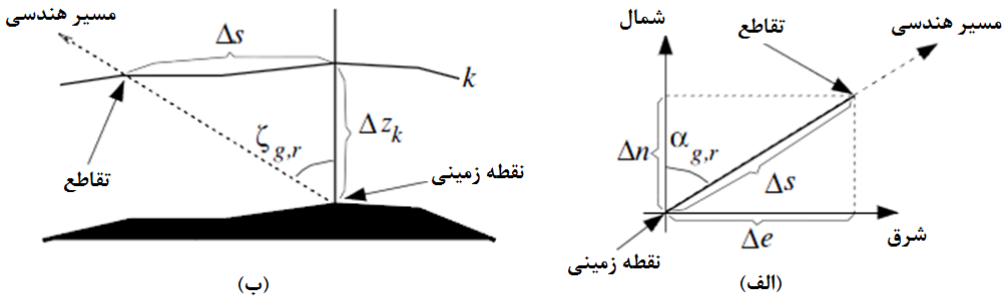
ردیابی اشعه به روش GP جهت تخمین تأخیر تروپسفری مایل یا STD شامل سه الگوریتم مجزا است [۲۰]:

۱- ابتدا می‌بایست با یک روند تکرار شونده محل تقاطع سیگنال با سطوح مدل هواشناسی شناسایی شده و مسیر سیگنال در راستای شبکه مدل عددی WRF تعیین گردد. برای این منظور با توجه به شکل۱، مختصات نقطه زمینی (k+1) به عنوان مقدار اولیه جهت دستیابی به مختصات محل تقاطع با اولین لایه (k) در نظر گرفته می‌شود. سپس اختلاف طول و عرض جغرافیایی ($\Delta\varphi_k$,$\Delta\lambda_k$) بین هر دو نقطه متوالی با استفاده از اختلاف ارتفاع ژئوپتانسیل (Δz_k) بین دو نقطه و زوایای آزیموت ($\alpha_{g,r}$) و زنیت هندسی ($\zeta_{g,r}$) موج ارسالی ماهواره در محل نقطه زمینی، مطابق روابط (۳) قابل محاسبه است (شکل۲) [۲۰]:

$$\Delta s \approx \Delta z_k \tan\zeta_{g,r}$$
$$\Delta n = \Delta s \cos\alpha_{g,r} \approx \Delta z_k \tan\zeta_{g,r} \cos\alpha_{g,r} \qquad (۳)$$
$$\Delta e = \Delta s \sin\alpha_{g,r} \approx \Delta z_k \tan\zeta_{g,r} \sin\alpha_{g,r}$$

در روابط فوق، Δs، Δn و Δe به ترتیب میزان جابجایی مسطحاتی، نصف‌النهاری و میزان جابجایی مداری می‌باشد. لازم بذکر است که ارتفاع ژئوپتانسیل یکی از پارامترهای تولید شده توسط مدل WRF است. همچنین زوایای آزیموت و زنیت هندسی نیز با استفاده از موقعیت ماهواره و نقطه‌ی زمینی مورد نظر قابل محاسبه است.

۱ Slant Tropospheric Delay
۲ Least Travel Time
۳ Geometrical Path



شکل۲- هندسه مسیر موج الف) نمای بالا از هندسه مسیر سیگنال ب) نمای روبرو از هندسه مسیر سیگنال [۲۰]

البته این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که روابط (۳) در نزدیکی قطب اعتبار ندارند. با بدست آمدن میزان جابجایی‌ها، اختلاف طول و عرض جغرافیایی با استفاده از روابط (۴) قابل محاسبه است:

$$\Delta\varphi_k = \frac{\Delta n}{a_{k+\frac{1}{2}} + z_{k+\frac{1}{2}}}$$
$$\Delta\lambda_k = \frac{\Delta e}{(a_{k+\frac{1}{2}} + z_{k+\frac{1}{2}})\cos\varphi_{k+\frac{1}{2}}} \quad (۴)$$

در این روابط $a_{k+\frac{1}{2}}$ متوسط شعاع انحنای محلی زمین بین هر دو سطح متوالی و $z_{k+\frac{1}{2}}$ متوسط ارتفاع بین هر دو سطح متوالی است. در نهایت مختصات نقطه تقاطع به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\varphi_k = \Delta\varphi_k + \varphi_{k+1}$$
$$\lambda_k = \Delta\lambda_k + \lambda_{k+1} \quad (۵)$$

در رابطه فوق، $(\varphi_{k+1}, \lambda_{k+1})$ و (φ_k, λ_k) به ترتیب مختصات نقطه تقاطع سیگنال با لایه پایینی و لایه بالایی مدل هواشناسی است (شکل۱).

۲- گام دوم انتقال پارامترهای مدل هواشناسی (دما، فشار و بخار آب) بر روی نقاط تلاقی بین مسیر سیگنال با سطوح مدل WRF است. در این پژوهش، برای درونیابی قائم متغیرهای مدل WRF از روش چهار ستونه و برای درونیابی افقی نیز از روش میانگین وزن‌دار استفاده گردید [۳۰].

۳- در نهایت تأخیر مایل تروپسفری در طول مسیر سیگنال محاسبه می‌گردد [۳۱]:

$$STD = \int_s (n-1)ds = 10^{-6}\int_s N\, ds \quad (۶)$$

در رابطه اخیر n در محدوده فرکانس ماکروویو برابر با $1+10^{-6}N$ می‌باشد و N به عنوان تابعی از پارامترهای هواشناسی از رابطه (۷) در هر سطح تقاطع قابل محاسبه است.

$$N = k_1\frac{p_d}{T} + (k_2\frac{e}{T} + k_3\frac{e}{T^2}) \quad (۷)$$

در رابطه فوق، p_d و e به ترتیب فشار هوای خشک و فشا بخار آب بر حسب میلی‌بار و T دمای مطلق بر حسب درجه کلوین است. k_1، k_2 و k_3 مقادیر ثابتی تجربی می‌باشند. محققین متعددی مقادیر مختلفی را برای این ثابت‌های تجربی پیشنهاد نموده‌اند. بِویس و همکاران مقادیر ثابت تعیین شده توسط این محققین را مقایسه نموده و مقادیر ثابت جدیدی را ارائه کردند [۳۲]:

$$k_1 = 77.60 \pm 0.05\ K\,hPa^{-1}$$
$$k_2 = 70.4 \pm 2.2\ K\,hPa^{-1} \quad (۸)$$
$$k_3 = 3.739 \pm 0.012\ 10^5\ K^2 hPa^{-1}$$

برای محاسبه STD به صورت زیر اقدام می‌شود:

$$STD = \sum_k^{k+1} STD_k \quad (۹)$$

در این رابطه، STD_k میزان تأخیر مایل تروپسفری بین هر دو لایه متوالی است که از رابطه (۱۰) بدست می‌آید [۲۰]:

$$STD_k = \int_k^{k+1} \exp(a+bz)\frac{dz}{\cos\zeta_{a,k+\frac{1}{2}}}$$
$$= \frac{10^{-6}}{b\cos\zeta_{a,k+\frac{1}{2}}}[\exp(a+bz_{k+1}) - \exp(a+bz_k)] \quad (۱۰)$$

به طوری که مقادیر (a,b) از رابطه شبه نمایی بین انکسارپذیری و ارتفاع، تخمین زده می‌شود [۲۰]:

$$N = \exp(a+bz) \quad (۱۱)$$

از آنجا که مقدار انکسارپذیری و ارتفاع در هر تقاطع مشخص است، با نوشتن رابطه اخیر برای هر دو سطح

متوالی و حل دستگاه دو معادله دو مجهول مقادیر (a,b) بدست می‌آیند.

لازم بذکر است که در محاسبات تأخیر تروپسفری با استفاده از روش ردیابی اشعه از محاسبه انحناء مسیر سیگنال صرف‌نظر شد، زیرا از آنجا که در تداخل‌سنجی راداری کمیت اختلاف فاز مورد بررسی قرار می‌گیرد، نادیده گرفتن انحناء در محاسبات تأثیر چندانی نخواهد داشت [۴].

۴-۲- محاسبه اختلاف فاز تروپسفری

پس از محاسبه STD برای تصاویر پایه[۱] و پیرو[۲]، با رابطه‌ی (۱۲) اختلاف تأخیر تروپسفری بین این دو تصویر به فاز تبدیل می‌شود:

$$\phi_{trop} = \frac{4\pi}{\lambda}(STD_{master} - STD_{slave}) \qquad (۱۲)$$

در رابطه فوق، STD_{master} تأخیر تروپسفری مربوط به تصویر پایه و STD_{slave} تأخیر تروپسفری مربوط به تصویر پیرو است.

۵- داده‌های SAR

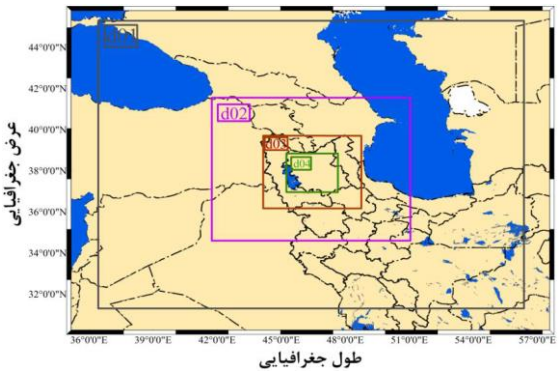
در این تحقیق از ۱۲ تصویر پایین گذر ENVISAT (ASAR) مربوط به مسیر ۴۹ مربوط به بازه زمانی از ژانویه ۲۰۰۶ تا ژانویه ۲۰۱۰ که توسط آژانس فضایی اروپا تهیه شده است، به عنوان داده‌های SAR استفاده گردید. این تصاویر منطقه شمال غرب ایران، بخش شرقی دریاچه ارومیه را پوشش می‌دهند.

