

کاربرد مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا در بهبود دقت تعیین موقعیت به روش ماهواره‌ای

الهه صادقی*^۱، مسعود مشهدی حسینعلی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئودزی دانشکده نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- استادیار دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ وصول: ۱۳۹۲/۸/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۷

چکیده

ارائه خدمات ناوبری در تمامی شرایط آب و هوایی به کاربران، همواره به عنوان یکی از مزایای بسیار برجسته سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای به حساب می‌آید. امواج ارسالی از ماهواره‌های این سیستم‌ها از لایه‌های مختلف جو عبور کرده و این امر منجر به ایجاد انکسار در مسیر حرکت موج و در نهایت تأخیر در دریافت امواج مذکور می‌گردد. این تأخیر به برآوردی ناصحیح از موقعیت گیرنده منجر می‌شود. از آنجا که بیشتر فرآیند های جوی در پایینی‌ترین لایه اتمسفر زمین (تروپوسفر) رخ می‌دهد، این لایه، یکی از منابع مهم ایجاد خطا در تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP^۲) با سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS)^۳ است. از روش‌های مختلفی برای تعامل با این منبع خطا استفاده می‌شود. در این مقاله از مدل پیش‌بینی جهانی سستامین^۴ که با داده‌های حاصل از مدل استاندارد اتمسفری حمایت می‌شود و روش ردیابی اشعه^۵ با استفاده از مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا^۶، مدل پیش‌بینی و تحقیقاتی آب و هوا (WRF)^۷ جهت برآورد تأخیر مایل تروپوسفری استفاده گردیده است. نتایج در سطح تعیین موقعیت مقایسه و بررسی شده است. موقعیت مطلق دقیق یک نقطه پس از حذف خطای مورد بحث از هر دو روش در یک بازه دوازده روز تعیین گردید. جهت بررسی نتایج از روش تکرار پذیری استفاده شده است. تکرار پذیری در مؤلفه ارتفاعی نتایج حاصل از تصحیح تأخیر تروپوسفر با استفاده از مدل سستامین و ردیابی اشعه به ترتیب ۳/۱۳ میلی متر و ۰/۹۸ میلی متر به دست آمده است. کاهش ۲/۱۵ میلی متر در خطای مربعی متوسط نمایانگر پتانسیل مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا جهت دستیابی به برآوردی صحیح‌تر در مقدار تخمین تأخیر تروپوسفری با استفاده از روش ردیابی اشعه است.

واژگان کلیدی: سیستم تعیین موقعیت جهانی، تعیین موقعیت مطلق دقیق، مدل عددی پیش‌بینی وضع هوا، ردیابی اشعه.

*. Email: Sadeghi_elaheh@ymail.com

2. Principal point positioning
3. Global Positioning System (GPS)
4. Saastamonien
5. Ray tracing
6. Numerical Weather Prediction Models (NWP)
7. Weather Research and Forecasting (WRF)

مقدمه

امروزه با توجه به مزایای فراوان سیستم‌های تعیین موقعیت و ناوبری ماهواره‌ای، استفاده از آن‌ها رشد چشمگیری داشته است. از مزایای این سیستم‌ها می‌توان به امکان استفاده از آن‌ها در تمامی شرایط آب و هوایی و ساعات شبانه‌روز اشاره کرد. شناسایی منابع ایجاد خطا و کشف روش‌هایی برای کاهش و یا حذف آن‌ها به منظور افزایش دقت مختصات تعیین شده همواره یکی از چالش‌های پیش روی در استفاده از این سیستم‌ها بوده است (Witchayangkoon and Segantine, 2000). یکی از منابع ایجاد خطا، انکسار سیگنال GPS در عبور از لایه‌های مختلف جو زمین است. پایین‌ترین لایه جو، تروپوسفر است. اثر این بخش از اتمسفر روی تمام فرکانس‌های سیگنال GPS یکسان بوده و بر هر دو مشاهدات کد و فاز اثر می‌گذارد (Seebr, 2003). این اثر روی سیگنال‌های ارسالی باعث تأخیر در دریافت سیگنال و در نهایت منجر به برآوردی ناصحیح از موقعیت نقاط می‌شود. این خطا به دو مؤلفه خشک و تر تقسیم می‌شود؛ که هر کدام از آن‌ها از سهمی مستقل در بروز خطا برخوردارند. مؤلفه خشک متأثر از دما و فشار و مؤلفه تر علاوه بر وابستگی به دما و فشار تابعی از میزان رطوبت در طول مسیر سیر سیگنال است. مسئله اساسی ضعف در تخمین مؤلفه تر این تأخیر است. تغییرات شدیدتر مکانی و زمانی رطوبت نسبت به دو پارامتر دیگر در مدل سازی بخش تر این تأخیر مشکل می‌سازد.

