

کاهش اثر بخار آب جو بر روی محصولات تداخل سنجی راداری به کمک داده‌های GPS و MERIS-FR (مطالعه موردی: فرونشست دشت مشهد)

سینا ادهم خیابانی^{۱*}، محمدرضا مبشری^۱، محمدجواد ولدان زوج^۱ و مریم دهقانی^۲

^۱ دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
^۲ گروه مهندسی راه و ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز، شیراز، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۸/۰۸ تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۷/۱۹

چکیده

تداخل سنجی راداری از روش‌های شناخته شده سنجش از دور است که کاربردهای آشکاری در مطالعه جابه‌جایی‌های سطحی زمین دارد. جو، بر خلاف دیگر عوامل تأثیرگذار بر روی اندازه‌گیری‌های تداخل سنجی راداری، رفتاری غیر قابل پیش‌بینی و نسبتاً پیچیده دارد که بسته به شرایط مختلف زمان‌های تصویربرداری، نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق مدلی با توجه به جنس خطا برای کاهش اثر جو، برای فرونشست زمین در استان خراسان مطالعه شده است. در این مدل، از داده‌های تمام تفکیک (FR) (سنجده MERIS برای برآورد اثر بخار آب و داده‌های سینوپتیک هواشناسی برای کاهش اثر فشار استفاده شده است. همچنین اثر قطرات آب و ابر نیز در این مدل در نظر گرفته شده است. برای تداخل نمای مورد استفاده، میزان خطای حاصل از انتشار خطاها برای مدل، برابر ۷/۶ میلی‌متر برآورد شده است. از سوی دیگر، مقایسه نتایج حاصل از تداخل سنجی و داده‌های نقطه‌ای GPS، تغییر میزان RMSE از مقدار بیش از ۹ میلی‌متر پیش از تصحیح به حدود ۲ میلی‌متر پس از تصحیح را نشان داده است.

کلید واژه‌ها: سنجش از دور، فرونشست، تداخل سنجی راداری، GPS، MERIS

***نویسنده مسئول:** سینا ادهم خیابانی

E-mail: Adham@IEEE.org

۱- مقدمه

فاز تداخل سنجی راداری موجود در یک تداخل نما، دارای مؤلفه‌های مختلفی به شرح زیر است:

۱- اختلاف ارتفاع بین سطح مینا و سطح زمین یا به عبارتی توپوگرافی، ۲- تغییرات سه‌بعدی سطحی زمین بین دو تاریخ تصویربرداری یا اثر جابه‌جایی، ۳- تغییر هندسه تصویربرداری یا اثر خط مینا، ۴- تغییر ضریب شکست مسیر بین دو لحظه تصویربرداری یا اثر جو، ۵- نوفه (نویز)

مطالعه جابه‌جایی سطوح، یکی از مهم‌ترین کاربردهای تصاویر تداخل سنجی راداری است. در این گونه مطالعات تمام سیگنال‌های موجود در تصویر به جز آنهایی که حاصل از جابه‌جایی هستند به عنوان اثر مزاحم شناخته شده و نیازمند اصلاح هستند. معمولاً اثرات ناشی از توپوگرافی و نوفه و خط مینا در هنگام پردازش تصاویر به کمک داده‌های کمکی مانند مدل‌های رقومی ارتفاعی زمین و روش‌های شناخته شده تا حد مطلوبی کاهش می‌یابند. اما اثر جو بر خلاف دیگر موارد به دلیل تغییرپذیری میزان و الگوی اثر و همچنین برخی دشواری‌های موجود نیازمند توجه جداگانه‌ای خواهد بود (Zebker et al., 1997).

برای تعیین اثر جو بر سیگنال راداری، ابتدا مسیر انتشار موج راداری در خلأ در نظر گرفته می‌شود (Zebker et al., 1997). در این حالت، ضریب شکست محیط برابر یک در نظر گرفته شده و فاز موج راداری از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (1)$$

در این رابطه λ طول موج و x فاصله طی شده توسط سیگنال راداری است.

حال اگر مسیر انتشار جو زمین در نظر گرفته شود، رابطه (۲) معرف فاز سیگنال راداری خواهد بود. در این رابطه ضریب شکست محیط به صورت $1+10^{-6}N(x)$ بوده که $N(x)$ ضریب شکست اضافی حاصل از وجود ذرات و گازهای مختلف در جو است.
$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} x + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \quad (2)$$
 در اینجا $\Delta x = 10^{-6}N(x)$ نمایانگر اختلاف فاصله اضافی ناشی از شکست موج در جو است. (Smith & Weintraub, 1953). ضریب شکست جو را به صورت رابطه (۳) تعریف کردند.

$$N = k_1 \frac{P}{T} + \left(k_2' \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) - 4.028 \times 10^7 \frac{n_e}{f^2} + 1.45w \quad (3)$$

در این رابطه P فشار هوای بر حسب hPa، e فشار جزئی بخار آب بر حسب hPa، T دمای مطلق بر حسب کلوین، W میزان آب تبخیر نشده موجود در جو بر حسب میلی‌متر، n_e تعداد الکترون‌های موجود در جو و f بسامد موج حامل بر حسب هرتز هستند. همچنین k_1 ، k_2' و k_3 مقادیر ثابت تجربی هستند. این مقادیر به ترتیب $77.6 K hPa^{-1}$ ، $23.3 K hPa^{-1}$ و $3.75 \times 10^5 K^2 hPa^{-1}$ در نظر گرفته می‌شوند (Smith & Weintraub, 1953). در این رابطه، عبارت اول مبین تأثیر فشار هوا، عبارت دوم نیز حاصل تأثیر رطوبت و به طور کلی بخار آب موجود در جو است و عبارت‌های سوم و چهارم نیز به ترتیب اثر یون‌سپهر (Ionosphere) و قطره‌های آب موجود در جو را شامل می‌شود.

اثر تغییر ضریب شکست در فاز تک تصویر راداری نسبتاً زیاد خواهد بود، اما به طور خلاصه می‌توان گفت که تأثیر جو بر روی تداخل نما بر اثر اختلاف تأخیر ناشی از تغییر پارامترهای تأثیرگذار جو بر فاز سیگنال راداری ایجاد می‌شود (Hanssen, 1998). بدیهی است هر چه شرایط آب و هوایی بین دو زمان تصویربرداری، بیشتر متغیر باشد، اثر جو بر تصاویر بیشتر خواهد شد.