پردازش تصاویر SAR جهت تشکیل تداخل‌نما با استفاده از مجموعه نرم‌افزار StaMPS[۳] در چندین مرحله انجام گردید [۳۳] که عبارتند از: انتخاب تصویر پایه، ثبت هندسی تصویر پایه و پیرو، تشکیل تداخل‌نما، تصحیح اثر انحنای زمین (مداری یا زمین مسطح)، تصحیح توپوگرافی (با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ASTER[۴] با تفکیک مکانی افقی ۳۰متر) و بازیابی فاز (توسط الگوریتم SNAPHU[۵] [۳۴]).

۶- روند اجرای تحقیق

۶-۱- پردازش مدل WRF

در این تحقیق، از نسخه 3.8 مدل پیشرفته تحقیقاتی و پیش‌بینی آب و هوا (WRF-ARW) استفاده شد که بر روی کامپیوترهای شخصی نیز قابل نصب می‌باشد. برای شرایط مرزی معادلات، از مدل جهانی GFS-ANL با تفکیک مکانی ۰/۵ درجه استفاده گردید که با مشاهدات هواشناسی آنالیز شده و بهبود یافته است [۳۵]. سیستم پیش‌بینی جهانی (GFS) یک مدل پیش‌بینی آب و هوایی تولید شده توسط مراکز بین‌المللی پیش‌بینی محیط زیست (NCEP) است. ده‌ها شاخص جَوی و زمین-خاک از طریق این مجموعه داده در دسترس است که از جمله آن‌ها می‌توان به فشار، دما، رطوبت، فشار بخار آب، باد، بارش، رطوبت خاک و غلظت ازون در جو اشاره نمود [۳۵]. با طراحی چهار دامنه با تفکیک مکانی ۲۷، ۹، ۳ و ۱ کیلومتر در راستای افقی و ۴۱ لایه ارتفاعی از سطح فشاری ۱۰۰۰ تا ۴۰ میلی‌بار پردازش مدل WRF انجام شد. به طوری که در تمامی دامنه‌ها از میکروفیزیک Ferrier [۳۶]، مدل سطح زمین Unified Noah [۳۷]، تابش موج کوتاه Dudhia [۳۸] و از مدل انتقال تابش سریع (RRTM) [۳۹] برای تابش موج بلند استفاده گردید. همچنین برای لایه مرزی سیاره‌ای، طرح YSU [۴۰] و برای کومولوس نیز طرح Kain-Fritsch [۴۱] به کار گرفته شد. دامنه‌های طراحی شده برای این تحقیق در شکل۳ نمایش داده شده است.



شکل۳- دامنه‌های طراحی شده برای مدل WRF در این تحقیق. دامنه‌های d01، d02، d03 و d04 به ترتیب دارای تفکیک مکانی ۲۷، ۹، ۳ و ۱ کیلومتر هستند

---

۱ Master
۲ Slave
۳ Stanford Method for Persistent Scatterers
٤ Advanced Spaceborne Thermal Emition and Reflection Radiometer
٥ Statistical-coast Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping

۶-۲- کشف پراکنش‌گرهایی با کمترین جابجایی

جهت ارزیابی بهتر نتایج، سعی بر این شد که فاز ناشی از جابجایی، کمترین تأثیر را بر روی تداخل‌نما داشته باشد. به عبارت دیگر، بیشترین سهم فاز موجود در تداخل‌نماها، مربوط به فاز تروپسفری باشد تا بتوان از اثر جابجایی در مقابل اثر تروپسفر چشم‌پوشی کرد. در این صورت می‌توان فرض نمود که تنها فاز موجود در تداخل‌نما مربوط به اثر تروپسفری است. به همین دلیل، با استفاده از اطلاعات زمین‌لرزه‌ای ایران توسط مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ۴ تصویر از ۱۲ تصویر موجود شناسایی شد که در فاصله زمانی ۱۰۵ روزه این تصاویر زمین‌لرزه‌ای که منجر به جابجایی در منطقه شود رخ نداده است (جدول ۱).

جدول۱- مشخصات تصاویر منتخب

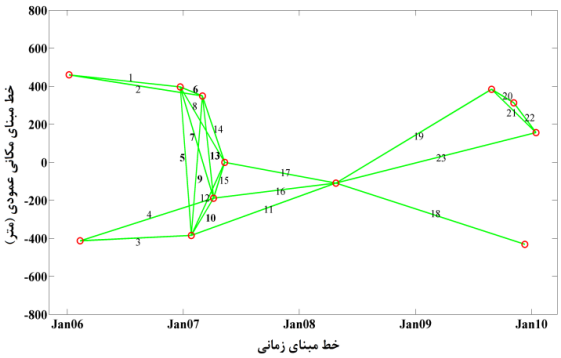
پایین گذر، مسیر ۴۹، قاب ۲۸۳۵		
شماره	تاریخ أخذ تصویر	مدار
۱	۲۰۰۶/۱۲/۲۲	۲۵۱۵۳
۲	۲۰۰۷/۰۱/۲۶	۲۵۶۵۴
۳	۲۰۰۷/۰۳/۰۲	۲۶۱۵۵
۴	۲۰۰۷/۰۴/۰۶	۲۶۶۵۶

با استفاده از ۴ تصویر فوق، ۳ تداخل‌نما با مشخصات زیر تشکیل گردید (جدول ۲):

جدول۲- تداخل‌نماهای تشکیل شده

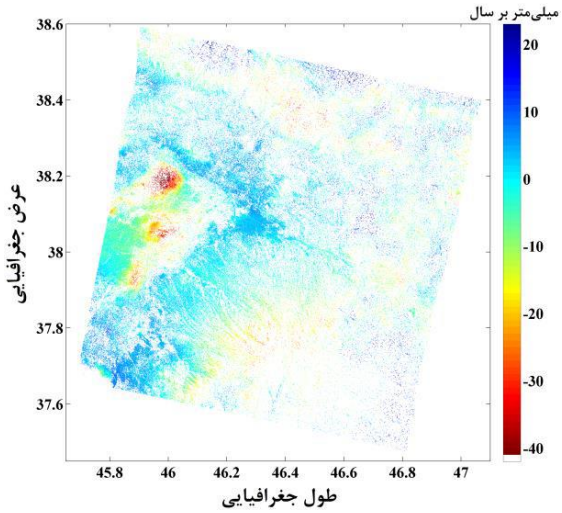
تصویر پایه	تصویر پیرو	خط مبنای عمودی (متر)	خط مبنای زمانی (روز)
۲۰۰۷/۰۳/۰۲	۲۰۰۶/۱۲/۲۲	۴۸/۵	۷۰
	۲۰۰۷/۰۱/۲۶	-۷۳۳/۲	۳۵
	۲۰۰۷/۰۴/۰۶	-۵۳۶/۳	۳۵

در گام بعدی به منظور انتخاب منطقه مناسب با کمترین جابجایی از تمامی ۱۲ تصویر جهت محاسبه میانگین سرعت جابجایی منطقه با روش SBAS استفاده شد.



شکل۴- شبکه گراف طراحی شده تداخل‌نماها برای تکنیک SBAS

لازم بذکر است که تصحیح مربوط به باقیمانده توپوگرافی و مداری با استفاده از الگوریتم‌های مربوطه در StaMPS و همچنین تصحیح تروپسفری با استفاده از الگوریتم TRAIN[۱] [۴۲] بر روی تداخل‌نماها صورت گرفت. علت این امر این است که تا حد امکان تنها فاز ناشی از جابجایی در تداخل‌نماها وجود داشته باشد تا مقایسه صحیح‌تری بین فاز جابجایی و فاز تروپسفری محاسبه شده صورت گیرد.

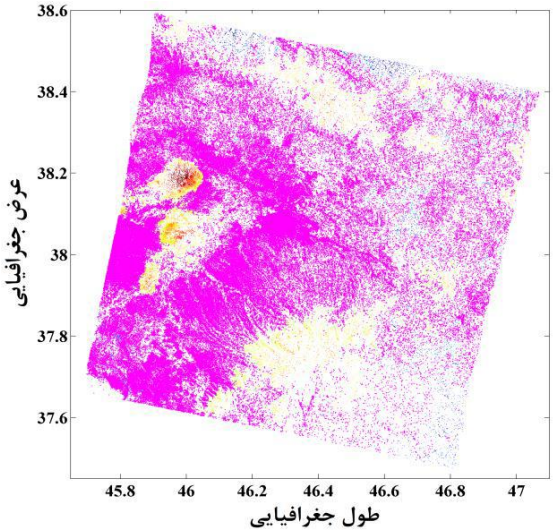


شکل۵- میانگین سرعت جابجایی بدست آمده برای پراکنش‌گرهای دائمی با روش SBAS

میانگین سرعت بدست آمده برای منطقه با نتایج بدست آمده توسط سو و همکاران مطابقت دارد [۴۳]. سپس به منظور شناسایی پراکنش‌گرهایی که از جابجایی کمی برخوردار هستند و می‌توان از فاز جابجایی آن‌ها در مقابل فاز تروپسفری صرف‌نظر نمود، شرط میانگین سرعت جابجایی کمتر از ۱۰ میلی‌متر برای انتخاب پراکنش‌گرها در نظر گرفته شد. این مقدار بر اساس مقادیر فاز

[۱] Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise

تروپسفری محاسبه شده در منطقه تعیین گردید. تعداد ۱۶۵۰۲۰ پراکنش‌گر دائمی با میانگین سرعت جابجایی سالیانه کمتر از ۱۰ میلی‌متر به عنوان مناطقی با کمترین جابجایی انتخاب شدند.

