

قابلیت محصولات مداری سرویس IGS برای کاربردهای هواشناسی سامانه GPS

محمدعلی شریفی^۱، مهدی قهرمانی^{۲*}، علی سام خانیانی^۳

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
sharifi@ut.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی
- دانشگاه تهران
ghahremanim@ut.ac.ir

^۳ استادیار گروه نقشه‌برداری - دانشکده عمران - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
ali.sam@nit.ac.ir

(تاریخ دریافت خرداد ۱۳۹۶، تاریخ تصویب فروردین ۱۳۹۷)

چکیده

آگاهی از مقادیر دقیق بخار آب موجود در جو، از اهمیت بالایی در پیش‌بینی وضعیت آب و هوا برخوردار است. در این مطالعه با استفاده از روش تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP)، پارامتر تاخیر کلی تروپوسفری (ZTD) به کمک مشاهدات گیرنده‌های GPS سامانه سمت و همچنین ایستگاه GPS دائم سازمان نقشه‌برداری برآورد شده است. هزینه محاسباتی پایین‌تر یکی از برتری‌های روش PPP نسبت به روش تفاضلی دوگانه در برآورد تاخیر تروپوسفری می‌باشد. مشاهدات برای بیست روز متوالی از تاریخ ۲۰۱۵/۷/۱۰ تا ۲۰۱۵/۷/۲۹ استفاده شده است. با استفاده از داده‌های هواشناسی سطحی در مدل تجربی، سهم قسمت هیدروستاتیک (خشک) از قسمت غیرهیدروستاتیک (تر) در تاخیر کلی تروپوسفری تفکیک شده است. در ادامه با استفاده از تابع تبدیل، تاخیر ناشی از قسمت غیرهیدروستاتیک که ناشی از بخار آب اتمسفر است، به بخار آب قابل بارش تبدیل شد. برای انجام پردازش از سه نوع داده‌های ساعت و مداری نهایی (final) و سریع (rapid) و خیلی سریع (ultra-rapid) تولید شده توسط سرویس بین‌المللی ناوبری جهانی (IGS) استفاده شده است. پردازش مشاهدات در نرم‌افزار Bernese 5.0 انجام گرفت. همچنین بخار آب قابل بارش حاصل از روش PPP با نتایج بارش سطحی ایستگاه‌های هواشناسی مقایسه شد. برای اعتبار سنجی مقدار بخار آب محاسبه شده توسط GPS، از مقادیر متناظر مشاهده شده توسط رادیوسوند استفاده شد. برای این منظور، ایستگاه GPS سازمان نقشه‌برداری و ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد انتخاب شد. نتایج نشان داد برای حالتی که از داده‌های ساعت و مدار نهایی در پردازش استفاده می‌شود، میزان انحراف معیار و RMS و همبستگی به ترتیب ۱/۲۵۶۴ میلی‌متر، ۱/۰۹۶۲ میلی‌متر و ۰/۹۶۹۸ بوده است و این مقادیر برای حالتی که از محصولات ساعت و مداری سریع استفاده گردید، به ترتیب ۱/۵۶۵۰ میلی‌متر، ۱/۲۲۳۵ میلی‌متر و ۰/۹۶۴۷ بدست آمد. در نهایت مقادیر انحراف معیار و RMS و همبستگی به ترتیب برای محصولات خیلی سریع برابر ۲/۶۰۸۶ میلی‌متر، ۱/۵۷۹۶ میلی‌متر و ۰/۹۳۵۲ است.

واژگان کلیدی: تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP)، تاخیر کلی زینتی تروپوسفر، بخار آب قابل بارش، رادیوسوند

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

بخار آب اتمسفر فراوان‌ترین گاز گلخانه‌ای است و نقش اساسی در تشکیل شرایط آب و هوایی، تغییرات محیطی و گرمایش جهانی^۱ ایفا می‌کند [۱]. دانستن دقیق مقدار بخار آب موجود در اتمسفر در بهبود پیش‌بینی آب و هوا و پایش وضعیت جوی حائز اهمیت است. به طور کلی تاخیر انتشار امواج GNSS^۲ ناشی از اثر تروپوسفر در راستای زنیت را تاخیر کلی زینتی تروپوسفر^۳ می‌گویند [۲]. می‌توان با استفاده از داده‌های سطحی هواشناسی این تاخیر را به مقدار بخار آب قابل بارش^۴ اتمسفر تبدیل کرد. در یک دهه‌ی گذشته سیستم ناوبری ماهواره‌ای جهانی همانند یک وسیله دقیق و مقرون به صرفه برای مطالعه‌ی اتمسفر به کار گرفته شده است. اطلاعات به دست آمده از طریق GNSS درباره تاخیر تروپوسفری در مقیاس‌های زمانی مختلف را می‌توان به منظور پیش‌بینی شرایط آب و هوایی استفاده کرد.

در بحث تعیین موقعیت با استفاده از GNSS، تاخیر تروپوسفری به عنوان یک پارامتر مزاحم تلقی می‌گردد. بدین لحاظ برای افزایش دقت تعیین موقعیت درصد حذف و کاهش اثر آن هستند. در حالی که امروزه می‌توان برای کاربردهای هواشناسی مقدار بخار آب قابل بارش تروپوسفر را از طریق تاخیر انتشار سیگنال‌های GPS هنگام عبور از جو زمین بدست آورد، زیرا تاخیر (خطای) تروپوسفری تابعی از فشار، دما و رطوبت جو است.

در اوایل دهه ۱۹۹۰، محققین تکنیک‌هایی را توسعه دادند که خطای تروپوسفری موجود در سیگنال‌های GPS برای تعیین مقدار بخار آب قابل بارش اتمسفر استفاده شود. این امر منجر به تعریف تکنیک جدیدی به نام GPS Meteorology (به اختصار GPS-MET) گردید [۳].

از زمان توسعه هواشناسی به روش GPS در دهه‌ی ۱۹۹۰، سامانه تعیین موقعیت جهانی به عنوان یک روش موثر برای مطالعه اتمسفر از قبیل برآورد تاخیر کلی زینتی تروپوسفری شناخته شده است. دو روش کلی برای برآورد تاخیر تروپوسفر به وسیله GPS استفاده می‌شود. روش اول پردازش‌های تفاضلی دوگانه‌ی مشاهدات GPS و روش

دوم تعیین موقعیت مطلق دقیق^۵ است. روش تفاضلی دوگانه یکسری محدودیت‌هایی دارد. در این روش فاصله بین ایستگاه‌ها باید کمتر از ۵۰۰ کیلومتر باشد. همچنین به دلیل استفاده از شبکه نقاط GPS و تعداد گیرنده‌های زیاد، هزینه استفاده از این روش زیاد و مقرون به صرفه نیست. روش دیگر، روش تعیین موقعیت مطلق دقیق است. در این روش تنها از یک دستگاه گیرنده GPS برای جمع‌آوری مشاهدات استفاده می‌شود. این روش وابسته به پردازش مشاهدات غیر تفاضلی یک گیرنده‌ی تنهاست که به طور مستقیم می‌توان مقدار تاخیر زینتی تروپوسفر را محاسبه کرد [۴].

