

ارزیابی اثر بخار آب ستونی جو بر محاسبات جابجایی سطح زمین در روش DInSAR (سنجنده ASAR)

محمد صادق پاکدامن: دانشجوی کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد، یزد، ایران*

وصول: ۱۳۹۱/۱۲/۲۶ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۱۷، صص ۱۴۶-۱۲۹

چکیده

علی‌رغم مزایای استفاده از داده‌های SAR نسبت به سایر داده‌های دورسنجی، می‌توان از اتمسفر و علی‌الخصوص بخار آب ستونی جو به عنوان اصلی‌ترین عامل محدود کننده در دقت محاسبات تداخل‌سنجی راداری نام برد. بخار آب می‌تواند با اثر بر روی فاز امواج راداری دقت محاسبات را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های همزمان بخار آب سنجنده MERIS و داده‌های راداری سنجنده ASAR، رابطه بین تغییرات مقدار ستونی بخار آب موجود در جو و خطای ناشی از آن در محاسبات جابجایی سطح زمین در ۱۶ ایستگاه مختلف در ایران مورد بررسی قرار گرفت. با مشاهده وضعیت تغییرات بخار آب اتمسفری و مقایسه مقادیر جابجایی ثبت شده توسط GPS و روش DInSAR مشخص گردید که اولاً در روش تفاضل تداخل‌سنجی دو گذره افزایش مجموع میزان بخار آب در زمان‌های اصلی و فرعی در یکتداخل‌نگار به ۴ گرم بر سانتیمتر مربع می‌تواند خطایی تا ۶ سانتی‌متر در برآورد میزان جابجایی عمودی سطح زمین ایجاد کند. ثانیاً مشخص گردید که با افزایش میزان بخار آب، خطای ناشی از آن بر روی محاسبات تداخل‌سنجی جابجایی به صورت یک تابع تواندار افزایش پیدا می‌کند. در انتها جهت تصحیح مقادیر جابجایی بدست آمده از سنجنده ASAR در حالت بدون تصحیح اتمسفری در سایر مطالعات، رابطه‌ای ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، بخار آب اتمسفری، MERIS، ASAR

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر همواره اهمیت و کاربردهای داده‌های فضا برد دهانه ترکیبی راداری (SAR) با توجه به مزیت‌های عمده‌ای که نسبت به سایر سیستم‌های سنجش از دور دارند، رو به فزونی بوده است [۱] و [۲]. در آنالیز تصاویر فاز ثبت شده غالباً از تکنیک تداخل سنجی یا تداخل سنجی راداری (InSAR) استفاده می‌نماییم [۳]. در این تکنیک با استفاده از اختلاف فاز دو تصویر راداری مختلف از یک منطقه در دو زمان مختلف، تصویر جدیدی به نام تداخل نگار یا تداخل نگار تهیه می‌گردد که حاوی اطلاعات ژئوفیزیکی از هدف مورد سنجش است [۱]. تفاوت‌های سنجش از دور راداری و دورسنجینوری و مزیت‌های ویژه‌ای که سنجش از دور راداری نسبت به سنجش از دورنوری دارد، جایگاه این شاخه از سنجش فضایی را تثبیت نموده است. از میانمزیای عمده سنجش راداری، دو مزیت پررنگ تر هستند [۴].

۱- حساسیت امواج راداری به محتوای رطوبت و زبری اهداف ۲- قابلیت برداشت در تمام شرایط آب و هوایی و در تمام ساعات شبانه روز

عوامل مختلفی نتایج حاصل از تصاویر تداخل سنجی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. یکی از این عوامل جو است که هم بر دامنه موج و هم بر فاز موج تأثیر می‌گذارد [۵] و [۶]. در اینجا و با توجه به مزیت دوم که در بالا به آن اشاره شد، ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که در سنجش از دور راداری، برخلاف داده‌های نوری، ابر، غبار غلیظ و پدیده‌هایی از این قبیل مانع جمع آوری داده از سطح زمین نمی‌شوند. با این حال در اینجا نیز پدیده‌های جوی بر امواج فرودی و پسپراکنده تأثیری مخرب می‌گذارند. در این میان تأثیر

جو بر دامنه امواج راداری، بسیار کمتر از تأثیر آن بر فاز امواج است [۷]. چرا که امواج راداری به علت طول موج بلندی که نسبت به نور دارند، در جو کمتر تحت تأثیر افت انرژی (تغییر دامنه) یا پراکنش قرار می‌گیرند. این در حالی است که تغییر سرعت امواج و یا تغییر مسیر آنها در لایه‌های مختلف جو باعث می‌شود که فاز امواج به شرایط جوی حساس باشد. آنالیزهای تداخل سنجی راداری به کمک تفسیر دقیق تأخیر زمانی و اختلاف دیفرانسیلی فاز امواج برگشتی قادر به اندازه‌گیری فاصله است. این فواصل با توجه به هندسه تصویربرداری، به توپوگرافی، سرعت و جابجایی سطح تبدیلی گردد [۸].

در ابتدا می‌توان گفت به طور کلی سرعت سیگنال منتشره معلوم و ثابت فرض می‌شود تا بتوان تأخیرهای زمانی و اختلاف فازها را به فاصله تبدیل کرد. البته با توجه به اینکه سیگنال در محیطی ناهمگن (از نظر مکانی) مثل جو زمین پخش می‌شود که ضریب شکست محیط آن از خالص کمی بیشتر است، از سرعت آن کمی کاسته می‌شود [۹]. همین مورد باعث ایجاد تأخیر در فاز اندازه‌گیری می‌شود و نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

با در نظر گرفتن دامنه واحد، برای شدت موج مسطح در مکان x در فضای با ضریب شکست $n(x)$ و طول موج λ داریم [۱]:

$$E(x, t) = e^{i(kx - \omega t)} \quad (1)$$

که در اینجا عدد موج k برابر است با $\frac{2\pi n(x)}{\lambda}$ و e برابر است با عدد اویلر. با مشتق‌گیری از فاز رابطه فوق به رابطه‌ای بین طول مسیر و اختلاف فاز می‌رسیم که عبارت است از:

(۷)

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + \left(k_2 \frac{a}{T} + k_3 \frac{a}{T^2} \right) - 4.028 \times 10^7 \frac{n_a}{f^2} + 1.4w$$

در رابطه فوق Pd فشار هوای خشک بر حسب hPa و فشار جزئی بخار آب بر حسب hPa و T دمای مطلق بر حسب کلونین، ne تعداد الکترون بر حسب تعداد بر متر مکعب، f فرکانس موج بر حسب هرتز و w محتوی آب مایع بر حسب گرم بر متر مکعب است. همچنین ضرایب k1, k2, k3 مقادیر ثابت تجربی هستند. در این رابطه، جمله اول را جمله هیدروستاتیکی و دو جمله داخل پرانتز را جمله تر (مربوط به بخار آب قابل بارش) می نامند. ضمن آنکه دو جمله بعدی به ترتیب جمله یونسفری و جمله آب مایع هستند. تحقیقات نشان می دهد که تأثیرات یونسفری در جو و بر تصاویر راداری نسبت به سایر اثرات موجود از اهمیت کمتری برخوردارند و بنابراین، فعالیت چندان زیادی نیز برای تعیین مقدار دقیق این خطا و یا ارائه مدل ویژه ای برای حذف آن در تصاویر راداری وجود ندارد [۷]. همچنین با توجه به اینکه آنالیزهای تداخل سنجی در شرایط بدون حضور ابر و باران صورت می گیرد جمله آب مایع نیز از رابطه ۷ کنار گذاشته می شود. با ناچیز در نظر گرفتن جمله یونسفری تأثیر باقی مانده به تروپوسفر نسبت داده می شود. در اینجا به جمله های تأثیرگذار تر تأثیرات تروپوسفری خواهیم پرداخت. این تأثیرات به دو مولفه مجزا تقسیم شده است [۱۳].

$$\Delta x = (\Delta x)_{dry} + (\Delta x)_{wet} \quad (۸)$$

که در آن $(\Delta x)_{dry}$ و $(\Delta x)_{wet}$ به ترتیب نماینده طول اضافی اندازه گیری شده ناشی از تأخیر هیدروستاتیکی و بخار آب هستند. مشاهدات

$$d\Phi = \frac{2\pi n(x)}{\lambda} dx \quad (۲)$$

انتگرال گیری حول مسیر انتشار به معادله زیر منتهی می گردد:

$$\Phi = \int \frac{2\pi n(x)}{\lambda} dx \quad (۳)$$

برای انتشار سیگنال های رادیویی در خلا $n(x)=1$ نظر گرفته می شود بنابراین، اختلاف فاز موجب صورت مستقیم با طول مسیر متناسب خواهد بود.