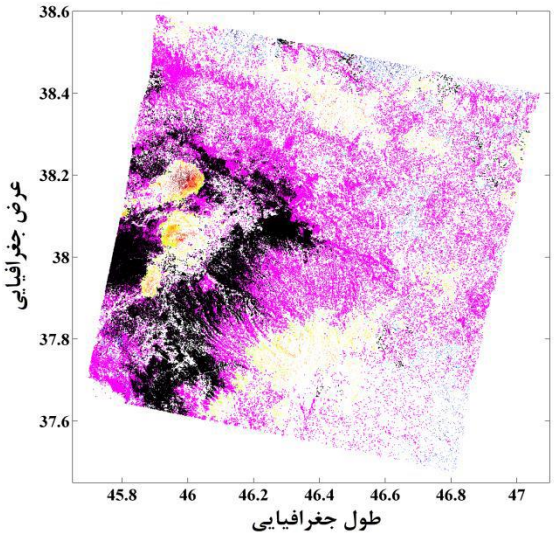


شکل۶- پراکنش‌گرهای با میانگین سرعت جابجایی کمتر از ۱۰ میلی‌متر در سال (نقاط به رنگ بنفش)

لازم بذکر است که پراکنش‌گرهای انتخاب شده با تأثیر زمین‌لرزه‌های متعدد در منطقه دارای کمترین جابجایی هستند. حال آنکه در بازه زمانی انتخاب شده ۱۰۵ روزه که هیچ زمین‌لرزه‌ای رخ نداده است، این پراکنش‌گرها قطعاً با جابجایی کمتری همراه بوده‌اند.

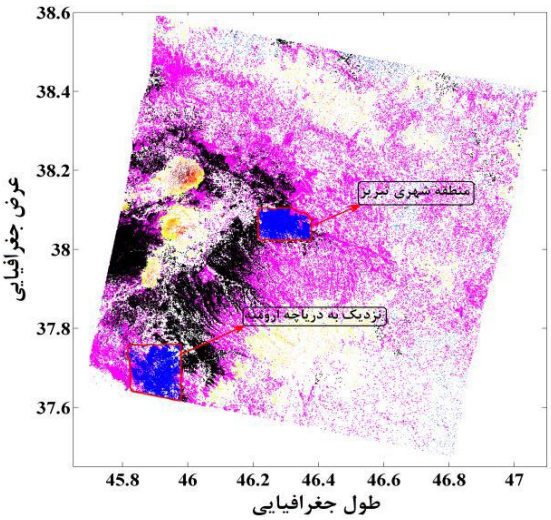
برای اینکه بتوان با اطمینان بیشتری از مقدار فاز جابجایی در مقابل فاز تروپسفری چشم‌پوشی نمود، از آزمون میانگین بین دو مجموعه فاز جابجایی و فاز تروپسفری برای هر پراکنش‌گر استفاده شد تا پراکنش‌گرهایی که اختلاف معنی‌دار بین میانگین فاز جابجایی و میانگین فاز تروپسفری آن‌ها وجود دارد شناسایی شوند.

برای این منظور از بین تداخل‌نماهای ایجاد شده در پردازش به روش SBAS، فاز جابجایی ۶ تداخل‌نما به شماره‌های ۵، ۶، ۷، ۹، ۱۰ و ۱۳ که با استفاده از ۴ تصویر فوق‌الذکر (جدول۱) ایجاد شده بود در نظر گرفته شد. همچنین با به کارگیری روش ردیابی اشعه، تأخیر مایل تروپسفری برای این چهار تصویر محاسبه شده و با تفاضل دو به دو آن‌ها، ۶ فاز تروپسفری در بازه زمانی مورد نظر برای هر پراکنش‌گر بدست آمد. سپس با آزمون میانگین و در سطح اطمینان ۰/۹۵، تعداد ۶۵۲۰۳ پراکنش‌گر که اختلاف معنی‌داری بین میانگین فاز جابجایی و میانگین فاز تروپسفری آن‌ها وجود داشت، مشخص شدند (شکل۷).



شکل۷- پراکنش‌گرهای انتخاب شده توسط آزمون میانگین. نقاط سیاه رنگ نشان‌دهنده پراکنش‌گرهایی است که اختلاف معنی‌داری بین میانگین فاز تروپسفری و میانگین فاز جابجایی آن‌ها وجود دارد

از بین مناطق مشخص شده با رنگ سیاه در شکل ۷، دو محدوده که در آن پراکنش‌گرهای سیاه رنگ تراکم بیشتری دارند به عنوان مناطق مطالعاتی برای ارزیابی نتایج انتخاب شدند. محدوده اول، منطقه شهری تبریز با ۷۲۶۹ پراکنش‌گر دائمی و محدوده دوم، منطقه‌ای نزدیک به دریاچه ارومیه با ۷۷۰۷ پراکنش‌گر دائمی انتخاب شد (شکل۸). دلیل دیگر انتخاب محدوده دوم در نزدیکی دریاچه ارومیه، تأثیر این دریاچه بر رطوبت منطقه بود.



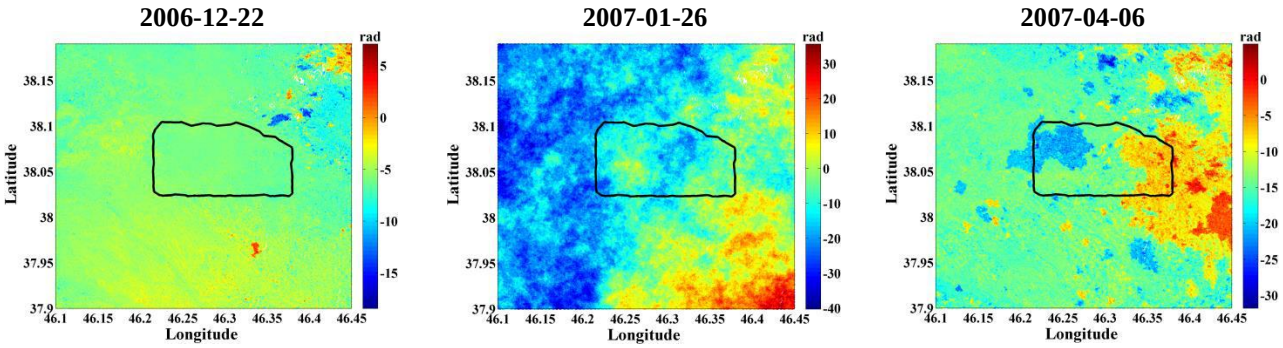
شکل۸- محدوده‌های مطالعاتی انتخاب شده در این تحقیق

تداخل‌نماهای تشکیل شده برای دو منطقه مورد نظر در شکل۹ و ۱۰ نمایش داده شده‌اند. لازم بذکر است که تصویر پایه برای هر سه تداخل‌نما (برای هر دو منطقه مطالعاتی) مربوط به تاریخ 2007-03-02 بوده و تاریخ‌های قید شده در شکل ۹ و ۱۰ مربوط به تصاویر پیرو است.

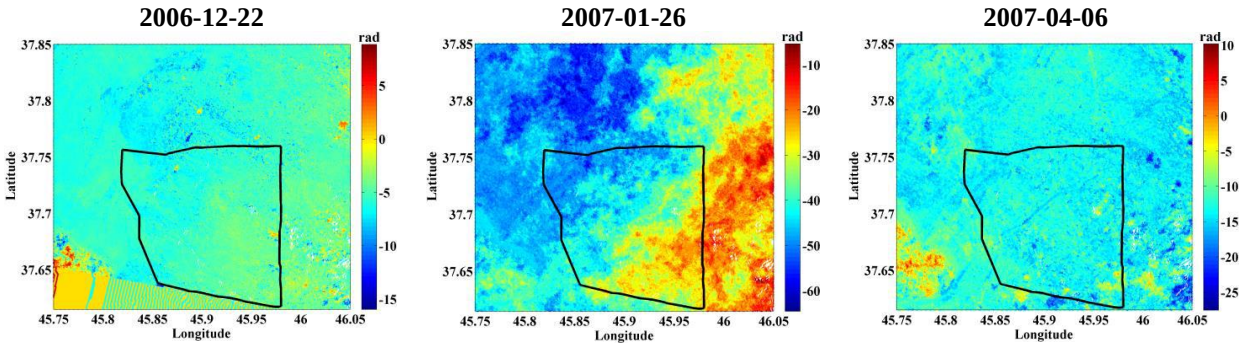
۷- نتایج عددی

با توجه به روند انجام شده، می‌توان عمده فاز تداخل‌نمای مربوط به پراکنش‌گرهای مستخرج از بخش ۶-۲ را به فاز تروپسفری نسبت داد. با در نظر گرفتن این موضوع جهت ارزیابی نتایج، از کمیت RMS فاز هر پراکنش‌گر، قبل و بعد از تصحیح تروپسفری، استفاده گردید. به طوری که اگر RMS کاهش پیدا کند نشان‌دهنده عملکرد مثبت روش تصحیح خواهد بود.

با توجه به اینکه سه تداخل‌نما در بازه زمانی مورد نظر تشکیل شده است، در نتیجه هر پراکنش‌گر شامل ۳ مقدار فاز می‌باشد. محاسبه RMS برای یک نمونه ۳ عضوی (نمونه-ای به طول ۳)، قابلیت اطمینان کمی برای ارزیابی نتایج دارد.



شکل۹- تداخل‌نماهای تشکیل شده برای منطقه شهری تبریز مشخص شده با خط سیاه

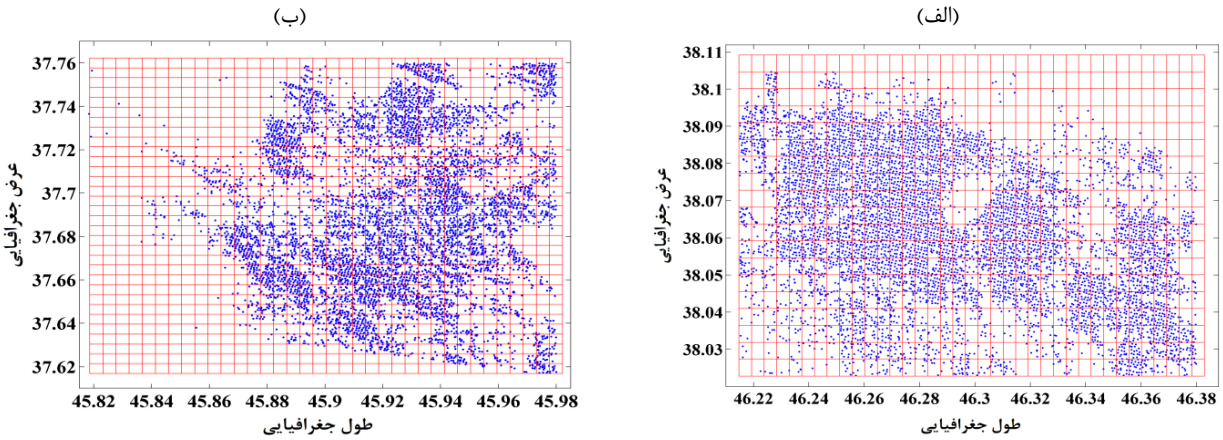


شکل۱۰- تداخل‌نماهای تشکیل شده برای منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه مشخص شده با خط سیاه

برای افزیش تعداد اعضای نمونه، از آنجا که مقدار تأخیر مایل تروپسفری برای نقاط نزدیک به هم، تفاوت چندانی ندارد، محدوده مطالعاتی به شبکه‌ای با ابعاد ۵۰۰ متری تقسیم گردید و فاز پراکنش‌گرهای موجود در هر اِلمان از این شبکه به عنوان یک نمونه در نظر گرفته شد (شکل۱۱). لازم بذکر است که با محاسبه تأخیر تروپسفری منطقه و بررسی تغییرات آن در حوزه مکان مشخص گردید که در فاصله ۵۰۰ متری، تغییرات تروپسفری ناچیز است به همین دلیل ابعاد المان‌های شبکه، ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد.