از روش‌های مختلفی جهت تخمین خطای تروپوسفری استفاده می‌شود. یکی از روش‌های تعامل با خطای مورد بحث استفاده از مدل‌های پیش‌بینی جهانی است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مدل هاپفیلد (Hopfield, 1969)، مدل سستامینن (Saastamoinen, 1973, 1972) و مدل گود و گودمن (Goat and Goodman, 1974) اشاره کرد. تفاوت این مدل‌ها در پروفیل انکسار و نحوه نگاشت تأخیر عمودی محاسبه شده در راستای زاویه ارتفاعی ماهواره است. این مدل‌ها با دریافت داده‌های سطحی هواشناسی (ظنیر دما، رطوبت و فشار هوا، حاصل از مشاهدات یا مدل‌های استاندارد اتمسفری)، تأخیر تروپوسفری را در اختیار می‌گذارند.

یکی دیگر از روش‌های محاسبه تأخیر مایل تروپوسفری استفاده از پیش‌بینی‌های عددی مقادیر فشار، دما و رطوبت حاصل از مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا^۱ در یک شبکه سه بعدی است (Vedel et al., 2001, Nordman, et al., 2007, Hobiger et al., 2008, Eresmaa et al., 2008). مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا نمایشی سه بعدی از ساختار اتمسفر بر اساس سطوح فشاری مختلف می‌باشند (Warner, 2011). در مقایسه بین دو مجموعه نام برده می‌توان گفت که بیشتر مدل‌های پیش‌بینی جهانی صرفاً به زاویه ارتفاعی وابسته بوده و بنابراین نسبت به تغییراتی که در سطح اتفاق می‌افتد حساس نمی‌باشند. این ویژگی از دقت نتایج مدل‌های مذکور می‌کاهد (Nordman, et al., 2007). اما تأخیر مایلی که از روش ردیابی اشعه با استفاده از مدل‌های عددی هواشناسی حاصل می‌شود علاوه بر وابستگی به زاویه ارتفاعی به آزمون مسیر ماهواره نیز وابسته است (Eresmaa & Jarvinen, 2006). از دیگر تفاوت‌های مهم بین دو دسته مدل معرفی شده ضعف مدل‌های پیش‌بینی جهانی در تخمین تأخیر تر تروپوسفری است. استفاده از پیش‌بینی‌های مدل‌های عددی وضع هوا در روش ردیابی اشعه منجر به تخمین بهتر مؤلفه تر می‌شود (Nordman, et al., 2007).

در سال ۲۰۰۱ روشی به منظور استفاده از داده‌های مدل NWP جهت تخمین تأخیر تروپوسفری توسط وِدل و همکارانش معرفی شد (Vedel et al., 2001). نوردمن (Nordman, et al., 2007) در تحقیقات خود نشان داد که استفاده از مدل‌های عددی هواشناسی در تخمین تأخیر مایل تروپوسفری در مقایسه با مدل‌های پیش‌بینی جهانی از دقت بالاتری برخوردارند. اخیراً نیز تحقیقاتی در زمینه ارزیابی پتانسیل روش ردیابی اشعه با استفاده از مدل‌های عددی هواشناسی در جهت محاسبه تأخیر تروپوسفری روی مشاهدات GPS انجام گرفته (Eresmaa & Jarvinen, 2010, Ghoddousi-Fard et al., 2009, Hobiger et al., 2008).

تفاوت‌های موجود بین مدل‌های نام برده و نتایج حاصل از تحقیق محققین دیگر، انگیزه بررسی و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های مذکور را در کشور ایجاد می‌کند. هدف

بر خط ارسال و موقعیت مطلق نقاط مجدداً محاسبه می‌گردد. تکرار پذیری موقعیت در دو دسته مختصات حاصله معیار مورد استفاده برای انتخاب روش بهینه است. فصل دوم از این مقاله به مدل سازی تأخیر تروپوسفری و نحوه محاسبه این تأخیر با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی جهانی و ردیابی اشعه مبتنی بر NWP پرداخته است. در فصل سوم نحوه محاسبه این تأخیر و نحوه اعمال آن بر روی مشاهدات خام دریافتی از گیرنده‌های GPS و در نهایت محاسبه موقعیت مطلق نقاط معرفی و نتایج حاصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها نتایج عددی تحقیق و بررسی آن‌ها موضوعی است که در فصل چهارم به آن پرداخته شده است.