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (۴)$$

در اینجا اختلاف فاز موج اندازه گیری و ارسالی فقط به طول موج در خلا و طول مسیر بستگی دارد. حال اگر مسیر موج را در جو در نظر بگیریم، $n(x)$ دیگر ثابت نخواهد بود و این امر باعث ایجاد یکتا خیر فاز خواهد شد [۱]. برای جو طبیعی زمین، $n(x)$ همواره حقیقی و کمی بزرگتر از یک است بنابراین، می توان $n(x)$ را به صورت $1 + 10^{-6}N(x)$ گسترش داد که در آن $N(x)$ ضریب شکست اضافی حاصل از جو خواهد بود. با توجه به ضریب 10^{-6} در رابطه فوق می توان بیان داشت که تغییر ضریب شکست در جو زمین نسبت به خلا بسیار جزئی است. با ذکر این موضوع و توجه به رابطه ۴ می توان گفت:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} x + \frac{2\pi 10^{-6} N(x)}{\lambda} x \quad (۵)$$

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} x + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \quad (۶)$$

که نمایانگر اختلاف فاصله اندازه گیری شده اضافی ناشی از شکست موج در جو است. ضریب شکست یعنی N را می توان به صورت زیر تعریف کرد [۱۰] و [۱۱] و [۱۲]:

فوق زاویه دید ۴۵ درجه فرض گردیده است. تأثیرات فوق در زوایای بزرگتر واضح‌تر و در زوایای نزدیک به صفر کمتر خواهد بود. تغییر در فشار خشک جوی در حفاصل ۹۹۰ تا ۱۰۴۰ میلی بار نسبت به مقدار میانگین نرمال سالیانه در نیمکره شمالی، تأخیر فازی بیش از ۱۰ رادیان در باند L (با طول موج ۲۴ سانتیمتر)، ۴۳ رادیان در باند C (با طول موج ۵/۷ سانتیمتر) و ۷۸ رادیان در باند X (با طول موج ۳/۱ سانتیمتر) نسبت به مقدار آن در ۹۹۰ میلی بار دارد [۱]. تأخیر فاز ناشی از تروپوسفر در نتیجه تغییر رطوبت از صفر تا صد درصد در باند L از صفر تا ۲۵ رادیان متغیر خواهد بود؛ و به همین ترتیب در طول موجهای کوچکتر شدیدتر خواهد بود [۱]. ذکر این نکته نیز ضروری است که در هر دو نمودار دما ۳۰۰ کلوین و ثابت فرض گردیده است. همچنین تغییر دما در شرایط فوق به علت افزایش فشار جزئی بخار آب ناشی از ثابت نگهداشتن رطوبت در مقدار ۵۰ درصد بوده است [۱].

از این رو می‌توان نتیجه گرفت که قسمت تروپوسفر تأثیر بسیار زیادی در اندازه‌گیری‌های فاز امواج و تحلیل‌های تداخل سنجیاداری دارد و تا حد زیادی کیفیت نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پس می‌توان نتیجه گرفت که عامل غالب تأثیرات که به داده‌ها وارد می‌شود بخش تر است که عمده آن ناشی از بخار آب است.

تجربی [Smith and Weintraub, 1953] و با توجه به‌ناچیز بودن تأثیر فاز غیر گازی آب در مقابل تأثیر بخار آب نشان داده که رابطه ۸ را به صورت تقریبی می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۵]:

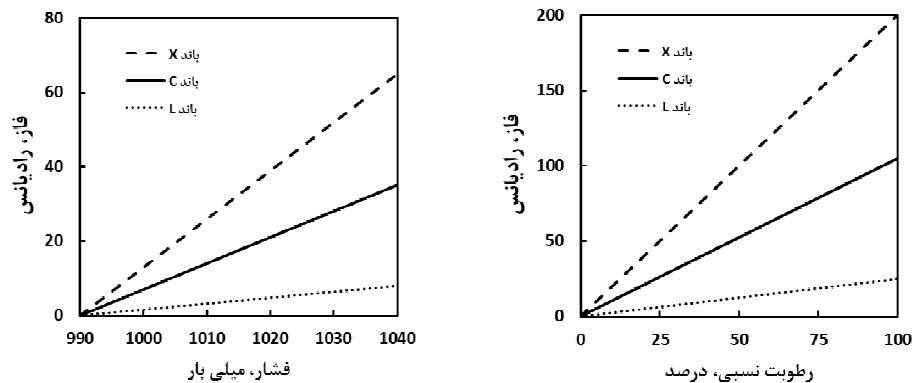
$$\Delta x = 77.6 \times 10^{-6} \int_0^x \frac{P}{T} dx + 3.73 \times 10^{-1} \int_0^x \frac{e}{T^2} dx \quad (9)$$

که در رابطه فوق x طول مسیر کل در جو است، P فشار جو است بر حسب میلی بار، T دما است بر حسب کلوین و e فشار جزئی بخار آب بر حسب میلی بار است. ثابت‌های موجود در رابطه فوقه صورت کلی تا فرکانس 30GHz و در شرایط نرمال فشار هوا و دما و رطوبت، تا 0.5 درصد قابل استناد است. مدل تعریف شده در رابطه ۹ بر اساس برش عمودی جوی طراحی شده است در حالی که باید برش مایل در راستای دید رادار در نظر گرفته می‌شده است [۱]. مقادیر واقعی فشار و دما در راستای مسیر انتشار رادار در صورت وجود تغییر مکانی در جو، وابستگی کمتری با مقادیر سطحی دارند. بدون در نظر گرفتن مورد فوق می‌توان تأخیر فاز اضافی دو مسیر رادار تصویر بردار پهلو نگر را به صورت زیر توصیف نمود [۱]:

$$\Delta \theta = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\Delta x}{\cos \theta_i} \quad (10)$$

که $\Delta \theta$ شیفت فاز سیگنال برگشتی رادار از نقطه‌ای تحت زاویه میل θ_i است.

شکل ۱- [۱] با توجه به رابطه ۱۰ تأخیر فاز ناشی از تغییر فشار و رطوبت را تحت طول موجهای مختلف به تصویر کشیده است. لازم به ذکر است که در شرایط

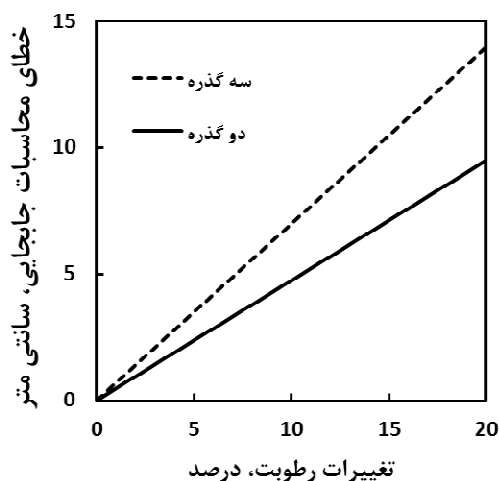


شکل ۱- تأخیر فاز جوی ناشی از تغییرات فشار و بخار آب در سه طول موج مختلف [۱]

را ارائه دهد [۱۵]، اما با توجه به اینکه این مطالعات بر روی یک ناحیه و به صورت مطالعه موردی صورت گرفته است نمی تواند نمایان گر مدلی کامل و جامع باشد. همچنین لی (۲۰۰۶) نشان داد که محصول بخار آب اتمسفری بدست آمده از سنجنده MERIS به طور موثری اثرات مخرب اتمسفر را در تداخل نگارها کاهش می دهد. وی پتانسیل این داده ها را برای کاهش اثرات مخرب اتمسفر بررسی نمود و مطابقت آن با داده های راديو سوند و GPS را در حد 1.1mm ذکر نمود [۱۶] اما وی نیز در مورد رابطه بین میزان بخار آب و خطای ناشی از آن بررسی خاصی را انجام نداد.