همانطور که در شکل۱۱ دیده می‌شود، برخی از اِلمان‌ها دارای تعداد کمی از پراکنش‌گرها هستند. به منظور عدم شرکت این اِلمان‌ها در محاسبه RMS، برای اِلمان‌ها شرط حداقل تعداد فاز موجود در آنها گذاشته شد.

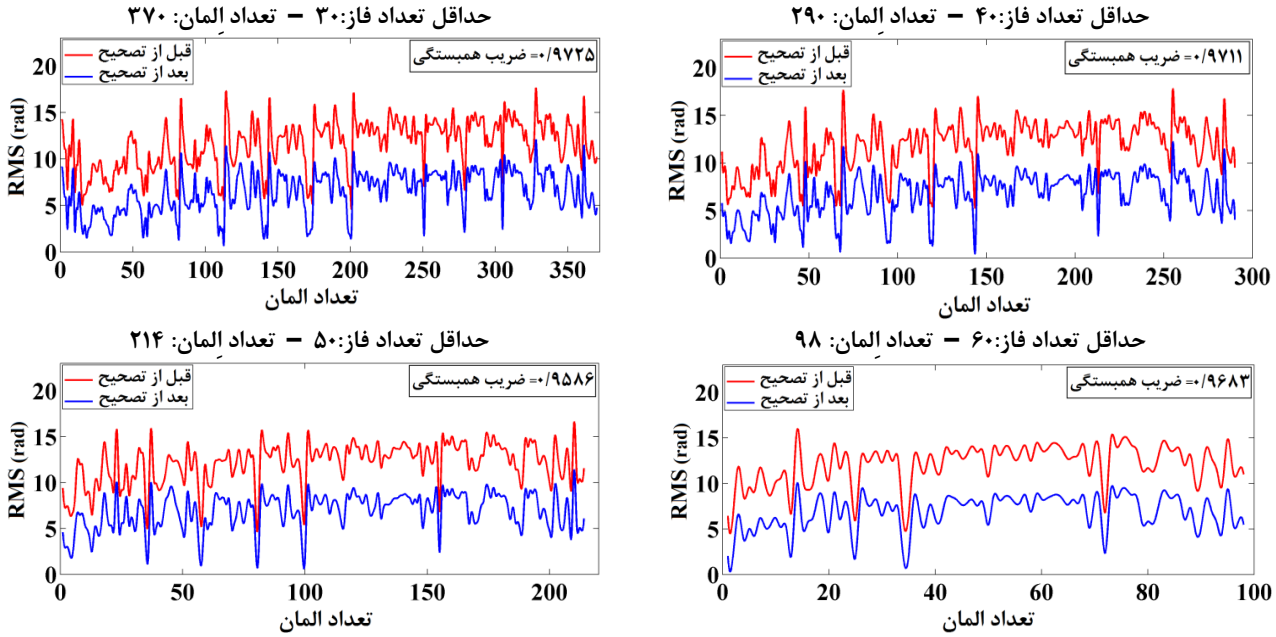
در این تحقیق چهار مقدار ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ به عنوان حداقل تعداد فاز در هر شبکه در نظر گرفته شد. به این ترتیب شبکه‌هایی که تعداد فازهای آن‌ها کمتر از مقدار حداقلی بود کنار گذاشته شده است. برای مثال اگر در اِلمانی ۹ پراکنش‌گر وجود داشته باشد، به ازای هر پراکنش‌گر، سه مقدار فاز خواهیم داشت. تعداد کل فاز در این اِلمان برابر با ۲۷ می‌شود و اگر حداقل تعداد فاز را ۳۰ در نظر بگیریم، آنگاه این اِلمان در ارزیابی در نظر گرفته نشده است.



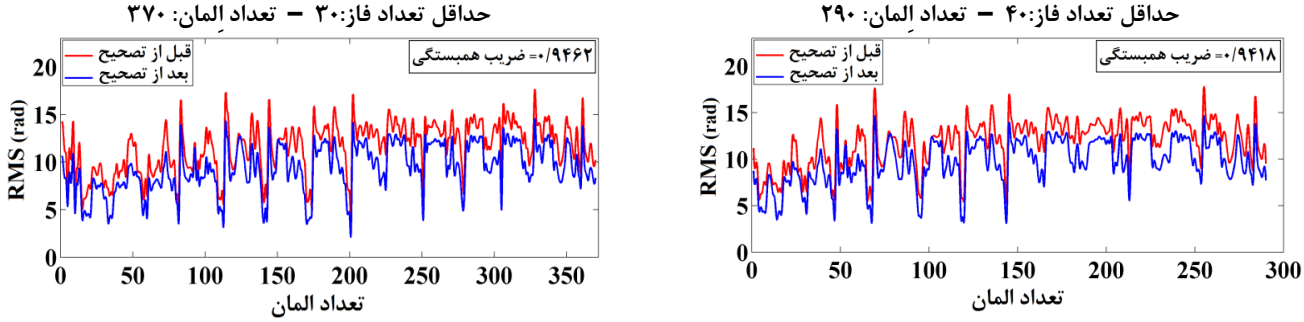
شکل۱۱- نحوه شبکه‌بندی ۵۰۰ متری الف) پراکنش‌گرهای منطقه شهری تبریز ب) پراکنش‌گرهای منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه

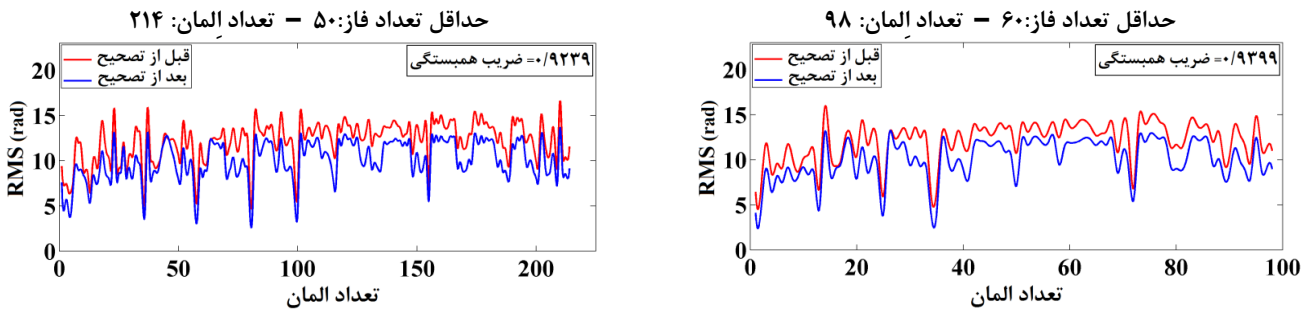
تصحیح اثر تروپسفری بدست آمده با چهار تفکیک مکانی ۱، ۳، ۹ و ۲۷ کیلومتر مدل WRF بر روی پراکنش‌گرها اعمال شد. نتایج بدست آمده از محاسبه RMS در شکل‌های ۱۲ تا ۱۹ برای منطقه شهری تبریز و منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه ترسیم شده است. در شکل‌های مذکور کاهش مقدار RMS بعد از اعمال تصحیحات به وضوح مشاهده می‌شود.

از آنجا که تأخیر فاز تروپسفری در InSAR یک خطای سیستماتیک محسوب می‌شود [۴۴-۴۶]، ضریب همبستگی بالا بین مجموعه RMS قبل و بعد از تصحیح نشان از حذف خطای سیستماتیک از روی تداخل‌نماها دارد.

