

بررسی امکان پیش‌بینی بارش با برآورد بخار آب تعلیق‌پذیر از مشاهدات GNSS به روش تعیین موقعیت مطلق دقیق

محمد زاهدی^۱، جمال عسگری^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده عمران و حمل‌ونقل - دانشگاه اصفهان
mortezaahedi413@yahoo.com

^۲ دانشیار دانشکده عمران و حمل‌ونقل - دانشگاه اصفهان
asgari@eng.ui.ac.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۵، تاریخ تصویب خرداد ۱۳۹۶)

چکیده

در علوم نقشه‌برداری از سامانه‌ی ناوبری ماهواره‌ای جهانی (GNSS) برای اهداف ژئودتیک و ژئودینامیک استفاده شده است ولی در سال‌های اخیر از این سامانه برای اندازه‌گیری پارامترهای جو کره‌ی زمین نیز استفاده شده است. یکی از این پارامترها، بخار آب تعلیق‌پذیر (PWV) اتمسفر می‌باشد. امکان اندازه‌گیری PWV توسط گیرنده‌های GNSS، به واسطه‌ی تأخیر اتمسفری ایجاد شده در سیگنال ارسال شده از طرف ماهواره فراهم می‌شود و مقدار PWV از تأخیر کلی در راستای زنیت (ZTD) استخراج می‌شود. سامانه ناوبری ماهواره‌ای جهانی ویژگی‌های منحصر به فردی دارد که از آن جمله می‌توان به پیوستگی زمانی مشاهدات آن اشاره نمود که منجر به برآورد PWV با تفکیک زمانی بالا می‌شود. پیوستگی زمانی امکان پایش بخار آب موجود در اتمسفر را برای مقیاس‌های کوچک زمانی فراهم می‌کند. PWV نشان‌دهنده‌ی بخار آب موجود در اتمسفر است و در صورت برآورد سریع آن، می‌توان احتمال بارندگی را مورد بررسی قرار داد. در این مقاله دقت PWV حاصل از مشاهدات لحظه‌ای GNSS جهت استفاده در مدل‌های عددی پیش‌بینی آب‌وهوا مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور مشاهدات GNSS برای ایستگاه‌های شبکه‌ی IGN واقع در کشور فرانسه با روش تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP) پردازش شد. پردازش‌ها یک بار با تولیدات مدار و ساعت بسیار سریع و یک بار با تولیدات مدار و ساعت نهایی انجام گرفت و بین ZTDهای حاصل از آن‌ها، مقایسه صورت گرفت. این مقایسه‌ها به وسیله‌ی خطای ریشه‌ی میانگین مربعی، انحراف معیار و بایاس میانگین با مبنا قرار دادن مقادیر حاصل از مدار و ساعت نهایی به عنوان مقادیر صحیح انجام شد و نتایج نشان دهنده‌ی دقت کافی PWV حاصل از ZTDهایی بود که با مدار و ساعت بسیار سریع برآورد شده بودند.

واژگان کلیدی: سامانه‌ی ناوبری ماهواره‌ای جهانی، بخار آب تعلیق‌پذیر، تأخیر کلی زنیتی، تعیین موقعیت مطلق دقیق

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

یکی از مهمترین پارامترها در پی بردن به خصوصیات آب‌وهوایی هر منطقه، میزان بخار آب موجود در اتمسفر می‌باشد که نقش مهمی در تبادل انرژی بین قلمروهای آب‌وهوایی ایفا می‌کند [۱]. همچنین بخار آب موجود در جو کره‌ی زمین، عامل اصلی اثر گلخانه‌ای است و بنابراین نه تنها بر روی آب‌وهوا و اقلیم اثرگذار است بلکه تأثیر قابل توجهی بر گرمای کره‌ی زمین دارد. رخدادهای بارشی شدیدی هم که به وقوع می‌پیوندد در واقع به مقدار زیاد بخار آب موجود در جو مربوط می‌شوند. از این رو پی بردن به وضعیت توزیع بخار آب در اتمسفر و شناخت تأثیر تغییرات مکانی و زمانی آن بر آب‌وهوا و اقلیم ضروری است. اندازه‌گیری کمیت‌های مربوط به بخار آب اتمسفر، می‌تواند به پیش‌بینی بارش‌ها کمک کند. یکی از این کمیت‌ها، بخار آب تعلیق‌پذیر^۱ (PWV) یا همان بخار آب بارش‌زای اتمسفر می‌باشد. PWV عبارت است از ارتفاع آب مایع حاصل از متراکم شدن ستونی از بخار آب از سطح زمین تا بالای اتمسفر [۲]. بررسی رفتار PWV در هر منطقه، منجر به یافتن مکانیزم بارش‌ها در آن منطقه خواهد شد. پیش‌بینی دقیق رخدادهای بارشی، وابستگی زیادی به دقت برآورد PWV دارد و این در حالی است که بخار آب تنها ۵ درصد از اتمسفر را تشکیل می‌دهد و بسیار متغیر است و این باعث می‌شود که اندازه‌گیری دقیق این پارامتر دشوار باشد [۳].

یکی از ابزارهایی که برای اندازه‌گیری PWV استفاده می‌شود، سامانه‌ی ناوبری ماهواره‌ای جهانی^۲ (GNSS) است. سیگنال‌های ارسالی از ماهواره، هنگام عبور از اتمسفر دچار تأخیر می‌شوند و امکان استخراج و اندازه‌گیری برخی از پارامترهای اتمسفر، به واسطه‌ی تأخیر ایجاد شده در سیگنال فراهم می‌شود که یکی از این پارامترها PWV می‌باشد. از آنجایی که GNSS خصوصیات منحصر به فردی از جمله: دقت زیاد، کم هزینه بودن، تفکیک مکانی و زمانی بالا، لحظه‌ای بودن و غیره را دارد توجه هواشناسان را جهت بررسی و پیش‌بینی حوادث مخاطره‌آمیز جوی به خود جلب کرده است. هرچند که گیرنده‌های GNSS یک پروفیل قائم

از پارامترهای اتمسفر ارائه نمی‌دهند، ولی داده‌ها را به صورت پیوسته فراهم می‌کنند.