۱-۱. تأخیر فاز اتمسفری در محاسبات DInSAR
هر پژوهشگر منفرد راداری که از هدف به سنجنده میرسد فازی اتفاقی دارد که تحت شرایط لحظه ای جوی تعیین می گردد. تخمین میزان اثر جوی مؤثر بر آن قبل از تشکیل تداخل نگار دشوار است [۱].

تاکنون بیشتر کارهای صورت گرفته در داخل و خارج از کشور بر روی روشهای تصحیح اتمسفری تداخل نگارها و همچنین اثر بخار بر روی تأخیر فاز حاصله متمرکز شده است. در یک پژوهش مشابه Zebker (1997) اظهار داشت که تغییرات ۲۰٪ رطوبت نسبی موجب بروز ۱۰ سانتی متر خطا در محاسبه جابجایی و ۱۰۰ متر خطا در تهیه توپوگرافی خواهد شد که این مقدار با تغییر طول باز تغییر خواهد کرد اما خطای جابجایی مستقل از طول باز است [۱۴]. به طور کلی در مورد ارائه مدلی بین میزان بخار آب جوی و میزان خطای حاصل از آن بر روی تداخل سنجی راداری هیچ تحقیق جدی، جامع و کاملی صورت نگرفته است. همچنین خیابانی در سال ۱۳۸۶ در یک تحقیق اثر عام جو بر فاز رادار و به طور خاص تر تأثیر جو بر اندازه گیری هایتداخل سنجی در منطقه شمال شرق ایران مورد توجه قرار داد و سعی کرد مدلی جامع جهت کاهش اثرات عام جوی تأثیرگذار بر روی فاز اینترفرومتری



شکل ۲- خطا بر اساس تغییرات میزان بخار آب در جو در اندازه‌گیری تغییر شکل به روش دوگذره و سه‌گذره [۱]

همچنین می‌توان گفت با توجه به اینکه در روش دوگذره با دو تصویر SAR کار میکنیم، پس طبعاً در مقایسه با روش سه‌گذره که با سه تصویر SAR کار می‌کند، مقدار خطای کمتری حاصل از اتمسفر وارد سیستم می‌شود.

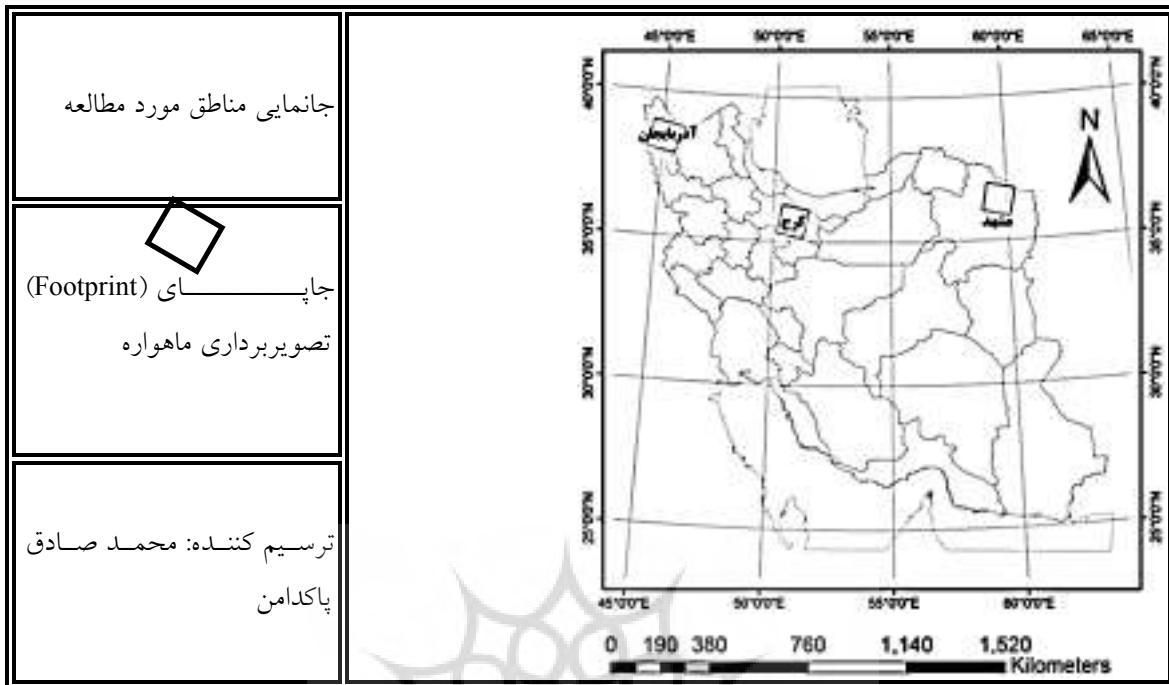
۱-۲. مناطق مورد مطالعه

در این پژوهش به منظور مدلسازی دقیق تر رفتار بخار آب سه منطقه کرج، مشهد و شمال دریاچه ارومیه مد نظر قرار گرفت (شکل-۳). مناطق مورد بررسی تقریباً در عرض‌های جغرافیایی نزدیک به هم ولی با فواصل زیادی در طول جغرافیایی می‌باشند. هر سه منطقه از نظر جغرافیایی و وضعیت بخار آب اتمسفری شبیه به یکدیگر می‌باشند. هر سه منطقه در دشتهای مختلف خود دارای جابجایی بوده که برای مقایسه نتایج ایده آل می‌باشند. در مجموع در ۳ ناحیه مذکور از اطلاعات ۱۶ نقطه مختلف برای پردازش داده‌های زمینی و ماهواره‌ای استفاده گردید.

تأثیر تغییرات بخار آب جوی که منجر به خطا در فاز اندازه‌گیری می‌گردد در حالت‌های زیر قابل بررسی و تخمین است: ۱- برداشت تکراری ۱ جهت محاسبه توپوگرافی ۲- برداشت دوگذره سطح جهت محاسبه تغییر شکل سطوح ۳- برداشت سه‌گذره سطح جهت محاسبه تغییر شکل سطوح.

ما در اینجا حالت شماره ۲ یعنی برداشت دوگذره جهت محاسبه تغییر شکل سطوح را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این حالت بخش توپوگرافیک فاز تداخل‌نگار با مدل رقومی ارتفاعی مستقل از برداشت ارتفاعی حذف می‌گردد [۵]. انتخاب حالت دوگذره به این دلیل است که برای اندازه‌گیری تغییر شکل به روش دوگذره خطا مستقل از خط مبنا (Baseline) و طول موج است در حالی که در روش سه‌گذره که اندازه خطا از نظر اندازه نزدیک روش قبل است، خطا تا حدودی به اندازه خط‌مبناها وابسته است. در این دو حالت طول خط‌مبناهای موازی برابر در نظر

گرفته شده و خطای روش سه‌گذره برابر روش دوگذره در نظر گرفته شده است. خطای محاسبه شده در حالت‌های دوگذره و سه‌گذره که بر اساس تغییرات میزان بخار آب در جو در نظر گرفته شده در شکل-۲ به تصویر کشیده شده اند [۱].



شکل ۳ - موقعیت سه منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه ایران

۲. مواد و روشها

زمینی سازمان نقشه برداری کشور آغاز به فعالیت نمود [۱۷].

همانطور که ذکر شد، در این پژوهش از سنجنده ASAR که در باند C تصویربرداری می‌کند برای استخراج مقادیر جابجایی ارتفاعی از طریق روش DInSAR استفاده گردید. مشخصات داده‌های مورد استفاده، به همراه تاریخ و فواصل خط مبنای آنها در پیوست-۱ آمده است. همانطور که مشخص است به جز دو بازه که فاصله خط مبنای آنها بیش از ۱۰۰ متر است مابقی بازه‌ها کمتر از ۹۰ متر می‌باشند که برای تحلیل تداخل سنجی راداری بسیار مناسب هستند.

