فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵، صفحهٔ ۶۰۷-۶۱۸

مقایسه داده‌های بازتحلیل ERA-Interim و حس‌گر MERIS در کاهش اثر لایهٔ وردسپهر موجود در میدان‌های سرعت جابه‌جایی تداخل‌سنجی راداری

سعید حاجی آقاجانی[1*] و بهزاد وثوقی[2]

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(دریافت: ۹۳/۶/۳، پذیرش نهایی: ۹۵/۷/۲۷)

چکیده

یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌های روش تداخل‌سنجی راداری به‌منظور یافتن میزان و نرخ جابه‌جایی دقیق، میزان اختلاف فاز ناشی از عبور سیگنال راداری از جوّ است. بیشترین اثر جوّ مربوط به لایهٔ وردسپهر و به‌طور مشخص تغییرات بخار آب است. دو مورد از روش‌های متداول موجود برای شناسایی اختلاف فاز مربوط به وردسپهر، استفاده از داده‌های جوّی بازتحلیل شده و همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی بخار آب و فشار به‌دست آمده از حس‌گر Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) است. هدف از این تحقیق مقایسه این دو روش با یکدیگر است. به‌منظور دستیابی به میزان اختلاف فاز، از دو تصویر راداری مربوط به منطقه‌ای در شمال غرب ایران استفاده شد. علاوه بر به‌دست آوردن میزان اختلاف فاز دو تصویر بدون تصحیحات از روش‌های پیش‌گفته، میزان این اختلاف پس از اِعمال تصحیحات وردسپهری از راه داده‌های ERA-Interim و داده‌های MERIS نیز به‌دست آمد و نتایج به‌دست آمده با میزان جابه‌جایی گزارش شده از ایستگاه‌های Global Positioning System (GPS) موجود در منطقه مقایسه شد. این نتایج حاکی از آن است که مقدار Root Mean Square Error (RMSE) در حالت استفاده از داده‌های ERA- Interim برابر ۱/۸۴ میلی‌متر و در حالت استفاده از داده‌های حس‌گر MERIS برابر ۲/۳۷ میلی‌متر است. بیشینه اختلاف بین دو روش تصحیح برابر ۷/۷ میلی‌متر است که علت این اختلاف را می‌توان به بودن و نبودن پیکسل‌های ابری در آن ناحیه و در نتیجه متغیر بودن دقت تصاویر MERIS در این دو حالت نسبت داد. همچنین کمترین اختلاف به‌دست آمده برابر ۰/۳ میلی‌متر و ناشی از کم بودن تغییرات مسطحاتی عوامل جوّی در ناحیه است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت وجود ابرهای کومه‌ای در منطقه، استفاده از داده‌های ERA-Interim نتایج مطلوب‌تری به همراه خواهد داشت. همچنین در شرایطی که شاخص‌های لایهٔ وردسپهر دارای تغییرات مسطحاتی زیادند ، استفاده از داده‌ها با قدرت تفکیک بیشتر، تاثیر قابل‌توجهی در نتایج خواهد داشت.

واژهای کلیدی: بخار آب، تداخل‌سنجی راداری، وردسپهر، ERA-Interim، MERIS.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری به‌منظور پایش دگرشکلی پوستهٔ زمین رواج بسیار یافته و تلاش‌های بسیاری در جهت کاهش اثرات اضافی و بهبود نتایج حاصل از این روش صورت گرفته است. مهم‌ترین اثرات موجود در نتایج تداخل‌سنجی راداری عبارت‌اند از خطای مداری، خطای ناشی از عبور سیگنال از جوّ و همچنین خطای ناشی از توپوگرافی منطقه. از بین عوامل گوناگون جوّ (Atmosphere) مانند فشار هوا، بخار آب، قطرات آب موجود در ابرها، دما ومانند آن، بیشترین اثر مربوط به بخار آب موجو در جوّ است. ازآنجاکه بیشترین بخار آب موجود در جوّ، در لایهٔ وردسپهر (Troposphere) قرار دارد، بررسی تاثیر این لایه بر سیگنال راداری اهمیت بیشتری نسبت به سایر اثرات جوّی دارد. زبکر و همکاران (۱۹۹۷) اولین‌بار به بررسی و شرح نحوهٔ تاثیر جوّ بر سیگنال راداری پرداختند، پس از آن دویین و همکاران (۲۰۰۹) میزان تاثیر وردسپهر بر نتایج تداخل‌سنجی راداری را با استفاده از مدل‌های جهانی جوّ بررسی کردند. ژولیوت و همکاران (۲۰۱۱) به‌جای استفاده از مدل‌های جوّی جهانی، از داده‌های بازتحلیل شده (Reanalysis) مرکز پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوای اروپا

*نگارنده رابط: E-mail: S_h_aghajany@mail.kntu.ac.ir

(ECMWF) به‌منظور تصحیح اثر وردسپهر استفاده کردند و ژو و همکاران (۲۰۱۳) نقشه‌های بخار آب حس‌گرهای Moderate Resolution Imaging (MODIS) Spectroradiometer و Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) را برای این منظور به‌کار گرفتند. در داخل کشور نیز ادهم خیابانی (۱۳۸۶) با استفاده از تصاویر حس‌گر MERIS و حاجی‌آقاجانی (۱۳۹۳) با استفاده از داده‌های بازتحلیل شده به بررسی اثرات جوّ بر تصاویر راداری پرداختند.

در این مقاله به مقایسهٔ میزان تاثیر وردسپهر در یافتن میزان اختلاف فاز از تصاویر راداری با استفاده از داده‌های ERA-Interim و داده‌های MERIS پرداخته شده است. بدین‌منظور از دو تصویر راداری ماهواره ENVISAT از منطقهٔ آذربایجان به فاصلهٔ زمانی ۳۶ روز و خط مبنای مکانی ۱۸۸ متر استفاده شده است و میزان تغییرات فاز در این بازه زمانی بدون استفاده از تصحیحات وردسپهری به‌دست خواهد آمد. در مرحلهٔ بعد به‌منظور اعمال تصحیحات، از داده‌های بازتحلیل شده ERA-Interim و داده‌های MERIS استفاده می‌شود و میزان تاخیر ناشی از لایهٔ وردسپهر برای هر دو زمان عکسبرداری به‌صورت شبکه محاسبه خواهد شد. پس از درون‌یابیِ این مقادیر به‌ازای مختصات پراکنش‌کننده‌های مقطعی (SDPF)، نتایج حاصل از تداخل‌نگار موجود کسر می‌شود و تغییرات فاز را با اعمال تصحیحات مربوط به لایهٔ وردسپهر نیز به‌دست می‌آوریم. درنهایت به‌منظور بررسی صحت نتایج از میزان جابه‌جایی گزارش شده از ایستگاه‌های GPS موجود در منطقه در زمان‌های موردنظر استفاده خواهیم کرد.