مدل سازی تأخیر تروپوسفر

اتم‌سفر از لایه‌هایی با ماهیت متفاوت تشکیل می‌شود. بنابراین سرعت سیگنال‌های GPS در عبور از اتم‌سفر، بین ماهواره و ایستگاه زمینی، تغییر می‌کند. بر اساس اصل فرمت این تغییرات پیوسته در شکست، منجر به انحراف موج از مسیر مستقیم می‌شود (Mendes, 1999). سیگنال مسیر منحنی و مقعر شکلی را به سمت زمین طی می‌کند بنابراین مسیر طی شده بزرگ‌تر از مسیر مستقیم آن است (Mendes, 1999). میزان تأخیر انتشار در عبور از تروپوسفر، اختلاف موجود بین طول مسیر الکترومغناطیس (حاصل از انتگرال‌گیری در مسیر طی شده (ray)) و طول مسیر هندسی (حاصل از انتگرال‌گیری در فضای خلأ (vac)) طی شده در این لایه است (Neill, 2003).

$$d_{trop} = \int_{ray} nds - \int_{vac} ds \quad (1)$$

در رابطه اخیر n ضریب شکست و ds المان دیفرانسیلی طول مسیر انتشار سیگنال است. همان طور که گفته شد این تأخیر را می‌توان به صورت مجموعی از دو مؤلفه خشک (d_h^z) و تر (d_w^z) نوشت:

$$d_{trop} = d_h^z + d_w^z \quad (2)$$

از ارائه این مقاله، ارزیابی و مقایسه بین دو مدل نام برده در منطقه‌ای مرطوب از ایران است. از آنجا که مشکل عمده در تخمین مؤلفه تر تأخیر تروپوسفری است، منطقه‌ای مرطوب از ایران در این تحقیق انتخاب شده است تا کارایی روش ردیابی اشعه با استفاده از مدل‌های NWP در بهبود برآورد مؤلفه نام برده بررسی شود. در این تحقیق از مدل پیش‌بینی جهانی سیستمین که با داده‌های حاصل از مدل استاندارد اتم‌سفری حمایت می‌شود و تأخیر تروپوسفری حاصل از روش ردیابی اشعه با استفاده از مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا، WRF^۱ استفاده گردیده است. در استفاده از روش ردیابی اشعه دو رویکرد مورد بررسی قرار گرفته است. یک حالت زمانی است که از داده‌های سطحی مشاهده شده توسط ایستگاه هواشناسی در روند پردازش استفاده شده و در حالت دوم از داده‌های سطحی حاصل از مدل NWP جهت محاسبات بهره گرفته شده است. میزان تأخیر تروپوسفری برای هر ماهواره و در هر اپک مشاهداتی برآورد شده و مشاهدات مربوطه نسبت به خطای مربوطه تصحیح شده‌اند.

جهت ارزیابی کارترین روش در حذف یا کاهش این منبع خطا از سامانه‌های بر خط تعیین موقعیت مطلق دقیق استفاده شده است. در تعیین موقعیت با سامانه‌های مذکور علاوه بر موقعیت مطلق نقاط، مقدار تأخیر تروپوسفری نیز در راستای زینتی هر اپک مشاهداتی تولید می‌گردد. از توابع نگاشت مختلفی می‌توان جهت نگاشت تأخیر زینتی بر راستای هر ماهواره و در هر اپک مشاهداتی استفاده کرد که از آن جمله می‌توان به GMF^۲، VMF^۳، NMF^۴ اشاره کرد (Bohem et al., 2006, 2007, Neill, 1996). در این تحقیق از تابع نگاشت GMF استفاده شده است. مقادیر تأخیر مایل بدست آمده از دو روش نام برده از مقدار حاصل از سرویس‌های بر خط تعیین موقعیت کم می‌شود و این اختلاف به عنوان باقیمانده خطای تروپوسفر روی مشاهدات کد و فاز در سطح فایبل راینکس^۵ به مشاهدات خام اعمال می‌گردد. فایبل‌ها برای پردازش به سامانه پردازش

1. Weather Research and Forecasting
3. Viena mapping function
5. RINEX (Receiver INdependent EXchange) Fermat's principle

2. Global mapping function
4. Neill mapping function
6. Fermat's principle

مدل سستامینن

مدل سستامینن یکی از رایج‌ترین و اجرایی‌ترین مدل‌های پیش‌بینی جهانی است (Mendes, 1999). این مدل مبتنی بر قانون گازها بوده و مدلی استاندارد محسوب می‌شود. سستامینن دو مؤلفه خشک (d_h^z) و تر (d_w^z) تروپوسفری را با روابط زیر ارائه کرد (Saastamoinen, 1973):

$$d_h^z = \frac{0.002277P_s}{(1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00000028H_s)} \quad (3)$$

$$d_w^z = 0.002277 \left(\frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) e_s$$

در این رابطه P_s فشار اتمسفر در ایستگاه بر حسب میلی بار، e_s فشار بخار آب بر حسب میلی بار، T_s دما در ایستگاه بر حسب کلون و φ عرض جغرافیایی ایستگاه می‌باشند. کمیت‌های هواشناسی در ایستگاه از مدل استاندارد اتمسفری بدست می‌آید (Doch et al., 2007). مجموع دو تأخیر تر و خشک میزان تأخیر تروپوسفری را در راستای زینتی به دست می‌دهد. با داشتن زاویه ارتفاعی ماهواره در هر اپک و با استفاده از توابع نگاشت^۱ مانند تابع نگاشت GMF تأخیر زینتی به تأخیر در راستای ماهواره تبدیل می‌گردد.