برای استخراج مقادیر بخار آب اتمسفری نیز از سنجنده MERIS مستقر بر روی ماهواره ENVISAT که همزمان با سنجنده ASAR تصویربرداری می‌کند استفاده گردید. MERIS یا تصویربردار طیف سنج با قدرت تفکیک متوسط مستقر بر روی ماهواره

داده‌های استفاده شده در این پژوهش به دو دسته کلی داده‌های زمینی و ماهواره‌ای تقسیم بندی می‌شوند. داده‌های زمینی از سازمان نقشه برداری کشور و داده‌های ماهواره‌ای از سازمان فضایی اروپا تهیه گردید.

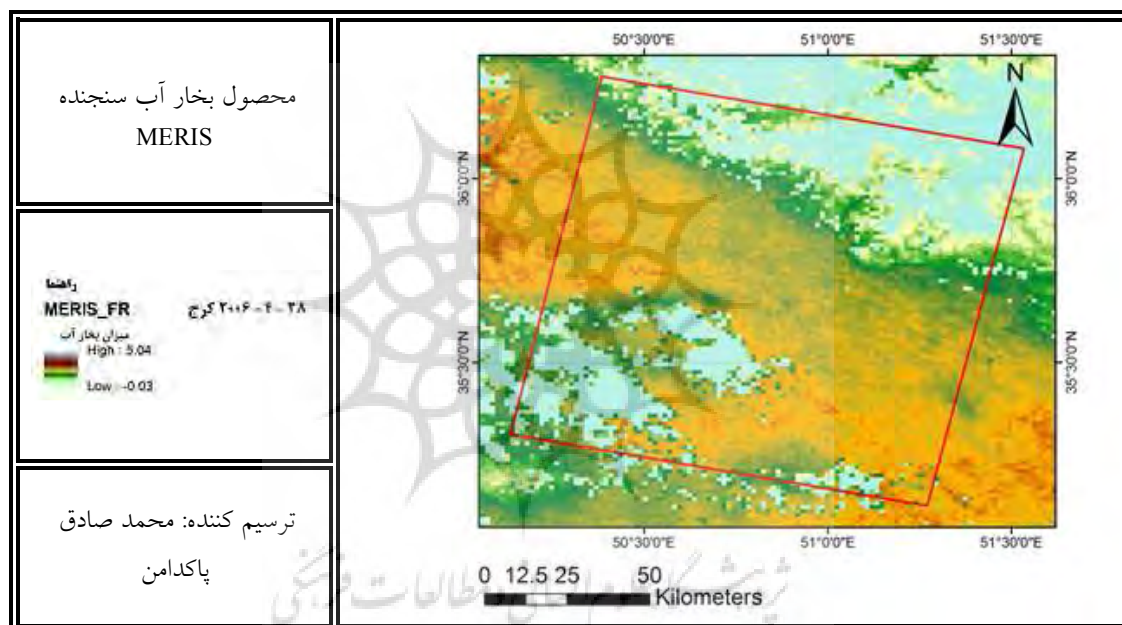
۲-۱. داده‌های ASAR و MERIS و IPGN^۱

داده‌های زمینی مورد استفاده در این پژوهش از ایستگاه‌های دائم اندازه‌گیری پوسته زمین به وسیله GPS از سازمان نقشه برداری کشور تهیه گردید. این شبکه به نام شبکه دائم GPS ایران (IPGN) از سال ۱۳۷۷ به منظور پایش تغییرات پوسته زمین و حرکات تکتونیکی مربوط به آن در اداره کل نقشه برداری

^۱Iran Permanent GPS Network

ساحلی ۲۶۰*۳۰۰ متر است و در مناطق اقیانوسی تا ۱۰۴۰*۱۲۰۰ متر کاهش می‌یابد. اهداف اصلی این سنجنده در روی زمین برای گیاهان، در روی اقیانوس و مناطق ساحلی جهت تعیین رنگ و بیولوژی مناطق و در تحلیل های اتمسفری جهت تخمین بارش، ابر و بخار آب موجود در جو است. شکل-۴ نمونه‌ای از محصول بخار آب MERIS در تاریخ ۲۸-۴-۲۰۰۶ در منطقه کرج است که بر حسب واحد گرم بر سانتی متر مربع محاسبه گردیده است.

ENVISAT سازمان فضایی اروپا (ESA) می باشد که در ۱۵ باند طیفی تصویر برداری می‌کند که از محدوده طیفی ۳۹۰ تا ۱۰۴۰ نانومتر حساس است. MERIS طوری طراحی شده است که بتواند در حداقل شرایط نوری هم تصویربرداری کند و تصاویر مناسبی را ارائه کند. این سنجنده با زاویه FOV 68.5 درجه در نادیر (Nadir) تصاویر با عرض ۱۱۵۰ کیلومتر را در پوشش زمانی ۳ روزه تهیه می‌کند. قدرت تفکیک مکانی این سنجنده در مناطق زمینی و



شکل-۴: محصول بخار آب (g/cm²) سنجنده MERIS در منطقه کرج ۲۸-۴-۲۰۰۶

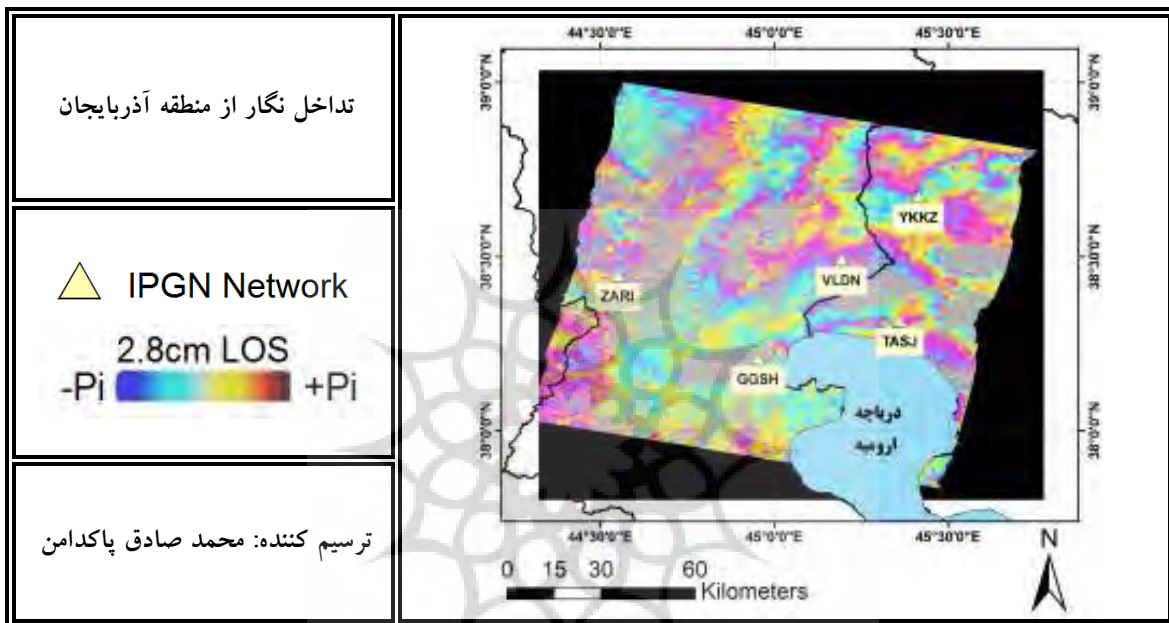
عددی پیکسل‌ها بیانگر ارتفاعات است). اگر دو نقشه دقیقاً مشابه باشند، از تفاضل پیکسل به پیکسل دو تصویر، آریه‌ای از صفر حاصل خواهد شد. اگر بعضی مقادیر در تصویر حاصل (تفاضل دو تصویر) غیر صفر باشند، بیانگر آن است که در آنجا تغییری رخ داده است، مقدار تغییر متناسب با مقدر روشنایی پیکسل در تصویر حاصل (تفاضل) است. در حقیقت، در اینجا ما نقشه منحنی میزان رستری اول (قدیمی) را برای حذف اثر توپوگرافی از نقشه جدیدتر به کار

۲-۲. روش DInSAR

تداخل سنجی تفاضلی SAR (DInSAR) برآوردی از تغییرات سطح (هم از نظر سطحی و هم ارتفاعی) توسط تداخل سنجی را بیان می‌کند. اساس آن مشابه نقشه برداری زمینی برای جمع‌آوری داده در تهیه نقشه منحنی میزان‌ها است. فرض کنید یک نقشه توپوگرافی که ۵ سال قبل تهیه شده است و یک نقشه توپوگرافی که ۱ هفته قبل تهیه شده، داریم (نقشه رستری که از پیکسل‌هایی ساخته شده که مقادیر

از یک مکان ثابت روی زمین الگوهایی به نام فرینج (Fringe) را در یک تداخل نگار به وجود می آورد. شکل ۵- تداخل نگار حاصل از پردازش داده های سال ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ مربوط به منطقه آذربایجان است.