به طور معمول اثر فشار هیدروستاتیکی (هوای خشک) یا به عبارت دیگر اثر فشار هوا بر روی تک تصویر راداری آشکارتر خواهد بود، اما این اثر به دلیل تغییرات محدود فشار هوا در زمان‌های مختلف، در تصاویر تداخل سنجی راداری معمولاً کم اهمیت‌تر از دیگر تأثیرات است (Hanssen, 2001). در واقع در تصاویر تداخل سنجی راداری، اثر فشار هوا و یون‌سپهر به دلیل تغییرات نسبتاً نرم و بسامد پایین آن به صورت یک خطای همگن نمایان می‌شوند (Zebker et al., 1997). خطاهای همگن به کمک نقاط ثابت اندازه‌گیری شده در سطح زمین و یا اندازه‌گیری پارامترهای مربوطه در تعداد محدود نقاط در صحنه تصویربرداری و تعمیم آن به کل صحنه (Li et al., 2005) تا حد قابل قبولی قابل حذف هستند. از سوی دیگر، تأثیر بسامد بالاتر مانند اثر موجودی بخار آب و یا اثر ابر باعث ایجاد خطاهای ناهمگنی می‌شوند که به آسانی به روش‌های میانگین‌گیری، قابل حذف نخواهد بود (Li et al., 2005) در فعالیت‌هایی که تاکنون در زمینه اصلاح جوی با توجه به ماهیت خطاها انجام شده است، خطای جوی ناشی از بخار آب، بیش از

۳-۲. تصاویر MERIS

سنجده MERIS بر روی ماهواره ENVISAT قرار دارد که ۱۵ باند طیفی در محدوده مرئی و فروسرخ نزدیک دارد (Kramer, 2002). قدرت تفکیک مکانی این سنجده در مد تمام تفکیک برابر ۳۰۰ متر و برای مد RR (Reduced Resolution) حدود ۱۲۰۰ متر است. تصاویر تمام تفکیک معمولاً برای کاربردهای زمینی و تصاویر RR برای کاربردهای اقیانوسی پیشنهاد شده‌اند (ESA, 2006).

مأموریت اصلی این سنجده مطالعات اقیانوسی است (Kramer, 2002). اما این سنجده با توجه به طراحی طیفی انجام شده، کاربرد گسترده‌ای در مطالعات جوی دارد. از آنجا که این سنجده با سنجده راداری ASAR که بر روی همین ماهواره قرار گرفته است، در یک زمان از یک مکان تصویربرداری می‌کند و با توجه به تغییرات زمانی جوی، این سنجده در تصحیح تصاویر ASAR کاربرد فراوانی دارد. از باندهای ۱۴ و ۱۵ این سنجده برای استخراج بخار آب استفاده می‌شود (Albert, 2004). مشخصات این باندها در جدول ۱ نمایش داده شده است. شکل ۳ نشان‌دهنده موقعیت و پهنای باندهای بیان شده در نمودار گذردهی جوی در محدوده فروسرخ نزدیک است. در مرکز گسیل و توزیع داده‌های تصاویر MERIS، یک محصول بخار آب آماده شده از همین تصاویر وجود دارد. عدم قطعیت بخار آب تخمینی MERIS در مد تمام تفکیک برابر ۱۰ درصد میزان بخار آب برآورد شده است (ESA, 2006).

۴-۴. کاهش اثر جو

در این مرحله مدل کاهش اثر جو بر اساس سه اثر مهم تروپوسفری (بخار آب، ابر و فشار سطح) تهیه و با توجه به ماهیت خطاها به تصاویر تداخل‌سنجی راداری اعمال می‌شود. لازم به یادآوری است که مدل تصحیح خطای جوی در این پژوهش، توسط زبان برنامه‌نویسی C#NET ایجاد شده است. همچنین اثر خط مبنا و اثر یونسفر بدون توجه به ماهیت خطا و با روش ریاضی کاهش خواهند یافت.

۴-۱. مدل کاهش اثر بخار آب

مدل‌سازی اثر بخار آب به کمک تصاویر MERIS-FR انجام می‌شود. البته محصول بخار آب حاصل از این تصاویر، در مناطق ابری اعتبار ندارد (ESA, 2006). این امر به دلیل پراکنش غیر انتخابی ابر در باندهای جذبی بخار آب است (مباشری، ۱۳۸۵). در این تصاویر مقادیر بخار آب در مناطق ابری معمولاً نزدیک به صفر برآورد شده است. در این بخش، ابتدا به معرفی سنجده MERIS پرداخته خواهد شد. سپس برآورد تصحیح مناطق ابری در تصاویر MERIS مورد بحث قرار خواهد گرفت. در مرحله بعد نیز استخراج میزان خطای ناشی از بخار آب بر روی تصاویر تداخل‌سنجی راداری محاسبه خواهد شد.

– **تصحیح ابر محصول بخار آب تصاویر MERIS:** با توجه به این موضوع که در مناطق ابری هوا از بخار آب اشباع است، میزان بخار آب نقاط ابری با کمک مناطق اطراف ابر محاسبه شد. البته با توجه به اینکه این فرض برای ابرهای گسترده و ابرهای کومه‌ای نسبتاً وسیع با خطای محسوسی همراه خواهد بود، تلاش شد تا این نقاط شناسایی و کنار گذاشته شود. البته با مطالعه نقشه‌های ابر استخراج شده از تصاویر، مشخص شد که در تصاویر حاضر چنین ابرهایی وجود نداشتند.

برای استخراج میزان بخار آب از روش همسایگی وزن‌دار استفاده شد. (Li et al., 2005). در این روش یک پنجره ۱۵×۱۵ پیرامون پیکسل ابری در نظر گرفته می‌شود و مقدار ابری بودن مرکز پنجره با کمک میانگین وزن‌دار پیکسل‌های بدون ابر موجود در همسایگی درون‌یابی می‌شود. وزن مقادیر مختلف موجود در همسایگی در این روش، با معکوس فاصله آن سلول، با سلول، مرکزی تعیین می‌شود. – **تهیه نقشه تفاضلی خطا:** برای تهیه نقشه تفاضلی خطا لازم است میزان خطای زینتی در هر دو تاریخ به دست آید و سپس در جهت تفاضل تداخل‌نگاشت از هم کم شود. برای تبدیل میزان بخار آب موجود در جو به خطای زینتی از رابطه (۵) استفاده

دیگر موارد، مورد توجه واقع شده‌است (Li et al., 2005) با استفاده از تصاویر MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) خطای ناشی از بخار آب را در شرایط بدون ابر از روی تصاویر تداخل‌سنجی راداری کاهش دادند. آنچه در این مقاله بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است، توجه به همه عوامل خطاساز در منطقه نیمه‌کوهستانی منطقه خراسان رضوی برای رسیدن به دقت اندازه‌گیری بهتر و بارزسازی الگوی فرونشست زمین است.