تخمین تأخیر مایل با استفاده از ردیابی اشعه

براساس مدل عددی پیش‌بینی وضع هوا

پیش‌بینی‌های مدل‌های عددی هواشناسی در قالب یک شبکه سه بعدی ارائه می‌شوند. تقسیم‌بندی این شبکه در راستای ارتفاعی براساس سطوح فشاری است. کمیت‌های هواشناسی در هر سطح فشاری، در یک شبکه افقی با رزولوشن مشخصی پیش‌بینی می‌شوند. بدین ترتیب اتمسفر تا یک سطح ارتفاعی مشخص شبیه سازی می‌گردد.

محاسبه شکست در طول مسیر سیگنال بین ماهواره و گیرنده با استفاده از مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا مبتنی بر ردیابی اشعه از میان لایه های اتمسفری است. برای تعیین مسیر سیگنال و محاسبه تأخیر مایل تروپوسفری در روش ردیابی اشعه از مسیر هندسی، زوایای زینتی و آزیموت هندسی بین گیرنده و ماهواره و موقعیت جغرافیایی

گیرنده استفاده می‌شود. تأخیر مایل از انتگرال گیری انکسار در طول مسیر سیگنال بدست می‌آید (Hofmann-Wellenhof et al., 2001):

$$STD = \int_s (n-1) ds = 10^{-6} \int_s N ds \quad (4)$$

در رابطه اخیر میزان انکسار (N)، تابعی از دما، فشار و رطوبت است. این کمیت‌ها از مدل عددی پیش‌بینی وضع هوا قابل استخراج است (Bevis et al., 1994):

$$N = \frac{k_1 p}{T} + \frac{(k_2 - k_1) q p}{(0.622 + 0.378 q) T} + \frac{k_3 q p}{(0.622 + 0.378 q) T^2} \quad (5)$$

در این رابطه $k_2 = 70.4 \text{ K hPa}^{-1}$ ، $k_1 = 77.60 \text{ K hPa}^{-1}$ و $k_3 = 3.739 \times 10^{-5} \text{ K}^{-2} \text{ hPa}^{-1}$ می‌باشند. تأخیر مایل تروپوسفری از طریق ردیابی اشعه در طی سه مرحله از شبکه مدل عددی پیش‌بینی وضع هوا قابل محاسبه است (Eresmaa & Jarvinen, 2005). در ادامه این سه مرحله به طور خلاصه توضیح داده شده است.

تعیین مسیر سیگنال در راستای شبکه مدل

عددی پیش‌بینی وضع هوا

مسیر سیگنال توسط مجموعه‌ای از نقاط با مختصات سه بعدی تعیین می‌شود. این نقاط محل تقاطع سیگنال با سطوح مدل NWP است؛ این مطلب را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد. ردیابی از ایستگاه مشاهداتی تا بالاترین سطح از مدل NWP صورت می‌گیرد. در این مرحله از آنجایی که ممکن است ایستگاه از نظر فشاری بین سطوح مدل NWP قرار گیرد ابتدا پایین‌ترین لایه مدل که بالای سر ایستگاه قرار دارد شناسایی می‌شود. شناسایی سلولی که سیگنال در هر سطح فشاری از آن عبور می‌کند به عنوان دومین گام در فرآیند تعیین مسیر سیگنال در روش ردیابی اشعه محسوب می‌شود (Eresmaa & Jarvinen, 2005).

رطوبت ویژه از روابط پیشنهاد شده توسط هایبگر استفاده شده است (Hobiger et al., 2008). به این ترتیب تمام نقاط برای محاسبه میزان انکسار در طول مسیر سیگنال از پارامترهای هواشناسی برخوردار می گردند. میزان انکسار با استفاده از رابطه ۵ در طول مسیر انتشار سیگنال محاسبه می شود.