به طور کلی اتمسفر روی امواج میکروویو تاثیر می‌گذارد. از جمله تکنیک‌های ژئودتیک که متاثر از تاثیرات اتمسفر هستند، می‌توان از سیستم تعیین موقعیت جهانی و سیستم SAR^۶ و همچنین تکنیک VLBI^۷ نام برد [۵]. به طور کلی در علوم ژئودتیک جو را به دو بخش تروپوسفر و یونوسفر تقسیم می‌کنند.

یونوسفر بخش بالایی جو است که توسط تابش‌های خورشیدی یونیزه می‌شود. این لایه در ارتفاع ۵۰-۱۰۰۰ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد. یونوسفر به دلیل دارا بودن ذره‌های باردار، امواج الکترومغناطیس را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تعداد الکترون‌ها در یونوسفر به اندازه‌ای است که می‌توانند بر انتشار فرکانس رادیویی تاثیر بگذارد. تراکم یون‌ها در این لایه در طول روز و شب، فصل‌ها و براساس بازه فعالیت خورشیدی تغییر می‌کند. میزان اثر این لایه بر روی امواج الکترومغناطیس به گرانش زمین نیز بستگی دارد. این خطا یکی از مهمترین منابع خطا در اندازه‌گیری با سامانه‌های تعیین موقعیت جهانی است [۶]. برای کاهش اثر این خطا و از بین بردن آن، ترکیب خطی دو موج حامل L1 و L2 که به ترکیب L3 معروف است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ترکیب به ترکیب عاری از یونوسفر معروف است.

تروپوسفر پایین‌ترین لایه جو است که ضخامت آن به مکان وابسته است. در کوهستان‌ها ضخامت تروپوسفر کم و در دشت‌ها ضخامت و ارتفاع آن افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ارتفاع این لایه به تغییر فصل‌ها و زمان نیز بستگی

^۵ Precise Point Positioning

^۶ Synthetic Aperture Radar

^۷ Very Long Baseline Interferometry

^۱ Global warming

^۲ Global Navigation Satellite System

^۳ Zenith Total Delay

^۴ Precipitable Water Vapor

تا به امروز تحقیقات زیادی از برآوردهای بخار آب قابل بارش حاصل از ایستگاه‌های GPS زمینی بهره گرفته‌اند. برای مثال پرسد و ساین در سال ۲۰۰۹ از برآوردهای بخار آب GPS برای اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ی مادیس استفاده کردند [۱۱]. همچنین مطالعات زیادی در زمینه‌ی تغییرات روزانه‌ی بخار آب، بررسی تغییرات بخار آب در حین بارش، پایش تغییرات اقلیمی و مدل‌سازی عددی وضع آب و هوا به کمک تکنیک GPS-MET انجام شده‌اند [۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵]. اخیراً برآوردهای زمین مبنای بخار آب به کمک مشاهدات ایستگاه‌های GPS در منطقه ایران برای کاربری‌های مختلفی همانند توموگرافی تروپوسفر [۱۶] و پیش‌بینی عددی وضع هوا [۱۷] بکار گرفته شده‌اند. به هر حال تا به امروز تحقیقی در رابطه با بررسی اثر محصولات مداری و ساعت مختلف در دقت برآورد تاخیر تروپوسفری به کمک مشاهدات GPS صورت نگرفته است. از این رو در این مطالعه هدف اصلی بررسی میزان اثر محصولات مختلف ساعت و مدار سرویس IGS در دقت برآورد بخار آب قابل بارش می‌باشد. نتیجه‌ی چنین مطالعاتی در استفاده از بخار آب قابل بارش حاصل از این تکنیک در کاربری‌های به هنگام^۲ از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود.

۲- محصولات مداری سرویس IGS

ارائه محصولات مداری دقیق برای سیستم ناوبری ماهواره‌ای جهانی، از اهداف مهم سرویس جهانی IGS^۴ است [۱]. این محصولات شامل موقعیت ماهواره‌ها، ساعت ماهواره‌ها و همچنین پارامترهای دوران زمین هستند. محصولات مداری سرویس IGS به سه دسته محصولات نهایی^۵، سریع^۶ و خیلی سریع^۷ تقسیم می‌شود. محصول نهایی با کیفیت‌ترین محصول این سرویس است. محصول نهایی به صورت هفتگی، با تاخیر ۱۲ تا ۱۸ روز ساخته شده و در اختیار کاربران قرار می‌گیرد. محصول مداری سریع به اختصار با IGR نشان داده می‌شود. این محصول کیفیتی نزدیک به محصولات نهایی دارد. این محصول با

دارد. بسیاری از ابرها و سیستم‌های آب و هوایی در این لایه اتفاق می‌افتد. ضخامت این لایه از ۹ تا ۱۶ کیلومتر متغیر است. برای مثال در قطب شمال و جنوب ضخامت آن ۹ کیلومتر و در استوا به ۱۶ کیلومتر می‌رسد. برای سیگنال‌های با فرکانس پایین‌تر از 30GHz، این لایه یک محیط پاشنده^۱ نیست. به عبارت دیگر، تاثیری که روی این سیگنال‌ها دارد، مستقل از فرکانس آن‌ها است [۷]. بنابراین، نمی‌توان اثر آن را همانند اثر یونوسفر به صورت ترکیب خطی از امواج L1 و L2 حذف کرد. این لایه شامل همه تاثیرات جوی است که روی زمین اتفاق می‌افتد. با توجه به خواص الکترومغناطیسی مولکول آب، تاثیر تروپوسفر روی امواج الکترومغناطیس تا حدی بزرگ است. این ویژگی تروپوسفر یک منبع خطای اندازه‌گیری در سیستم GNSS به حساب می‌آید. تاخیر تروپوسفر در راستای زینتی به دلیل کاهش ضخامت تروپوسفر و کاهش طول مسیری که در این لایه طی می‌کند، کاهش می‌یابد [۸].