۲. اثر جوّ بر سیگنال راداری

فاز تداخل‌سنجی راداری موجود در یک تداخل‌نما، دارای مؤلفه‌های متفاوتی به شرح زیر است:

۱- مولفهٔ مربوط به توپوگرافی

۲- جابه‌جایی سه‌بُعدی سطح زمین

۳- تغییر هندسهٔ تصویربرداری یا اثر خط مبنا

۴- نوفه (Noise)

۵- تغییر ضریب شکست مسیر بین دو لحظهٔ تصویربرداری یا اثر جوّ

بررسی جابه‌جایی سطوح، از مهم‌ترین کاربردهای تصاویر تداخل‌سنجی راداری است. در این‌گونه بررسی‌ها همهٔ سیگنال‌های موجود در تصویر به‌جز آنهایی که حاصل جابه‌جایی هستند درحکم اثر مزاحم شناخته می‌شوند و نیازمند اصلاح هستند. معمولاً اثرات ناشی از نوفه و خط مبنا در هنگام پردازش تصاویر به‌کمک داده‌های کمکی برطرف می‌شود. اثر مربوط به توپوگرافی در فاز را می‌توان با روش‌های گوناگون تصحیح کرد. روش اول برای اعمال تصحیح توپوگرافی، استفاده از تصویر سوم است. در این روش تصویر سوم به‌نحوی انتخاب می‌شود که اختلاف فاز آن با یکی از تصاویر اول یا دوم فقط ناشی از اثر توپوگرافی منطقه باشد. سپس این اثر از اختلاف فاز دو تصویر اول و دوم کسر می‌شود تا اختلاف فاز ناشی از توپوگرافی منطقه تصحیح شود. بااین‌حال به‌منظور محاسبه میدان سرعت جابه‌جایی ناچار به استفاده از روش دوم یعنی به‌کارگیری مدل ارتفاعی منطقه هستیم. اثر جوّ برخلاف سایر اثرات با توجه به برخی دشواری‌های موجود، نیازمند توجه جداگانه‌ای خواهد بود. برای تعیین اثر جوّ بر سیگنال راداری، ابتدا مسیر انتشار موج راداری در خلأ در نظر گرفته می‌شود. در این حالت، ضریب شکست محیط برابر یک در نظر گرفته می‌شود وبا توجه به این موضوع، فاز موج راداری از رابطهٔ (۱) محاسبه می‌شود (زبکر و همکاران، ۱۹۹۷):

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} x \qquad (۱)$$

که در آن، x فاصله طی شدهٔ سیگنال راداری و λ طول موج است. حال اگر مسیر انتشار سیگنال، جوّ زمین در نظر گرفته شود، رابطهٔ (۱) به‌صورت رابطه (۲) در خواهد آمد:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} x + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \qquad (۲)$$

که در آن، Δx اختلاف فاصلهٔ اضافی ناشی از شکست موج در جوّ است. این متغیر از رابطهٔ (۳) محاسبه می‌شود:

$$\Delta x = 10^{-6}\, N(x)\, x \qquad (۳)$$

در رابطهٔ (۳) N(x) ضریب شکست جوّ است. مقدار ضریب شکست جوّ برابر است با:

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + (k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}) - 4.028 \times 10^7 \frac{ne}{f^2} + 1.4\, w \qquad (۴)$$

در رابطهٔ (۴)، Pd فشارهوای خشک برحسب hPa، e فشارجزئی بخار آب برحسب hPa، T دمای مطلق برحسب کلوین، Ne چگالی الکترون درهرمترمکعب، f بسامد رادار، w آب مایع موجود برحسب گرم بر مترمکعب و ضریب‌های k_1، k_2 و k_3 مقادیرثابت تجربی هستند (ژولیوت و همکاران، ۲۰۱۱).

در رابطهٔ (۴) جملهٔ اول مربوط به تاخیر هیدروستاتیکی (Hydrostatic Delay) و یا تأخیر در اثر تغییرات فشار جوّ، جملهٔ داخل پرانتز مربوط به تاخیر در اثر رطوبت موجود در مسیر سیگنال، جملهٔ سوم مربوط به اثر لایهٔ یون‌سپهر (Ionosphere) و جملهٔ آخر مربوط به تاثیر آب مایع موجود در جوّ بر فاز موج راداری است.

اثر تغییر ضریب شکست در فاز تک‌تصویر راداری به‌نسبت زیاد خواهد بود، اما به‌طور خلاصه می‌توان گفت که تأثیر جوّ روی تداخل‌نگار (Interferogram) بر اثر اختلاف تأخیر ناشی از تغییر پارامترهای تأثیرگذار جوّ بر فاز سیگنال راداری ایجاد می‌شود. بدیهی است هرچه تغییر شرایط آب‌وهوایی بین دو زمان تصویربرداری بیشتر باشد، تاثیر جوّ بر تداخل‌نگار بیشتر خواهد شد(هانسن ۲۰۰۱).

معمولاً اثر فشار هیدروستاتیکی (هوای خشک) یا به‌عبارت‌دیگر اثر فشار هوا روی تک‌تصویر راداری آشکارتر خواهد بود، اما این اثر به علت تغییرات محدود فشار هوا در زمان‌های گوناگون، در تصاویر تداخل‌سنجی راداری معمولاً کم‌اهمیت‌تر از تأثیرات دیگر است (هانسن ۱۹۹۸).

در تداخل‌سنجی راداری، اثر یون‌سپهر به علت تغییرات به‌نسبت نرم و بسامد (Frequency) کم آن، به‌صورت یک خطای همگن نمایان می‌شود (زبکر و همکاران ۱۹۹۷). خطاهای همگن را می‌توان به‌کمک نقطه‌های ثابت اندازه‌گیری شده در سطح زمین و یا اندازه‌گیری پارامترهای مربوط در تعداد محدود نقطه‌های در صحنهٔ تصویربرداری و تعمیم آن، تا حد قابل‌قبولی حذف کرد. از سوی دیگر تأثیر بسامدهای زیاد مانند بخار آب به‌صورتی است که به آسانی با روش‌های ساده مانند میانگین‌گیری، قابل حذف نخواهد بود (لی و همکاران، ۲۰۰۵). در فعالیت‌هایی که تاکنون در زمینهٔ اصلاح جوّی با توجه به ماهیت خطاها صورت گرفته، خطای جوّی ناشی از بخار آب، بیش از دیگر موارد، مورد توجه واقع شده است.

۳. وردسپهر

با ناچیز در نظر گرفتن جملهٔ یون‌سپهری، تأثیر باقی‌مانده به لایهٔ وردسپهر نسبت داده می‌شود (زبکر و همکاران ۱۹۹۷).