در این مقاله، هدف ارائه مدلی برای کاهش اثر جو بر تصاویر تداخل‌سنجی راداری به منظور بهبود نتایج مطالعات فرونشست و بارزسازی سیگنال‌های فرونشست از نظر شکلی است. در این راستا و در بخش ۲، منطقه مورد مطالعه معرفی خواهد شد. داده‌های مورد استفاده در بخش ۳ معرفی می‌شوند. آنگاه مدل ارائه شده برای کاهش اثر جو در بخش ۴ مورد بحث قرار خواهد گرفت. برای این کار، مدل کاهش اثر بخار آب به کمک تصاویر نوری و مشخصاً تصاویر سنجده MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) به همراه مدل کاهش اثر ایستایی معرفی خواهند شد. همچنین روش‌های به کار رفته برای کاهش دیگر آثار نیز بیان خواهد شد. در نهایت ارزیابی جامعی از مدل ارائه شده و نتایج حاصل از فرایند اصلاح جوی آورده خواهد شد.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بخشی از استان خراسان رضوی و در حوالی شهر مشهد است. مطالعات زمین‌شناسی و تداخل‌سنجی راداری در این محدوده، حاکی از فرونشستی قابل توجه در منطقه طوس بوده است (جمور و همکاران، ۱۳۸۴؛ Dehghani et al., 2009; Motagh et al., 2006). این فرونشست در گزارش مطالعات GPS (Global Positioning System) نیز آورده شده است.

۳- داده‌های مورد استفاده

۳-۱. تصاویر تداخل‌سنجی

تصاویر تداخل‌سنجی با توجه به توانایی به تصویر کشیدن و فراهم کردن داده‌های پیوسته در یک بازه مکانی نسبتاً وسیع، ابزار مناسبی برای مطالعات جابه‌جایی زمین (از نظر الگوی تغییرات و میزان آن) هستند (Zebker et al., 1997). تداخل‌نماهای انتخاب شده در این تحقیق به وسیله تصاویر سنجده ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) از ماهواره ENVISAT و با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی (Differential InSAR) تهیه شده‌اند. تصاویر مورد استفاده در این بخش در باند C و تحت قطبش (VV) (Polarization) از مسیر ۳۹۲ برداشت شده‌اند. در این تداخل‌نما، تصویر اولیه (Master) مربوط به دوازدهم ماه سپتامبر سال ۲۰۰۵ میلادی و تصویر ثانویه (Slave) مربوط به هفدهم ماه اکتبر سال ۲۰۰۵ میلادی بود. برای اندازه‌گیری میزان فرونشست و همچنین استخراج شکل و الگوی فرونشست نیاز است تا خطاهای مختلف و آثار غیرهدف (توپوگرافی و جو و ...) حذف شوند. در این راستا، در هنگام تشکیل تصویر، نوبه به کمک فیلتر تطبیقی (Goldstein & Werner, 1998) و اثر توپوگرافی به کمک مدل رقومی ارتفاعی تشکیل شده به کمک داده‌های SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) کاهش داده شدند. بیشینه مقدار فرونشست در این منطقه ۲۴ سانتی‌متر در سال است. نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری با داده‌های GPS و تراز یابی ارزیابی شد (Dehghani et al., 2009).

تداخل‌نمای پردازش شده تا این مرحله در شکل ۲ به نمایش درآمده است. از میان سه اثر باقی‌مانده، اثر جابه‌جایی به عنوان سیگنال مد نظر بوده و اثر خط مبنا نیز به علت رفتار نسبتاً مشابه با برخی پارامترهای جوی (Hanssen, 2001)، به همراه اثر جو برای کاهش مورد مطالعه واقع می‌شود.

شود، می‌توان تأخیر سیگنال را با دقت ۱ میلی‌متر و یا بهتر برآورد کرد (Hanssen, 2001). نکته حائز اهمیت در اینجا این است که باید تعداد نقاطی که فشار سطحی آنها به روش فشارسنجی (بارومتري) و در زمان تصویربرداری به دست آمده‌اند، در حدی باشد که بتوان تأخیر را در کل صحنه تصویربرداری به دست آورد (Zebker et al., 1997). همچنین می‌توان فشار را برای تعداد محدود نقاط از داده‌های سینوپتیک استخراج کرد و با استفاده از روش‌های درون‌یابی یا استفاده از نقشه سطوح هم فشار، نقشه پهنه‌بندی فشار را به دست آورد. روش دیگر به دست آوردن نقشه پهنه‌بندی فشار نیز محاسبه گرادیان افقی فشار در دو زمان تصویربرداری است. برای مدل‌سازی اثر فشار از داده‌های سینوپتیک استفاده شد. فشار سطح برای تاریخ‌های ۱۲ سپتامبر و ۱۷ اکتبر نیز برابر ۸۹۹/۷ و ۹۰۷/۱ میلی بار بود. سرعت باد نیز در ساعات تصویربرداری بسیار ناچیز بوده است به گونه‌ای که در گزارش هواشناسی صفر منظور شده است. می‌توان نتیجه گرفت که گرادیان افقی فشار در دو تاریخ کم و با هم برابر خواهد بود (مباشری، ۱۳۸۵). از این رو با توجه به رابطه (۸) میزان خطای فشار برای هر دو تاریخ محاسبه شد و نقشه تفاضلی خطا تهیه شد.