تروپوسفر به طور کلی به دو بخش هیدروستاتیک (خشک) و غیر هیدروستاتیک (تر) تقسیم می‌شود. مولفه‌ی هیدروستاتیک به نسبت مخلوط گازهای خشک وابسته است و به بخار آب، وابسته نیست [۹]. این ویژگی مولفه هیدروستاتیک، پیش‌بینی بسیار دقیق آن را بر اساس پارامترهای سطحی هواشناسی ممکن می‌سازد. شکست پذیری قسمت تر به طور دقیق توسط اندازه‌گیری‌های سطحی قابل پیش‌بینی نیست. بنابراین، روش‌های جایگزین باید به کار گرفته شود.

امروزه شبکه دائم GPS در کنار کاربردهای ژئودتیکی و نقشه‌برداری، اهدافی مانند تعیین مقدار بخار آب قابل بارش را دنبال می‌کنند. در واقع پیش‌بینی شرایط آب و هوایی یکی از کاربردهای این شبکه‌ها است. برای این منظور بایستی در کنار گیرنده‌های GPS، حسگرهای هواشناسی نصب و راه‌اندازی گردد. از این حسگرهای هواشناسی برای اندازه‌گیری داده‌های سطحی مانند فشار، رطوبت و دمای سطحی استفاده می‌شود. با استفاده از این داده‌ها و روابط موجود، مثل رابطه ساستاموین^۲، قسمت هیدروستاتیک تروپوسفر محاسبه می‌شود [۱۰].

^۳ Real time

^۴ International GNSS Service

^۵ Final

^۶ Rapid

^۷ Ultra-Rapid

^۱ dispersive

^۲ Saastamoinen

تاخیر ۱۷ تا ۴۱ ساعت منتشر می‌شود. محصول مداری خیلی سریع در هر روز چهار بار در اختیار کاربران قرار می‌گیرد. طول این محصول ۴۸ ساعت است. نیمه اول این محصولات داده‌های مشاهده شده و نیمه دوم آن داده‌های پیش‌بینی شده است.

۳- روش‌های برآورد بخار آب اتمسفر

روش‌های مختلفی برای برآورد بخار آب اتمسفر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هواشناسی برای بدست آوردن بخار آب اتمسفر از روش‌هایی مانند رادیوسوند^۱ و رادیومتر^۲ استفاده می‌شود. در علوم ژئودتیک از روش‌های تعیین موقعیت جهانی و تداخل سنجی با خط مبنای بسیار بلند برای مطالعه اتمسفر و برآورد بخار آب استفاده می‌شود [۱۸]. یکی از روش‌های موجود جهت پردازش مشاهدات GPS، روش تعیین موقعیت مطلق دقیق است. این روش توسط زومبرگ^۳ توسعه یافته است. ویژگی اصلی این روش استفاده از تنها یک گیرنده برای انجام مشاهدات است. روش تعیین موقعیت مطلق دقیق، روشی است برپایه پردازش مشاهدات غیر تفاضلی که توسط یک گیرنده تنها جمع‌آوری شده است [۱۹]. در این روش از تصحیحات دقیق ساعت و مدار ماهواره‌ها استفاده می‌شود. این تصحیحات توسط IGS و مراکز دیگر در اختیار کاربران قرار می‌گیرد.

برای رسیدن به دقت‌های بهتر در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق، از ترکیب عاری از یونسفر مشاهدات شبه فاصله کد و فاز موج حامل استفاده می‌شود. به علاوه، منابع خطا نظیر تاخیر تروپوسفری، یا مدل می‌شوند و یا به عنوان مجهول برآورد می‌شوند. دقت این تکنیک برای تعیین موقعیت در حدود دسی‌متر یا چند دسی‌متر است [۲۰، ۲۱].

برای رسیدن به دقت بهتر استفاده از مشاهدات فاز گیرنده‌ی دوفرکانسه به منظور حذف خطای یونسفر توصیه می‌شود. همچنین برای بهبود دقت برآورد مجهولات، خطاهای سیستماتیک مانند آفست ساعت و آنتن ماهواره، بارگذاری جزر و مد اقیانوس‌ها، پارامترهای دوران زمین

تصحیح می‌گردند. این تصحیحات در نرم افزار Bernese 5.0 اعمال شده است.

روش PPP مشابه روش‌های دیگر تعیین موقعیت، شامل سه مولفه‌ی مشاهدات، مدل تصحیحات و روش سرشکنی است. مشاهدات پایه شامل مشاهدات عاری از یونسفر شبه فاصله کد و فاز موج حامل است [۲۲].

مراحل انجام تکنیک PPP در پردازش مشاهدات و برآورد مجهولات در نرم‌افزار Bernese 5.0 عبارتند از [۲۰]:

- استفاده از محصولات ساعت و مداری ماهواره‌ها
- ترکیب غیرتفاضلی مشاهدات شبه فاصله کد و فاز موج حامل گیرنده‌ی دو فرکانسه و به دست آوردن مشاهدات عاری از یونسفر
- استفاده از مدل تصحیحات
- انجام سرشکنی
- برآورد مجهولات به ویژه مجهول تاخیر زینتی تروپوسفری

در نهایت مدل معادلات مشاهدات برای انجام محاسبات و سرشکنی در روش PPP که به مدل عاری از یونسفر معروف است به صورت زیر خواهد بود [۲۳]:

$$P_{IF} = \rho + c dt + d_{trop} + \varepsilon(P_{IF}) \quad (1)$$

$$\Phi_{IF} = \rho + c dt + d_{trop} + \frac{c f_1 N_1 - c f_2 N_2}{f_1^2 + f_2^2} + \varepsilon(\Phi_{IF}) \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲) پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- P_{IF} : مشاهده عاری از یونسفر شبه فاصله کد
- Φ_{IF} : مشاهده عاری از یونسفر فاز موج حامل
- ρ : فاصله هندسی بین گیرنده و ماهواره، شامل مختصات مجهول گیرنده و موقعیت ماهواره
- c : سرعت نور
- dt : خطای ساعت گیرنده
- d_{trop} : تاخیر تروپوسفر
- f_i : فرکانس موج حامل
- N_i : ابهام فاز صحیح
- $\varepsilon(\cdot)$: نویز اندازه‌گیری

^۱ Radiosondes

^۲ Radiometer

^۳ Zumberge

و تاخیر غیرهیدروستاتیک تروپوسفر محاسبه شده طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (5)$$

۳-۲- برآورد بخار آب قابل بارش در اتمسفر به کمک GPS

بخار آب قابل بارش برابر مقدار بخار آب اتمسفر فشرده شده در ستون عمودی واحد سطح است. این متغیر به شدت به فرآیندهای هیدرولوژی و پردازش‌های دینامیکی وابسته است [۲۵]. میزان تاخیر تروپوسفری تابعی از بخار آب و دمای اتمسفر است. بنابراین می‌توان با در اختیار داشتن میانگین وزن‌دار دمای اتمسفر (T_m) و با استفاده از تاخیر تروپوسفری مقدار بخار آب قابل بارش را در اتمسفر به دست آورد. تبدیل تاخیر تروپوسفری به بخار آب قابل بارش در دو مرحله مطابق زیر انجام می‌شود.