دلیل استفاده از GNSS جهت تعیین PWV، به تأثیر-پذیری سیگنال GNSS از اتمسفر برمی‌گردد. موج ارسال-شده از ماهواره، هنگام عبور از یونسفر و تروپوسفر از این دو محیط اثر می‌پذیرد و دچار تأخیر می‌شود. این تأخیر در واقع اختلاف مسیر موج است بین خلأ و مسیری که در عمل طی می‌کند [۴]. از آنجایی که یونسفر محیطی پاشنده^۳ است و مقدار تأخیر در این لایه از جو، وابسته به فرکانس است، اثر آن را می‌توان با گیرنده‌های دوفرکانسه برطرف کرد [۵]. با برداشتن تأخیر یونسفر از تأخیر مجموع، تأخیر تروپوسفر در راستای ماهواره به گیرنده باقی می‌ماند که تصویر آن در راستای قائم، به عنوان تأخیر مجموع زینتی^۴ (ZTD) در نظر گرفته می‌شود [۶]. با فرض همگن بودن اتمسفر، ZTD به دو بخش تقسیم می‌شود: تأخیر هیدرواستاتیک زینتی^۵ (ZHD) و تأخیر تر زینتی^۶ (ZWD) [۲]. ZHD مربوط به آن قسمت از تروپوسفر است که گازها در حالت تعادل هیدرواستاتیکی هستند. با داشتن داده‌های فشار سطح (در محل آنتن گیرنده)، می‌توانیم ZHD را با دقت زیاد به وسیله‌ی یک مدل تجربی مثل ساستوموینن^۷ محاسبه کنیم [۷].

در پردازش مشاهدات GNSS، ZTD به عنوان یک پارامتر مجهول برآورد می‌شود. از طرفی رابطه‌ی زیر بین ZTD، ZHD و ZWD برقرار است [۴]:

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (۱)$$

در این صورت با داشتن ZHD و ZTD، ZWD به دست می‌آید.

پس از به‌دست آمدن ZWD، با ضرب آن در یک ضریب تبدیل^۸، PWV به دست می‌آید [۸]. ضریب تبدیل تابعی از دمای متوسط وزن‌دار^۹ اتمسفر می‌باشد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که دمای متوسط وزن‌دار اتمسفر، دارای رابطه‌ی خطی با دمای سطح است [۷]. اگر این رابطه مشخص باشد، برای تعیین دمای متوسط اتمسفر،

^۳ Dispersive

^۴ Zenith Total Delay

^۵ Zenith Hydrostatic Delay

^۶ Zenith Wet Delay

^۷ Saastamoinen

^۸ Conversion factor

^۹ Weighted mean temperature

^۱ Precipitable Water Vapor

^۲ Global Navigation Satellite System

از آنجایی که واحد PWV و ZWD طول است، نسبتشان بدون واحد خواهد بود و از طریق یک ضریب تبدیل به صورت زیر با هم مرتبط می‌شوند [۸]:

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (۳)$$

که Π ضریب تبدیل (بدون واحد) است و معادله‌ی آن به شکل زیر می‌باشد:

$$\Pi^{-1} = 10^{-6} \rho_w R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right) \quad (۴)$$

در معادله‌ی ۴، R_v ثابت ویژه‌ی گاز برای بخار آب (با مقدار $[J \text{ kg}^{-1} K^{-1}]$ ۴۶۱،۵۲۴) است. k_3 و k'_2 ثوابت مربوط به شکست‌پذیری اتمسفر هستند و T_m دمای متوسط وزن‌دار اتمسفر بر حسب کلون می‌باشد. در محاسبه‌ی ضریب تبدیل، به غیر از T_m ، بقیه‌ی پارامترها مقادیر مشخصی دارند، بنابراین کمیت اساسی در تعیین ضریب تبدیل، T_m است. دمای متوسط وزن‌دار اتمسفر به شکل زیر محاسبه می‌شود (برای N لایه‌ی اتمسفر) [۱۱]:

$$T_m = \frac{\int \frac{P_v}{T} dz}{\int \frac{P_v}{T^2} dz} \approx \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\bar{P}_{v,i}}{\bar{T}_i} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^N \frac{\bar{P}_{v,i}}{\bar{T}_i^2} \Delta z_i} \quad (۵)$$

که $\bar{P}_{vi}$ و $\bar{T}_i$ عبارتند از:

$$\bar{T}_i = \frac{1}{2} (T_{i+1} + T_i)$$

$$\bar{P}_{v,i} = \frac{1}{2} (P_{v,i+1} + P_{v,i})$$

در این روابط، P_v فشار جزئی بخار آب است. بنابراین طبق معادله‌ی ۵، می‌توان دمای متوسط وزن‌دار اتمسفر را با در اختیار داشتن پروفیل‌های قائم فشار جزئی بخار آب و دما تعیین کرد. در معادله‌ی ۵، انتگرال‌گیری از سطح زمین تا بالای اتمسفر انجام می‌شود.