۳-۴. مدل کاهشی اثر قطره

برای مناطق ابری، میزان بخار آب برآورد شده است. اما لازم است تا تصحیح اضافه قطره‌های آب نیز برای این مناطق انجام شود. میزان آب ابرهای موجود و همچنین ضخامت هندسی ابرها عواملی هستند که برای تعیین خطای قطره‌های آب مورد نیاز هستند. از آنجا که ارتفاع ابرها، ضخامت هندسی در راستای دید سنجنده و همچنین چگالی بخش‌های مختلف ابرها بسیار متغیر است، در نظر گرفتن چنین پارامتری دشوار است (Paperin, 2007). همچنین از آنجا که بیشتر مطالعات ابرها در راستای زینتی هستند، اعمال چنین تصحیحی در راستای سنجنده باید بسیار دقیق انجام شود. داده‌های MERIS، اطلاعات بسیار خوبی در مورد نوع و ارتفاع لایه بالایی ابرها می‌دهد. می‌توان از این اطلاعات، به همراه داده‌های زمینی ضخامت هندسی ابرها، برای تصحیح جوی تصاویر، استفاده کرد.

با توجه به جدول ۲ می‌توان مقدار خطای زینتی قطره‌های آب را بر حسب میلی‌متر بر کیلومتر برآورد کرد. حاصل ضرب این مقدار در ضخامت هندسی ابر منجر به خطای کل می‌شود. میزان خطای زینتی ناشی از ابرهای موجود در این مرحله با توجه به نقشه‌های نوع ابر MERIS برآورد شد. با توجه به نوع ابرهای مشخص شده در نقشه‌ها، در این مرحله و با توجه به این که دید زمینی به مناطق با ابرهای رقیق وجود داشت، از ضخامت اپتیک به جای ضخامت هندسی کمک گرفته شد. این پارامتر از تصاویر MERIS استخراج شدند. در انتهای این مرحله نیز میزان خطای زینتی ناشی از اثرات دیگر هم که پیش از این محاسبه شده بود به این تصویر اضافه شد تا میزان خطای زینتی ناشی از پارامترهای تروپوسفری برآورد شود.

۴-۴. اعمال مدل بر روی تداخل‌نما

اعمال مدل خطا بر روی تداخل‌نما با تفريق مدل معادل فاز خطای زینتی کل انجام می‌پذیرد. رابطه (۹) نشان‌دهنده ارتباط بین خطای زینتی و اختلاف فاز معادل آن بر روی تصاویر تداخل‌سنجی راداری است (Zebker et al., 1997).

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\Delta x}{\cos\theta_i} \quad (9)$$

در این رابطه Δx خطای زینتی کل، θ_i زاویه فرود و λ طول موج اندازه‌گیری راداری است. با توجه به رابطه (۹) و عملیاتی که تا این مرحله انجام شده است، شکل ۴ به عنوان تصویر اختلاف فاز معادل خطا به دست آمده است. اکنون لازم است تصویر مذکور از تداخل‌نما کم شود. برای این منظور، تداخل‌نما، پیکسل به پیکسل پیموده شد و خطای جوی هر پیکسل از تصویر خطا استخراج گردید.

پس از اعمال این مدل بر روی تصویر تداخل‌سنجی راداری، لازم است خطاهای خطی مانند خطای یون سپهر و همچنین خطای خط مبنا مورد توجه قرار گیرند. برای این امر کافی است دست کم سه نقطه ثابت اندازه‌گیری شده در خارج از منطقه فرونشست انتخاب

می‌شود (Hanssen, 2001). رابطه (۵) بر اساس رابطه تأثیر بخار آب قابل بارش بر تأخیر زینتی رابطه (۴) به دست آمده است.

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_{z,i,p,v} &= 10^{-6} R_v \left(k_2' + \frac{k_3}{T_m} \right) \rho_1 \frac{1}{\rho_1} \int \rho_v dh \\ PWV &= \frac{1}{\rho_1} \int \rho_v dh \end{aligned} \right. \quad (4)$$

در واقع رابطه (۴)، شکل جدیدی از جمله اثر بخار آب در رابطه (۳) است. در این رابطه برای تفکیک بخار آب قابل بارش (PWV=Perceptible Water Vapor)، چگالی آب مایع ρ_1 در صورت و مخرج کسر ضرب شده است. در این رابطه ضرایب k_2' و k_3 مقادیر ثابت تجربی هستند. این مقادیر به ترتیب 23.3 K hPa^{-1} و $3.75 \times 10^5 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ در نظر گرفته می‌شوند (Hanssen, 2001). همچنین ضرایب ثابت جهانی گازها برای بخار آب $R_v = 461.524 \text{ J K}^{-1} \text{ Kg}^{-1}$ و T_m میانگین دمای مقطع دارای بخار آب هستند. افزون بر این δ خطای زینتی رنج بر حسب متر، ρ_1 چگالی آب مایع بر حسب $10^6 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ و ρ_v چگالی بخار آب است. در این رابطه بخش غیر متعلق به بخار آب قابل بارش، Π^{-1} نامیده شده است.

$$\delta_{z,i,p,v} = \Pi^{-1} PWV \quad (5)$$

در رابطه (۵)، پارامتر Π^{-1} یا پارامتر مبدل بخار آب به تأخیر زینتی به دمای متوسط ستون جو بستگی دارد. این پارامتر برای دو تاریخ تصویربرداری به کمک داده‌های سینوپتیکی اخذ شده از سازمان هواشناسی کشور در نقطه مشهد (تقریباً در مرکز تصاویر بوده است) و جدول استاندارد هواشناسی به دست آمد. این مقدار برای تاریخ‌های ۱۲ سپتامبر و ۱۷ اکتبر به ترتیب ۶/۱ و ۶/۱۷ در نظر گرفته شد. پس از تبدیل بخار آب به خطای زینتی لازم بود تا نقشه تفاضلی خطای بخار آب به دست آید. این عملیات به کمک تفاضل پیکسل‌های متناظر انجام پذیرفت.