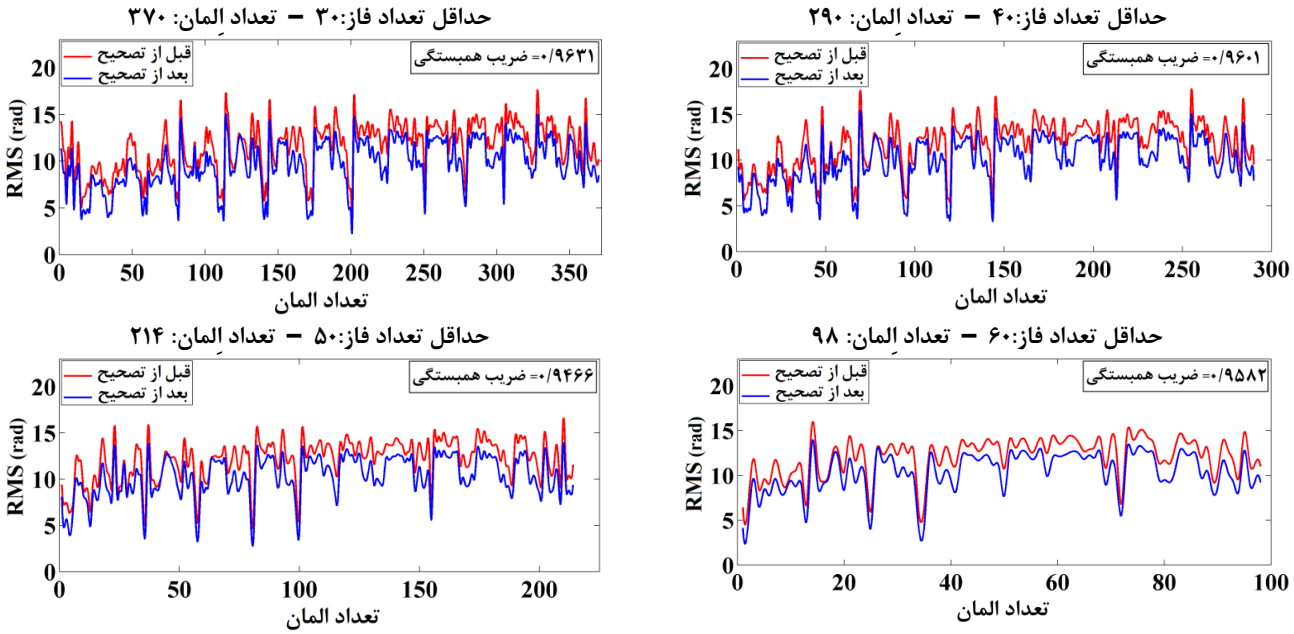


شکل۱۲- ترسیم RMS مربوط به شهر تبریز، با مدل WRF ۱ کیلومتر

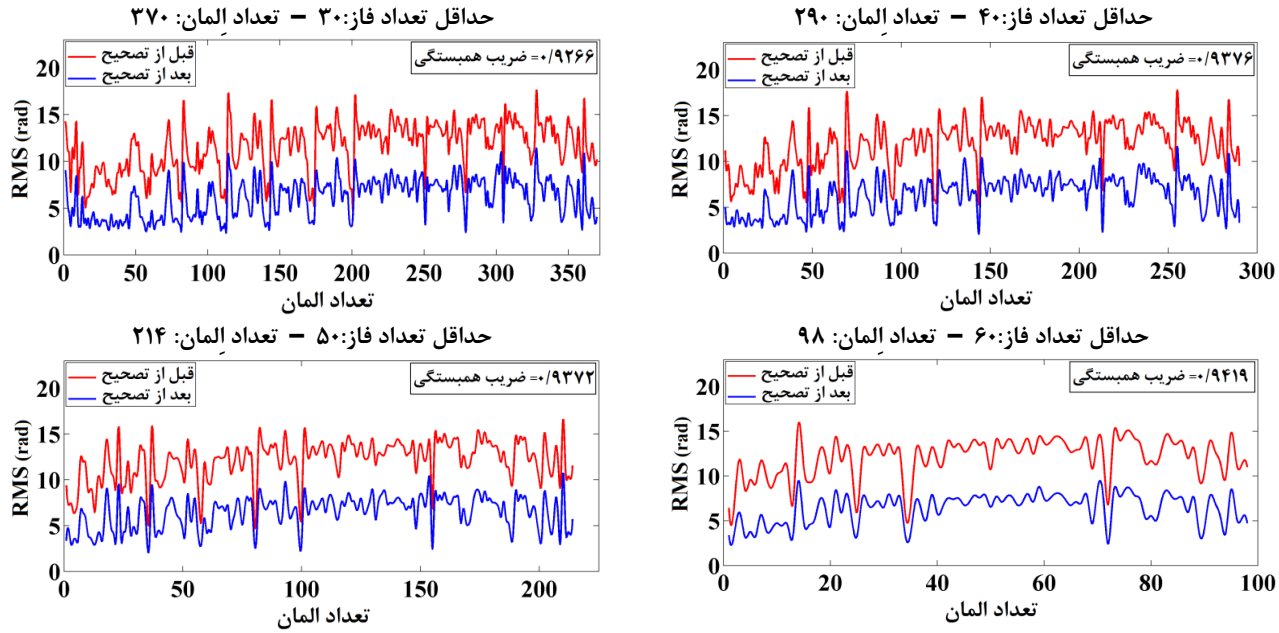




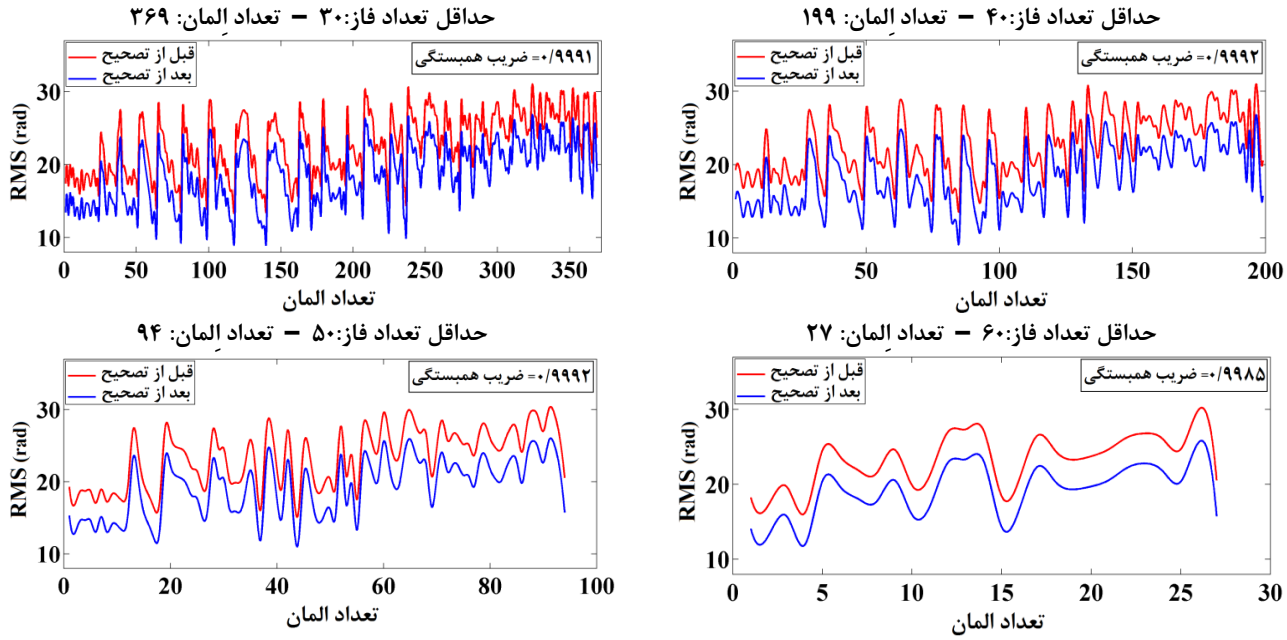
شکل۱۳- ترسیم RMS مربوط به شهر تبریز با مدل WRF ۳ کیلومتر



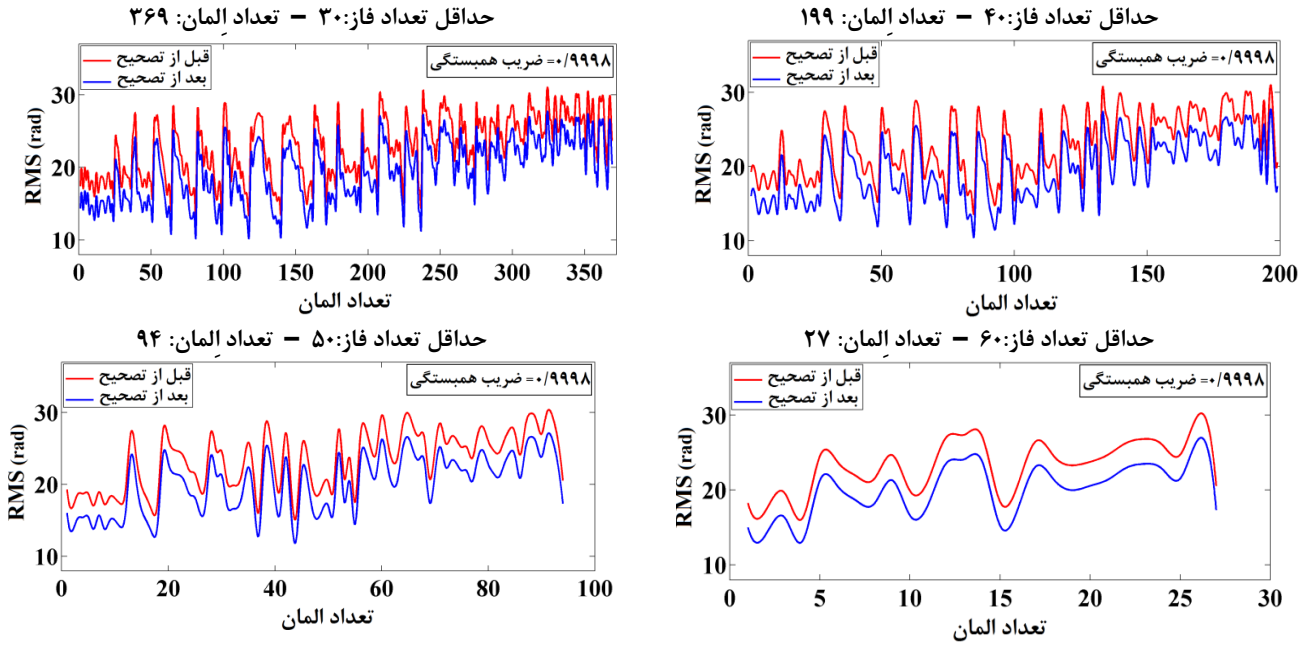
شکل۱۴- ترسیم RMS مربوط به شهر تبریز با مدل WRF ۹ کیلومتر