وردسپهر پایین‌ترین لایهٔ جوّ است که خود از لایه‌های کوچک‌تری تشکیل شده است. وجه تمایز این لایه با لایه‌های دیگر جوّ، تجمع همهٔ بخار آب جوّ زمین در آن است. به همین سبب بسیاری از پدیده‌های جوّی که با رطوبت ارتباط دارند و عاملی تعیین‌کننده در وضعیت هوا به‌شمار می‌آیند، فقط در این لایه رخ می‌دهند. منبع حرارتی لایهٔ وردسپهر انرژی تابشی سطح زمین است. ضخامت این لایه از شرایط حرارتی متفاوتی که در عرض‌های جغرافیایی مختلف حاکم است تبعیت می‌کند. این ضخامت معمولاً از ۱۷ تا ۱۸ کیلومتر در استوا به ۱۰ تا ۱۱ کیلومتر در مناطق معتدل و ۷ تا ۸ کیلومتر در قطب‌ها تغییر می‌کند. لایهٔ وردسپهر از جوّ را می‌توان متشکل از دو بخش مجزا در نظر گرفت. بخش خشک وردسپهر که ترکیبی است از مولکول‌های غیر قطبی یا همان گازهای خشک و بخش تر آنکه شامل مولکول‌های قطبی است. هر دو بخش لایهٔ وردسپهر بر نحوهٔ انتشار امواج اثر می‌گذارند. تأخیر خشک لایهٔ وردسپهر عمدتاً به فشار جوّ

وابسته است به همین علت با گذر زمان به کندی تغییر می‌کند ولی ازآنجاکه تأخیر تر لایهٔ وردسپهر به بخار آب وابسته است و این پارامتر از نظر زمانی و مکانی تغییرات سریع‌تری دارد، این مؤلفهٔ تأخیر، تغییرات سریع‌تری را نسبت به زمان و مکان آشکار می سازد (سستامینن، ۱۹۹۲).

قسمت تر وردسپهر تأثیر بسیار زیادی در اندازه گیری‌های راداری دارد و تا حد زیادی کیفیت نتایج را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. عامل غالب تأثیرات که به داده‌ها وارد می‌شود، بخش تر و عمدهٔ آن ناشی از بخار آب است. دراینجا به جمله‌های تأثیرگذارتر تأثیرات مربوط به لایهٔ وردسپهر خواهیم پرداخت. این تأثیرات به دو مؤلفه مجزا تقسیم شده‌اند (گلدریش، ۱۹۷۲):

$$\Delta x = (\Delta x)_{dry} + (\Delta x)_{wet} \tag{۵}$$

که در آن، $(\Delta x)_{dry}$ طول اضافی اندازه‌گیری شده ناشی از تأخیرهیدروستاتیکی و $(\Delta x)_{wet}$ طول اضافی اندازه‌گیری شده ناشی از بخار آب است. باتوجه به ناچیز بودن تأثیر فاز غیرگازی آب در مقابل تأثیر بخار آب، اثر وردسپهر را می‌توان ناشی از تغییرات فشار، دما و بخار آب دانست (زبکر و همکاران ۱۹۹۷).

۴. وردسپهر خشک

تاثیر لایهٔ خشک وردسپهر را می‌توان ناشی از تغییرات فشار و دما دانست. با توجه به رابطهٔ (۴)، تاثیر ناشی از تغییر فشار را می‌توان به شکل رابطه (۶) مدل‌سازی کرد:

$$ZHD = 10^{-6} k_1 \int_p^a \frac{p}{T} dz \tag{۶}$$

با استفاده از قانون عمومی گازهای ایدئال، رابطهٔ بالا به شکل رابطه (۷) قابل محاسبه است:

$$ZHD = 10^{-6} k_1 R_d \int_p^a p(z)\, dz \tag{۷}$$

مدل فشار سطح عبارت است از (سستامینن، ۱۹۹۲):

$$p_s = g_m \int_0^\infty p(z)\, dz \tag{۸}$$

در روابط بالا، R_d ثابت هوای خشک، T دما برحسب کلوین و g_m جاذبهٔ محلی در مرکز ستون جوّ و k_1 ضریب ثابت است.

$$R_d = 287.06 \ J\,Kg^{-1}\,K^{-1} \tag{۹}$$

$$g_m = 9.784(1 - 0.0026 \cos 2\Phi - 0.00028\, Z_0) \tag{۱۰}$$

$$k_1 = 0.776\ K.Pa^{-1} \tag{۱۱}$$

که در آن، Z_0 ارتفاع سطح و φ عرض جغرافیایی است. با استفاده از این رابطه، تأخیر ناشی ازفشار هوا بر تک‌سیگنال راداری از رابطهٔ (۱۲) قابل محاسبه خواهدبود:

$$ZHD = 10^{-6} k_1 \frac{R_d}{g_m} p_s \tag{۱۲}$$

جت (۱۹۷۹) یک جملهٔ تکمیلی برای تغییرات عرض جغرافیایی درنظرگرفت. پس میزان تاخیر ناشی از تغییر فشار سیگنال راداری از رابطهٔ (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$ZHD = \left(10^{-6} k_1 \frac{R_d}{g_m - 1.11 \times 10^{-5} \cos\varphi}\right) p_s \tag{۱۳}$$

بدین‌ترتیب تأخیر ناشی از فشار به‌صورت رابطه (۱۴) در خواهد آمد:

$$\delta l(z)_{pressure} = 10^{-6} (k_1 \frac{R_d}{g_m} (p(z) - p(z_{ref}))) \tag{۱۴}$$

رابطهٔ (۱۴) نشان می‌دهد که در شرایط عادی، فشار هوا قادر است تا ۲/۳ متر روی سیگنال راداری تأخیر ایجاد کند (هانسن ۲۰۰۱). نکتهٔ قابل‌توجه این است که فشار هوا در یک نقطه از یک منطقهٔ مشخص، بیش از چند میلی‌بار در شرایط آب‌وهوایی متفاوت تغییر نمی‌کند. این مسئله باعث می‌شودکه صورت تفاضلی به عدد بسیارکوچک‌تری نسبت به ۲/۳ متر و حدود ۲ میلی‌متر در هر میلی‌بار اختلاف فشار، منتج شود. ازاین‌رو این تأثیر اغلب در تداخل‌سنجی (Interferometry) نادیده گرفته می‌شود. استفاده از این رابطه روشن می‌سازد که اگر فشار سطحی بادقت ۰/۴ hPa محاسبه شود، می‌توان تأخیر موجود در سیگنال را با دقت ۱ میلی‌متر و یا بهتر از این مقدار برآورد کرد (بویس و همکاران، ۱۹۹۶).

۵. وردسپهر تر

بخار آب مهم‌ترین عامل خطای جوّی بر تداخل‌نگار است (زبکر و همکاران، ۱۹۹۷). تغییرات مکانی و زمانی

با بسامد زیاد بخار آب باعث می‌شود که این اثر به‌صورت کاملاً ناهمگن روی تصاویر مشهود باشد. علت اصلی این ناهمگنی، غیریکنواختی چرخهٔ آبی جوّی و تغییر مکانی فشار و دما و سایر پارامترهای جوّ است. البته میزان تأثیر بخار آب و به‌طورکلی جوّ بر تداخل‌نگار، وابسته به شرایط آب‌وهوایی دو زمان تصویربرداری است. حالت بسیار مشکل‌ساز اثر بخار آب زمانی رخ می‌دهد که تغییرات مکانی بخار آب در هر دو تاریخ محدود ولی رطوبت در دو زمان تصویربرداری بسیار متغیر باشد. در این شرایط کل تداخل‌نگار، از نظر فیزیکی یک جابه‌جایی کاملاً بی‌معنی خواهد یافت.