برده ایم. مشابه این کار را می توان برای دو DEM حاصل از تصاویر SAR که قبل و بعد از رویداد مهمی نظیر زلزله تهیه شده اند، به کار گرفت. اختلاف بین دو DEM حاصل از تداخل سنجی، تغییرات موجود در سطح که ناشی از زلزله یا فرونشست می باشد را نشان می دهد. اختلاف فازها در فاصله زمانی بین دو تصویر



شکل ۵- تداخل نگار در منطقه آذربایجان Slave: 2008-07-07 Master: 2007-07-23

آنکه، ابتدا با استخراج مقادیر جابجایی واقعی هر ایستگاه از داده های IPGN، تغییرات ارتفاعی هر ایستگاه از نظر داشتن یا نداشتن جابجایی بررسی می شود. معیار بررسی نیز $\lambda/2$ طول موج استفاده در روش DInSAR است. از آنجا که به طور کلی هر فرینج بدست آمده از روش تداخل سنجی تفاضلی معادل $\lambda/2$ جابجایی است پس هر سنجنده با طول موج λ می تواند از نصف طول موج خود تا مقادیر مطلق بزرگتر را در جابجایی ها با دقت میلیمتر نشان دهد. در اینجا چون ما از سنجنده ASAR با باند C یعنی طول موج ۵.۶ سانتی متر استفاده می کنیم پس

برای تمامی مناطق تداخل نگارهای مخصوص تهیه گردید و در انتها این تداخل نگارها تبدیل به مقادیر جابجایی عمودی گردیدند. محاسبات تداخل سنجی بر روی تصاویر راداری توسط نرم افزار Sarscape صورت پذیرفت.

۳. تجزیه و تحلیل

جهت بررسی خروجی ها، ابتدا داده های جابجایی بدست آمده از ایستگاه های GPS شبکه ژئودینامیک دائمی ایران (IPGN) با داده های جابجایی بدست آمده از روش DInSAR مقایسه گردید. روند مقایسه این داده ها با یکدیگر در شکل ۶- آمده است. توضیح

IPGN در ایستگاه‌های مختلف در پیوست-۱ آمده است.

پس از استخراج مقادیر جابجایی عمودی از ایستگاه‌های IPGN مقادیر نظیر آنها در فواصل زمانی مشابه با استفاده از روش تفاضل تداخل‌سنجی راداری و از طریق داده‌های ASAR استخراج گردید. جابجایی‌های بدست آمده در بازه‌های زمانی مورد نظر در تمام ایستگاه‌ها با استفاده از روش DInSAR در ایستگاه‌های مختلف در پیوست-۱ ارائه گردیده است.

معیار ما برای داشتن یا نداشتن جابجایی در ایستگاه‌های IPGN ۲۸ میلیمتر است.

در فواصل زمانی بین تصویربرداری ماهواره ENVISAT مقادیر مربوط به جابجایی‌های ارتفاعی در تمامی ایستگاه‌های زمینی شبکه IPGN بر حسب متر استخراج گردید. مقادیر منفی نشان دهنده فرونشست سطح زمین و مقادیر مثبت نشان دهنده بالاآمدگی سطح زمین در بازه زمانی مورد نظر می‌باشد. مقادیر بدست آمده از جابجایی ارتفاعی شبکه



شکل-۶: فلوجارت بررسی مدل بین مقادیر بخار آب و جابجایی

۳-۱. ارزیابی داده ها

بر اساس فلوجارت ارائه شده در شکل ۶- ایستگاه هایی که بر اساس حساسیت طول موج سنجنده مایکروویو دچار جابجایی بیش از ۲۸ میلیمتر بودند انتخاب شدند. این نقاط، مکانهایی هستند که با استفاده از روش DInSAR می توان در طول موج C به میزان جابجایی آنها دست یافت؛ اما سایر نقاط گرچه دارای جابجایی می باشند اما در اصطلاح برای سنجنده SAR مورد استفاده «کور» می باشند و عملاً در آنها فرینج تشکیل نشده است. پس جابجایی این نقاط نمی تواند بدون استفاده از درونبایی توسط روش DInSAR اندازه گیری شود و است مقادیری که با استفاده از روشهای درونبایی در این ایستگاه ها بدست آمده را نادیده گرفت و آنها را صفر قلمداد کرد. پس از تعیین نقاط کور، میزان اختلاف مقادیر بدست آمده از روش DInSAR و IPGN مشخص گردید. در واقع این مقادیر اختلاف هستند که در اثر وجود بخار آب ستونی جو بین داده های واقعی و IPGN و روش DInSAR اتفاق افتاده و است مدل آن بررسی گردد. مقادیر اختلاف جابجایی بدست آمده از IPGN و روش DInSAR در پیوست-۱ آمده است. طبیعتاً در نقاط و ایستگاه هایی که جابجایی واقعی آنها کمتر از ۲۸ میلیمتر بوده و در آنها فرینج تشکیل نشده است، اختلاف جابجایی همان میزان ثبت شده توسط DInSAR است چراکه است جابجایی در این نقاط به دلیل حساسیت سنجنده صفر بدست می آمده اما مقادیر متفاوتی مشاهده می گردد. در سایر نقاط قدرمطلق اختلاف بین IPGN و روش DInSAR محاسبه گردیده است. به دلیل همزمانی تصویربرداری سنجنده MERIS و سنجنده مایکروویو

ASAR است مقادیر مربوط به بخار آب ستونی جو در تاریخ های اصلی و فرعی استخراج گردد. با توجه به مقادیر جابجایی بدست آمده در فواصل زمانی مشخص از روش DInSAR و داده های IPGN و نیاز به تعیین مدل بین متغیرها، مقادیر تجمعی بخار آب ستونی در جو در مناطق مختلف و ایستگاه های هر منطقه استخراج گردید. مقادیر تجمعی مربوط به بخار آب ستونی جو در مناطق آذربایجان، کرج و مشهد به ترتیب در پیوست-۱ ارائه گردیده است.

۳-۲. بررسی همبستگی

پیش از بررسی مدل بین متغیرها است ابتدا ارتباط معنادار بین آنها را کشف نمود. یکی از شاخصهای بررسی ارتباط بین داده ها ضریب همبستگی است. این شاخص ابزاری آماری برای تعیین نوع و درجه رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر است. معمولاً ضریب همبستگی را با R^2 نشان می دهند که با جذر گرفتن از این مقدار می توان به مقدار همبستگی بین داده ها در حالت خطی دست یافت. از همبستگی می توان در ارزیابی رابطه بین داده ها پیش از تهیه مدل استفاده نمود؛ اما از ضریب همبستگی در ارزیابی دقت مدل تولید شده از یک سری مجموعه داده استفاده می شود؛ بنابراین همانطور که انتظار می رود داده هایی که دارای همبستگی بالایی هستند می توانند مدلی تولید کنند که دارای ضریب همبستگی بالایی باشد و این نشانگر رابطه مستقیم همبستگی با ضریب همبستگی است. در ادامه پیش از اعمال هر مدلی، میزان همبستگی مقادیر جابجایی بدست آمده از روش DInSAR و ایستگاه های IPGN مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر همبستگی بین دو متغیر بین ۱ و ۱- است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد:

همانگونه که در جدول-۲ مشخص است میزان همبستگی عمومی در نواحی مختلف خوب و قابل قبول است و به جز یک مورد که زیر ۶۰ درصد می باشد، بقیه موارد مقادیر قابل اعتمادی از همبستگی بین مقادیر جابجایی عمودی ثبت شده توسط GPS و روش DInSAR را نشان می دهند.

$$Corr = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{(n - 1) \times S_x \times S_y} \quad (11)$$

که S_x انحراف معیار برای متغیر x ، S_y انحراف معیار برای متغیر y ، n تعداد متغیرها، \bar{x} میانگین متغیر x ، \bar{y} میانگین متغیر y و در آخر x و y مقادیر مربوط به هر کدام از متغیرها است.