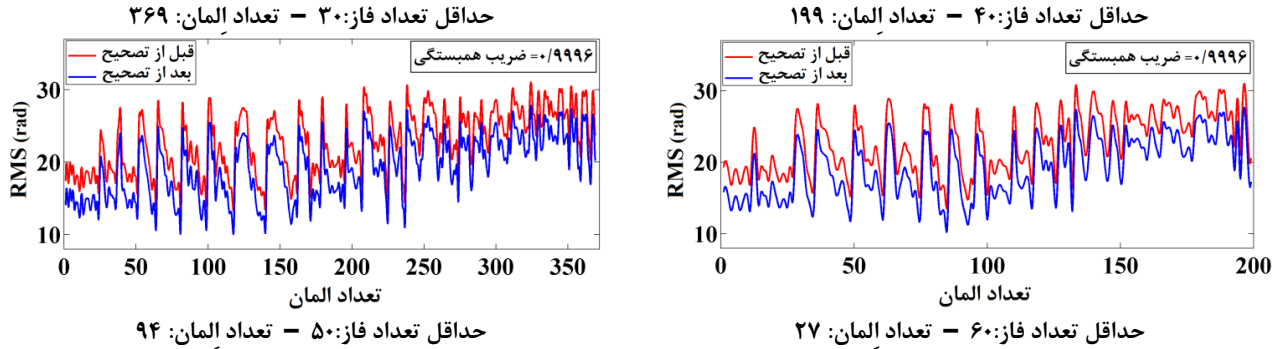
شکل۱۵- ترسیم RMS مربوط به شهر تبریز با مدل WRF ۲۷ کیلومتر

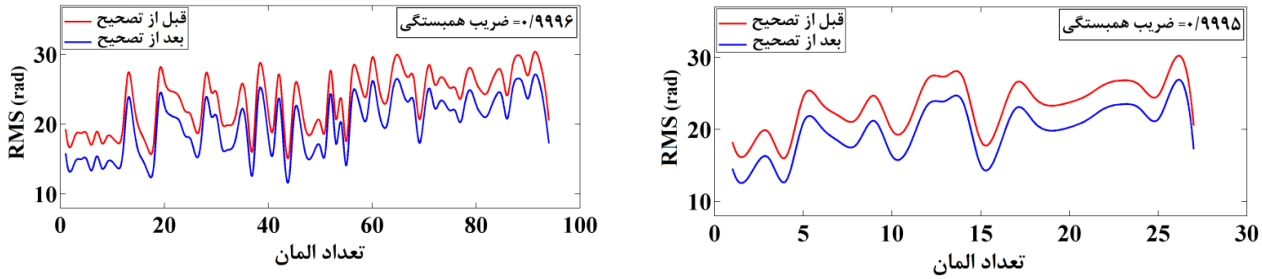


شکل۱۶- ترسیم RMS مربوط به منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه با مدل WRF ۱ کیلومتر

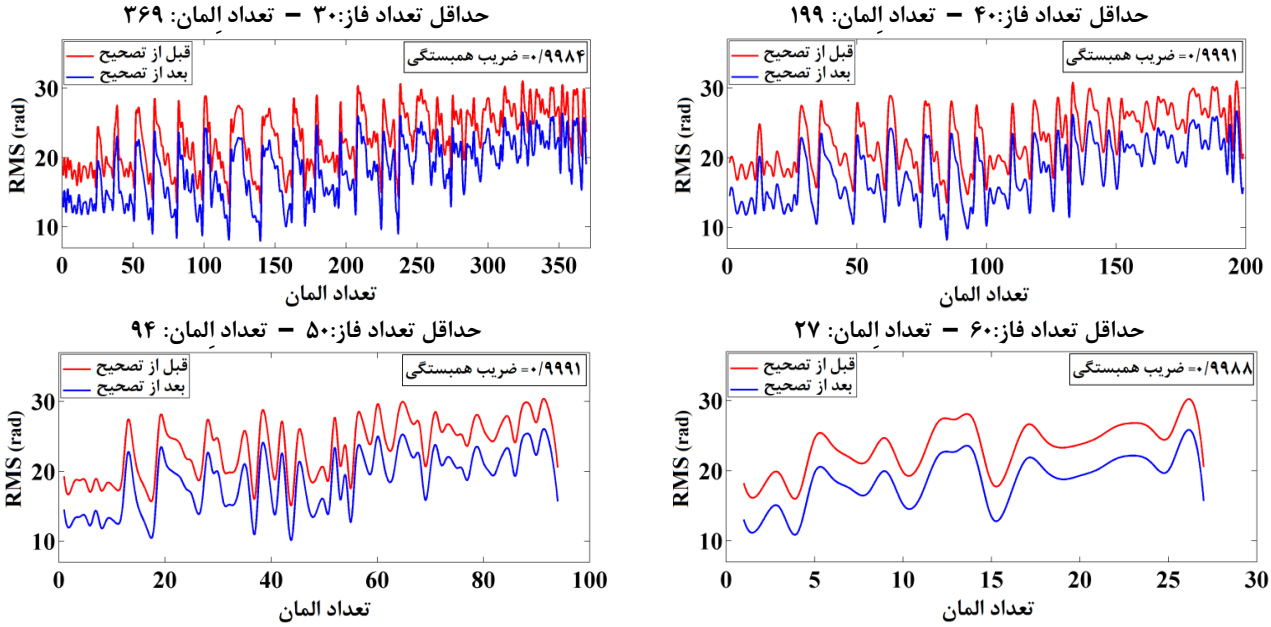


شکل۱۷- ترسیم RMS مربوط به منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه با مدل WRF ۳ کیلومتر





شکل۱۸- ترسیم RMS مربوط به منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه با مدل WRF ۹ کیلومتر



شکل۱۹- ترسیم RMS مربوط به منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه با مدل WRF ۲۷ کیلومتر

همچنین با یک ارزیابی بصری از شکل‌های فوق می‌توان متوجه شد که برخلاف انتظار، مقدار تصحیح تروپسفری با مدل WRF ۳ و ۹ کیلومتر از مدل WRF ۲۷ کیلومتر کمتر است. جهت ارزیابی دقیق‌تر یک تحلیل آماری و عددی نیز صورت گرفت. به این منظور برای مجموعه RMSهای بدست آمده با هر یک از ۴ شرط حداقل تعداد فاز ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ مقدار مینیمم، ماکزیمم و میانگین RMS بدست آمد.

جدول۳- نتایج عددی بدست آمده برای مجموعه RMSهای با شرط حداقل تعداد فاز ۳۰

منطقه مطالعاتی	وضعیت تصحیح	مینیمم RMS (رادیان)	ماکزیمم RMS (رادیان)	میانگین RMS (رادیان)	بهبود میانگین RMS (درصد)
منطقه شهری تبریز	قبل از تصحیح	۵/۱۵	۱۷/۶۳	۱۱/۵۴	–
	تصحیح با ۱ کیلومتر	۱/۳۷	۱۲/۰۸	۶/۴۱	**۴۴/۴۵**
	تصحیح با ۳ کیلومتر	۲/۸۷	۱۴/۵۴	۹/۳۴	**۱۹/۱۰**
	تصحیح با ۹ کیلومتر	۳/۰۰	۱۴/۹۷	۹/۶۶	**۱۶/۳۰**
	تصحیح با ۲۷ کیلومتر	۲/۴۰	۱۱/۴۳	۶/۰۸	**۴۷/۳۴**
منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه	قبل از تصحیح	۱۴/۲۶	۳۰/۶۷	۲۲/۶۹	–
	تصحیح با ۱ کیلومتر	۹/۹۰	۲۶/۴۴	۱۸/۵۶	**۱۸/۲۳**
	تصحیح با ۳ کیلومتر	۱۱/۰۳	۲۷/۳۴	۱۹/۴۳	**۱۴/۳۸**
	تصحیح با ۹ کیلومتر	۱۰/۹۰	۲۷/۳۶	۱۹/۲۴	**۱۵/۲۰**
	تصحیح با ۲۷ کیلومتر	۹/۰۱	۲۶/۱۰	۱۸/۰۰	**۲۰/۶۹**

جدول۴- نتایج عددی بدست آمده برای مجموعه RMSهای با شرط حداقل تعداد فاز ۴۰

منطقه مطالعاتی	وضعیت تصحیح	مینیمم RMS (رادیان)	ماکزیمم RMS (رادیان)	میانگین RMS (رادیان)	بهبود میانگین RMS (درصد)
منطقه شهری تبریز	قبل از تصحیح	۵/۸۱	۱۷/۶۳	۱۱/۸۲	–
	تصحیح با ۱ کیلومتر	۱/۳۷	۱۲/۰۸	۶/۶۶	**۴۳/۶۹**
	تصحیح با ۳ کیلومتر	۳/۵۸	۱۴/۵۴	۹/۶۵	**۱۸/۳۴**
	تصحیح با ۹ کیلومتر	۳/۹۸	۱۴/۹۷	۹/۹۷	**۱۵/۶۴**
	تصحیح با ۲۷ کیلومتر	۲/۴۰	۱۱/۴۳	۶/۲۸	**۴۶/۸۳**
منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه	قبل از تصحیح	۱۴/۳۵	۲۹/۹۸	۲۲/۷۰	–
	تصحیح با ۱ کیلومتر	۹/۹۰	۲۵/۸۸	۱۸/۵۶	**۱۸/۲۲**
	تصحیح با ۳ کیلومتر	۱۱/۲۲	۲۶/۷۳	۱۹/۴۳	**۱۴/۳۸**
	تصحیح با ۹ کیلومتر	۱۱/۰۴	۲۶/۷۷	۱۹/۲۵	**۱۵/۱۹**
	تصحیح با ۲۷ کیلومتر	۹/۰۱	۲۵/۷۳	۱۷/۹۸	**۲۰/۷۸**