ZTD را می‌توان به وسیله‌ی مشاهدات GNSS برآورد کرد. ZHD نیز از داده‌های هواشناسی سطح محاسبه می‌شود. معروف‌ترین مدل برای محاسبه‌ی ZHD، مدل

کافی است دمای سطح را از داده‌های هواشناسی به‌دست آوریم. بنابراین با برآورد ZTD توسط مشاهدات GNSS و اندازه‌گیری فشار و دمای سطح، PWV برآورد می‌شود. دو روش کلی برای برآورد PWV به وسیله‌ی GNSS وجود دارد [۹]:

۱- استفاده از یک روش غیرتفاضلی مثل تعیین موقعیت مطلق دقیق^۱ (PPP)

۲- استفاده از یک روش تفاضلی مثل حل شبکه

مسئله‌ای که باید به آن توجه کرد این است که برای پیش‌بینی‌ها، به برآورد لحظه‌ای PWV با تفکیک مکانی بالا نیاز داریم. برای تفکیک مکانی بالا باید یک شبکه‌ی چگال از ایستگاه‌های GNSS ایجاد شود، ولی در روش حل شبکه، با افزایش تعداد ایستگاه‌ها، با حجم زیادی از داده‌ها روبه‌رو خواهیم شد که پردازش آن زمان‌بر است. برای حل این مشکل می‌توانیم از یک روش غیرتفاضلی استفاده کنیم [۱۰].

آنچه در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است، استفاده از روش PPP (به عنوان روشی غیرتفاضلی) برای برآورد PWV و بررسی دقت آن است. به دلیل چندین عامل از جمله حل اعشاری ابهام فاز، PWV برآورد شده از روش PPP نسبت به روش حل شبکه دارای دقت کمتری است ولی زمان پردازش داده‌ها به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱۰].

۲- محاسبه PWV از طریق تأخیر تروپوسفری سیگنال‌های GNSS

محتوای بخار آب اتمسفر را اغلب به صورت ستونی از آب مایع نشان می‌دهند که همان بخار آب تعلیق‌پذیر (PWV) می‌باشد و مقدار آن از طریق رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$PWV = \frac{1}{\rho_w} \int \rho_v dz \quad (۲)$$

در این رابطه، ρ_v و ρ_w به ترتیب چگالی بخار آب اتمسفر و چگالی آب مایع هستند و PWV بر حسب واحد طول می‌باشد. انتگرال رابطه‌ی ۲، از سطح زمین تا ارتفاعی است که بخار آب وجود دارد.

^۱ Precise Point Positioning

ساستوموینن^۱ می‌باشد. تاکنون مطالعات زیادی نشان داده‌اند که در صورت استفاده از داده‌های دقیق فشار سطح، این مدل دقیقی در حد چند میلی‌متر خواهد داشت [۱۲]. مدل ساستوموینن جهت محاسبه‌ی ZHD به این صورت بیان می‌شود [۱۳]:

$$ZHD_{SA} = \frac{(2.2779 \pm 0.0024)/P_s}{(1 - 0.00266 \cos(2\varphi) - 0.00028H)} \quad (6)$$

در این روابط، P_s فشار سطح بر حسب میلی‌بار، T_s دمای سطح بر حسب کلون، ϕ عرض جغرافیایی و H ارتفاع از بیضوی مرجع بر حسب کیلومتر می‌باشد. ZHD بر حسب میلی‌متر به دست می‌آید.

با تفریق ZHD از ZTD، ZWD به دست می‌آید. در این صورت PWV به شکل زیر تعیین می‌شود:

$$PWV = \Pi \times (ZTD - ZHD) \quad (7)$$

۳- تعیین موقعیت مطلق دقیق

جهت استفاده از PWV برای پیش‌بینی بارش‌ها، باید مقادیر آن در کوتاهترین زمان ممکن برآورد شود. از طرفی باید PWV را از تأخیر کلی زینتی استخراج کنیم. بنابراین زمان برآورد PWV وابسته به زمان برآورد ZTD می‌باشد. یکی از روش‌های پردازش مشاهدات GNSS که امکان برآورد لحظه‌ای پارامترهای تأخیر اتمسفری را فراهم می‌کند، روش تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP) است. این روش در مقایسه با روش‌های تفاضلی، زمان پردازش داده‌ها را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. در روش PPP، از همه‌ی مشاهدات GNSS در محاسبات استفاده می‌شود، در حالی که در روش تفاضلی دوگانه^۲ (DD) فقط مشاهدات هم‌زمان دو گیرنده و دو ماهواره در محاسبات دخیل هستند. همچنین تعیین موقعیت دقیق نیازی به ایستگاه مرجع نیست، بنابراین داده‌های هر ایستگاه به طور مستقل پردازش می‌شود و زمان پردازش داده‌ها متناسب با تعداد ایستگاه‌ها خواهد بود که مزیت ویژه‌ای برای پردازش‌های با حجم زیاد داده‌ها می‌باشد. در PPP پارامترهای تأخیر تروپوسفری اپیک به اپیک برآورد می‌شود که یک نیاز اساسی برای کاربردهای آنی و نزدیک به آن می‌باشد. این در حالی است که حل اپیک‌ها در روش

تفاضلی دوگانه، فقط برای اپیک‌هایی که دارای مشاهدات DD هستند در دسترس می‌باشد. بنابراین برای کارهای آنی و همچنین برای داده‌های با حجم زیاد، روش PPP نسبت به روش DD مناسب‌تر می‌باشد [۱۴].

در روش PPP از ترکیب‌های عاری از یونسفر مشاهدات کد (ρ) و فاز موج حامل (φ) استفاده می‌شود. در این روش برخی از منابع خطا باید برطرف شوند یا کاهش یابند. این منابع خطا عبارتند از: آفست مرکز فاز^۳ (PCO) آنتن گیرنده و ماهواره، پیچش فاز^۴، جزر و مد خشکی^۵، بارگذاری اقیانوس‌ها^۶، چرخش زمین، آثار نسبیت^۷ و چندمسیری^۸ [۱۵]. با فرض این که این خطاها بر طرف شده باشند، معادله‌ی مشاهدات برای PPP، به شکل زیر می‌باشد:

$$p_{if} = \rho + c(dt - dT) + d_{tr} + \varepsilon_p \quad (7)$$

$$\varphi_{if} = \rho + c(dt - dT) + d_{tr} + N\lambda + \varepsilon_\varphi \quad (8)$$