محاسبه تأخیر مایل تروپوسفری در طول

مسیر سیگنال

بعد از محاسبه انکسار پذیری از رابطه ۵، میزان تأخیر تروپوسفری روی مسیر مایل سیگنال از رابطه ۴ بدست می آید. از آنجا که مدل های NWP تمام لایه خنثی جو را پوشش نمی دهند، برای محاسبه تأخیر از بالاترین لایه مدل NWP تا بالاترین سطح از لایه خنثی جو (STD_{top})، از مدل های پیش بینی جهانی استفاده می شود. در این تحقیق از مدل سستانمین بدین منظور استفاده شده است (Saastamoinen, 1972):

$$STD_{top} = \frac{2.2779 \times 10^{-3} p_k}{\cos \zeta_{a,k} [1 - 0.00266 \cos(2\phi_k) - 0.00000028 z_k]} \quad (6)$$

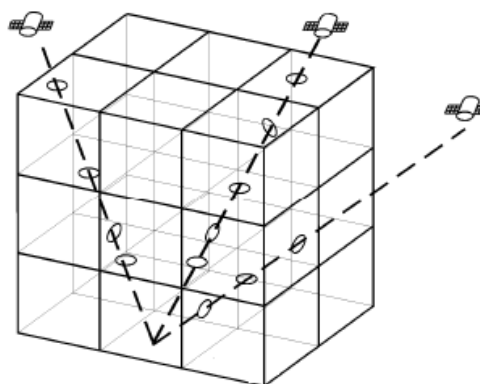
در این رابطه p_k ، $\zeta_{a,k}$ ، ϕ_k ، z_k به ترتیب به فشار، زاویه زنی، عرض جغرافیایی و ارتفاع نقطه تلاقی بر روی بالاترین سطح مدل NWP اشاره دارد. در نهایت تأخیر مایل تروپوسفری از جمع دو تأخیر بدست آمده به صورت زیر تعریف می شود:

$$STD = STD_{mod} + STD_{top} \quad (7)$$

در این رابطه STD_{mod} میزان تأخیر مایل تروپوسفری مسیر سیگنال از گیرنده تا بالاترین سطح مدل NWP است که از مجموع میزان تأخیر مایل تروپوسفری بین هر دو لایه متوالی (STD_n) بدست می آید (Eresmaa & Jarvinen, 2005):

$$STD_{mod} = \sum_{n=1}^{k-1} STD_n \quad (8)$$

به این ترتیب با داشتن یک شبکه سه بعدی از پارامترهای هواشناسی (دما، رطوبت و فشار) همراه با داده های هواشناسی سطحی (حاصل از مدل NWP یا مشاهدات



شکل ۱- مسیر سیگنال ارسالی از ماهواره های GPS به سمت گیرنده و نقاط تلاقی آنها با شبکه سه بعد مدل NWP

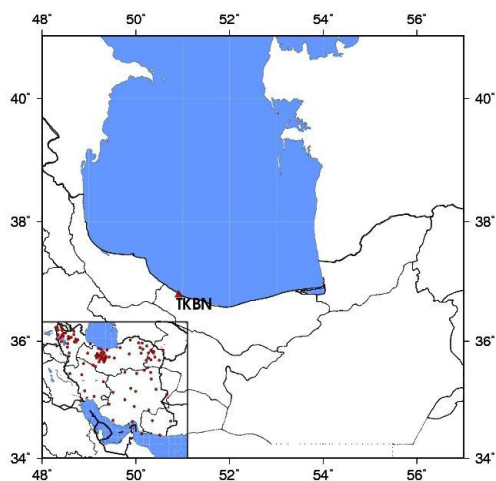
انتقال متغیرهای مدل عددی پیش بینی وضع

هوا روی مسیر سیگنال

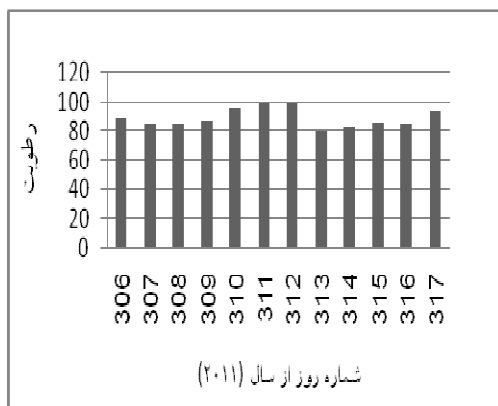
برای محاسبه میزان تأخیر تروپوسفری در طول مسیر سیگنال، به مقادیر دما، فشار و رطوبت نقاط برخورد سیگنال با سطوح فشاری نیاز است. برای این منظور با یک درون یابی افقی بین مقادیر هواشناسی روی چهار نقطه از سلولی که در سطح مورد نظر و در مرحله قبل در مدل NWP شناسایی شده است، مقادیر دما، فشار و رطوبت در نقاط تلاقی بدست می آید. در این تحقیق از روش درون یابی بای لینر استفاده شده است (Kang-Tsung, 2009).