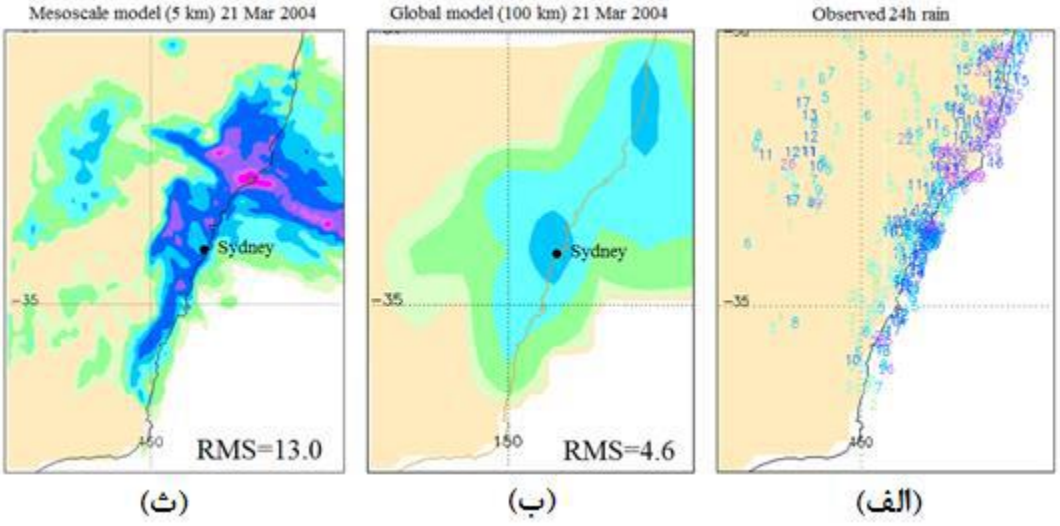
جدول۵- نتایج عددی بدست آمده برای مجموعه RMSهای با شرط حداقل تعداد فاز ۵۰

منطقه مطالعاتی	وضعیت تصحیح	مینیمم RMS (رادیان)	ماکزیمم RMS (رادیان)	میانگین RMS (رادیان)	بهبود میانگین RMS (درصد)
منطقه شهری تبریز	قبل از تصحیح	۵/۸۱	۱۶/۶۱	۱۲/۰۸	–
	تصحیح با ۱ کیلومتر	۱/۵۶	۱۱/۳۹	۶/۸۸	**۴۳/۰۳**
	تصحیح با ۳ کیلومتر	۳/۷۹	۱۳/۶۷	۹/۹۶	**۱۷/۶۱**
	تصحیح با ۹ کیلومتر	۳/۹۸	۱۳/۹۷	۱۰/۲۸	**۱۴/۹۶**
	تصحیح با ۲۷ کیلومتر	۲/۴۰	۱۰/۷۷	۶/۴۴	**۴۶/۷۳**
منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه	قبل از تصحیح	۱۵/۶۵	۲۹/۹۸	۲۳/۳۶	–
	تصحیح با ۱ کیلومتر	۱۱/۵۲	۲۵/۸۸	۱۹/۲۲	**۱۷/۷۱**
	تصحیح با ۳ کیلومتر	۱۲/۳۷	۲۶/۷۳	۲۰/۰۹	**۱۴/۰۰**
	تصحیح با ۹ کیلومتر	۱۲/۱۷	۲۶/۶۵	۱۹/۹۱	**۱۴/۷۶**
	تصحیح با ۲۷ کیلومتر	۱۰/۶۶	۲۵/۵۸	۱۸/۶۳	**۲۰/۲۶**

جدول۶- نتایج عددی بدست آمده برای مجموعه RMSهای با شرط حداقل تعداد فاز ۶۰

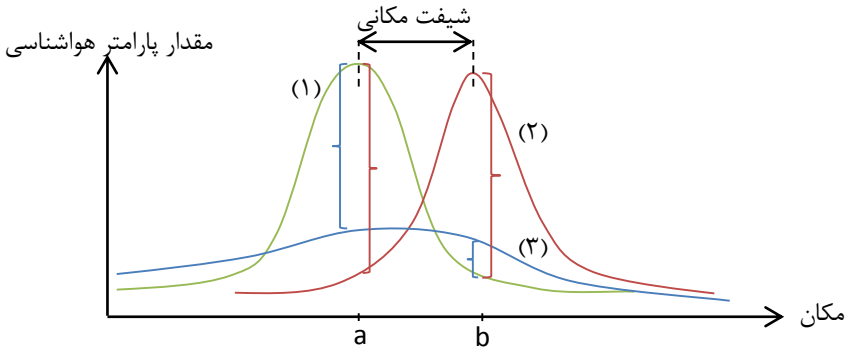
منطقه مطالعاتی	وضعیت تصحیح	مینیمم RMS (رادیان)	ماکزیمم RMS (رادیان)	میانگین RMS (رادیان)	بهبود میانگین RMS (درصد)
منطقه شهری تبریز	قبل از تصحیح	۵/۸۱	۱۵/۷۸	۱۲/۰۷	–
	تصحیح با ۱ کیلومتر	۱/۸۴	۹/۹۵	۶/۸۵	**۴۳/۲۵**
	تصحیح با ۳ کیلومتر	۳/۷۹	۱۳/۰۳	۱۰/۰۱	**۱۷/۰۹**
	تصحیح با ۹ کیلومتر	۳/۹۸	۱۳/۷۷	۱۰/۳۳	**۱۴/۴۳**
	تصحیح با ۲۷ کیلومتر	۲/۴۰	۹/۴۵	۶/۳۷	**۴۷/۱۸**
منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه	قبل از تصحیح	۱۶/۱۵	۲۹/۹۸	۲۳/۲۰	–
	تصحیح با ۱ کیلومتر	۱۱/۹۱	۲۵/۶۱	۱۹/۰۹	**۱۷/۷۰**
	تصحیح با ۳ کیلومتر	۱۳/۱۰	۲۶/۷۳	۱۹/۹۴	**۱۴/۰۷**
	تصحیح با ۹ کیلومتر	۱۲/۸۰	۲۶/۶۵	۱۹/۷۵	**۱۴/۸۸**
	تصحیح با ۲۷ کیلومتر	۱۱/۰۱	۲۵/۵۸	۱۸/۴۹	**۲۰/۳۲**

همان‌طور که در جدول‌های فوق مشاهده می‌شود، تصحیح تروپسفری با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و ۲۷ کیلومتر بیشترین بهبود RMS را برای هر دو منطقه مطالعاتی در برداشته است. نکته قابل توجه این است که میزان بهبود RMS برای تفکیک مکانی ۲۷ کیلومتر بهتر از تصحیح با مدل‌های با تفکیک مکانی بالاتر می‌باشد. برای بررسی و تحلیل این موضوع به شکل ۲۰ توجه نمایید.



شکل ۲۰- پارامتر بارش الف) اندازه‌گیری شده ب) به دست آمده از مدل جهانی با تفکیک مکانی ۱۰۰ کیلومتر ث) به دست آمده از مدل میان‌مقیاس با تفکیک مکانی ۵ کیلومتر [۴۷]

در شکل ۲۰ اندازه‌گیری‌های هواشناسی، نتایج حاصل از مدل میان‌مقیاس ۵ کیلومتری و مدل جهانی ۱۰۰ کیلومتری برای پارامتر بارش نمایش داده شده است. از مقایسه مشاهدات با مدل‌های جهانی و میان‌مقیاس می‌توان دریافت که مدل میان‌مقیاس با تفکیک ۵ کیلومتر، جزئیات بیشتری را مدل نموده و به مشاهدات شباهت بیشتری دارد. اما RMS آن نسبت به مدل جهانی با تفکیک مکانی ۱۰۰ کیلومتر بدتر است. علت این امر شیفت مکانی مدل میان‌مقیاس است که موجب RMS بدتری نسبت به مدل جهانی شده است. برای توضیح بیشتر این موضوع با توجه به شکل ۲۱، اگر نمودار (۱) مربوط به اندازه‌گیری‌های انجام شده در نظر گرفته شود، نمودار (۲) که مربوط به مدل میان‌مقیاس با تفکیک مکانی بالا می‌باشد، با دقت بیشتری نمودار (۱) را مدل نموده اما با یک شیفت مکانی یا خطای سیستماتیک همراه است. در مقابل، نمودار (۳) که مربوط به مدل جهانی با تفکیک مکانی پایین است، یک شبیه‌سازی هموار از نمودار (۱) را ارائه می‌کند، اما به علت شیفت مکانی موجود در مدل میان‌مقیاس، برای ارزیابی دو مدل با پارامتر RMS در دو نقطه a و b، مدل جهانی RMS بهتری را نشان می‌دهد. به عبارتی این شیفت مکانی باعث می‌شود که مدل میان‌مقیاس دوبار با بایاس ناشی از انتقال مکانی مدل همراه باشد [۴۸]. یکبار در نقطه a و بار دیگر در نقطه b، که موجب بدتر شدن RMS این مدل نسبت به مدل جهانی می‌گردد.



شکل ۲۱- نمودار فرضی برای ۱) اندازه‌گیری‌های یک پارامتر هواشناسی ۲) مدل‌میان مقیاس و ۳) مدل جهانی

در پژوهش‌های تصحیح تروپسفری تداخل‌سنجی راداری به دلیل تفکیک مکانی بالای تداخل‌نما (تقریباً ۳۰ متر)، انتقال مکانی مدل WRF (در حد چند کیلومتر) در تصحیح فاز پیکسل‌های تداخل‌نما بسیار تأثیر گذار بوده و از صحت این تصحیحات می‌کاهد. از آنجا که معمولاً وقوع انتقال مکانی در مدل WRF با تفکیک مکانی بالاتر نسبت به تفکیک مکانی پایین‌تر بیشتر است [۴۸]، بنابراین در تصحیحات تروپسفری فاز تداخل‌نما با خطای بیشتری همراه خواهد بود. البته ارتباط بین انتقال مکانی و تفکیک مکانی مدل WRF به طور خطی نیست. به عبارت دیگر، همواره با افزایش تفکیک مکانی، انتقال مکانی افزایش نمی‌یابد [۴۸]. همچنین لازم بذکر است که مدت زمان پردازش مدل WRF برای تولید پارامترهای هواشناسی با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر بسیار بیشتر از تفکیک مکانی ۲۷ کیلومتر است.

لازم بذکر است که با توجه به نتایج عددی بدست آمده، تصحیح در نزدیکی دریاچه ارومیه نسبت به منطقه شهری تبریز از بهبود کمتری برخوردار بوده است. به طوری که برای تصحیح تروپسفری با مدل WRF با تفکیک مکانی ۱ و ۲۷ کیلومتر که عملکرد مثبت قابل توجهی از خود نشان دادند، میزان تصحیح برای منطقه نزدیکی دریاچه ارومیه تقریباً نصف میزان تصحیح برای منطقه شهری تبریز است. علت این امر تأثیر دریاچه ارومیه در رطوبت منطقه می‌باشد. از آنجا که بخش تَر در طول زمان با تغییرات زیادی همراه است در نتیجه اثر بیشتری نیز بر روی تداخل‌نما دارد. این امر از مقدار فاز تداخل‌نماهای مربوط به منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه نیز مشهود است (شکل ۱۰).