جدول-۲: همبستگی بین مقادیر IPGN و DInSAR

منطقه	تاریخ اصلی	تاریخ فرعی	خط مبنای مکانی (m)	همبستگی
آذربایجان	23-Jul-2007	7-Jul-2008	236.03	59.72%
آذربایجان	7-Jul-2008	31-Aug-2009	81.02	81.52%
آذربایجان	31-Aug-2009	16-Aug-2010	303.22	78.50%
کرج	28-Apr-2006	15-Aug-2008	89.11	75.71%
کرج	15-Aug-2008	7-May-2010	56.57	81.23%
مشهد	19-May-2008	17-Aug-2009	26.37	97.13%
مشهد	17-Aug-2009	24-May-2010	22.98	98.89%

متغیرها و در ادامه میزان دقت در مدل‌های نهایی ضروری است. پس در این مرحله میزان همبستگی بین مقادیر بخار آب ستونی اتمسفر بدست آمده از MERIS و مقادیر اختلاف جابجایی برداشت شده توسط IPGN و DInSAR مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه آن در جدول-۳ آمده است.

پس از بررسی میزان همبستگی بین مقادیر ثبت شده توسط IPGN و روش DInSAR و اطمینان از رابطه معنادار آنهاست پیش از اعمال مدل، ابتدا یک رگرسیون خطی بین میزان بخار آب ستونی موجود در جو و مقدار خطای به وجود آمده ناشی از آن بر اندازه‌گیری‌های جابجایی در روش DInSAR، برآزش داده شود. این امر به دلیل اطمینان از نحوه رفتار

جدول-۳: همبستگی بین مقادیر بخار آب IPGN و MERIS و DInSAR

منطقه	تعداد ایستگاه‌ها	تعداد تداخل نگارها	همبستگی
آذربایجان	5	3	85.41%
کرج	6	2	79.97%
مشهد	5	2	88.09%
تمام مناطق	16	7	82.93%

همانگونه که از جدول-۳ مشخص است، داده‌های ثبت شده در منطقه کرج با همبستگی ۷۹.۹۷٪ دارای

بر روی داده های هر دو منطقه از سه منطقه به طور جداگانه اعمال خواهند شد تا جهت آزمون مدل در مراحل بعدی از داده های منطقه سوم استفاده شوند.

۳-۴. آزمون مدل

در این مرحله جهت مقایسه دقیق تر مدلها نسبت به هم و مقایسه نتایج آزمون مدل ها، تمام ضرایب همبستگی در مدلهای تولیدی تهیه گردید که در جدول-۴ و خطای RMSE در جدول-۵ ارائه گردیده است. همچنین در پیوست-۲ نتایج مربوط به جزئیات مدلهای اعمال شده و همچنین ضریب همبستگی و خطای RMSE آنها به صورت یکجا آورده شده است.

کمترین میزان همبستگی است اما به طور کلی می توان گفت که میزان همبستگی ۸۲.۹۳٪ برای تمامی مناطق قابل قبول است.

۳-۳. مدلسازی

پس از بررسی رفتار متغیرها نسبت به هم و اطمینان از همبستگی بالای آنها به سراغ تعیین نوع رفتار آنها نسبت به هم و مدل کردن رفتار آنها می رویم. در این قسمت با ترسیم مقادیر متغیرها نسبت به یکدیگر اقدام به برازش رگرسیون های مختلف بر روی نمودار می کنیم. در اینجا با توجه به نوع رفتار متغیرها نسبت به هم برای بررسی دقیقتر نوع رفتار آنها، علاوه بر توابع خطی، از توابع نمایی، چند جمله ای با توان ۲ و تابع توانی نیز استفاده می شود. این توابع

جدول-۴: مقایسه ضرایب همبستگی (R2) بین مدلهای مختلف در هر منطقه

مناطق مدل	منطقه آزمون	خطی	نمایی	چند جمله ای	توانی
آذربایجان و کرج	مشهد	0.8259	0.7654	0.8291	0.8389
کرج و مشهد	آذربایجان	0.5689	0.5604	0.6009	0.6622
مشهد و آذربایجان	کرج	0.6737	0.7379	0.6844	0.7263

جدول-۵: مقایسه RMSE بین مدلهای مختلف در هر منطقه

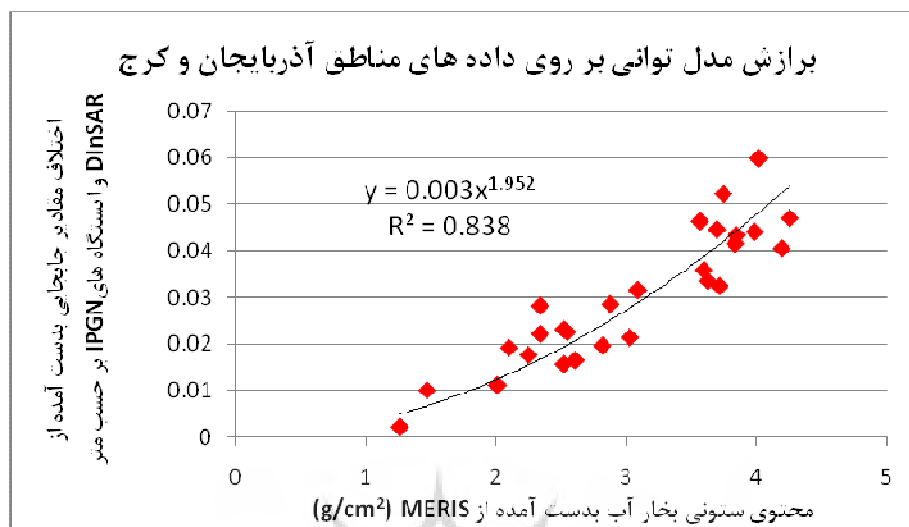
مناطق مدل	منطقه آزمون	خطی	نمایی	چند جمله ای	توانی
آذربایجان و کرج	مشهد	0.011	0.009	0.011	0.010
کرج و مشهد	آذربایجان	0.012	0.010	0.016	0.009
مشهد و آذربایجان	کرج	0.016	0.008	0.010	0.009

داده شده بر روی داده های بخار آب ثبت شده توسط MERIS و اختلاف جابجایی های بدست آمده از IPGN و DInSAR است. در شکل-۷ مدل توانی برازش داده شده بر روی داده های دو منطقه آذربایجان و کرج نمایش داده شده است. مدل نهایی معرفی شده در این پژوهش پس از ساده سازی، بین میزان بخار آب ستونی جو بر حسب g/cm^2 و میزان خطای ناشی از آن بر روی اندازه گیری های جابجایی

۳-۵. معرفی مدل

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول-۴ جدول-۵ و همچنین پیوست-۲ مشخص گردید مدل توانی بدست آمده از داده های آذربایجان و کرج دارای بیشترین ضریب همبستگی با مقدار ۸۳٪ و RMSE مناسب ۰.۰۱ می باشد پس می توان گفت در بین مدلهای موجود، مدل توانی بهترین رگرسیون برازش

سطح زمین سنجنده ASAR مطابق جدول ۶- می و RMSE مدل آورده شده است. باشد. در این جدول بار دیگر ضریب همبستگی مدل



شکل ۷- برآزش رگرسیون توانی بین مقادیر بخار آب MERIS و اختلاف مقادیر IPGN و DInSAR (آذربایجان و کرج)