میزان تاخیر ناشی از بخار آب را می‌توان به شکل زیر در نظر گرفت (سستامینن، ۱۹۹۲):

$$\delta l(z)_{wet} = 10^{-6}\int_{z}^{z_{ref}} \left(-\frac{R_d}{R_v}k_1 + k_2\frac{e}{T} + k_3\frac{e}{T^2}\right)dz \qquad (۱۵)$$

که در آن، e فشار بخار آب برحسب پاسکال و R_v ثابت بخار آب k_1 و k_2 ضریب‌های ثابت هستند.

$$R_v = 461.495\ \mathrm{J.Kg^{-1}\ K^{-1}} \qquad (۱۶)$$

$$k_2 = 0.716\ \mathrm{K.Pa^{-1}} \qquad (۱۷)$$

$$k_3 = 3.75\times 10^{3}\ \mathrm{K^2.Pa^{-1}} \qquad (۱۸)$$

این انتگرال از ارتفاع سطح زمین در ایستگاه موردنظر تا بخش فوقانی وردسپهر محاسبه می‌شود. ازآنجاکه داده‌ها به شکل گسسته است به‌منظور محاسبه تاخیر ناشی از قسمت تر وردسپهر از صورت گسسته انتگرال بالا استفاده خواهد شد.

$$\delta l(z)_{wet} = 10^{-6}\sum_{i=1}^{n-1} 2\left[\frac{k_2}{T_i+T_{i+1}} + \frac{k_3}{(T_i+T_{i+1})^2}\right]\left[\frac{e_w^i+e_w^{i+1}}{2}\right][z_{i+1}-z_i] \qquad (۱۹)$$

در رابطهٔ (۱۹) n تعداد سطوح فشاری است. با توجه به مطالب گفته شده، تاخیر سمت‌الرأسی ناشی از وردسپهر را می‌توان به‌صورت مجموع اثرات وردسپهر خشک و تر دانست.

۶. داده‌های بازتحلیل شده ERA-Interim

تحلیل دوبارهٔ یک سامانه، برای تولید مجموعه‌ای از داده‌های اقلیمی، بازتحلیل نامیده می‌شود. داده‌های بازتحلیل یا تحلیل مجدد، با استفاده از یک سامانهٔ ثابت و از نظر دینامیکی سازگار در داده‌گواری (Data Assimilation) داده‌ها و مدل‌ها که در آن از همهٔ داده‌های در دسترس مشاهداتی استفاده می‌شود، ایجاد می شوند (مرکز پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوای اروپا، ۲۰۱۳).

یکی از مولفه‌هایی که در این فرایند تغییر می‌کند، داده‌های دیدبانی است (مرکز پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوای اروپا، ۲۰۱۳). درواقع داده‌های بازتحلیل، تلفیقی از داده‌های دیدبانی به‌علاوهٔ مدل‌سازی هستند. برای منطقه‌هایی که فاقد داده هستند یا شبکه ایستگاه‌ها تراکم کمی دارند از مدل‌سازی استفاده می‌شود. یکی از انواع داده‌های بازتحلیل داده‌های ERA-Interim است. این داده‌ها ناشی از آخرین تحلیل دوباره جوّ است که سازمان پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوای اروپا از آن رز۱۹۸۹ آغاز کرده است و تاکنون ادامه دارد (مرکز پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوای اروپا ۲۰۱۳). هدف از تهیه این داده‌ها برطرف کردن مشکلات داده‌های ERA-40 است. درنظر نگرفتن چرخهٔ آب در جوّ، اثر لایهٔ پوشن-سپهر (Stratosphere) و تطابق زمانی با دیگر داده‌ها، از جملهٔ این مشکلات است. بدین‌منظور تعداد لایه‌های فشاری از ۲۳ به ۳۷ همچنین تعداد پارامترهای عرضه شده افزایش یافت (مرکز پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوای اروپا ۲۰۰۶). این داده‌ها مجموعه‌ای از پارامترهای هواشناسی از ژانویه ۱۹۸۹ تاکنون را دربردارد. فاصلهٔ مکانی این داده‌ها ۰/۷۵ درجه و حدود ۷۰ کیلومتر است که کرهٔ زمین را به‌صورت شبکه‌های ۰/۷۵ × ۰/۷۵ درجه دربر می گیرد. این داده‌ها در برگیرندهٔ عرض جغرافیایی ۸۹/۴۲۵ تا ۸۹/۴۲۵- درجه و طول جغرافیایی ۰ تا ۳۵۹/۲۵ درجه هستند (مرکز پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوای اروپا ۲۰۱۳).

قدرت تفکیک زمانی این دادها ۶ ساعت است و اطلاعات را در ساعت‌های ۶ صبح ۱۲ ظهر ۶ بعدازظهر و ۱۲ شب در بر دارد. این داده‌ها حدود ۳۰۰ پارامتر از جمله فشار بخار آب، دما، فشار و مانند آن را در اختیار کاربران

قرار می‌دهند (مرکز پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوای اروپا ۲۰۱۳).

۷. نقشه‌های بخار آب و فشار حس‌گر MERIS

حس‌گر MERIS روی ماهواره ENVISAT قرار داشت و دربردارندهٔ ۱۵ باند طیفی در محدودهٔ مرئی و فروسرخِ نزدیک بود(کرامر ۲۰۰۲). تصاویر این حس‌گر در دو نوع Reduce Resolution (RR) و Full (FR) Resolutionهستند که به‌ترتیب اغلب برای کاربردهای اقیانوسی و زمینی پیشنهاد شده‌اند(سازمان فضایی اروپا ۲۰۰۶). ماموریت اصلی این حس‌گر تحقیقات اقیانوسی است اما با توجه به طراحی طیفی آن، کاربرد گسترده‌ای در تحقیقات جوّی دارد. با توجه به هم‌زمانی تصویربرداری حس‌گر با تصاویر راداری ماهوارهٔ ENVISAT این حس‌گر همواره در تصحیح تصاویر این ماهواره کاربرد فراوانی داشته است. قالب داده‌های این حس‌گر N1. و از استانداردهای سازمان فضایی اروپا است. به‌منظور پردازش‌های اولیهٔ این تصاویر، از نرم‌افزار BEAM که محصول سازمان فضایی اروپا است و برای پردازش‌های نهایی و به‌دست آوردن نقشهٔ بخار آب و فشار از نرم‌افزار ENVI استفاده شد. با در اختیار داشتن بخار آب قابل بارش (PWV=Perceptible Water Vapor) از راه تصاویر این حس‌گر و با استفاده از رابطهٔ (۲۰) می‌توان به تاخیر ناشی از لایهٔ تر وردسپهر دست یافت.