۱- سهم هوای خشک که به تاخیر هیدروستاتیک زینیتی معروف است از تاخیر کلی تروپوسفر جدا می‌شود. برای محاسبه تاخیر هیدروستاتیک می‌توان از فرمول ساستاموینن (رابطه‌ی ۴) استفاده کرد.

۲- مقدار باقی مانده را با استفاده از فاکتور تبدیل $\Pi(T_m)$ طبق رابطه (۶)، به مقدار بخار آب قابل بارش تبدیل می‌شود.

$$PWV_{GPS} = \Pi(T_m) ZWD \quad (6)$$

فاکتور تبدیل $\Pi(T_m)$ ، به میانگین وزن‌دار دمای بخار آب (T_m) ستون اتمسفر در راستای زینیتی ایستگاه گیرنده بستگی دارد و از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۲۵].

$$\Pi(T_m) = \frac{10^6}{\rho_w R_v \left[(k_3/T_m) + k_2 + k_1 (M_w/M_d) \right]} \quad (7)$$

متغیرهای رابطه ۷ و مقادیر آنها در جدول ۱ معرفی شده است.

برای محاسبه ضرایب میانگین وزن‌دار دمای اتمسفر (T_m) روابط گوناگونی برای مناطق مختلف بدست آمده است. از جمله می‌توان به رابطه بیویس^۳ برای ایالات متحده اشاره کرد [۲۶]. برای انجام محاسبات از مدل

بردار مجهولات در این روش به شرح زیر است [۲۰]:

- موقعیت گیرنده (شامل سه پارامتر): x_r, y_r, z_r
- در رابطه‌ی پارامتر ρ وجود دارند.
- خطای ساعت گیرنده: dt
- تاخیر قائم تروپوسفر: d_{trop}
- ابهام فاز موج حامل: N_{IF} ، که خود ترکیبی از ابهام فاز موج حامل در فرکانس L_1 و L_2 است.

۳-۱- محاسبه تاخیر کلی قائم تروپوسفری با روش PPP

تاخیر تروپوسفر به فاصله انتشار موج رادیویی در اتمسفر وابسته است. همچنین، این کمیت تابعی از زاویه زینیتی ماهواره‌ها است. با توجه به وابستگی تاخیر تروپوسفر به زاویه ارتفاعی، تاخیر تروپوسفر در راستای زینیتی تولید می‌شود. تروپوسفر برای امواج رادیویی با فرکانس بالای 15GHz محیط غیر پاشنده است. تاخیر تروپوسفر برای امواج فرکانس‌های مختلف مورد استفاده در سامانه تعیین موقعیت جهانی یکسان است. همچنین این تاخیر در مشاهدات شبه فاصله کد و فاز موج حامل مقادیر یکسانی دارد. به دلیل تاثیری که تروپوسفر روی امواج الکترومغناطیس می‌گذارد، می‌توان تاخیر تروپوسفر را به دو قسمت هیدروستاتیک (خشک) و غیر هیدروستاتیک (تر) تقسیم کرد [۲۱، ۲۴].

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (3)$$

مولفه‌ی ZHD ^۱ تاخیر ناشی از قسمت هیدروستاتیک تروپوسفر و ZWD ^۲ تاخیر ناشی از قسمت غیر هیدروستاتیک تروپوسفر است.

$$ZHD_{[m]} = \frac{0.0022768 \times p_{0[mbar]}}{1 - 0.00266 \times \cos(2\varphi) - 0.00028 \times H_{[km]}} \quad (4)$$

در رابطه‌ی بالا پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

p_0 : فشار سطحی

φ : عرض جغرافیایی نقطه مشاهداتی

H : ارتفاع ارتومتریک نقطه مشاهداتی

مولفه‌ی ZWD که مرتبط با توزیع بخار آب در اتمسفر است، با اختلاف بین تاخیر کلی زینیتی تروپوسفری

^۳ Bevis

^۱ Zenith Hydrostatic Delay

^۲ Zenith Wet Delay

مشاهداتی به دست آورد. برای این منظور از رابطه ۹ استفاده می‌شود [۲۹].

$$PWV = \frac{1}{\rho_w} \int \rho_v dh = \frac{1}{\rho_w} \sum (h_{j+1} - h_j) (\rho_v^{j+1} + \rho_v^j) / 2 \quad (9)$$

ρ_w چگالی آب مایع و مقدار آن در جدول ۱ بیان شده است. ضرایب j و $j+1$ به ترتیب برای لایه‌های پایین و بالای جو است. h ارتفاع و ρ_v چگالی بخار آب است. ρ_v بر طبق معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho_v = \frac{P_v}{R_v \times T} \quad (10)$$

R_v ثابت گازهای ویژه برای بخار آب، و مقدار آن در جدول ۱ بیان شده است. P_v فشار جزئی بخار آب است و بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود [۲۷].

$$P_v = RH \times \exp(-37.2465 + 0.213166 \times T - 2.56908 \cdot 10^{-4} \times T^2) \quad (11)$$

مولفه T دمای مطلق در واحد درجه کلوین و RH رطوبت نسبی در سطوح مختلف فشار هستند.

شریفی و همکاران (رابطه ۸) که برای منطقه ایران بدست آمده، استفاده شده است. این مدل با استفاده از داده‌های رادیوسوند برای منطقه ایران محاسبه شده است [۲۷].

$$T_m = 82.97 + 0.67T_0 \quad (8)$$

مولفه T_0 بیانگر دمای سطحی برحسب درجه کلوین در ایستگاه مشاهداتی است. اگر در ایستگاه مشاهداتی سنسوری برای اندازه‌گیری دمای سطحی وجود نداشته باشد، باید از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی این پارامتر را به ایستگاه مشاهداتی انتقال داد.