تأخیر تروپوسفری در هر اپک مشاهداتی مورد نیاز است در حالی که خروجی مدل NWP مورد استفاده، از رزولوشن زمانی یک ساعته برخوردار است. بدین لحاظ درون یابی نتایج این مدل ها در فضای زمان اجتناب ناپذیر است. بدین منظور از درون یابی خطی استفاده شده است (Hobiger et al., 2008). به دلیل تعداد کم لایه های فشاری و در واقع پایین بودن رزولوشن ارتفاعی جهت دستیابی به رزولوشن ارتفاعی قوی تر بین سطوح فشاری، درون یابی اطلاعات در امتداد قائم نیز انجام می پذیرد. تعداد لایه های ارتفاعی جهت درون یابی قائم به گونه ای در نظر گرفته می شود که تراکم لایه ها در سطح های پایینی تروپوسفر بیشتر باشد (Rocken, 2001). در این تحقیق جهت درون یابی قائم دما از درون یابی خطی و برای فشار و

تنکابن در بازه زمانی مذکور است. متوسط رطوبت روزانه در بازه زمانی مورد نظر در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳- موقعیت جغرافیایی ایستگاه IPGN تنکابن



شکل ۴- رطوبت نسبی در ایستگاه تنکابن در بازه زمانی ۲

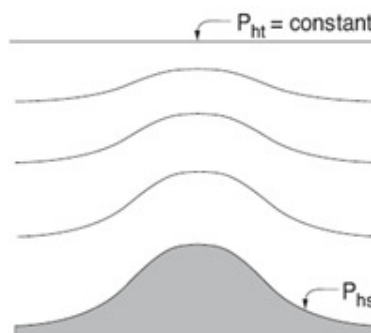
نوامبر تا ۱۳ نوامبر سال ۲۰۱۱

در ادامه با استفاده از این مقادیر و خروجی مدل عددی WRF از طریق ردیابی اشعه تأخیر مایل تروپوسفری برای هر مشاهده و در هر اپک محاسبه گردیده است. در این روند یکبار از داده‌های سطحی حاصل از مدل WRF جهت محاسبات استفاده شده و یکبار از داده‌های سطحی مشاهده شده بهره گرفته شده است. در مرحله دوم، تأخیر زینتی تروپوسفر با استفاده از مدل پیش‌بینی جهانی سستامینز مجدداً محاسبه گردیده است. با اعمال تابع نگاشت GMF بر روی خروجی این مرحله، تأخیر مایل تروپوسفری برای هر ماهواره و در هر اپک مشاهداتی محاسبه شده است.

صورت گرفته) می‌توان میزان تأخیر مایل تروپوسفری را برای هر ماهواره و در هر اپک مشاهداتی محاسبه کرد.

روند پردازش و نتایج عددی

در این تحقیق از پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته مدل تحقیقات آب و هوایی و پیش‌بینی وضعیت هوا (WRF) در بازه‌های زمانی یک ساعته با رزولوشن افقی ۰/۱ درجه در ۲۵ سطح فشاری (از فشار ۱۰۰۰ میلی بار تا فشار ۵۰ میلی بار) استفاده شده است. تصویری از لایه‌های فشاری مدل WRF در شکل ۲ به نمایش گذاشته شده است. مدل WRF با همکاری اداره ملی جوی و اقیانوسی (NOAA) و مرکز ملی تحقیقات اتمسفری (NCAR) و انجمن تحقیقات هواشناسی توسعه پیدا کرده است.



شکل ۲- لایه‌های فشاری در مدل WRF. فشار P_{ht} در

سطح زمین و P_{hs} فشار در سطوح فشاری (Skamarock et al., 2005)

ایستگاه تنکابن از شبکه IPGN به دلیل رطوبت بالا جهت بررسی و ارزیابی نتایج انتخاب شده است. موقعیت جغرافیایی این ایستگاه در شکل ۳ به نمایش گذاشته شده است.

در ابتدا برای محاسبه تأخیر مایل از روش ردیابی اشعه، آزیموت و زاویه ارتفاعی ماهواره از طریق پردازش فایل‌های مشاهداتی راینکس، برای تمامی ماهواره‌ها و در تمام اپک‌های مشاهداتی با نرخ ۳۰ ثانیه محاسبه شده است.

بازه زمانی مورد تحقیق در این مقاله دوازده روز است که از ۲ نوامبر تا ۱۳ نوامبر سال ۲۰۱۱ ادامه می‌یابد. علت انتخاب این بازه زمانی بالا بودن میزان رطوبت در ایستگاه

حاصل از پردازش بر خط داده‌ها کم و مقدار حاصل با مشاهدات کد و فاز مربوطه در فایل راینکس جمع می‌گردد. به عبارت دیگر انتظار می‌رود تا این اختلاف میزان باقیمانده خطای مدل نشده را تصحیح نماید. فایل‌های راینکس بدست آمده در این مرحله جهت محاسبه موقعیت مطلق دقیق سامانه بر خط تعیین موقعیت مطلق دقیق معرفی می‌گردد. تمامی این مراحل برای تأخیرهای مایل حاصل از ردیابی اشعه با داده‌های سطحی حاصل از مدل WRF و تأخیرهای مایل حاصل از مدل سستامین نیز تکرار شده است.