$$\delta l(z)_{wet}=\Pi^{-1}\,PWV \qquad (۲۰)$$

در رابطهٔ (۲۰) Π^{-1} ضریب تبدیل بخار آب قابل بارش به تاخیر ناشی از لایهٔ تر وردسپهر است که از رابطهٔ (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\Pi^{-1}=10^{-6}R_v(k_2^{'}+\frac{k_3}{T_m})\rho_1 \qquad (۲۱)$$

$$k_2^{'}=23.3\ K.Pa^{-1} \qquad (۲۲)$$

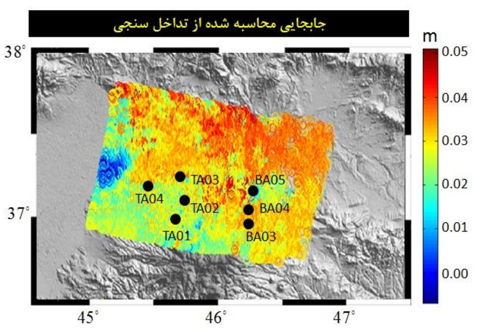
در رابطهٔ (۲۲) ρ_1 چگالی آب مایع است. درجدول ۱ مشخصات تصاویر به‌کار رفته از این حس‌گر ملاحظه می‌شود.

۸. منطقهٔ تحقیقاتی

در این تحقیق برای بررسی اثر وردسپهر در یک تداخل-نگار، از دو تصویر ماهواره ENVISAT از منطقهٔ آذربایجان استفاده شده است. ویژگی‌های دو تصویر با خط مبنای مکانی ۱۸۸ متر و خط مبنای زمانی ۲۰۰ روز در جدول ۲ ملاحظه می‌شود.

۹. تغییر فاز

به‌منظور به‌دست آوردن میزان تغییرات فاز در بازهٔ زمانی مربوط به تصاویر، از روش خط مبنای کوتاه و پراکنش‌کننده‌های مقطعی استفاده شد و درنهایت تداخل‌نگار ناشی از تفاضل فازهای دو تصویر به‌دست آمد. نکتهٔ مهم آن است که تداخل‌نگار به‌دست آمده حاوی مقادیر تغییرات فاز در راستای خط دید ماهواره ENVISAT است و برای آنکه در ادامه بتوان تصحیحات وردسپهری را بر آن اِعمال کرد نیاز است که این مقادیر به راستای قائم (Zenith) تبدیل شوند. برای این منظور با داشتن زاویهٔ برخورد سیگنال راداری که برای هر دو تصویر برابر ۲۳/۱ درجه است و مشخص بودن طول موج سیگنال (λ)، مقادیر را در کسینوس زاویه برخورد ضرب می‌کنیم تا به راستای قائم تبدیل شوند. همچنین به‌منظور تبدیل مقادیر به واحد متر لازم است آنها را در مقدار ثابت $\frac{\lambda}{4\pi}$ ضرب کنیم. در شکل ۱ میدان جابه‌جایی به‌دست آمده از تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۶ تا ۲۰۰۷/۰۵/۱۱ ملاحظه می‌شود.



شکل ۱. میدان جابه‌جایی در راستای قائم برحسب میلی‌متر از تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۶ تا ۲۰۰۷/۰۵/۱۱. نقطه‌های مشکی نشان‌دهندهٔ ایستگاه‌های GPS هستند.

جدول ۱. ویژگی‌های تصاویر MERIS

تاریخ	توضیحات تصاویر
۲۰۰۷/۰۴/۰۶	**MER_RR__2PPBCM20070406_094239_000000542058_00208_27316_0005.N1**
۲۰۰۷/۰۵/۱۱	**MER_RR__2PPBCM20070511_091128_000000562059_00222_27831_0009.N1**

جدول ۲. ویژگی‌های دو تصویر راداری

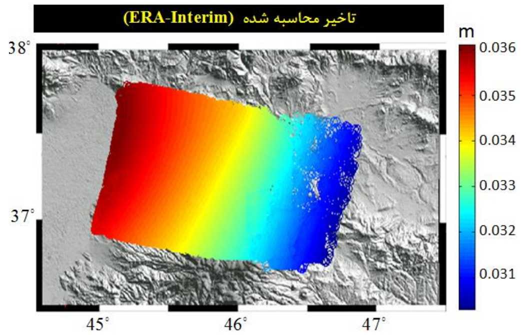
شاخص	تاریخ	طول موج	طول جغرافیایی مرکز تصویر	عرض جغرافیایی مرکز تصویر	گذر	زاویه برخورد سیگنال
تصویر اول	۰۶- ۰۴ – ۲۰۰۷	باند C ۰/۰۵۶۲۷۵ متر	°۴۶ '۱۹ "۱۰	°۳۸ '۰۱ "۲۵	پایین‌گذر	۲۳/۱ درجه
تصویر دوم	۱۱- ۰۵ – ۲۰۰۷	باند C ۰/۰۵۶۲۷۵ متر	°۴۶ '۱۸ "۴۵	°۳۸ '۰۱ "۱۳	پایین‌گذر	۲۳/۱ درجه

۱۰. تصحیح وردسپهری با استفاده از داده‌های ERA-Interim

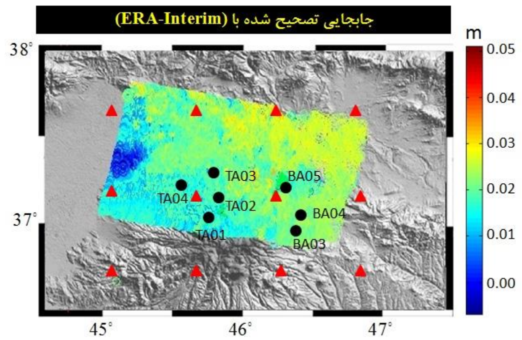
همان‌طور که قبلاً ذکر شد، برای اِعمال تصحیحات وردسپهری، از داده‌های ERA-Interim که در شبکه‌های مشخص آماده شده‌اند، استفاده شده است. به علت پایین‌گذر بودن تصاویر ENVISAT، از داده‌های جوّی در ساعت ۶ صبح براساس زمان UTC استفاده شد. به‌سبب یکسان بودن زمان داده‌های ERA-Interim با تصاویر راداری، مشکل نبود انطباق زمانی در آنها وجود ندارد. داده‌های پیش‌گفته حاوی ارتفاع ۳۷ لایهٔ فشاری و همچنین رطوبت نسبی و فشار جزئی بخار آب و دما در هر لایه هستند. در رابطهٔ تاخیر ناشی از بخار آب می‌باید همهٔ سطوح فشاری از سطح زمین به بالا در محاسبات شرکت داده شود. با توجه به ارتفاع متفاوت نقطه‌های سطح زمین، برای محاسبه تاخیر در هر نقطه می‌باید از ارتفاع همان نقطه که با توجه به مدل ارتفاعی منطقه معلوم است، به‌منظور بالا، اقدام به محاسبهٔ تاخیر کرد.

