

استفاده از مدل‌های عددی هواشناسی و روش ردیابی اشعه برای بهبود تعیین موقعیت مطلق دقیق

سیده فریناز میرمحمدیان^{۱*}، جمال عسگری^۲، وهاب نفیسی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده مهندسی - دانشگاه اصفهان
fm.mohamadian@yahoo.com

^۲ استادیار گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده مهندسی - دانشگاه اصفهان
{jamal.asgari, vnafisi}@gmail.com

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۲، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۳)

چکیده

یکی از مباحث مهم در ژئودزی تعیین موقعیت نقاط است که به دو روش نسبی و دقیق انجام می‌شود. روش تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP)^۱ که در دو دهه اخیر گسترش یافته و مزایای ویژه‌ای نسبت به روش نسبی دارد، هنوز نتوانسته به دقت روش‌های تعیین موقعیت نسبی برسد. عمده‌ی مشکلات این روش مربوط به مدل‌های پردازش، ابهام فاز غیرصحیح و دقت برآورد اثر تروپوسفر است. تاکنون تلاش‌های زیادی برای اصلاح مدل‌ها و کالیبراسیون بایاس فازهای ماهواره‌ای صورت گرفته است. در این مقاله هدف برآورد هرچه دقیق‌تر تأخیر تروپوسفری و در نتیجه افزایش دقت تعیین موقعیت با روش تعیین موقعیت مطلق دقیق است. برای این منظور تأخیر توسط پردازش PPP محاسبه می‌گردد، سپس سعی می‌شود بخشی از تأخیر که این روش نتوانسته مدل کند، توسط روش ردیابی اشعه محاسبه و اعمال گردد تا تعیین موقعیت به دقت بالاتری برسد.

امواج منتشره از ماهواره‌ها تحت تأثیر تروپوسفر دچار تأخیر می‌شوند. مدل کردن این تأخیر در روش‌های تعیین موقعیت برای دستیابی به دقت بالا، بسیار مهم است. روش‌های مختلفی مانند روش ردیابی اشعه و استفاده از توابع نگاشتی مثل $\frac{1}{\cos Z}$ ، VMF^2 ، GMF^3 که تأخیر زینتی را به تأخیر مایل تبدیل می‌کند، برای برآورد این تأخیر موجود است.

در این مقاله تأخیر مایل تروپوسفری با استفاده از مدل‌های عددی هواشناسی توسط ردیابی اشعه محاسبه شده است و اختلاف آن با تأخیرات مایل تروپوسفری بدست آمده به سه روشی که به تفصیل شرح داده خواهد شد (با استفاده از تابع نگاشت GMF و تأخیر زینتی بدست آمده از روش PPP) به فایل‌های RINEX اعمال شده است. سپس برای فایل‌های RINEX اصلاح شده، پردازش PPP انجام شد. در واقع هدف ساختن فایل مشاهداتی RINEX جدیدی است که تأخیر مایل حاصل از PPP به جواب ردیابی اشعه نزدیک باشد. سپس اثر این اصلاح مشاهدات را در مختصات گیرنده حاصل از این روش‌ها بررسی می‌نماییم. با مقایسه‌ی نتایج با مختصات ITRF نقطه، مشخص شد که اعمال اختلاف بین تأخیر مایل حاصل از حاصلضرب تأخیر زینتی بدست آمده از روش PPP در ۸۸٪ تابع نگاشت هیدروستاتیک GMF و ۱۲٪ از تابع نگاشت غیرهیدروستاتیک با تأخیر حاصل از روش ردیابی اشعه، به فایل‌های مشاهداتی، باعث بهبود تعیین موقعیت مطلق دقیق می‌شود.

واژگان کلیدی: ردیابی اشعه^۴، مدل‌های عددی هواشناسی، تعیین موقعیت مطلق دقیق

* نویسنده رابط

^۱ Precise Point Positioning

^۲ Vienna Mapping Function

^۳ Global Mapping Function

^۴ Ray Tracing

۱- مقدمه

PPP روشی برای تعیین موقعیت مطلق یک گیرنده، با استفاده از محصولات دقیق مدار و ساعت ماهواره است. این اصطلاح اولین بار توسط هروکس و کوبا در سال ۱۹۹۵ مطرح شد، زمانی که آنها از ساعت و مدارهای "دقیق" ماهواره برای تعیین موقعیت نقطه استفاده کردند [۹].

بعدها در سال ۱۹۹۷، زومبرگ و همکاران استفاده از PPP برای آنالیز صدها تا هزاران سایت در هرروز را مطرح کردند و نشان داده شد، که کیفیت نتایج قابل مقایسه با آنالیز همزمان همه‌ی داده‌هاست [۳۰].

همچنین یک روش پس‌پردازشی برای تعیین موقعیت دقیق مستقل با دقت سانتی‌متری با استفاده از مشاهدات فاز موج حامل و شبه‌فاصله دو فرکانسه غیرتفاضلی همراه با محصولات مدار دقیق IGS^۱ توسط کوبا و هروکس ارائه شده است [۱۵].