که در این معادلات:

p_{if} و φ_{if} ترکیب‌های عاری از یونسفر کد و فاز

dt خطای ساعت گیرنده

dT خطای ساعت ماهواره

c سرعت نور در خلأ

d_{tr} تأخیر تروپوسفری

λ طول موج ترکیب عاری از یونسفر فاز

N ابهام فاز ترکیب عاری از یونسفر فاز

ε_φ نویز مشاهدات ترکیب عاری از یونسفر فاز

ε_p نویز مشاهدات ترکیب عاری از یونسفر کد

ρ فاصله‌ی هندسی بین ماهواره و گیرنده

یکی از عوامل مؤثر در دقت برآوردهای حاصل از PPP، دقت اطلاعات مداری و ساعت ماهواره می‌باشد. اطلاعات ساعت و مدار ماهواره‌ها، توسط سامانه‌ی بین‌المللی GNSS (IGS)^۹ فراهم می‌شود. تولیدات ساعت و مدار IGS به سه صورت نهایی^{۱۰}، سریع^{۱۱} (IGR) و بسیار سریع^{۱۲} (IGU) در دسترس کاربران قرار می‌گیرد. از بین این تولیدات، تولیدات

^۳ Phase Center Offset

^۴ Phase wind up

^۵ Earth tide

^۶ Ocean loading

^۷ Relativistic effects

^۸ Multipath

^۹ International GNSS System

^{۱۰} Final

^{۱۱} Rapid

^{۱۲} Ultra Rapid

^۱ Saastomoinen

^۲ Double Difference

شکل ۱ توزیع PWV را در ایالت تگزاس نشان می‌دهد. همان طور که از شکل پیداست به تدریج بخار آب به سمت محل بارش در حال حرکت است تا اینکه بارش اتفاق می‌افتد و پس از آن PWV کاهش می‌یابد.

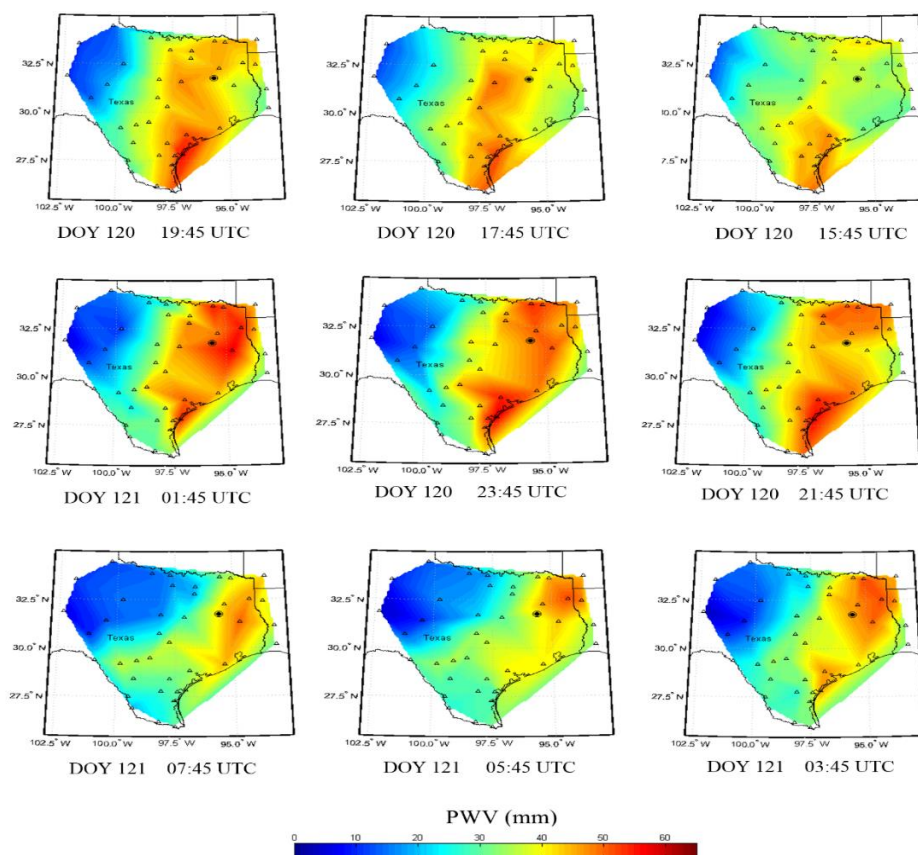
تفکیک مکانی PWV به موقعیت و تراکم ایستگاه‌های GNSS بستگی دارد. در این مطالعه، موقعیت ایستگاه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که توزیع آن‌ها یکنواخت باشد. با نگاهی به نحوه‌ی توزیع PWV در هنگام بارندگی‌ها، می‌توان به این نتیجه رسید که در صورت استفاده از یک شبکه‌ی چگال شامل ایستگاه‌های GNSS، می‌توان به تجمع بخار آب بارش‌زای اتمسفر در یک منطقه پی برد و احتمال وقوع بارندگی را مورد بررسی قرار داد. به همین منظور باید ایستگاه‌های GNSS علاوه بر منطقه‌ی مورد نظر، در نواحی اطراف آن نیز تا شعاع چند کیلومتری ایجاد شوند. این امر موجب می‌شود که برای پیش‌بینی توسط توزیع مکانی PWV نتایج بهتری حاصل شود. تراکم بالای ایستگاه‌ها و توزیع یکنواخت آن‌ها و همچنین برآورد آنی بخار آب تعلیق‌پذیر می‌تواند کارایی هر چه بهتر مشاهدات لحظه‌ای GNSS را در پیش‌بینی بارندگی‌ها موجب شود.