۴-۲. مدل کاهشی اثر فشار

برای به دست آوردن خطای ناشی از تغییر فشار بین دو زمان تصویربرداری، نیاز است تا نيمرخ تغییر فشار ستون جوی در هر دو تاریخ به دست آید که چنین چیزی برای تمام نقاط دو تصویر بسیار دشوار است. (Saastamoinen, 1972) رابطه‌ای جایگزین برای نیمرخ جوی پیشنهاد کرد که با استفاده از مقادیر سطحی فشار، میزان تأخیر ناشی از این پارامتر را تقریب می‌زند. براساس مدل (Saastamoinen, 1972) فشار سطح از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$P_s = g_m \int_0^\infty \rho(z) dz \quad (6)$$

در این رابطه g_m شتاب گرانش محلی در مرکز ستون جو است که به کمک رابطه (۷) قابل محاسبه است (Hanssen, 2001).

$$g_m = 9.784(1 - 0.0026 \cos 2\Phi - 0.00028 Z_0) \quad (7)$$

در این رابطه Z_0 ارتفاع سطح و Φ عرض جغرافیایی هستند. با استفاده از این رابطه و رابطه (۶)، تأخیر ناشی از فشار هوا بر تک سیگنال راداری از رابطه (۸) قابل محاسبه خواهد بود (Hanssen, 2001).

$$ZHD = 10^{-6} k_1 \frac{R_d}{g_m} P_s \quad (8)$$

در این رابطه ZHD تأخیر زینتی ناشی از فشار ایستایی و P_s فشار سطح است. همچنین در این رابطه k_1 مقدار تجربی است و برابر با 77.6 K hPa^{-1} در نظر گرفته شده است. همچنین Rd ثابت جهانی گازها برای هوای خشک است که برابر با $287.053 \text{ J K}^{-1} \text{ Kg}^{-1}$ در نظر گرفته شده است.

رابطه (۸) نشان می‌دهد که در شرایط عادی و در زمانی که فشار در حدود ۱۰۰۰ میلی بار است، فشار هوا تا ۲/۳ متر بر روی سیگنال راداری، تأخیر ایجاد می‌کند. اما نکته قابل توجه این است که فشار هوا در یک نقطه از یک منطقه مشخص بیش از چند میلی بار در شرایط آب و هوایی متفاوت تغییر نمی‌کند. این مسئله باعث می‌شود که فرم تفاضلی در این رابطه، به عدد بسیار کوچک تری نسبت به ۲/۳ متر (حدود ۲ میلی‌متر در هر میلی بار اختلاف فشار) منتج گردد. از سوی دیگر، تغییر فشار هوا نسبت به محتویات بخار آب از تغییرات نرم‌تری برخوردار است.

استفاده از این رابطه، نشان داد که اگر فشار سطحی با دقت 0.4 hPa محاسبه

بین دو تاریخ برداشت تداخل سنجی به کمک نقاط GPS برآورد شد. در مرحله بعدی نقاط GPS بر روی تداخل نما مشخص شدند. سپس مقادیر جابه جایی‌ها در این نقاط، از تداخل نماهای پیش و پس از تصحیح جوی استخراج شدند. نتایج مقایسه تغییرات در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده میزان RMSE (Root-Mean Square Error) نقاط GPS و تداخل سنجی از مقدار ۹/۳ میلی متر پیش از تصحیح به میزان ۲/۱ میلی متر پس از تصحیح بهبود یافته است. خطای RMSE در این اندازه گیری‌ها از رابطه (۱۲) به دست آمده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، N تعداد نمونه‌ها و x_i و y_i به ترتیب داده‌های تداخل سنجی و GPS در نقاط کنترل هستند.

همان گونه که دیده می‌شود نتایج اندازه گیری‌های تداخل سنجی در راستای خط دید رادار پس از تصحیح جوی در محدوده دقت خود با نقاط GPS انطباق دارند.

همچنین نمودار همبستگی داده‌های تداخل سنجی و GPS پیش و پس از تصحیح جوی در شکل ۶ نشان دهنده افزایش میزان همبستگی این داده‌ها پس از تصحیح است. در این شکل نقاط سبز مربوط به پس از تصحیح و نقاط قرمز مربوط به قبل از تصحیح هستند. خط موجود در شکل نیز همبستگی کامل را نشان می‌دهند.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق هدف ارائه روشی جهت تصحیح جوی تصاویر تداخل سنجی راداری به دست آمده از تصاویر سنجنده ASAR، بر روی ماهواره ENVISAT بود. تصاویر تداخل سنجی با فاصله زمانی ۳۵ روز برداشت شده‌اند. تصحیح جوی افزون بر افزایش دقت اندازه گیری امکان محاسبات پیوسته جابه جایی، امکان استخراج الگوی فرونشست را فراهم می‌سازد. در این راستا با توجه به رفتار جو و اثر آن بر فاز امواج راداری مدلی بر اساس تصاویر سنجنده MERIS (در مد تمام تفکیک) و داده‌های هواشناسی طراحی شد. از تصاویر MERIS به دلیل برداشت همزمان با تصاویر ASAR (به دلیل هم سکو بودن) و همچنین ارائه داده‌های همزمان ابر و فشار و بخار آب، استفاده شده است. شباهت کلی تصویر تداخلی خطا و تصویر تداخل سنجی حاکی از آن است که در منطقه مورد نظر، جو در تخریب شکل فرونشست و همچنین گزارش فرونشست‌ها و بالا آمدگی‌های غیر واقعی اثر گذار بوده است. در این بخش پس از مرحله تصحیح جوی، به کمک داده‌های GPS برداشت شده در منطقه، اعتبار سنجی نتایج انجام شد. با توجه به خطای ۷/۶ میلی متری موجود در مدل تصحیح جوی و نبود قطعیت ۷ میلی متری در داده‌های GPS، میزان خطای کمترین مربعات ۲/۱ میلی متری در انطباق داده‌های GPS، تداخل سنجی قابل قبول خواهد بود.

نتایج برای منطقه نیمه کوهستانی و در شرایط نبود وجود ابرهای کومه‌ای گسترده، به دست آمده است. در برخی از مناطق کشور وجود ابرهای کومه‌ای عمیق در برخی مناطق تصویر برداری شده، اثری مخرب و قابل ملاحظه‌ای بر برداشت‌های تداخل سنجی ایجاد می‌کند. بنابراین مطالعه و استخراج پارامترهای ابر می‌تواند در تصحیح جوی این مناطق نقش عمده‌ای داشته باشد.

سپاسگزاری

بر خود لازم می‌دانیم از سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، برای فراهم کردن داده‌های مورد نیاز و همکاری بخش دورسنجی در پردازش داده‌های راداری تقدیر کنیم. همچنین از سازمان هواشناسی کشور برای تأمین داده‌های هواشناسی سپاسگزاریم. از سازمان نقشه برداری کشور که در تأمین داده‌های GPS نویسنده‌گان را یاری نمودند، قدردانی می‌شود. همچنین از دکتر بابک منصوری، مهندس افشین نوبی و مهندس مسعود خوش سیما که از نظرات و کمک‌های ارزشمندشان بهره بردیم، کمال تشکر را داریم.