۳-۳- محاسبه بخار آب با استفاده از رادیوسوند

رادیوسوند وسیله و ابزار کوچکی است که در زیر بالون پر از گاز هیدروژن وصل می‌شود. این وسیله، مقادیر ارتفاع ژئوپتانسیل، سرعت و جهت باد، دما و رطوبت را در سطوح فشار بالای ایستگاه، اندازه‌گیری می‌کند. داده‌های جمع‌آوری شده، از طریق امواج رادیویی به ایستگاه زمینی ارسال می‌شود. رادیوسوند این داده‌ها را در بعضی سطوح فشار استاندارد اندازه‌گیری می‌کند. از این پروفیل ارتفاعی داده‌های رادیوسوند می‌توان مقدار بخار آب را در ایستگاه

جدول ۱- مقادیر مورد استفاده در فاکتور تبدیل تاخیر تر تروپوسفری به بخار آب قابل بارش [۲۸]

مقدار	نام متغیر	نماد
1025kg/m ³	چگالی آب	ρ_w
461.5J/kg K	ثابت گازهای ویژه	R_v
375463K ³ /hPa	ثابت فیزیکی	k_3
71.295K/hPa	ثابت فیزیکی	k_2
77.689K/hPa	ثابت فیزیکی	k_1
18.0152g/mol	جرم مولی بخار آب	M_w
28.9644g/mol	جرم مولی هوای خشک	M_d

مناطق مرزی شهر مستقر شده‌اند. چگونگی توزیع ایستگاه‌های GPS در شهر تهران را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد. مشاهدات ایستگاه‌های GPS از تاریخ ۲۰۱۵/۷/۱۰ تا ۲۰۱۵/۷/۲۹ (بیست روز) به عنوان داده‌های مورد نظر در این مطالعه، انتخاب شده است. دلیل انتخاب این بازه‌ی زمانی، رخداد بارش در تاریخ ۱۹ جولای ۲۰۱۵ در شهر تهران و ایجاد سیل و خسارت در این شهر است.

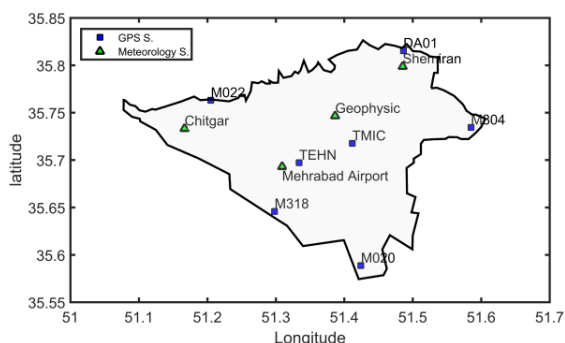
۴- داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

برای محاسبه بخار آب قابل بارش، ایستگاه‌های زمینی GPS استفاده شده در این مقاله شامل ایستگاه‌های سامانه موقعیت‌یابی آبی تهران (سامانه سمت) به علاوه ایستگاه GPS دائمی تهران واقع در سازمان نقشه‌برداری کشور است. سامانه سمت در حال حاضر متشکل از شش ایستگاه دائمی GNSS می‌باشد. یکی از این ایستگاه‌ها در مرکز و بقیه در

تروپوسفر (رابطه‌ی ۴) و همچنین محاسبه تابع تبدیل (رابطه‌ی ۷)، برای ایستگاه‌های GPS استفاده شده است. در این ایستگاه‌ها سنسورهای هواشناسی وجود ندارد، بنابراین باید از نزدیکترین ایستگاه هواشناسی موجود در اطراف ایستگاه GPS، پارامترهای جوی مورد نیاز را تا ایستگاه GPS انتقال داد. باید در نظر داشت تا کمترین خطا و بیشترین انطباق این دو نوع داده به یک دیگر وجود داشته باشند. از چهار ایستگاه هواشناسی با کمترین فاصله نسبت به ایستگاه‌های GPS استفاده شد. موقعیت این چهار ایستگاه هواشناسی و همچنین ایستگاه‌های GPS استفاده شده، در شکل ۱ نشان داده شده است. پس از مقایسه فاصله بین ایستگاه‌ها، ایستگاه‌های هواشناسی متناظر ایستگاه‌های GPS در جدول ۲ آورده شده است.

برای مقایسه نتایج محاسبات و صحت سنجی نتایج عددی به دست آمده از میزان بخار آب موجود در اتمسفر به روش PPP، از داده‌های هواشناسی رادیوسوند استفاده شد. تنها ایستگاه هواشناسی دارای مشاهدات رادیوسوند با فاصله زمانی ۱۲ ساعته، ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد بود. داده‌های مربوط به مشاهدات این ایستگاه از سایت دانشگاه Wyoming دریافت شد.

داده‌های رادیوسوند در هر ۱۲ ساعت (ساعت صفر UTC و ساعت دوازده UTC) برای ایستگاه هواشناسی مهرآباد اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین، مقایسه بخار آب حاصل از رادیوسوند و بخار آب حاصل از PPP، دو بار در روز امکان پذیر است. برای محاسبه بخار آب به وسیله رادیوسوند از رابطه ۹ استفاده شد.



شکل ۱- ایستگاه‌های هواشناسی و GPS مورد استفاده

جدول ۲- ایستگاه‌های هواشناسی متناظر هر ایستگاه GPS

داده‌های مربوط به نقاط شبکه شهرداری تهران از سایت سامانه سمت (<http://rtkservices.tehran.ir>) و داده‌های ایستگاه سازمان نقشه‌برداری از <http://sopac.ucsd.edu> دریافت شده است. البته در ایستگاه GPS سازمان نقشه‌برداری (TEHN) فایل مشاهدات برای پنج روز متوالی (۲۰۱۵/۷/۱۱ تا ۲۰۱۵/۷/۱۵) در دسترس نبود.

مشاهدات ایستگاه‌های با فاصله زمانی ۳۰ ثانیه جمع‌آوری شده است. در فرآیند پردازش زاویه ارتفاعی ۱۰ درجه انتخاب شد. دوره زمانی خروجی تاخیر تروپوسفر ۵ دقیقه در نظر گرفته شده است. از مدل FES2004 برای محاسبه تاثیر بارگذاری اقیانوس‌ها روی ایستگاه‌ها استفاده شده است. مدل FES2004 منطقه ایران را پوشش می‌دهد. ضرایب این مدل برای نقاط واقع در منطقه ایران با معلوم بودن مختصات نقطه‌ی مورد نظر توسط سایت <http://holt.oso.chalmers.se/loading> قابل تولید است. همچنین در فرآیند پردازش از بایاس تفاضلی کد استفاده شده است. بایاس تفاضلی کد را می‌توان از سایت <http://www.naic.edu> دریافت کرد.