نهایی دارای بالاترین دقت می‌باشد و با تأخیری در حدود ۱۳ تا ۲۰ روز ارائه می‌شود [۱۶]. تولیدات سریع در ساعت ۱۷ به وقت زمان جهانی منتشر می‌شود. برای کاربردهای لحظه‌ای و نزدیک به آن از تولیدات بسیار سریع استفاده می‌شود که در ساعات ۳، ۹، ۱۵ و ۲۱ منتشر می‌شود. تولیدات بسیار سریع شامل اطلاعات مدار و ساعت ماهواره برای ۴۸ ساعت و با نرخ ۱۵ دقیقه هستند که ۲۴ ساعت آن بر مبنای مشاهدات است و ۲۴ ساعت دیگر مربوط به بخش پیش‌بینی می‌باشد.

۴- نتایج عددی

۴-۱- توزیع مکانی PWV هنگام بارندگی

در ابتدای این بخش، توزیع مکانی PWV در هنگام بارش برای ایالت تگزاس آمریکا بررسی می‌شود. برآورد آنی PWV مستلزم آن است که مشاهدات GNSS به صورت لحظه‌ای پردازش شوند و ZTD حاصل از آن به منظور تبدیل به PWV، مورد استفاده قرار گیرد. مقادیر PWV با استفاده از درونیایی خطی به دست آمده است. برای این منظور از ایستگاه‌های واقع در شبکه‌ی SuomiNet استفاده شده است.



شکل ۱- توزیع مکانی PWV با فواصل زمانی دو ساعته حاصل از مشاهدات GNSS هنگام بارش در تگزاس (سال ۲۰۱۶). بارش در ساعت ۰۱:۴۵ به وقت UTC شروع شده است. محل بارش با علامت دایره و محل ایستگاه‌های GNSS با علامت مثلث مشخص شده است

۴-۲- دقت برآورد لحظه ای ZTD با استفاده از روش PPP

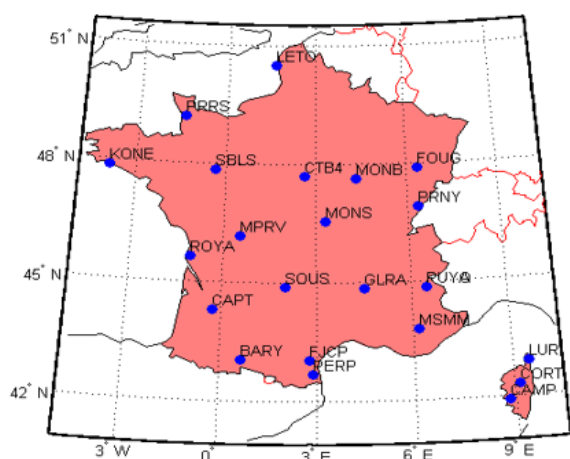
برای برآورد لحظه‌ای PWV از مشاهدات GNSS، ZTD را از روش PPP با مدار و ساعت بسیار سریع تعیین می‌کنیم. سپس دقت ZTD حاصل از این روش جهت تبدیل شدن به PWV بررسی می‌شود. برای این منظور از داده‌های ایستگاه‌های شبکه‌ی IGN واقع در کشور فرانسه استفاده شد که موقعیت آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

فایل‌های مشاهداتی مربوط به یک هفته با نرخ برداشت یک ثانیه مورد استفاده قرار گرفتند. مشاهدات توسط سرویس آنلاین PPP-CSRS^۱ پردازش شدند. این سرویس برای کاربردهای لحظه‌ای و نزدیک به آن، از مدار و ساعت بسیار سریع تولید شده توسط NRCan^۲ (EMU) استفاده می‌کند. مطالعات نشان داده است که EMU در مقایسه با IGS^۳، دقت قابل قبولی دارد [۱۷]. در جدول ۱ خلاصه‌ای از استراتژی استفاده شده برای پردازش فایل‌های مشاهداتی ارائه شده است. پردازش‌ها یک بار با مدار و ساعت نهایی و یک بار با مدار و ساعت بسیار سریع انجام شد و بین ZTDهای حاصل از آن‌ها مقایسه‌ای صورت گرفت.

اختلاف بین ZTDها به وسیله‌ی بایاس میانگین^۴، انحراف معیار^۵ و خطای ریشه‌ی میانگین مربع (RMSE) با مبنا قرار دادن ZTDهای حاصل از مدار و ساعت نهایی به عنوان مقادیر صحیح، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مقایسه‌های صورت گرفته در جدول ۲ موجود است.

با توجه به جدول ۲ برای تمامی ایستگاه‌ها مقادیر انحراف معیار و RMSE، کوچکتر از ۸ میلی‌متر است. بنابراین با توجه به مقدار آستانه‌ی ۱۵ میلی‌متر، ZTD برآورد شده توسط مدار و ساعت بسیار سریع، برای اینکه به عنوان یک ورودی برای مدل‌های عددی پیش‌بینی آب‌وهوا^۶ (NWP) استفاده شوند، صحت کافی دارند [۱۸]. همچنین برای تمامی ایستگاه‌ها بیش از ۹۸ درصد از

ZTDهای حاصل از مدار و ساعت بسیار سریع نسبت به ZTDهای حاصل از مدار و ساعت نهایی دارای اختلاف کمتر از ۲۰ میلی‌متر می‌باشند. بنابراین طبق معادله‌ی ۳ و با فرض اینکه ضریب تبدیل بین ۰.۱۵ الی ۰.۱۶ باشد، ۲۰ میلی‌متر خطا در ZTD، باعث می‌شود که PWV خطایی در حدود ۳ میلی‌متر داشته باشد. مقدار آستانه‌ی خطا برای PWV به منظور استفاده از آن در پیش‌بینی آب‌وهوا ۳ میلی‌متر است [۱۸]. در تحقیق انجام شده در سال ۲۰۱۴ دقت ۱-۲ میلی‌متر گزارش شده است [۱۹]. بنابراین PWVهایی که نتیجه‌ی برآورد آنی ZTD توسط مدار و ساعت بسیار سریع می‌باشند، می‌توانند برای پیش‌بینی آب‌وهوا مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های استفاده شده برای برآورد ZTD با روش PPP از شبکه IGN در فرانسه