جدول ۶- ضریب همبستگی (R^2)، RMSE و واریانس مدل نهایی معرفی شده

RMSE	R^2	مدل پیشنهادی	منطقه آزمون	مناطق مدل
۰.۰۱۰	۰.۸۳۸۹	$diff = \frac{3 \times WV^2}{10^3}$	مشهد	آذربایجان و کرج

مدل های تولید شده از داده های منطقه آذربایجان و کرج جهت انتخاب مدل بهینه استفاده نمود. همچنین با دقت در ضرایب بدست آمده از هر مدل در مناطق مختلف مشاهده می گردد که مدل توانی توانسته است عملکرد دقیق تری نسبت به سایر مدل ها ارائه دهد که در این بین، مطابق مدل توانی برآزش داده شده از داده های آذربایجان و کرج که بر روی داده های مشهد آزمون گردیده است دارای بیشترین ضریب همبستگی هستند. با دقت در مقادیر RMSE نشان داده شده در جدول ۵-، ملاحظه می گردد که مقادیر بدست آمده خطای جذر میانگین مربعات حاصل از اعمال مدل های مختلف بر روی مناطق سه گانه مورد آزمون، بسیار نزدیک به یکدیگر بوده که به طور کلی دقت بالای

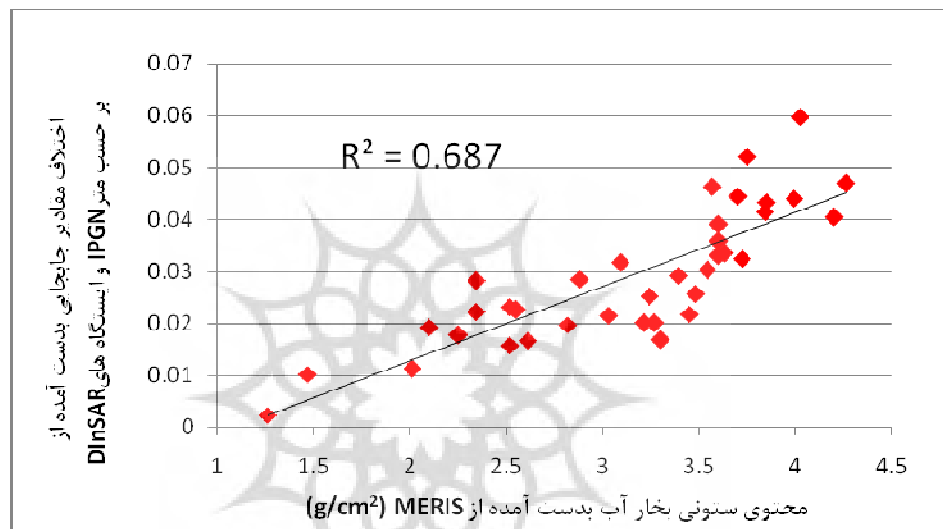
Diff خطای ایجاد شده بر حسب $WV \text{ m}$ میزان بخار آب ستونی جو بر حسب g/cm^2 است. در رابطه ارائه شده، با در اختیار داشتن میزان بخار آب ستونی جو که همزمان با داده های ASAR برداشت شده است، می توان میزان خطای ناشی از آن را بدست آورد.

۴. بحث و نتایج

به طور کلی رگرسیون های مختلفی که روی داده های منطقه آذربایجان و کرج تولید شده است دارای بیشترین ضریب همبستگی نسبت به رگرسیون های تولیدی از داده های سایر مناطق می باشند که این امر به دلیل همبستگی بالای داده های برداشت شده از این مناطق است (پیوست-۲). پس می توان با اطمینان از

MERIS و اندازه‌گیری‌های بدست توسط ایستگاه های IPGN و روش DInSAR مشخص گردید که با افزایش مقدار بخار آب ستونی جو، میزان خطای ناشی از اندازه‌گیری‌های جابجایی سطح زمین نیز افزایش می‌یابد (شکل ۸) که خود موید نظر [Zebker(1997) ۱] است.

مدلهای اعمال شده در حالت های مختلف را نشان می‌دهد. در این پژوهش با توجه به مقایسه نتایج بین مقادیر جابجایی ثبت شده توسط GPS و مقادیر بدست آمده از روش DInSAR محرز گردید وجود اتمسفر خود محدودیتی در اندازه‌گیری دقیق سطح زمین به روش تفاضل تداخل‌سنجی راداری است. همچنین با مشاهده مقادیر بخار آب ثبت شده توسط



شکل ۸ - افزایش اختلاف مقادیر IPGN و DInSAR نسبت به بخار آب اتمسفری در تمام ایستگاه‌ها

رطوبت نسبی موجب بروز ۱۰ سانتی متر خطا در تهیه جابجایی می‌شود کاملاً همسو است. و در انتها، رابطه‌ای به فرم $3 \times (WV)^2 / 10^3$ جهت تصحیح مقادیر جابجایی عمودی به دست آمده در سنجنده ASAR ارائه گردید.

۵. نتیجه گیری

با توجه به از کار افتادگی سنجنده ASAR در سال ۲۰۱۲ و عدم دسترسی به داده‌های به روز، پیشنهاد می‌گردد در صورت دسترسی به داده‌های همزمان بخار آب ستونی جو با تصاویر SAR، نتایج این پژوهش بر روی سایر سنجنده‌های موجود مانند

اما با بررسی دقیق تر و اعمال مدل‌های مختلف مشخص گردید، با افزایش میزان بخار آب ستونی جو، مقدار خطای حاصل از آن بر روی اندازه‌گیری‌های جابجایی سطح زمین توسط سنجنده ASAR در روش DInSAR به صورت نمایینا توانی افزایش پیدا می‌کند (شکل ۷). همچنین مشخص گردید که در DInSAR به روش دو گذره، افزایش مجموع مقدار بخار آب ستونی جو به میزان 4 g/cm^2 در هر دو تصویر اصلی و فرعی، می‌تواند تا ۶ سانتی متر در اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی جابجایی، خطا ایجاد کند (شکل ۸) که در مقایسه با ادعای [Zebker(1997) ۱] که اظهار داشت تغییرات ۲۰٪

- and InSAR integration", *J. Geophys. Res.*, 110, B03410, doi:10.1029/2004JB003446., 2005.
- CCRS: Canada Centre for Remote Sensing: Global Synthetic Aperture Radar2 (Globe SAR2) Project: 1998-2001.
- Rees, W.G., *Physical Principles of Remote Sensing*, Cambridge University Press, 1990.
- Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl, and T. Rabautte, "The displacement field of the Landers earthquake", *Nature*, 364, 138-142, 1993.
- Dankmayer, A., E. Archibald, T. Boerner, D. Hounam and M. Chandra, "Atmospheric Effects and Product Quality in the Application of SAR Interferometry", *EUSAR*, 89-93, 2004.
- Hanssen, R.F., *Radar Interferometry: Data interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.
- Kursinsky, E.R., G.A. Haij, J.T. Schofield, and R.P. Linfield, "Observing earth's atmosphere with radio occultation measurements using the global positioning systems", *J. Geophys. res.*, 102(D19):23,429-465, 1997.
- Zebker, H.A., C.L. Werner, P.Rosen and S. Hansley, "Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 radar interferometry", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 32(4), 823-836, 1994a.
- Smith, E.K., and S. Weintraub, "The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies", *Proc. IRE*, 41, 1035-1037, 1953.
- Hanssen, R.F., *Atmospheric Heterogeneities in ERS Tandem SAR Interferometry*, 136 pp., Delft Univ. Press, Delft, Netherlands., 1998.
- Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, and G. Elgered, "Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length", *Radio Sci.*, 20, 1593-1607, 1985.
- Saastamoinen, J., "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., 1972.
- Zebker, H., 1997, "Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *Journal of Geophysical research*", 7548, Vol.102, No. B4.
- Li, Z., Muller, J.-P., Cross, P., 2006, "Assessment of the potential of MERIS near-infrared water vapor products to correct ASAR Interferometric measurements". *International Journal of Remote Sensing* Vol. 27, No. 2, P. 349-365. 20 January.