برای محاسبهٔ فشار سطح و سایر شاخص‌ها از جمله دما و فشار جزئی بخار آب و رطوبت نسبی در طول نیم‌رُخ ارتفاعی، از درون‌یابیِ اسپیلاینی (Spline interpolation) که در نسخه‌های راهنمای ECMWF عرضه و توصیه شده، استفاده شد. سپس با استفاده از شاخص‌های موجود در هر لایه شامل دما، فشار بخار آب و اختلاف ارتفاع بین هر دو لایه و با به‌کارگیری رابطهٔ (۱۹)، میزان تاخیر مربوط به قسمت تر لایهٔ وردسپهر محاسبه شد. تاخیر مربوط به لایهٔ خشک وردسپهر نیز با استفاده از رابطهٔ (۱۴) محاسبه شد. درنهایت پس از محاسبهٔ تاخیر کل در هر نقطه، برای تعیین میزان تاخیر در محل مشاهدات تداخل‌سنجی، از درون‌یابیِ کریجینگ (Kriging) استفاده شد. علت آن است که این درون‌یابی، به‌سبب داشتن قابلیت انعطاف زیاد در استفاده در توان‌های گوناگون، یکی از دقیق‌ترین روش‌های درون‌یابی است. در شکل ۲ میزان اختلاف تاخیر ناشی از لایهٔ وردسپهر با استفاده از داده‌های ERA-Interim از تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۶ تا ۲۰۰۷/۰۵/۱۱ در راستای قائم، مشاهده می‌شود.

برای اِعمال تصحیحات به تداخل‌نگار، میزان تاخیر ناشی از لایهٔ وردسپهر را از مقادیر تداخل‌نگار کم کردیم که نتیجه آن در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۲. اختلاف ناشی از تاخیر لایهٔ وردسپهر از تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۶ تا ۲۰۰۷/۰۵/۱۱که با استفاده از داده‌های ERA-Interim محاسبه شده است.



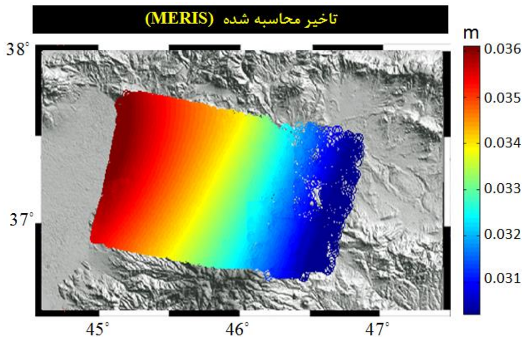
شکل ۳. میدان جابه‌جایی تصحیح شده با استفاده از داده‌های هواشناسی ERA-Intrim از تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۶ تا ۲۰۰۷/۰۵/۱۱. ایستگاه-های GPS (دایرهٔ/مشکی) و همچنین شبکهٔ داده‌های ERA- Intrim (مثلث سرخ) نیز مشخص شده‌اند.

۱۱. تصحیح وردسپهری با داده‌های MERIS

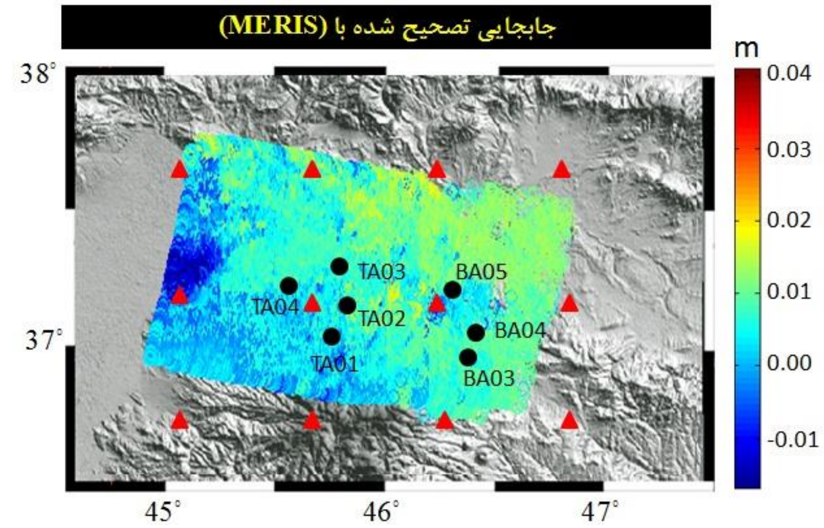
داده‌های حس‌گر MERIS به علت اشتراک در ماهواره ENVISAT با تصاویر راداری مورد استفاده، هم‌زمان هستند و در نتیجه، مشکل نبود تطابق زمانی با تصاویر راداری وجود ندارد. محصول بخار آب حاصل از این تصاویر در مناطق ابری اعتبار ندارد(کرامر ۲۰۰۲) علت این امر پراکنش غیرانتخابی ابر در باندهای جذبی بخار آب است. با توجه به این موضوع که در مناطق ابری، هوا از بخار آب اشباع است، میزان بخار آب نقطه‌های ابری با کمک مناطق اطراف ابر محاسبه شد. البته با توجه به اینکه این فرض برای ابرهای گسترده و ابرهای کومه‌ای به‌نسبت وسیع است و با خطای محسوس همراه خواهد بود، تلاش شد تا این نقطه‌ها شناسایی و کنار گذاشته شود. برای استخراج میزان بخار آب در پیکسل ابری از درون‌یابیِ کریجینگ استفاده شده است. با توجه به در اختیار داشتن میزان بخار آب قابل بارش از تصاویر این حس‌گر و استفاده از روابط (۲۰ و ۱۴) در اینجا نیز میزان تاثیر وردسپهر بر هرکدام از تصاویر محاسبه و از یکدیگر کسر شد. درنهایت بر میدان جابه‌جایی به‌دست آمده که تصحیحات وردسپهری بر آن اعمال نشده است اثر داده شدند تا میدان جابه‌جایی تصحیح شده با داده‌های حس‌گر MERIS نیز به‌دست آید. در شکل ۴ اختلاف تاخیر وردسپهر به‌دست آمده از داده‌های MERIS از تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۶ تا ۲۰۰۷/۰۵/۱۱ ملاحظه می‌شود.

پس از یافتن تاخیر نهایی موثر بر میدان جابه‌جایی، این مقادیر را از میدان جابه‌جایی کسر کردیم تا میدان جابه‌جایی تصحیح شده با استفاده از داده‌های حس‌گر MERISبه‌دست آید (شکل ۵).

در ادامه به ارزیابی نتایج براساس دو معیار کیفی و کمّی می‌پردازیم. در ارزیابی کیفی مدل، تحلیل پدیده‌ها پیش و پس از مرحلهٔ اصلاح، بررسی می‌شوند و در مرحلهٔ ارزیابی کمّی، نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های عددی مورد توجه قرار خواهد گرفت.



شکل ۴. اختلاف ناشی از تاخیر لایهٔ وردسپهر از تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۶ تا ۲۰۰۷/۰۵/۱۱که با استفاده از داده‌های MERIS محاسبه شده است..