جهت ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از دو روش شرح داده شده، روز میانی از بازه زمانی مورد تحقیق به عنوان اپک مرجع در نظر گرفته شده است و تکرارپذیری مختصات‌های بدست آمده از سرویس برخط مذکور، نسبت به این اپک مرجع مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج در جدول ۱ گزارش شده است.

فایل‌های مشاهداتی راینکس جهت تعیین موقعیت دقیق به سامانه تعیین موقعیت مطلق دقیق مستقر در سرور مرکز منابع طبیعی کانادا NRcan به آدرس: <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod> ارسال گردید. در فرآیند تعیین موقعیت مطلق دقیق ضمن محاسبه مختصات نهایی نقاط، تأخیر زینتی تروپوسفر برای هر یک از اپک‌های اندازه‌گیری محاسبه شده است. جهت محاسبه تأخیر مایل تروپوسفری از تأخیرهای زینتی مربوط به هر اپک از تابع نگاشت GMF مربوط به هر ماهواره در آن اپک خاص استفاده شده است. با توجه به اینکه تأخیر خشک ۹۰٪ و تأخیر تر ۱۰٪ از کل تأخیر را به خود اختصاص می‌دهند، هنگام تبدیل تأخیر زینتی به تأخیر مایل ۹۰٪ از تأخیر زینتی کل در تابع نگاشت خشک و ۱۰٪ از آن در تابع نگاشت تر ضرب شده و با جمع بستن دو مقدار حاصله تأخیر مایل کل بدست آمده است. در یک مرحله تأخیر تروپوسفری بدست آمده از ردیابی اشعه با داده‌های سطحی مشاهداتی از تأخیر مایل تروپوسفر

جدول ۱- مقادیر خطای مربعی متوسط تکرار پذیری در موقعیت مطلق دقیق ایستگاه تنکابن به سه روش تصحیحی تأخیر تروپوسفری

ریشه خطای مربعی متوسط تکرارپذیری (میلی‌متر)			روش مورد استفاده
ارتفاعی	شمالی - جنوبی	شرقی - غربی	
۰/۹۸	۱/۳۵	۰/۸۸	ردیابی اشعه همراه با داده‌های سطحی مشاهداتی
۳/۲۸	۲/۹۵	۳/۴۲	ردیابی اشعه همراه با داده‌های سطحی مدل WRF
۳/۱۳	۳/۴۶	۲/۶۱	مدل سستامین

در مؤلفه ارتفاعی موقعیت این ایستگاه از ۳/۱۳ میلی‌متر در روش تصحیح تأخیر تروپوسفر با استفاده از مدل سستامین به ۰/۹۸ میلی‌متر در روش ردیابی اشعه همراه با داده‌های سطحی مشاهداتی کاهش پیدا کرده است. همچنین با اعمال تأخیر تروپوسفری حاصل از روش ردیابی اشعه همراه با داده‌های سطحی مشاهداتی (روش دوم در این مقاله)، تکرار پذیری در مؤلفه‌های شرقی و شمالی به ترتیب ۲/۱۱ و

نتیجه گیری

تصحیح‌های تروپوسفری محاسباتی با سه روش مذکور، به فایل‌های مشاهداتی خام گیرنده اعمال و موقعیت دقیق روزانه از این ایستگاه با استفاده از داده‌های تصحیح شده تخمین زده شد. از تکرارپذیری موقعیت دقیق محاسبه شده برای ایستگاه تنکابن به عنوان معیاری جهت تحلیل و مقایسه نتایج بدست آمده استفاده شده است. تکرارپذیری مختصات

- Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research*, Vol.111.
2. Bohm J., Heinkelmann R., Schuh H., 2007, Short Note: A Global Model of Pressure and Temperature for Geodetic Applications. *Journal Geod*, 81(19), pp. 679- 683.
 3. Chang, Kang-Tsung, 2009, Computation on for Bilinear Interpolation. *Introduction to Geographic Information Systems*. 5th Ed. New York, NY: McGraw-Hill.
 4. Dach, R., Hugentubler, U., Fridez, P., Meindl, M., 2007, Bernese GPS Software Version 5.0.612 pp., Astronomical Institute, University of Berne.
 5. Eresmaa, R., Jarvinen, H., 2005, Estimation of spatial GPS Zenith Delay observation error covariance. *Tellus* 57A, 194–203.
 6. Eresmaa, R., Jarvinen, H., 2006, an observation operator for ground-based GPS slant delays, *Tellus*, 58A, 131–140.
 7. Reima Eresmaa, R., Healy, S., Jarvinen, H., Salonen, K., 2008, Implementation of a ray-tracing operator for ground-based. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113.
 8. Ghoddousi-Fard, R., 2009, Modelling tropospheric gradients and parameters from NWP models: Effects on GPS estimates, PhD thesis, 216 pp., Dep. of Geode and Geometrics Eng., Univ. of N. B., Fredericton, N. B., Canada.
 9. Hopfield, H. S., 1969, Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data. *Journal of Geophysical Research*, 74(18), 4487-4499.
 10. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J., 2001, *GPS Theory and practice*. 5th Edition. Springer, New York, ISBN 3-211-83534-2, 384 pp.
 11. Hobiger T., Ichikawa R., Koyama Y., Kondo T., 2008, Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models, *J. Geophys. Res.*, vol. 113.
 12. Mendes, V. B., 1998, modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques. Ph.D. Thesis. Univ. New Brunswick, p.353.
 13. Niell, A., 1996, Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *J. Geophys. Res.* 101(B2), 3227–3246.
 14. Niell, A. E., 2001, Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models, *Physics and Chemistry of the Earth*, 26, 475–480.
 15. Nordman M., Eresmaa R., Poutanen M., Jarvinen H., Koivula H., Luntama J. P., 2007, Using numerical weather prediction model derived tropospheric slant delays in GPS