خروجی‌های نرم افزار Bernese 5.0 در پردازش با روش PPP، شامل موقعیت سه بعدی ایستگاه، خطای ساعت گیرنده و تاخیر تروپوسفری است. برای به دست آوردن تاخیر تروپوسفری در راستای زینتی از تابع تبدیل نیل^۱ استفاده شده است. تاخیر کلی تروپوسفر شامل دو جزء است. جزء اول، جواب مدل تاخیر تروپوسفری اولیه^۲ است. جزء دوم، مربوط به تاخیر قسمتی از تروپوسفر است که مدل کردن آن سخت است و در فرآیند پردازش به عنوان مجهول برآورد می‌شود. جمع این دو جزء، تاخیر کلی تروپوسفر را در راستای زینتی شامل می‌شود. نتایج حاصل از مدل اولیه برای یک ایستگاه همواره ثابت است. به دلیل اینکه در مدل اولیه با توجه به ارتفاع ایستگاه، دما و فشار از سطح دریا انتقال می‌یابد. مدل اولیه نمی‌تواند نماینده تاخیر خشک تروپوسفر باشد، زیرا دما و فشار تابعی از زمان است و هر لحظه تغییر می‌کند.

از داده‌های فشار، دما و رطوبت ایستگاه‌های سینوپتیک^۳ هواشناسی موجود در شهر تهران برای محاسبه مقدار تاخیر قسمت هیدروستاتیک (خشک)

^۱ Niell mapping function

^۲ priori troposphere model

^۳ synoptic

ایستگاه‌های GPS	نزدیکترین ایستگاه هواشناسی
DA01	Shemiran
M020	Mehrabad Airport
M022	Chitgar
M318	Mehrabad Airport
M804	Shemiran
TEHN	Geophysic
TMIC	Mehrabad Airport

متناظر، به حداکثر مقدار خود رسیده است. این بدان معنی است که یک رابطه مستقیم بین میزان بخار آب قابل بارش و میزان بارش وجود دارد.

جدول ۳- مقایسه میزان بخار آب قابل بارش محاسبه شده با روش PPP در حالت‌های استفاده از محصولات مداری مختلف (واحد میلی‌متر)

ایستگاه	Bias IGS-IGR	STD IGS-IGR	Bias IGS-IGU	STD IGS-IGU
DA01	-۰/۰۰۶	۰/۲۵۳	۰/۱۱۵	۱/۰۹۶
M020	-۰/۰۱۳	۰/۲۵۶	۰/۰۳۷	۰/۹۵۳
M022	-۰/۰۰۸	۰/۲۸۴	-۰/۰۰۹	۱/۱۰۴
M318	-۰/۰۲۰	۰/۲۳۸	۰/۰۳۱	۰/۹۱۷
M804	-۰/۰۰۲	۰/۲۴۶	۰/۱۰۴	۰/۹۵۹
TEHN	-۰/۰۱۰	۰/۲۲۹	-۰/۰۹۲	۰/۹۲۴
TMIC	۰/۰۰۹	۰/۲۹۸	-۰/۰۳۲	۰/۹۶۵

۵- نتایج عددی

بخار آب قابل بارش در دوره زمانی بیست روزه برای ماه جولای در سال ۲۰۱۵ به وسیله روش PPP محاسبه شد. از سه نوع محصولات مداری و ساعت نهایی، سریع و خیلی سریع داده‌های مداری GPS در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق استفاده گردید. همچنین، اطلاعات مربوط به بارش سطحی با فاصله زمانی ۳ ساعته ایستگاه‌های هواشناسی با مقادیر بخار آب قابل بارش محاسبه شده به وسیله روش PPP مقایسه گردید. نتایج بدست آمده از هر دو روش با دقت بالا با هم منطبق هستند. برای زمانی که مقدار بخار آب قابل بارش افزایش پیدا کرده میزان بارش ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی افزایش پیدا کرده است. در مقایسه بین مقادیر عددی ثبت شده ایستگاه‌های GPS و ایستگاه‌های هواشناسی متناظر از جدول ۲ کمک گرفته شد. در شکل ۲، نتایج عددی مقادیر بخار آب قابل بارش ایستگاه M022 و بارش سطحی ایستگاه هواشناسی متناظر (ایستگاه Chitgar) نشان داده شده‌اند. همان طور که از شکل ۲ مشخص است، در محاسبه بخار آب با استفاده از سه نوع محصول سرویس IGS تفاوت زیادی وجود ندارد. نتایج حاصل از مقایسه این سه نوع محصول برای تمام ایستگاه‌های GPS در جدول ۳ بیان شده است. در این جدول مقادیر بایاس و انحراف معیار بین محصول مداری نهایی (IGS) و سریع (IGR) و همچنین بایاس و انحراف معیار محصول مداری نهایی و خیلی سریع (IGU) محاسبه شده است. جدول ۳ بیانگر این است که در تمام ایستگاه‌ها مقادیر بایاس و انحراف معیار بین محصول مداری نهایی و سریع کمتر از مقادیر بایاس و انحراف معیار بین محصول مداری نهایی و خیلی سریع است. در شکل ۲، ستون سبز رنگ میزان بارش سطحی (میزان بارشی که در ایستگاه هواشناسی اندازه‌گیری شده است) در نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل ۲ مشخص است، در اواخر روز ۱۹ جولای ۲۰۱۵، ایستگاه هواشناسی بارشی به میزان ۱۹ میلی‌متر ثبت کرده است. از طرف دیگر میزان بخار آب قابل بارش در همان زمان در ایستگاه GPS

۵-۱- مقایسه با داده‌های رادیوسوند

برای اعتبار سنجی نتایج حاصل از داده‌های مداری در پردازش به روش PPP، از داده‌های رادیوسوند ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد استفاده شده است. به دلیل اینکه در ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد گیرنده GPS وجود نداشت، برای کاهش خطا در مقایسه بین بخار آب قابل بارش حاصل از رادیوسوند و GPS از نزدیک‌ترین ایستگاه GPS موجود، یعنی ایستگاه TEHN استفاده شده است. در شکل ۳، بخار آب ایستگاه TEHN واقع در سازمان نقشه‌برداری و بخار آب حاصل از رادیوسوند ایستگاه هواشناسی مهرآباد با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