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از مدل عددی هواشناسی WRF جهت تصحیح تروپسفری فاز تداخل‌نما استفاده شد. مدل WRF قابلیت تولید پارامترهای متنوع جوی با تفکیک مکانی و زمانی مناسب را داراست. به طوری که از نظر زمانی می‌توان پارامترهای جوی را در لحظه تصویربرداری تولید نمود. پارامترهای فیزیکی جهت پردازش مدل WRF در جدول۷ نمایش داده شده است.

جدول۷- پارامترهای فیزیکی مدل WRF

پارامتر فیزیکی مدل WRF	مدل در نظر گرفته شده
میکروفیزیک	Ferrier
مدل سطح زمین	Unified Noah
تابش موج کوتاه	Dudhia
تابش موج بلند	RRTM
لایه مرزی سیاره‌ای	YSU
کومولوس	Kain-Fritsch

همچنین برای محاسبه‌ی تأخیر تروپسفری از آنجا که هندسه تصویربرداری SAR به صورت مایل است، به منظور هر چه دقیق‌تر شدن محاسبات و جلوگیری از ایجاد خطای تابع نگاشت، از روش ردیابی اشعه استفاده شد.

با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌توان مدل WRF را در جهت تصحیح اثر تروپسفری موجود در تداخل‌نما به نحو مطلوبی مؤثر دانست. تصحیح تروپسفری با مدل WRF با تفکیک مکانی‌های ۱، ۳، ۹ و ۲۷ برای منطقه شهری تبریز به ترتیب برابر با ۴۳، ۱۷، ۱۴ و ۴۷ درصد و برای منطقه نزدیک به دریاچه ارومیه به ترتیب برابر با ۱۷، ۱۴، ۱۵ و ۲۱ درصد میزان بهبود RMS را به همراه داشت. برخلاف انتظار مدل WRF با تفکیک مکانی ۲۷ کیلومتر نتیجه بهتری در تصحیح فاز تروپسفری تداخل‌نماها از خود نشان داد. علت این موضوع شیفت مکانی و یا خطای سیستماتیک موجود در مدل WRF است که معمولاً مدل‌های با تفکیک مکانی بالاتر بیشتر دچار این خطا می‌شوند. اما به دلیل عدم وجود رابطه خطی بین تفکیک مکانی بالا و افزایش انتقال مکانی مدل WRF، مشاهده می‌شود که مدل با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر نتایج بهتری نسبت به تفکیک مکانی ۳ و ۹ کیلومتر را داراست. از دیگر محدودیت‌های به کارگیری مدل WRF، مدت زمان زیاد پردازش مدل جهت تولید پارامترهای جوی با تفکیک مکانی بالاست (۱ کیلومتر). این موضوع به کارگیری مدل WRF با تفکیک مکانی بالا جهت تصحیح تروپسفری سری زمانی تصاویر SAR را با مشکل مواجه می‌کند. اما از آنجا که پردازش مدل WRF برای تفکیک مکانی پایین (۲۷ کیلومتر در این تحقیق) با شیفت مکانی کمتری همراه بوده و زمان خیلی کمتری برای تولید پارامترهای جَوی نیاز دارد، استفاده از این مدل‌ها برای تصحیح تروپسفری فاز تداخل‌نما مناسب‌تر به نظر می‌رسد.

مراجع

[1] Massonnet, D. and K.L. Feigl, Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. Reviews of geophysics, 1998. 36(4): p. 441-500.

[2] Yun, Y., et al., Mitigating atmospheric effects in InSAR measurements through high-resolution data assimilation and numerical simulations with a weather prediction model. International Journal of Remote Sensing, 2015. 36(8): p. 2129-2147.

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

[4] Zebker, H.A., P.A. Rosen, and S. Hensley, Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. Journal of geophysical research: solid earth, 1997. 102(B4): p. 7547-7563.

[5] Hanssen ,R. and A. Feijt. A first quantitative evaluation of atmospheric effects on SAR interferometry. in ERS SAR Interferometry. 1997.

[6] Sarti, F., B. Fruneau, and T. Cunha. Isolation of atmospheric artifacts in differential interferometry for ground displacement detection: comparison of different methods. in Proceedings of the European Space Agency ERS-Envisat Symposium. 2000.

[7] Bock, Y. and S. Williams, Integrated satellite interferometry in southern California. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1997. 78(29) :p. 293-300.

[8] Li, Z., J.P. Muller, and P. Cross, Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS, and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer measurements. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003. 108(20) D.

[9] Li, Z., et al., Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: GPS topography-dependent turbulence model. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2006. 111(B2).

[10] Aghajany, S.H., B. Voosoghi, and A. Yazdian, Estimation of north Tabriz fault parameters using neural networks and 3D tropospherically corrected surface displacement field. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2017: p. 1-15

[11] Foster, J., et al., Mitigating atmospheric noise for InSAR using a high resolution weather model. Geophysical Research Letters, 2006. 33(16).

[12] Powers ,G., et al., A description of the Advanced Research WRF version 3. 2008.

[13] Wadge, G., et al., Correction of atmospheric delay effects in radar interferometry using a nested mesoscale atmospheric model. Journal of Applied Geophysics, 2010. 72(2): p. 141-149.

[14] Kinoshita, Y., et al., Are numerical weather model outputs helpful to reduce tropospheric delay signals in InSAR data? Journal of Geodesy, 2013. 87(3) :p. 267-277.

[15] Dehghani, M., et al., Hybrid conventional and Persistent Scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin, Iran. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2013. 79: p. 157-170.

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

[17] Kampes, B.M., Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry. 2005, TU Delft, Delft University of Technology.

[18] Ding, X.-l., et al., Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation. Sensors, 2008. 8(9): p. 5426-5448.

[19] Mateus, P., et al. Approaches to Mitigate Atmosphere Artefacts in SAR Interferograms: GPS Vs. WRF Model. in Proceedings of Fringe 2009 Workshop. 2009.

[20] Eresmaa, R. and H. Järvinen, An observation operator for ground-based GPS slant delays. Tellus A, 2006. 58(1): p. 131-140.

[21] Rohm, W. and J. Bosy, The verification of GNSS tropospheric tomography model in a mountainous area. Advances in Space Research, 2011. 47(10): p. 1721-1730.

[22] Healy, S., Radio occultation bending angle and impact parameter errors caused by horizontal refractive index gradients in the troposphere: A simulation study. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001. 106(D11): p. 11875-11889.

[23] Poli, P. and J. Joiner, Effects of horizontal gradients on GPS radio occultation observation operators. I: Ray tracing. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2004. 130(603): p. 2787-2805.

[24] Zou, X., et al., A ray-tracing operator and its adjoint for the use of GPS/MET refraction angle measurements. Journal of Geophysical Research: Atmospheres ,1999 .104(D18) : p. 22301-22318.

[25] Eresmaa, R., et al., Implementation of a ray-tracing operator for ground-based GPS slant delay observation modeling. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008. 113(D11).

[26] Healy, S., et al., Assimilating GPS radio occultation measurements with two-dimensional bending angle observation operators. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2007. 133(626): p. 1213-1227.

[27] Rodgers, C.D., Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice .Vol. 2. 2000: World scientific.

[28] Rahimi, H., V. Nafisi, and J. Asgari, Tropospheric Delay estimation using constrained ray-tracing method based on surface meteorological parameters and Numerical Weather Models. ISSGE, 2013. 3(2): p. 15-26

[29] Schüler, T., On ground-based GPS tropospheric delay estimation. 2001: Univ. der Bundeswehr München.

[30] Hofmann, B., H. Lichtenegger, and J. Collins, GPS theory and practice. Springer Wien NewYork, 2001.

[31] Bevis, M., et al., GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. Journal of applied meteorology, 1994. 33(3): p. 379-386.

[32] Hooper, A., et al., Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. Tectonophysics, 2012. 514: p. 1-13

[33] Chen, C.W. and H.A. Zebker, Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002. 40(8): p. 1709-1719.

[34] https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs

[35] Rogers, E., et al., Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution , new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. NWS Technical Procedures Bulletin, 2001. 488: p. 15.

[36] Tewari, M., et al. Implementation and verification of the unified NOAH land surface model in the WRF model. in 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction. 2004.

[37] Dudhia, J., Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. Journal of the Atmospheric Sciences, 1989. 46(20): p. 3077-3107.

[38] Mlawer, E.J., et al., Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave (Paper 97JD00237). JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ALL SERIES-, 1997. 102 :p. 16,663-16,682.

[39] Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Monthly weather review, 2006. 134(9): p. 2318-2341.

[40] Kain, J.S., The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. Journal of Applied Meteorology, 2004. 43(1): p. 170-181.

[41] Bekaert, D., et al., Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. Remote Sensing of Environment, 2015. 170: p. 40-47.

[42] Su, Z., et al., Quantifying the Termination Mechanism Along the North Tabriz-North Mishu Fault Zone of Northwestern Iran via Small Baseline PS-InSAR and GPS Decomposition. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017. 10(1): p. 130-144

[43] Balbarani, S., et al., Atmospheric corrections in interferometric synthetic aperture radar surface deformation. Advances in Geosciences, 2013. 35: p. 105.

[44] Fattahi, H. and F. Amelung, InSAR bias and uncertainty due to the systematic and stochastic tropospheric delay. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015. 120(12): p. 8758-8773

[45] Jolivet, R., et al., Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data. Geophysical Research Letters, 2011. 38(17)

[46] Ebert, B., Methods for verifying spatial forecasts. 4th Int'l Verification Methods Workshop, 2009(Helsinki).

[47] Ebert, E., Fuzzy verification of high resolution gridded forecasts: a review and proposed framework. Meteo App, 2008: p. 51–64.