شود و صفحه‌ای به این نقاط برآزش داده شود. تصویر تداخل نما بر روی این صفحه، نتیجه نهایی عملیات تصحیح است که در شکل ۵ نشان داده شده است. لازم به توضیح است که شکل ۵ نمایش دهنده تصویر نهایی اصلاح شده برای فاصله زمانی ۳۵ روزه است.

۵- ارزیابی نتایج

ارزیابی نتایج در این مرحله بر اساس دو معیار کیفی و کمی انجام می‌گیرد. در ارزیابی کیفی مدل، تحلیل پدیده‌ها پیش و پس از مرحله اصلاح بررسی می‌شوند و در مرحله ارزیابی کمی، نتایج به دست آمده از اندازه گیری‌های عددی مورد توجه قرار می‌گیرند. با توجه به گزارش‌های متعدد زمین شناسی (Poland, 1984) و مطالعات GPS مربوط به همین منطقه میزان جابه جایی موجود در منطقه فرونشست در راستای افقی کمتر از دقت داده‌های تداخل سنجی بوده و قابل صرف نظر است. بنابراین تمام جابه جایی‌های نمایش داده شده در منطقه مورد نظر در راستای ارتفاعی در نظر گرفته می‌شود. همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ناحیه مشخص شده با عدد ۱، منطقه اصلی فرونشست است که در شکل ۵ نیز به روشنی دیده می‌شود. در شکل ۲ ناحیه ۲ بالا آمدگی و در ناحیه ۳ فرونشستی دیده می‌شود که در واقع حاصل جو هستند. این سیگنال‌ها به روشنی در شکل ۳ که تصویر خطای جوی هستند، دیده می‌شوند. در حالی که در تصویر متناظر تصحیح شده اثری از این پدیده‌ها دیده نمی‌شوند. در ناحیه ۴ که در شکل ۲ نیز پدیده بدون تغییر دیده می‌شود که با مقایسه شکل ۴ و ۵ دیده می‌شود که این اثر بالا آمدگی نزدیک به صفر بوده که به علت وجود خطای جوی در شکل تصحیح نشده و بی تغییر باقی مانده است. همان گونه که دیده می‌شود، سیگنال‌های غیر واقعی بسیار زیادی در تصویر تصحیح نشده، وجود دارند که درستی تشخیص پدیده‌ها را با مشکل رو به رو می‌کند.

در این بخش ارزیابی کمی نتایج، با آزمون درستی عددی تصویر نهایی انجام می‌پذیرد. در واقع در این مرحله با کمک نقاط ثابت GPS موجود در منطقه (واقع در داخل و خارج از منطقه فرونشست) درستی نتایج و همچنین میزان بهبودی مدل، ارزیابی شده است. اما برای انجام مرحله ارزیابی عددی مدل، در ابتدا میزان عدم قطعیت داده‌های تداخل سنجی استخراج شدند و در نهایت میزان انطباق دو نوع داده GPS و تداخل سنجی (پیش و پس از مرحله تصحیح) محاسبه شد.

برای به دست آوردن عدم قطعیت در نتایج تصحیح شده تداخل سنجی، از روش انتشار خطاها استفاده شد (Vanicek & Krakiwsky, 1986). میزان عدم قطعیت وارد شده بر اندازه گیری جابه جایی تداخل سنجی در فرایند اصلاح جوی از رابطه (۱۰) به دست آمده است (Li et al., 2006).

$$\sigma_{\Delta\rho} = \frac{\sqrt{\sigma_{ZTD1}^2 + \sigma_{ZTD2}^2}}{\cos \theta} \quad (10)$$

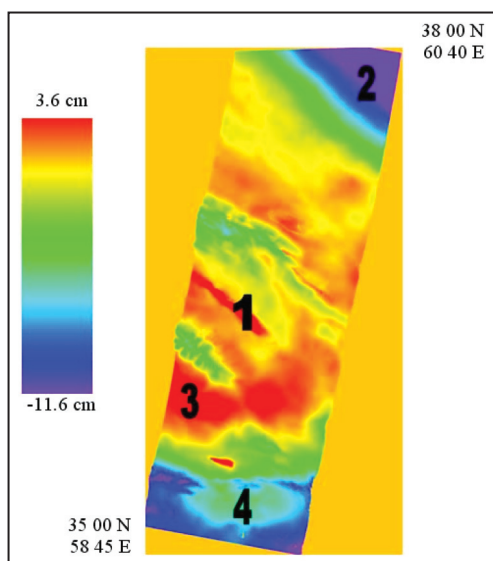
در این رابطه σ_{ZTD} خطای زینتی تأخیر تروپوسفری برای هر کدام از دو تصویر 0 زاویه دید سنجنده هستند.

برای به دست آوردن میزان عدم قطعیت در محاسبات حاضر مقدار زاویه فرود، برابر مقدار میانگین آن برای تصاویر حاضر در مد Fine یعنی ۱۸ درجه در نظر گرفته می‌شود (میزان خطای وارد شده بر کل صحنه در بیشترین میزان اختلاف زاویه از مقدار میانگین کمتر از ۰/۱ میلی متر است که از دقت اندازه گیری جابه جایی به مراتب کمتر است).

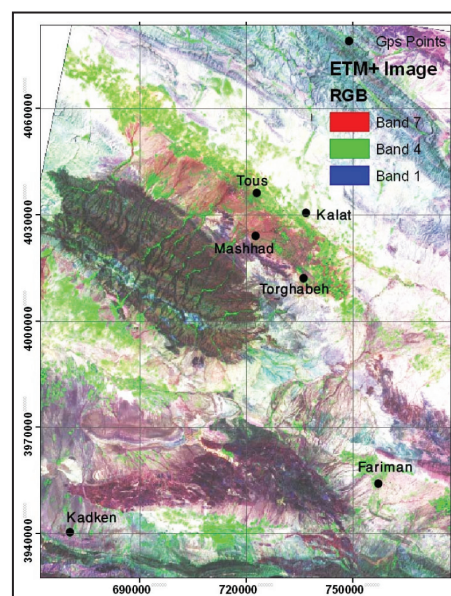
همچنین برای ZTD (Zenith Tropospheric Delay) عدم قطعیت بخار آب بر اساس بخار آب بخش متناظر تداخل نما بر روی تصاویر MERIS محاسبه شده است. بنابراین خطای ZTD از رابطه (۱۱) و به کمک خطای خشک و تر قابل محاسبه خواهد بود.