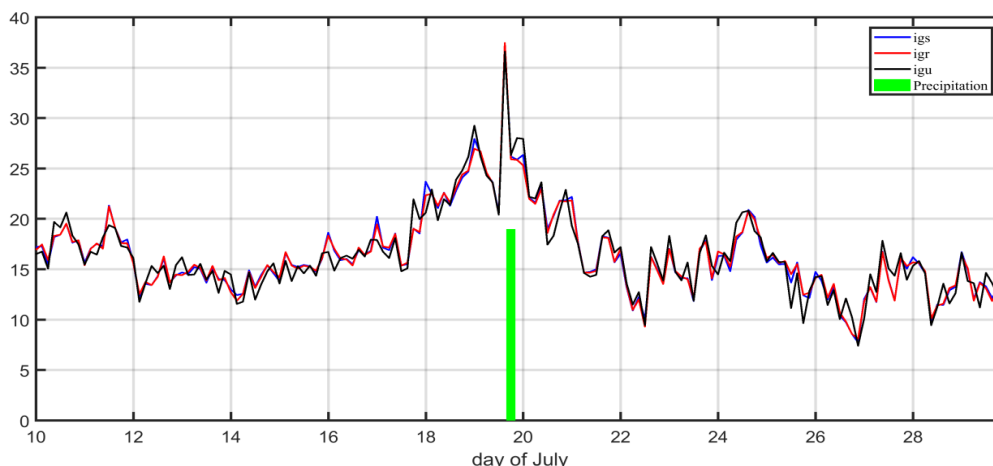
همان طور که از شکل ۳ معلوم است، نتایج حاصل از دو روش با دقت خیلی خوبی به یکدیگر منطبق هستند. برای نشان دادن میزان انطباق بین دو روش برآورد بخار آب قابل بارش، نتایج حاصل از این مقایسه آماری در جدول ۴ نشان آورده شده است. همان طور که انتظار می‌رفت، برآوردهای بخار آب حاصل از محصول ساعت و مداری نهایی دقت بهتری را نسبت به دو نوع دیگر این محصولات دارد. همچنین نتایج حاصل از رادیوسوند با نتایج حاصل از محصول نهایی همبستگی بیشتری دارد. یکی از معایب محصولات مداری نهایی، تاخیر دو هفته‌ای این محصولات است. محصولات سریع تا حدودی این تاخیر زمانی را برطرف کرده است. اما در کاربردهای نزدیک به آنی^۱ و آنی^۲

^۱ Near real-time
^۲ real-time

جدول ۴- مقایسه آماری برآورد بخار آب قابل بارش حاصل از روش PPP به کمک محصولات مختلف مداری و بخار آب حاصل از رادیوسوند در ایستگاه تهران

محصولات مداری	RMS(mm)	STD(mm)	CORR
نهایی	۱/۰۹۶۲	۱/۲۵۶۴	۰/۹۶۹۸
سریع	۱/۲۲۳۵	۱/۵۶۵۰	۰/۹۶۴۷
خیلی سریع	۱/۵۷۹۶	۲/۶۰۸۶	۰/۹۳۵۲

نمی‌توان این محصولات را استفاده کرد. بنابراین محصول جایگزین، محصولات مداری و ساعت خیلی سریع هستند. با توجه به نتایج جدول ۴، این محصول با میزان همبستگی ۰/۹۳ و RMS حدود ۱/۵ میلی‌متر می‌تواند در کاربردهای نزدیک به آبی و آبی استفاده شود.

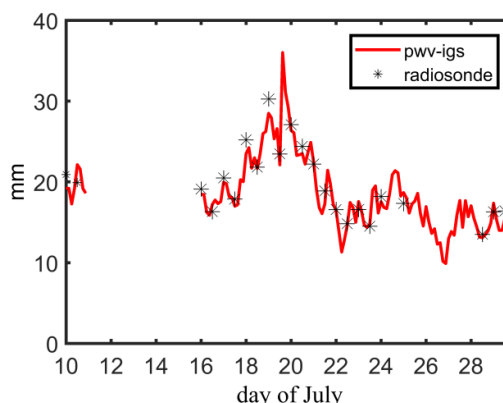


شکل ۲- مقایسه بخار آب قابل بارش حاصل از روش تعیین موقعیت مطلق دقیق در ایستگاه M022 و مقادیر بارش سطحی در ایستگاه هواشناسی Chitgar بر حسب میلی‌متر (igs محصولات مداری نهایی و igr محصولات مداری سریع، igu محصولات مداری خیلی سریع و Precipitation بارش سطحی)

شهرداری تهران (M022) و ایستگاه هواشناسی چیتگر (شکل ۲) به خوبی مشخص است.

در برآورد بخار آب قابل بارش که پارامتر مهمی در میزان بارش و پیش‌بینی‌های آب و هوا است، باید این پارامتر به صورت آبی برآورد شود تا وقوع خطرات احتمالی و ایجاد سیل‌ها اطلاع رسانی شود. برای این کار می‌توان از سامانه تعیین موقعیت جهانی که داده‌های آن با فاصله زمانی در حد ثانیه جمع‌آوری می‌شود، استفاده کرد. در حالی که استفاده از رادیوسوند با فاصله زمانی ۱۲ ساعته برای پیش‌بینی احتمال وقوع سیل روش مناسبی نیست. همچنین روش‌های هواشناسی بسیار پر هزینه بوده و مقرون به صرفه نمی‌باشد.

برای کاربردهای نیمه آبی و آبی می‌توان از محصولات مداری خیلی سریع بهره‌مند شد. این محصول به مراتب دقتی کمتر از دیگر محصولات مداری خواهند داشت. اما به دلیل در دسترس بودن این محصول در هر زمانی، استفاده از این محصول را اجتناب ناپذیر کرده است.



شکل ۳- مقایسه بخار آب ایستگاه TEHN سازمان نقشه‌برداری و بخار آب حاصل از رادیوسوند ایستگاه هواشناسی مهرآباد بر حسب میلی‌متر

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

نتایج به دست آمده گویای این حقیقت است که دقت برآورد بخار آب با استفاده از داده‌های مداری نهایی بهتر از برآورد این پارامتر با استفاده از داده‌های مداری سریع و خیلی سریع است و این موضوع در جدول ۴ به خوبی بیان شده است. همچنین در منطقه‌ای که ایستگاه هواشناسی بارش را ثبت کرده، متناسب با آن مقدار بخار آب قابل بارش برآورد شده به وسیله GPS افزایش پیدا کرده است. برای مثال این موضوع در ایستگاه GPS منطقه ۲۲