شکل ۵. میدان جابه‌جایی تصحیح شده با استفاده از داده‌های MERIS از تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۶ تا ۲۰۰۷/۰۵/۱۱. ایستگاه‌های GPS (دایرهٔ مشکی) و همچنین شبکهٔ داده‌های ERA-Interim (مثلث سرخ) نیز مشخص‌اند.

۱۲. ارزیابی کیفی نتایج

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، قبل از تصحیح اثر مربوط به لایهٔ وردسپهر در تداخل‌نگار، سیگنال‌های زیادی در تصویر به چشم می‌رسد که موجب بروز خطا در تشخیص سیگنال ناشی از پدیدهٔ ژئودینامیکی می‌شود. برای مثال در نواحی شرقی میدان جابه‌جایی تصحیح نشده، بالاآمدگی وجود دارد که به‌منزلهٔ یک سیگنال مشاهده می‌شود اما پس از اِعمال تصحیحات با داده‌های به‌دست آمده از MERIS و ERA- Interim، بالاآمدگی در آن ناحیه مشاهده نشده و نشانگر این است که علت اصلی جابه‌جایی به‌دست آمده در منطقه، جوّ است و سیگنالی ناشی از پدیدهٔ ژئودینامیکی در آن ناحیه موجود نیست. سیگنال دیگری که از ناحیه مرکزی به سمت شمال میدان کشیده شده است پس از تصحیحات وردسپهری نیز وجود دارد و نشانگر این است که این جابه‌جایی ناشی از وجود یک پدیدهٔ ژئودینامیکی در منطقه ،یعنی گسل تبریز است که از ناحیهٔ پیش‌گفته در میدان جابه‌جایی گذر می‌کند. عکس این مورد هم در میدان جابه‌جایی موجود است. در ناحیهٔ جنوب شرقی قبل از تصحیحات وردسپهری سیگنالی مشاهده نمی‌شود اما پس از اِعمال تصحیحات، ملاحظه می‌شود که در بازهٔ زمانیِ دو تصویر، به مقدار اندکی پدیدهٔ فرونشست در منطقه، به وقوع پیوسته است. علاوه‌براین در حالت تصحیح با داده‌های MERIS در قسمت‌های جنوبی، شرقی و غربی منطقه، سیگنال‌های ناشی از فرونشست ملاحظه می‌شود که در حالت تصحیح با داده‌های ERA- Interim به چشم نمی‌رسد. این موضوع ناشی از وجود پیکسل‌های ابری در تصاویر MERIS و همچنین تغییرات شاخص‌های لایهٔ وردسپهر در این مناطق است.

۱۳. ارزیابی کمّی نتایج

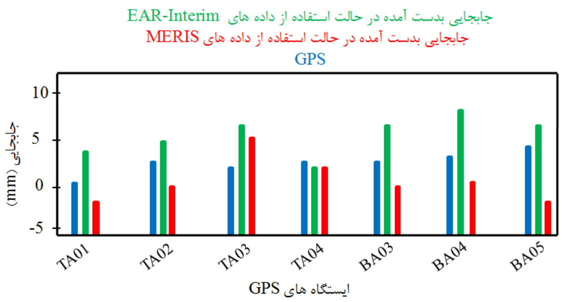
در این بخش ارزیابی کمّی نتایج، با آزمون درستی عددی تصویر نهایی صورت می‌پذیرد. درواقع در این مرحله با کمک جابه‌جایی گزارش شده از ایستگاه‌های GPS، درستی نتایج و همچنین میزان بهبودی مدل، ارزیابی شده است.

جدول ۲ نشان‌دهندهٔ مقایسه گزارش‌های ایستگاه‌های GPS و نتایج تداخل‌سنجی راداری، قبل و بعد از تصحیحات مربوط به لایهٔ وردسپهر است.

در شکل ۱۱ مقایسهٔ بین نتایج به‌دست آمده در محل مربوط به هفت ایستگاه GPS مشاهده می‌شود.

جدول ۳. نتایج به‌دست آمده و مقایسه آن‌ها

نام ایستگاه	TA01	TA02	TA03	TA04	BA03	BA04	BA05
جابه‌جایی به‌دست آمده از ایستگاه GPS (mm)	۲/۱	۳/۹	۳/۵	۳/۸	۴/۴	۴/۷	۵/۸
جابه‌جایی قبل از تصحیح (mm)	۲۸/۲	۲۳/۵	۳۷/۳	۳۱/۱	۳۹/۵	۳۵/۲	۲۹/۱
جابه‌جایی بعد از تصحیح با ERA-Interim (mm)	۴/۵	۵/۲	۶/۹	۲/۷	۷/۱	۷/۸	۷/۲
جابه‌جایی بعد از تصحیح با MERIS (mm)	−۳/۱	۰/۷	۵/۴	۲/۴	۰/۱	۱/۱	−۰/۵



شکل ۱۱. مقایسه بین نتایج به‌دست آمده در ۷ ایستگاه GPS

جدول ۴. شاخص‌های آماری مربوط به نتایج برحسب میلی‌متر بر سال

روش	میانگین	انحراف معیار	RMSE
تداخل‌سنجی	۳۱/۹۸	۵/۶۳	۳۱/۷۴
تصحیح تداخل‌سنجی با استفاده از داده‌های ERA-Interim	۵/۹۰	۳/۴۰	۱/۱۴
تصحیح تداخل‌سنجی با استفاده از داده‌های MERIS	۱/۱۸	۵/۵۴	۲/۳۷

با توجه به مقادیر جابه‌جایی در محل ایستگاه، قبل از اعمال تصحیحات مربوط به لایهٔ وردسپهر، میزان بهبود نتایج در ایستگاه‌های TA03 و BA03 بیشتر از سایر ایستگاه‌ها است و این حاکی از تفاوت بسیار شرایط آب‌وهوایی در ناحیهٔ مربوط به این دو نقطه در دو تصویر راداری، و نمایانگر نقش تعیین‌کننده بخار آب و فشار جوّ در تعیین میدان جابه‌جایی آن ناحیه است. در محل ایستگاه‌های BA03، BA04، BA05، TA01 و TA02 و

شاهد بیشترین اختلاف بین نتایج به‌دست آمده از دو روش تصحیح هستیم که همان‌طور که در قسمت ارزیابی کیفی نیز مطرح شد، این اختلاف در نواحی جنوبی و شرقی ناشی از وجود پیکسل‌های ابری و تغییرات شاخص‌های لایۀ وردسپهر در این نواحی است. با در اختیار داشتن میزان جابه‌جایی ارتفاعی ایستگاه‌های GPS و نتایج به‌دست آمده از تداخل‌سنجی راداری، میزان RMSEو سایر شاخص‌های آماری مربوط به نتایج در دو حالت استفاده از تصحیحات وردسپهری به‌دست آمد (جدول ۴).

مشاهده می‌شود که میزان RMSE نتایج تفاوت چشمگیری با یکدیگر ندارند و داده های ERA-Interim فقط به میزان ۱/۲۳ میلی‌متر بیشتر از داده‌های MERIS، میزان RMSE را کاهش می‌دهند.