جدول ۱- استراتژی مورد استفاده برای برآورد ZTD با استفاده از نرم‌افزار CSRS-PPP

Observations	Code, Phase
Ionospheric mode	L1, L2
Sampling rate	1 s
Frequency	L3
Elevation cutoff	10°
Ocean loading	Applied
ZTD estimation interval	1 s
Hydrostatic delay	Davis
Wet delay	Hopfield
Mapping functions	GMF

^۱ Canadian Spatial Reference System

^۲ Natural Resources Canada

^۳ IGS Ultra rapid ephemeris

^۴ Mean Bias

^۵ Standard Deviation

^۶ Numerical Weather Prediction

جدول ۲- بایاس میانگین، انحراف معیار، RMSE و درصد مقادیر کوچکتر از ۲۰ میلی متر (مقدار آستانه برای پیش‌بینی آب‌وهوا) برای اختلاف بین ZTD های حاصل از مدار و ساعت بسیار سریع و مدار و ساعت نهایی با روش PPP برای مدت یک هفته

نام ایستگاه	بایاس (mm)	انحراف معیار (mm)	RMSE (mm)	< 20mm
CTB4	۰٫۵	۳٫۷	۳٫۷	۱۰۰
SBSL	۱٫۲	۷٫۲	۷٫۳	۹۸
KONE	-۰٫۶	۳٫۸	۳٫۸	۱۰۰
PRRS	-۰٫۹	۴	۴٫۲	۱۰۰
LETO	۰٫۷	۳٫۴	۳٫۴	۱۰۰
MPRV	-۰٫۹	۶٫۲	۶٫۳	۹۸
MONS	-۰٫۹	۴٫۲	۴٫۳	۹۹
PRNY	-۰٫۷	۴٫۱	۴٫۲	۹۹
FOUG	۰٫۴	۳٫۵	۳٫۵	۱۰۰
MONB	-۱٫۲	۶٫۵	۶٫۶	۹۸
PUYA	-۰٫۴	۴٫۲	۴٫۲	۹۹
GLRA	-۰٫۷	۳٫۸	۳٫۹	۹۹
SOUS	-۱٫۲	۳٫۲	۳٫۴	۱۰۰
CAPT	-۰٫۸	۲٫۶	۲٫۷	۱۰۰
ROYA	۰٫۳	۳٫۶	۳٫۶	۱۰۰
PUYO	-۰٫۵	۲٫۶	۲٫۷	۱۰۰
BARY	-۰٫۲	۲٫۴	۲٫۴	۱۰۰
FJCP	-۰٫۸	۰٫۳	۳٫۲	۱۰۰
MSMM	-۲	۴٫۳	۴٫۷	۱۰۰
CORT	-۲٫۷	۴٫۸	۵٫۶	۱۰۰
LURI	-۰٫۶	۳٫۱	۳٫۱	۱۰۰
CAMP	-۱	۳٫۶	۳٫۷	۹۹
PERP	-۰٫۱	۴	۴	۹۹

۴-۳- امکان‌سنجی پیش‌بینی بارندگی‌ها توسط ایستگاه‌های GNSS واقع در ایران

در کشور ایران، شبکه‌های مختلفی شامل ایستگاه‌های دائم GNSS به منظور اهداف گوناگونی توسط برخی نهادها و سازمان‌ها ایجاد و راه‌اندازی شده‌اند. برخی از این شبکه‌ها عبارتند از: شبکه‌ی مدیریت یکپارچه‌ی مالکیت‌ها (شمیم)، شبکه‌ی ژئودینامیک سراسری ایران، سامانه‌ی یکپارچه‌ی مکانی اصفهان (سیما) و سامانه‌ی موقعیت‌یابی آنی تهران (سمت). موقعیت ایستگاه‌های شبکه‌های مذکور، در شکل ۳ نشان داده شده است. بزرگترین شبکه شامل ایستگاه‌های دائم GNSS در ایران، شبکه‌ی مدیریت یکپارچه‌ی مالکیت‌ها می‌باشد. این

شبکه بر اساس فناوری تلفیقی RTK^۱ و GPRS^۲ در اداره‌ی کل کاداستر سازمان ثبت اسناد و املاک کشور طراحی و پایه‌ریزی شده است و داده‌های مربوط به تصحیح مشاهدات خام ماهواره‌ای را به صورت آنی برای کاربران گیرنده‌های متحرک (روور^۳) مخابره می‌کند. کاربران این شبکه می‌توانند در هر لحظه در کوتاهترین زمان ممکن، به دقت مطلوب در تعیین موقعیت دست یابند. اهداف عمومی این شبکه عبارتند از: کارهای مطالعاتی ژئودینامیکی، زمین‌شناسی، میکروژئودزی و مطالعات جابجایی گسل‌ها، سدها و سازه‌های بزرگ.

یکی از پروژه‌های بنیادی که در سال ۱۳۸۳ توسط سازمان نقشه‌برداری کشور (اداره‌ی ژئودزی و ژئودینامیک) اجرا شده است شبکه‌ی ژئودینامیک سراسری ایران با ۱۲۰ ایستگاه دائمی GPS می‌باشد. هدف از ایجاد این شبکه، استفاده از تکنولوژی GNSS به منظور تعیین و برآورد پارامترهای تغییر شکل و همچنین پایش حرکات پوسته‌ی زمین و گسل‌ها می‌باشد. در برخی از تحقیقات، برآورد تروپوسفر با استفاده از مشاهدات این شبکه انجام شده است [۲۰] و [۲۱].