$$\sigma_{ZTD}^2 = \sigma_{ZWD}^2 + \sigma_{ZHD}^2 \quad (11)$$

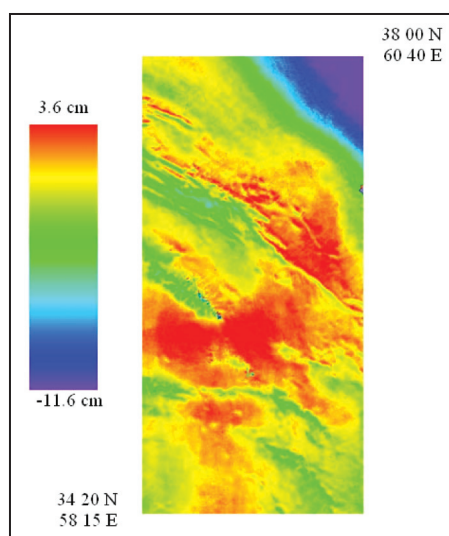
با صرف نظر از خطای جمله مبدل بخار آب (σ_{Π}^2)، میزان عدم قطعیت وارد در مرحله اصلاح جوی حدود ۷/۵ میلی متر برای هر یک از نقاط آزمون برآورد شد. این مقدار با توجه به میزان عدم قطعیت ۱۰ درصدی بخار آب تصاویر MERIS به دست آمده است. پس از تعیین میزان عدم قطعیت تصاویر، در این مرحله میزان تغییرات ارتفاعی



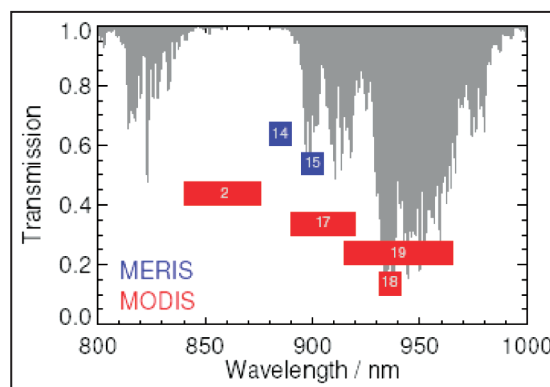
شکل ۲- تداخل نمای تشکیل شده برای مطالعه جابه جایی (حاوی اثر جو)



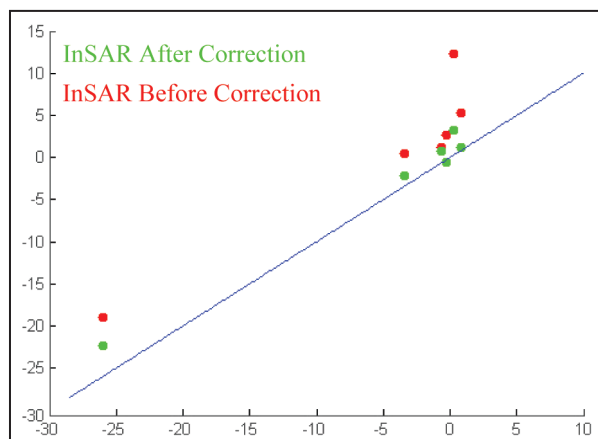
شکل ۱- ترکیب رنگی تهیه شده از تصویر ETM+ منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت نقاط GPS در داخل و خارج منطقه فرونشست که با دایره سیاه رنگ نشان داده شده است. نقاط GPS عبارتند از: طوس، کلات، مشهد، طرهبه، فریمان و کدکن.



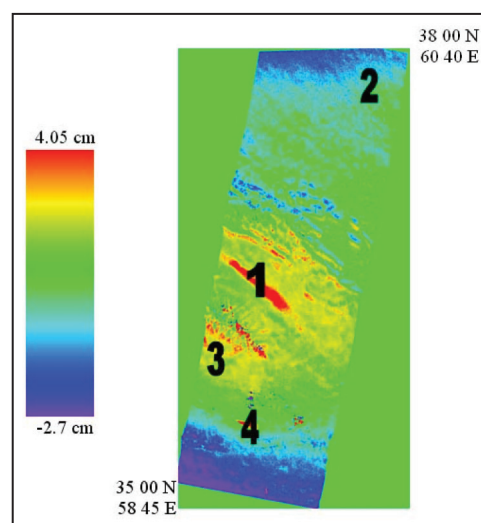
شکل ۴- تصویر خطای محاسبه شده



شکل ۳- موقعیت باندهای جذبی و گسیلی MODIS و MERIS (برگرفته از (Albert, 2004



شکل ۶- نمودار همبستگی نقاط GPS و تداخل سنجی



شکل ۵- تصویر تصحیح شده

جدول ۱- باندهای مورد استفاده در استخراج بخار آب از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و MERIS

نام سنجنده	شماره باند	مرکز باند (nm)	پهنای باند (nm)	نوع باند	SNR
MERIS	۱۴	۸۸۵	۱۰	عبوری	۳۰۰
MERIS	۱۵	۹۰۰	۱۰	جذبی	۳۰۰

جدول ۲- میزان خطای ناشی از ذرات آب موجود در ابر (Hanssen, 2001)

نوع ابر	آب مایع موجود (g/m ³)	تأخیر طولی (mm/km)
ابره‌ای استراتیفورم	۰/۰۵ - ۰/۲۵	۰/۱ - ۰/۴
ابره‌ای کومولوس کوچک	۰/۵	۰/۷
ابره‌ای کومولوس و کومولونیمبوس	۰/۵ - ۲	۰/۷ - ۳/۱
ابره‌ای یخی	۰/۱ >	۰/۱ >

جدول ۳- نتایج تصحیح به کمک داده‌های تمام تفکیک

نقطه	GPS (mm)	InSAR (mm) (Before Correction)	InSAR (mm) (After Correction)	اندازه اختلاف پس از تصحیح (میلی‌متر)
کلات	-۰/۳	۲/۷	-۰/۶	۰/۳
طرقبه	-۰/۶	۱/۲	۰/۸	۱/۴
مشهد	-۳/۴	-۰/۵	-۲/۲	۱/۲
فریمان	۰/۸	۵/۳	۱/۲	۰/۴
کدکن	۰/۳	۱۲/۳	۳/۲	۲/۹
طوس	-۲۶	-۱۹	-۲۲/۳	۳/۷