مراجع

- [1] Byram, S., Hackman, C., Slabinski, V. and Tracey, J. (2011). "Computation of a high-precision GPS-based troposphere product by the USNO." In: Proc 24th Int Tech Meet Sat Division Inst Nav ION GNSS, PP. 572-578.
- [2] Byun, S. H. and Bar-Sever, Y. E. (2009). "A new type of troposphere zenith path delay product of the International GNSS Service." *Journal of Geodesy*, Vol. 83, PP. 367-373.
- [3] Gutman, S., Sahm, R., Benjamin, G., Schwartz, E., Holub, L., Stewart, Q. and Smith, L. (2004). "Rapid retrieval and assimilation of ground based GPS-Met observations at the NOAA forecast systems laboratory: impact on weather forecasts." *J Meteorol Soc Jpn*, Vol. 82, PP. 351-360.
- [4] Shi, J., Xu, C., Li, Y. and Gao, Y. (2015). "Impacts of real-time satellite clock errors on GPS precise point positioning-based troposphere zenith delay estimation." *Journal of Geodesy*, Vol. 89, PP. 747-756.
- [5] Lu, C., Li, X., Ge, M., Heinkelmann, R., Nilsson, T., Soja, B., Dick, G. and Schuh, H. (2015). "Estimation and evaluation of real-time precipitable water vapor from GLONASS and GPS." *GPS Solutions*, Vol. 20, PP. 1-11.
- [6] Ahmed, F. (2010). "Evaluation of GNSS as a Tool for Monitoring Tropospheric Water Vapour." Master of Science Thesis in the Master Degree Programme, Radio and Space Science, Department of Earth and Space Sciences, Göteborg, Sweden.
- [7] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E. (2008). "GNSS – Global Navigation Satellite Systems." Springer Wien NewYork. Graz, Austria.
- [8] Xu, G. (2003). "GPS · Theory, Algorithms and Applications." Springer, Potsdam, Germany
- [9] Ahmed, F., Vaclavovic, P., Teferle, F.N., Dousa, J., Bingley, R. and Laurichesse, D. (2014). "Comparative analysis of real-time precise point positioning zenith total delay estimates." *GPS Solutions*, Vol. 20, PP. 187-199.
- [10] Saastamoinen, J. (1973). "Contributions to the theory of atmospheric refraction." *Bull Geodesique*, Vol. 105, PP. 279-298.
- [11] Prasad, A.K. and Singh, R.P. (2009). "Validation of MODIS Terra, AIRS, NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis-2, and AERONET Sun photometer derived integrated precipitable water vapor using ground-based GPS receivers over India." *Journal of Geophysical Research*, 114, D05107, doi:10.1029/2008JD011230.
- [12] Dai, A., Wang, J., Ware, R.H. and Van Hove, T. (2002). "Diurnal variation in water vapor over North America and its implications for sampling errors in radiosonde humidity." *Journal of Geophysical Research*, 107, 4090, doi:10.1029/2001JD000642.
- [13] Nilsson, T. and Elgered, G. (2008). "Long-term trends in the atmospheric water vapor content estimated from ground-based GPS data." *Journal of Geophysical Research*, 113, D19101, doi:10.1029/2008JD010110.
- [14] Foster, J., Bevis, M., Chen, Y.L., Businger, S. and Zhang, Y. (2003). "The Ka's storm (November 2000): imaging precipitable water using GPS." *Journal of Geophysical Research*, 108, D18, doi:10.1029/2003JD003413.
- [15] Wang, Y., Liu, Y., Liu, L., Guo, Z., Ge, X. and Xu, H. (2008). "Retrieval of the change of precipitable water vapor with zenith tropospheric delay in the Chinese mainland." *Advances in Space Research*, 43 (2009) 82-88.
- [16] Adavi, Z. and Mashhadi-Hossainali M. (2014). "4D tomographic reconstruction of the tropospheric wet refractivity 362 using the concept of virtual reference station, case study: northwest of Iran." *Meteorology and Atmospheric Physics*, 363 126, 193-205.
- [17] Sharifi, M.A., M. Azadi and Sam Khaniani A. (2016). "Numerical simulation of rainfall with assimilation of 476 conventional and GPS observations over north of Iran." *Annals of Geophysics*, 59, P0322, doi:10.4401/ag-6919.
- [18] Niell, A.E., Coster, A.J., Solheim, F.S., Mendes, V.B., Toor, P.C., Langley, R.B. and Upham, C.A. (2001). "Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapour radiometer, GPS and VLBI." *J. Atmos. Oceanic Technol.* Vol.18, PP. 830-850.
- [19] Kalitaa, J., Rzepeckab, Z. and Szuman-Kalitic, I. (2014). "The application of Precise Point Positioning in Geosciences." The 9th International Conference "ENVIRONMENTAL ENGINEERING", May 2014, Vilnius, Lithuania.
- [20] Kouba, J. and P. Heroux (2001). "Precise point positioning using IGS orbit and clock Products." *GPS Solutions*, Vol. 5, No. 2, PP. 12-28.

- [21] Tao, W. (2008). "Near Real-time GPS PPP-inferred Water Vapor System Development and Evaluation." Ph.D. dissertation, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada.
- [22] Marreiros, J. P. R. (2012). "Kinematic GNSS Precise Point Positioning Vapour." Ph.D. Thesis in Surveying Engineering, Faculty of Sciences, University of Porto, Portugal.
- [23] Gao, Y. and Chen, K. (2004). "Performance Analysis of Precise Point Positioning Using Real-Time Orbit and Clock Products." *Journal of Global Positioning Systems*, Vol. 3, No. 1-2, PP. 95-100.
- [24] Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P. and Meidl M. (2007) "Bernese GPS software, version 5.0.", Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland.
- [25] Bock, O., Bouin, M. -N., Walpersdorf, A., Lafore, J. P., Janicot, S., Guichard, F. and Agusti-Panareda, A. (2007). "Comparison of ground-based GPS precipitable water vapour to independent observations and NWP model reanalyses over Africa." *Royal Meteorological Society*, Vol. 133, PP. 2011-2027.
- [26] Bevis, M., Businger, S., Herring, T.A., Rocken, C., Anthes, R.A., Ware, R.H. (1992) "GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, PP. 15787-15801.
- [27] Sharifi, A. M., Sam Khaniani, A. and Joghataei, M. (2015). "Comparison of GPS precipitable water vapor and meteorological parameters during rainfalls in Tehran." *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 127, PP 701-710.
- [28] Rueger Jean, M. (2002) "Refractive Index Formulae for Radio Waves." School of Surveying and Spatial Information Systems, University of New South Wales, Sydney, Australia.
- [29] Bai, Z. (2005) "Near-real-time GPS sensing of atmospheric water vapor." PhD thesis, Queensland University of Technology, Australia.