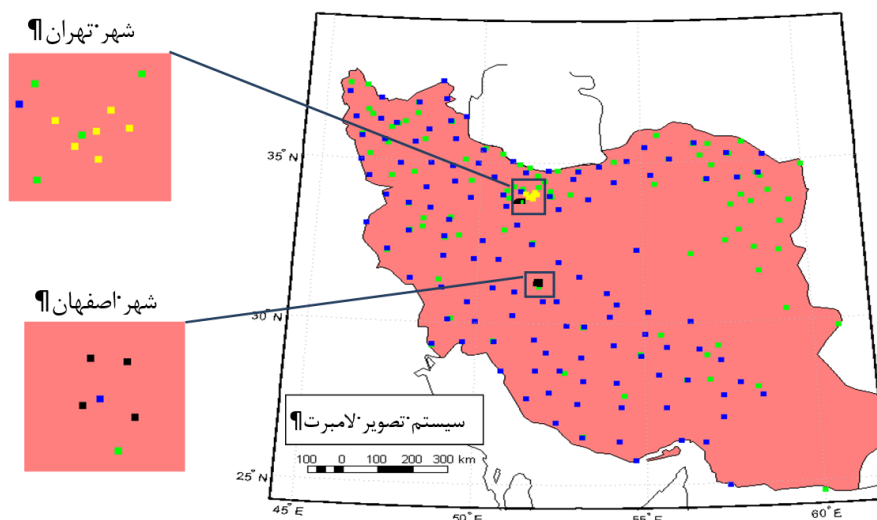
شهرداری تهران جهت تأمین زیرساخت مسطحاتی-ارتفاعی شهر تهران، شبکه‌ی تعیین موقعیت کینماتیک تهران را ایجاد نمود. این شبکه شامل ۶ ایستگاه دائمی است که یکی از آن‌ها در مرکز و مابقی در مناطق مرزی تهران پیاده شده‌اند. همچنین شهرداری اصفهان به منظور به روزرسانی نقشه‌ها، عملیات عمرانی و شهرسازی، نقشه‌برداری توسط کاربران شهرداری، پیمانکاران و سایر سازمان‌های مرتبط، سامانه‌ی یکپارچه‌ی مکانی اصفهان را راه‌اندازی نموده است که شامل ۴ ایستگاه دائم GNSS می‌باشد.

همان‌طور که در بخش‌های قبل گفته شد، قدرت تفکیک مکانی PWV حاصل از مشاهدات GNSS، به موقعیت و تراکم ایستگاه‌های آن بستگی دارد. با توجه به شکل ۳ این ایستگاه‌ها در کنار یکدیگر برای برخی مناطق مانند تهران (که در آن همپوشانی ایستگاه‌های شبکه‌های شمیم، سمت و شبکه‌ی ژئودینامیک سراسری رخ داده است) دارای تراکم بالایی است، همچنین پراکندگی

^۱ Real-Time Kinematic
^۲ General Packet Radio Service
^۳ Rover

ایستگاه‌ها برای مناطق تحت پوشش، یکنواخت می‌باشد. بنابراین با افزایش تراکم ایستگاه‌ها برای برخی مناطق و با توجه به اینکه همه‌ی ایستگاه‌های شبکه‌های مذکور قادرند

فایل‌های مشاهداتی را به صورت آنی فراهم کنند، می‌توان از مشاهدات چنین شبکه‌ای برای اندازه‌گیری PWV و پیش‌بینی بارش‌ها بهره گرفت.



شکل ۳- موقعیت تعدادی از شبکه‌های ایستگاه‌های دائمی GNSS در ایران شامل ایستگاه‌های شبکه مدیریت یکپارچه مالکیت‌ها (آبی رنگ)، شبکه ژئودینامیک سراسری (سبز رنگ)، سامانه موقعیت‌یابی آنی تهران (زرد رنگ) و سامانه‌ی یکپارچه‌ی مکانی اصفهان (مشکی رنگ)

۵- نتیجه‌گیری

بارش‌زای اتمسفر در یک منطقه پی برد و احتمال وقوع بارندگی را مورد بررسی قرار داد. این پیش‌بینی‌ها در صورتی کارایی خواهند داشت که ایستگاه‌ها تراکم بالایی داشته باشند و مقدار بخار آب تعلیق‌پذیر، طی مدت زمان کوتاهی برآورد شود.

به منظور برآورد لحظه‌ای تأخیر کلی زینتی، از روش تعیین موقعیت مطلق دقیق استفاده کردیم. برای این کار، یک مرتبه با مدار و ساعت نهایی و یک مرتبه نیز با مدار و ساعت بسیار سریع برآورد شد. سپس بین مقادیر حاصل از آن‌ها با مبنا قرار دادن مقادیر حاصل از مدار و ساعت نهایی به عنوان مقادیر صحیح، مقایسه‌هایی صورت گرفت. همه‌ی نتایج نشان دهنده‌ی سازگاری خوب بین ZTDهای حاصل از مدار و ساعت نهایی و ZTDهای حاصل از مدار و ساعت بسیار سریع بودند. همچنین مشخص شد که در صورت تبدیل ZTD حاصل از مدار و ساعت بسیار سریع به PWV، دقت PWV حاصل برای پیش‌بینی‌ها، کافی می‌باشد.

در پایان نیز امکان پیش‌بینی بارندگی‌ها توسط ایستگاه‌های دائم GNSS موجود در کشور ایران که فایل‌های مشاهداتی را به صورت آنی فراهم می‌کنند، مورد بررسی قرار گرفت. تراکم حاصل از همپوشانی ایستگاه‌های شبکه‌ی مدیریت یکپارچه مالکیت‌ها، شبکه‌ی ژئودینامیک

سامانه‌ی ناوبری ماهواره‌ای جهانی از جمله ابزارهایی است که می‌تواند بخار آب بارش‌زای اتمسفر را اندازه‌گیری کند. بخار آب تعلیق‌پذیر (PWV) پارامتری است که توسط مشاهدات GNSS قابل اندازه‌گیری است. برای استفاده از GNSS به منظور پیش‌بینی بارش‌ها، باید PWV را سریع برآورد کرد طوری که دقت آن، قابل قبول باشد. در این مقاله ارتباط بین PWV و بارش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برآورد سریع PWV توسط مشاهدات GNSS جهت پیش‌بینی بارش‌ها بررسی شد.