۱۴. نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که نبود تصحیحات وردسپهری در تداخل‌سنجی راداری، احتمال ایجاد دو مشکل در نتایج کسب شده را افزایش می‌دهد:

۱- اشتباه در تشخیص سیگنال ژئودینامیک

۲- خطا در اندازۀ بردارهای جابه‌جایی میدان به‌دست آمده

میزان تاثیر وردسپهر خشک بر تک‌سیگنال راداری، بسیار بیشتر از وردسپهر تر بود ولی به‌سبب تغییرات بسیار کم اندازۀ فشار سطوح جوّ در طول زمان، برخلاف تغییرات زمانی زیاد بخار آب، در حالت تفاضلی، میزان تاثیر وردسپهر تر بیشتر از وردسپهر خشک برآورد شد. همچنین ملاحظه شد که تصحیحات وردسپهری با داده‌های ERA-Interim ۳۰/۶ و با داده‌های MERIS ۲۹/۳۷ میلی‌متر، RMSE به‌دست آمده از نتایج تداخل‌سنجی راداری را کاهش داده‌اند. بیشترین اختلاف بین نتایج دو روش تصحیح در ایستگاه‌های BA03،BA04، BA05، TA01 و TA02 و کمترین اختلاف در ایستگاهای TA04 و TA03 دیده شد .در نتیجه در صورت نبود ابر در ناحیه در زمان تصویربرداری، نتایج دو نوع داده، اختلاف چندانی ندارند ولی در صورت وجود ابر و به‌طور شاخص‌تر، ابرهای کومه‌ای، استفاده از داده‌های MERIS چندان توصیه نمی‌شود. در صورت مساعد بودن شرایط جوّ در زمان تصویربرداری و همچنین تغییرات مسطحاتی کم عوامل جوّی از جمله فشار و بخار آب که باعث افزایش دقت درون‌یابی می‌شود، نتایج تصحیحات تداخل‌نگار با دو نوع داده جوّی ERA-Interim و MERIS تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد.

مراجع

ادهم خیابانی، س.، ۱۳۸۶، طراحی و توسعه مدل مناسب جهت حذف خطاهای جوّی از تصاویر رادار با تأکید بر داده‌های ENVISAT، پایان‌نامۀ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

حاجی‌آقاجانی، س.، ۱۳۹۳، تحقیقی در خطای وردسپهری مشاهدات تداخل‌سنجی راداری و تأثیر آن بر صحت میدان‌های سرعت مستخرج از آن، پایان‌نامۀ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

Bevis, M., Chiswell, S., Businger, S., Herring, T. A. and Bock, Y., 1996, Estimation wet delays using numerical weather analysis and predictions, Radio Science, 31(3), 477-478.

Doin, M. P., Lasserre, C., Peltzer, G., Cavalié, O. and Doubre, C., 2009, Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models, J. Appl. Geophys., 69, 35-50, doi: 10.1016/j.jappgeo.2009.03.010.

European centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 2005, 2013, User Guide European center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), User Guide.

European Space Agency, 2006, MERIS Handbook.

Hanssen, R. F., 1998, Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry, 136 pp., Delft Univ. Press, Delft, Netherlands.

Hanssen, R. F., 2001, Radar interferometry: data interpretation and error analysis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Jet Propulsion Laboratory, 1979, Seasat (Interim Geophysical Data Record) user's handbook, initial version, altimeter, NASA Rep. 622-97.

Julivet, R., Grandin, R. and Lassere, C., 2011, Systematic In SAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data, geophysical research letters, 38, L17311.

Kramer, H. J., 2002, Observation of the earth and its Environment, Springer.

Li, Z., Muller, J.-P., Cross, P. and Fielding, E. J., 2005, Interferometric synthetic aperture radar (In SAR) atmospheric correction: GPS, moderate resolution imaging Spectroradiometer (MODIS), and in SAR integration, J., Geophys. Res., 110, B03410, doi:10.1029/2004, JB003446.

Saastamoinen, J., 1992, Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in the use of artificial satellites for Geodesy, Geophys. Monogr. Ser., 15, edited by Henrikson, S.W., Mancini, A. and Chovitz, B. H., 247-252, AGU, Washington, D. C.

Zebker, H. A., Rosen, P. A. and Hensley, S., 1997, Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, J. Geophys. Res., 102(B4), 7547-7563.

Journal of the Earth and Space Physics, Vol. 42, No. 3, Autumn 2016, P. 11

Comparison of ERA-Interim global meteorological reanalysis model and MERIS data to reduce the tropospheric effects in InSAR displacement velocity fields

Haji Aghajany, S.[1*] and Voosoghi, B.[2]

1. Ph.D. Student, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 25 Aug 2014, Accepted: 18 Oct 2016)

Summary

The main limitation of radar interferometry in measuring ground displacements is due to phase propagation delays caused by the troposphere. Tropospheric water vapor is a major limitation for high precision Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) applications. Using global meteorological reanalysis models and MERIS data are two methods that can be used for correcting the effects of the troposphere. The purpose of this study is comparison of these two methods. The MERIS instrument is located on the platform of ENVISAT satellite and measures reflected solar radiation. We adopt the use of data of this sensor for our study as MERIS provides a direct estimate of atmospheric water simultaneously with Synthetic Aperture Radar (SAR) acquisition. ERA-Interim is a global atmospheric model computed by the ECMWF based on a 4D-Var assimilation of global surface and satellite meteorological data .This reanalysis provides values of several meteorological parameters on a global 70 km grid from 1989 to the present day, at 0 am, 6 am, 12 pm and 6 pm *Universal Time Coordinated*) UTC) daily. The vertical stratification is described on 37 pressure levels, densely spaced at low elevation (interval of 25 hPa), with the highest level around 50 km (1 hPa). For each acquisition date, we select the ERA-Interim and MERIS outputs that are of the closest time spans to the SAR acquisition time. A Kriging interpolation in the horizontal dimensions and a spline interpolation along altitude is then applied to produce a map of the predicted delay. Total delay maps at epoch of acquisitions are then combined by pairs to produce differential delay maps corresponding to each interferogram. The use of the precise formulation of the single path delay and of the profiles of temperature, water vapor and dry air partial pressure is of importance to compute an accurate delay function. We used the two ENVISAT radar acquisitions of a region in the north west of Iran. We calculated the displacement velocity field and we corrected it (by ERA-Interim and MERIS data) and then compared the results with reported displacement velocities of GPS stations. The RMSE of two methods were 1.84 mm and 2.37 mm. The maximum difference between two methods is about 7.7 mm. This difference could be due to the presence of cloudy pixels in the MERIS data. The minimum difference between two methods is about 0.3 mm. The reason for this difference is negligible horizontal changes in the tropospheric indicators. The results show that cloudy weather and changes in the troposphere indicators, are the most important factors in the accuracy of the results of the two methods.

keywords: Troposphere, InSAR, ERA-Interim, MERIS.

---

*Corresponding author: S_h_aghajany@mail.kntu.ac.ir