COSMO- و RADARSAT-2، TerraSAR-X و SkyMed بررسی گردد. با توجه به پیچیده بودن روشهای تصحیح تداخل نگارها از بخار آب ستونی جو، پیشنهاد می‌گردد همانطور که در این پژوهش انجام پذیرفت، در صورت دسترسی به داده‌های همزمان بخار آب ستونی جو با تصاویر SAR، با استفاده از رابطه ارائه شده در این پژوهش نتایج جابجایی بدست آمده از روش DInSAR تصحیح گردد و دقت آن با مقادیر بدست آمده از GPS مقایسه گردد.

سپاسگذاری

از سازمان نقشه برداری کشور و همچنین سازمان فضایی اروپا به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز این پژوهش کمال سپاس و قدردانی را داریم.

منابع

ادهم خیابانی، سینا، ۱۳۸۷، "طراحی و توسعه مدل مناسب جهت حذف خطاهای اتمسفری از تصاویر رادار با تاکید بر داده های ENVISAT" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، گروه مهندسی سنجش از دور

معرفی شبکه ژئودینامیک سراسری، سازمان نقشه برداری، اداره کل نقشه برداری زمینی، خرداد

۱۳۸۶

- Zebker, H.A., P.A. Rosen, and S. Hensley, "Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps", *J. Geophys. Res.*, 102(B4), p.7547-7563, 1997.
- Li, Z., J.-P. Muller, P. Cross and E. J. Fielding "Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS),

پیوست - ۱:

نام ایستگاه	تاریخ Master	تاریخ Slave	فاصله زمانی (روز)	فاصله مکانی تصاویر ASAR (متر)	مقادیر جابجایی از GPS (متر)	مقادیر جابجایی از DInSAR (متر)	اختلاف مقادیر GPS و DInSAR (متر)	بخار آب MERIS (گرم بر سانتیمتر مربع)
ZARI	1386/5/1	1387/4/17	349	236.03	0.00783	0.019636	0.019636	2.82
	1387/4/17	1388/6/9	419	81.02	-0.00772	-0.015706	0.015706	2.52
	1388/6/9	1389/5/25	351	303.22	0.00091	-0.016536	0.016536	2.61
GGSH	1386/5/1	1387/4/17	349	236.03	-0.09207	-0.032317	0.059753	4.02
	1387/4/17	1388/6/9	419	81.02	-0.15315	-0.109853	0.043297	3.85
	1388/6/9	1389/5/25	351	303.22	-0.07496	-0.119473	0.044513	3.7
VLDN	1386/5/1	1387/4/17	349	236.03	0.00382	0.040455	0.040455	4.2
	1387/4/17	1388/6/9	419	81.02	-0.00822	0.044001	0.044001	3.99
	1388/6/9	1389/5/25	351	303.22	0.00247	-0.052159	0.052159	3.75
TASJ	1386/5/1	1387/4/17	349	236.03	-0.01419	0.041505	0.041505	3.84
	1387/4/17	1388/6/9	419	81.02	0.00124	-0.033501	0.033501	3.63
	1388/6/9	1389/5/25	351	303.22	0.00085	-0.046281	0.046281	3.57
YKKZ	1386/5/1	1387/4/17	349	236.03	-0.00672	-0.032407	0.032407	3.72
	1387/4/17	1388/6/9	419	81.02	-0.00458	0.046936	0.046936	4.26
	1388/6/9	1389/5/25	351	303.22	0.00138	0.035806	0.035806	3.6
GOLM	1387/2/30	1388/5/26	455	26.37	-0.0037	0.021784	0.021784	3.45
	1388/5/26	1389/3/3	281	22.98	-0.01344	-0.039068	0.039068	3.6
MSHN	1387/2/30	1388/5/26	455	26.37	0.00395	-0.01996	0.01996	3.21
	1388/5/26	1389/3/3	281	22.98	-0.00881	-0.016786	0.016786	3.3
TOUS	1387/2/30	1388/5/26	455	26.37	-0.26585	-0.236689	0.029161	3.39
	1388/5/26	1389/3/3	281	22.98	-0.15567	-0.129991	0.025679	3.48
TORQ	1387/2/30	1388/5/26	455	26.37	0.00819	-0.025274	0.025274	3.24
	1388/5/26	1389/3/3	281	22.98	-0.00377	-0.020022	0.020022	3.27
KALT	1387/2/30	1388/5/26	455	26.37	0.00269	-0.033038	0.033038	3.6
	1388/5/26	1389/3/3	281	22.98	-0.01018	-0.030192	0.030192	3.54
TLGN	1385/2/8	1387/5/25	840	89.11	-0.00631	-0.002243	0.002243	1.26
	1387/5/25	1389/2/17	631	56.57	0.00205	0.019189	0.019189	2.1
HSGD	1385/2/8	1387/5/25	840	89.11	0.0102	-0.017648	0.017648	2.25
	1387/5/25	1389/2/17	631	56.57	-0.01615	0.022577	0.022577	2.55
ARNG	1385/2/8	1387/5/25	840	89.11	0.01629	0.011206	0.011206	2.01
	1387/5/25	1389/2/17	631	56.57	-0.01649	0.028169	0.028169	2.34

2.52	0.023133	-0.023133	0.01049	89.11	840	1387/5/25	1385/2/8	TEHN
3.03	0.021406	0.021406	-0.02188	56.57	631	1389/2/17	1387/5/25	
1.47	0.01012	-0.01012	-0.00615	89.11	840	1387/5/25	1385/2/8	AKHT
2.34	0.022187	0.022187	-0.00576	56.57	631	1389/2/17	1387/5/25	
2.88	0.028517	-0.060347	-0.03183	89.11	840	1387/5/25	1385/2/8	FOIM
3.09	0.031545	-0.075195	-0.04365	56.57	631	1389/2/17	1387/5/25	

پیوست-۲:

ردیف	مناطق مدل	منطقه آزمون	تعداد ایستگاهها IPGN	همبستگی	تعداد تداخل نگاره	تعداد مشاهدات	نوع رگرسیون	رگرسیون پیشنهادی	ضریب همبستگی ی (R ²)	RMSE
۱	آذربایجان - کرج	مشهد	۱۱	٪۹۰.۸۷	۵	۲۷	خطی	$diff = 0.00154 \times (WV) - 0.0167$	۰.۸۲۵۹	۰.۰۱۱
							نمایی	$diff = 0.0031 \times EXP(0.6987 \times WV)$	۰.۷۶۵۴	۰.۰۰۹
							چندجمله ای	$diff = 0.0012 \times WV^2 + 0.0086 \times WV - 0.0077$	۰.۸۲۹۱	۰.۰۱۱
۲	کرج - مشهد	آذربایجان	۱۱	٪۷۵.۴۲	۴	۲۲	توانی	$diff = 0.0032 \times WV^{1.9322}$	۰.۸۳۸۹	۰.۰۱۰
							خطی	$diff = 0.0089 \times (WV) - 0.0025$	۰.۵۶۸۹	۰.۰۱۲
							نمایی	$diff = 0.0034 \times EXP(0.6334 \times WV)$	۰.۵۶۰۴	۰.۰۱۰
۳	مشهد - آذربایجان	کرج	۱۰	٪۸۱.۹۳	۵	۲۵	چندجمله ای	$diff = -0.0032 \times WV^2 + 0.0253 \times WV - 0.0219$	۰.۶۰۰۹	۰.۰۱۶
							توانی	$diff = 0.0039 \times WV^{1.6475}$	۰.۶۶۲۲	۰.۰۰۹
							خطی	$diff = 0.0234 \times (WV) - 0.049$	۰.۶۷۳۷	۰.۰۱۶
							نمایی	$diff = 0.002 \times EXP(0.7815 \times WV)$	۰.۷۳۷۹	۰.۰۰۸
							چندجمله ای	$diff = 0.005 \times WV^2 + 0.0107 \times WV - 0.0078$	۰.۶۸۴۴	۰.۰۱۰
							توانی	$diff = 0.0012 \times WV^{2.5779}$	۰.۷۲۶۳	۰.۰۰۹