توزیع مکانی PWV هنگام بارش‌های شدید بررسی شد. برای این کار از داده‌های PWV حاصل از ایستگاه‌های شبکه‌ی SuomiNet واقع در ایالت تگزاس استفاده شد و با استفاده از درونیایی خطی، توزیع مکانی PWV برای منطقه‌ی واقع در محدوده‌ی ایستگاه‌ها تعیین شد. مشاهده شد که بخار آب برآورد شده از مشاهدات GNSS، به تدریج به سمت محل بارش حرکت می‌کند و سپس با تجمع در محل بارش، بارندگی شروع می‌شود و سپس PWV کاهش می‌یابد. بنابراین در صورت استفاده از یک شبکه شامل ایستگاه‌های GNSS با توزیع یکنواخت، می‌توان به وسیله‌ی مشاهدات GNSS، به تجمع بخار آب

بنابراین پیشنهاد می‌شود که با مطالعه‌ی دقیق رفتار PWV، احتمال وجود چنین الگوهایی بررسی شود. همچنین به منظور تعیین دقت PWV حاصل از مشاهدات GNSS توسط روش PPP و با مدار و ساعت بسیار سریع، پیشنهاد می‌شود که PWV حاصل از روش مذکور، با PWV حاصل از اندازه‌گیری رادیوسوندها به عنوان یک منبع قابل اعتماد مقایسه شود.

سراسری ایران، شبکه‌ی موقعیتیابی آنی تهران و سامانه‌ی یکپارچه‌ی مکانی اصفهان نشان می‌دهد که برای مناطقی مثل تهران که تراکم ایستگاه‌ها بالا می‌باشد می‌توان PWV را با تفکیک مکانی بالا و به طور آنی برآورد کرد.

گاهی اوقات ممکن است برای یک منطقه قبل از بارندگی‌های شدید، تغییرات و توزیع مکانی PWV، از الگو یا الگوهای خاصی پیروی کند که در صورت پی بردن به این الگوها، می‌توان بارندگی‌های شدید را پیش‌بینی کرد.

مراجع

- [1] Rohm W et al (2014). "Ground-based GNSS ZTD/IWV estimation system for numerical weather prediction in challenging weather conditions". *Atmos Res* 138:414-426.
- [2] Bevis M et al (1994). "GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water". *J Appl Meteorol* 33:379-386.
- [3] Choy S, Wang C, Zhang K, Kuleshov Y (2013). "GPS sensing of precipitable water vapour during the March 2010 Melbourne storm". *Adv Space Res* 52:1688-1699.
- [4] Wang H, Wei M, Li G, Zhou S, Zeng Q (2013). "Analysis of precipitable water vapor from GPS measurements in Chengdu region: Distribution and evolution characteristics in autumn". *Adv Space Res* 52:656-667.
- [5] Gu M, Brunner F (1990). "Theory of the Two Frequencies Dispersive Range Correction". *Manuscr Geod* 15:357-361.
- [6] Jin S, Luo O (2009). "Variability and climatology of PWV from global 13-year GPS observations". *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 47(7):1918-1924.
- [7] Li M et al (2015). "Assessment of precipitable water vapor derived from ground-based BeiDou observations with Precise Point Positioning approach". *Adv Space Res* 55:150-162.
- [8] Asken J, Nordius H (1987). "Estimation of tropospheric delay for microwave from surface weather data". *Radio Sci* 22(3):379-386.
- [9] Champollion C et al (2005). "GPS water vapour tomography: preliminary results from the ESCOMPTE field experiment". *Atmos Res* 74:253-274.
- [10] Karabatic A, Weber R, Haiden T (2011). "Near real-time estimation of tropospheric water vapour content from ground based GNSS data and its potential contribution to weather now-casting in Austria". *Adv Space Res* 47:1691-1703.
- [11] Davis J, Herring T, Shapiro I, Rogers A, Elgered G (1985). "Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length". *Radio Sci* 20:1593-1607.
- [12] Dodson A, Baker H (1998). "Accuracy of orbits of GPS atmospheric water vapour estimation". *Physics and Chemistry of the Earth* 23(1):119-124.
- [13] Liu Y (2000). "Remote sensing of atmospheric water vapor using GPS data in the Hong Kong region". The Hong Kong Polytechnic University.
- [14] Yuan Y et al (2014). "Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS precise point positioning". *J Geophys* 119. doi:10.1002/2014JD021486.
- [15] Kouba, J, Heroux P (2001). "Precise point positioning using IGS orbit and clock products". *GPS Solut* 5(2):12-28.
- [16] Kouba J (2009). "A guide to using international GNSS service (IGS) products".
- [17] Giancarlo C et al (2011). "PPP using NRCan Ultra Rapid products (EMU): Near real-time comparison and monitoring of time scales generated in time and frequency laboratories". doi:10.1109/fcs.2011.5977831.

- [18] De Haan S (2006). "National/regional operational procedures of GPS water vapour networks and agreed international procedures". Rep. WMO/TD-No 1340 pp20. KNMI, Netherlands.
- [19] Li, X., G. Dick, M. Ge, S. Heise, J. Wickert, and M. Bender (2014). "Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor: Precise point positioning with orbit, clock, and phase delay corrections". *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3615–3621, doi: 10.1002/2013GL058721.
- [20] Shoorcheh B, Ardalan AA (2014). "Precipitable Water Vapor Estimation Using GPS Observations for National Cartographic Center Permanent Station for year 2005". *GEJ*. 5 (1): 9-18
- [21] Mashhadi-Hossainali M, Adavi Z (2015). "4D Tomographic Modeling of Water Vapor and Wet Refractivity Using GPS Signals". *Journal of Climate Research* 6(1):73-84