۱/۳ میلی متر بهبود می‌یابد. نتایج بدست آمده گویای این مطلب است که استفاده از مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا به دلیل در اختیار گذاشتن شبکه‌ای سه بعدی از پارامترهای جوی، همراه با داده‌های سطحی مشاهداتی، راهکاری مناسب در برآورد خطای تروپوسفری مشاهدات GPS است.

اما استفاده از روش ردیابی اشعه با داده‌های سطحی حاصل از مدل WRF در مقایسه با روش استفاده از مدل سستامینن به بهبود تکرارپذیری مختصات در هر سه مؤلفه نمی‌انجامد. به عبارت دیگر بر اساس نتایج حاصل، تخمین تأخیر تروپوسفری با مدل پیش‌بینی جهانی سستامینن به برآوردی صحیح تر از این تأخیر در مقایسه با روش ردیابی اشعه بدون استفاده از داده‌های سطحی مشاهداتی می‌انجامد. نتایج این پژوهش بر این نکته تأکید دارد که مدل عددی هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق در محاسبه داده‌های سطحی ضعیف بوده و بنابراین استفاده از آن در تعیین موقعیت مستلزم استفاده از روش‌های پس پردازشی یا داده گواری جهت بهبود نتایج این مدل در سطح زمین است. توجه به این موضوع از آن جهت حائز اهمیت است که کوچک‌ترین خطا در داده‌های سطحی می‌تواند به خطای بزرگی در نتایج تعیین موقعیت منتهی گردد (Doch et al., 2007). بنابراین پیشنهاد می‌شود تا در غیاب داده‌های سطحی دقیق از مدل‌های استاندارد اتمسفری و مدل‌های پیش‌بینی جهانی جهت برآورد تأخیر تروپوسفری استفاده گردد. در غیراین صورت نتایج این تحقیق بر استفاده از روش ردیابی اشعه مبتنی بر داده‌های مدل هواشناسی WRF به همراه داده‌های سطحی با دقت مناسب برای حذف اثر تأخیر تروپوسفری تأکید دارد.

منابع

1. Bevis, M., Businger, S., Chiswell S., Herring, T. A., Anthes, R. A., Rocken, C., Ware, R. H., 1994, GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto perceptible water. *Journal of Applied Meteorology*, No. 33, PP. 379–386.
- Boehm, J., B. Werl, Schuh, H., 2006a, Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather

- X., Wang, W., Powers J. G., 2008, A Description of the Advanced Research WRF Version 3. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
20. Seeber, G., 2003, Satellite Geodesy, 2nd, completely revised and extended edition.
21. Vedel H., Mogensen, K. S., Huang, X. Y., 2001, Calculation of zenith delays from meteorological data, comparison of NWP model, radiosonde and GPS delays, Phys. Chem. Earth, Vol. 26, No. 6-8, pp. 497-502,
22. Warner, T. T., 2011, Numerical Weather and Climate Prediction, United States of America by Cambridge University Press, New York, pp. 526.
23. Witchayangkoon, B., Segantine, P. C. L., 1999, Testing JPL's PPP Service. GPS Solutions, 3(1), 73- 76.
- processing: a case study, Geophysica, Vol. 43: 43-51.
16. Rocken, C., Sokolovskiy, S., John, J. M., Hunt, D., 2001, Improved mapping of tropospheric delays. Journal of atmospheric and Oceanic Technology, 18(7), 1205-1213
17. Saastamoinen, J., 1972, Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysics Monograph Series, Vol. 15. Edited by Soren W. Henriksen, Armando Mancini, and Bernard H. Chovitz. Washington, DC: American Geophysical Union, p.247.
18. Saastamoinen, J., 1973, Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction., Bulletin Geodesique, 105, pp.279-298, 106, pp. 383-397, 107, pp. 13-34. Printed in three parts.
19. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker D. M., Duda, M. G., Huang,