کتابنگاری

جموری، ی.، موسوی، ز.، نانکلی، ح.، رحیمی، ز.، عربی، س.، طالبی، ع.، ۱۳۸۴- گزارشی از نقشه غیر عادی در منطقه شمال مشهد مقدس، نشریه علمی-فنی نقشه برداری، شمال ۷۴. مباحثی، م.ر.، ۱۳۸۵- مبانی فیزیک در سنجش از دور و فناوری ماهواره ای، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

References

- Albert, P., 2004- Remote sensing of atmospheric water vapour for numerical weather prediction. Ph.D. Thesis of Ferei University of Berlin.
- Dehghani, M., Valadan Zouj, M., J., Biggs, J., Mansourian, A., Parsons, B. & Wright, T., 2009- RADAR Interferometry Time Series Analysis of Mashhad Subsidence, Journal of International Society of Remote Sensing (ISRS).
- European Space Agency, 2006- MERIS Handbook, Oct.
- Goldstein, R. M. & Werner, C. L., 1998- Radar interferogram filtering for geophysical applications. Geophysical Research Letters, Vol. 25, No. 21, pp. 4035 – 8.
- Hanssen, R. F., 2001- Radar Interferometry: Data interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Hanssen, R. F., 1998- Atmospheric Heterogeneities in ERS Tandem SAR Interferometry, 136 pp., Delft Univ. Press, Delft, Netherlands.
- 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 (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration, J. Geophys. Res., 110, B03410, doi:10.1029/2004JB003446.
- Li, Z., Muller, J.- P., Cross, P., Albert, P., Fischer, J. & Bennartz, R., 2006- Assessment of the potential of MERIS near-infrared water vapour products to correct ASAR interferometric measurements. International Journal of Remote Sensing Vol. 27, No. 2, P. 349–365.
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzels, H., Zschau, J. and Arabi, S., 2006- Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: Results from InSAR, Leveling and GPS, Geophysical Journal International, No. 168.
- Paperin, M., 2007- Introduction to Clouds' structures. Ph.D. Thesis of Hamburg University.. (Could be accessed in www.brockmann-consult.de/CloudStructures/introduction.htm)
- Poland, J. F., 1984- Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal, Unesco.
- Smith, E. K. & Weintraub, S., 1953- The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies, Proc. IRE, 41, 1035-1037.
- Saastamoinen, J., 1972- Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in The Use of artificial satellites for Geodesy, Geophys. Monogr. Ser., vol.15, edited by S.W. Henrikson, A Mancini, and B.H. Chovitz, pp. 247-252, AGU, Washington, D. C.
- Vanicek, P. & Krakiwsky, E., 1986- Geodesy the Concepts., Elsevier science Publishers in Netherlands.
- 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), p.7547-7563.

Reducing Atmospheric Water Vapor Effects on the Interferogrametric SAR Products using MERIS-FR and GPS (Case Study: Mashhad Subsidence)

S. Adham Khiabani^{1*}, M. R. Mobasher¹, M. J. Valadan-zoej¹ & M. Dehghani²

¹Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

²Dept. of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 2009 October 11

Accepted: 2010 October 30

Abstract

SAR interferometry has shown its abilities in measuring the surface deformation in various applications. Atmospheric signals as an important factor affecting the interferometric measurements have temporally uncorrelated and complicated behavior. In this paper, a model based on the error source is presented to reduce the atmospheric contributions on the interferometric measurements in Mashhad subsidence area. In this model, the Full-Resolution (RF) MODIS data and meteorological information were used in order to estimate the water vapor and reduce the pressure effect, respectively. Moreover, water drops as well as the clouds effects were considered in the proposed model. Utilizing error propagation, model error was estimated as 7.2 mm. The Root Mean Square Error (RMSE) as a quantitative comparison between GPS measurements and interferometric results showed an improvement from 9 mm (before atmospheric correction) to 2 mm after applying the correction model.

Keywords: Remote sensing, SAR interferometry, MERIS, GPS.

For Persian Version see pages 123 to 128

*Corresponding author: S. Adham Khiabani; E-mail:Adham@IEEE.org

The Determining of the Nature of Magmatic Encalves in Granites of Malayer Plutonic Complex based on Geochemical and Statistical Methods

R. Deevsalar^{1*}, M. V. Valizadeh² & V. Ahadnejad³

¹ Faculty of Basic Sciences, Department of Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² College of Science, Faculty of Geology, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: 2009 September 08

Accepted: 2010 October 30

Abstract

Granitic rocks of Malayer plutonic complex contain varieties of enclaves with different shapes, sizes, mineralogy and chemical composition. The interpretation of bivariate geochemical diagrams of major oxides and trace elements with respect to higher values of some of oxides such as MnO, TiO₂, MgO, CaO & FeO₂ than host rocks in one groups of enclaves and moreover linear trend of these oxides and some of trace elements such as Ni, Cr, V indicate to different nature and mafic source of these enclaves (Mafic type) than host rocks and other enclaves (Felsic type). The study of chemical composition of this enclaves by using of univariate and bivariate statistical methods (bivariate regression analysis, correlation coefficients, cluster analysis and principle component analysis) indicate clear chemical contrast between mafic enclaves with felsic enclaves and granitic host rocks and in other side chemical affinity of felsic enclaves and their host rocks. Distinctive distribution of the majority of oxides and trace elements of mafic enclaves and host rocks and low values for R² in regression analysis, low value of correlation coefficient of major element oxides and trace elements between enclaves and their host rocks, separate position of samples in cluster pattern and special direction of variants and samples of vectors in bivariate diagram of principle component analysis (PCA) are outputs of different geochemical characteristics of enclaves and host rocks. Moreover this correlates with different trends of each major oxides and trace elements in bivariate geochemical diagram (Harker diagram).

Keywords: Enclave, Host Rock, Mineralogy, Geochemistry, Correlation Coefficient, Statistical Methods

For Persian Version see pages 129 to 140

*Corresponding author: R.Deevsalar; E-mail: Reza_dsalar@yahoo.com