تعیین موقعیت مطلق دقیق به علت عدم وابستگی به سایر نقاط برای تعیین موقعیت و ارائه مختصات در چارچوب ITRF، روش مهمی در مبحث ژئودزی ماهواره-ای است. اما هنوز این روش به علت مشکلاتی مانند ابهام فاز غیرصحیح و اثر تروپوسفر به دقت روش‌های نسبی نرسیده است. تلاش‌های زیادی برای بهبود این روش صورت گرفته است. برای مثال گائو و شن (۲۰۰۲)، لیندرو و همکاران (۲۰۰۶)، گی و همکاران (۲۰۰۷)، بانویل و همکاران (۲۰۰۸)، کولینز (۲۰۰۸)، لائوریثس و همکاران (۲۰۰۸) بروی حل ابهام فاز و کالیبراسیون بایاس فازهای ماهواره کار کردند [۵]، [۷] و [۱۷].

یکی از منابع مهم و موثر خطا در پردازش‌ها و آنالیزهای سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS)^۲، تأخیر تروپوسفری است. تأخیر تروپوسفری به دو مؤلفه‌ی هیدروستاتیک و غیرهیدروستاتیک تجزیه می‌شود که هر قسمت شامل تأخیر زینتی^۳ و تابع نگاشت است. روش‌های مختلفی برای برآورد تأخیر تروپوسفری وجود دارد. یکی از روش‌ها که تأخیر را به صورت مستقیم برآورد می‌کند، روش ردیابی اشعه است، که بطور خاص در سالهای اخیر به دلیل افزایش قدرت محاسبات و در دسترس بودن

مجموعه داده‌های هواشناسی که قدرت تفکیک مکانی و زمانی‌شان بهبود یافته است، به ابزاری کارا برای این منظور تبدیل شده است. روش دیگر که بطور معمول و سنتی در پردازش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، محاسبه‌ی تأخیر زینتی و سپس تصویر کردن آن با استفاده از توابع نگاشت مختلف مثل $\frac{1}{\cos z}$ ، VMF، GMF است.

در این مقاله هدف بررسی تأثیر استفاده از روش ردیابی اشعه بر روی نتایج PPP است، در مقایسه با حالتی که از توابع نگاشت برای این منظور استفاده می‌شود. در اینجا سعی شده است که نقص مدل کردن تأخیر با استفاده از توابع نگاشت توسط ردیابی اشعه رفع شود. مدل‌های عددی هواشناسی به عنوان ورودی بسیار مهم روش ردیابی در نظر گرفته می‌شوند.

۲- تأخیر تروپوسفری

کمیت پایه قابل مشاهده در ژئودزی فضایی مدت زمانی‌ست که سیگنال از فرستنده تا گیرنده‌ای که نزدیک یا روی سطح زمین واقع شده است، طی می‌کند [۲۵]. در خلاء امواج الکترومغناطیس با سرعت نور حرکت می‌کنند، اما چون اتمسفر زمین خلاء کامل نیست و از ترکیب اجزای خنثی و باردار تشکیل شده است، امواج منتشر شده از ماهواره سرعت انتشارشان کند و مسیرشان منحنی می‌شود. اتمسفر متشکل از دو قسمت است. قسمت یونیزه‌ی اتمسفر- یونسفر- که یک محیط پراکنده کننده برای امواج رادیویی است و تأثیر این محیط بر روی امواج به فرکانس آنها بستگی دارد. این خصوصیت امکان می‌دهد که با استفاده از اندازه‌گیری‌های همزمان در دو یا چند فرکانس، بخش عمده این اثر حذف شود [۱۴].

اما چون قسمت خنثی اتمسفر، تروپوسفر، که پایین-ترین لایه‌ی اتمسفر است و از سطح دریا تا ارتفاع حدود ۴۰ کیلومتر گسترش یافته است [۱۲]، برای امواج GNSS غیرپراکنده‌کننده^۴ است، نمی‌توان از روشی که برای یونسفر ذکر شد استفاده کرد. این اثر برای ماهواره‌ای در سرسو و گیرنده‌ای در سطح دریا بطور تقریبی ۲ تا ۳ متر بوده و برای ماهواره‌ای در افق تا حدود ۱۰ برابر می‌تواند افزایش یابد [۱]. این تأخیر بر روی پارامترهای برآورد شده

^۱ International GNSS Service

^۲ Global Positioning System

^۳ Zenith Delay

^۴ Non dispersive

و وابسته به ضریب تجربی تعیین شده K_1 و فشار کلی و درجه حرارت است.

شکست پذیری غیرهیدروستاتیک (N_{nh}) به فرم زیر تعریف می شود:

$$N_{nh} = K'_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \quad (7)$$

که $K'_2 = K_2 - K_1$ است. در روابط فوق e ، p و T به ترتیب فشار کلی (برحسب هکتوپاسکال)، فشار بخار آب (برحسب هکتوپاسکال) و دما (بر حسب کلون) هستند.

مقادیر مختلفی برای ثوابت تجربی K_1 و K_2 و K_3 توسط محققین مختلف ارائه شده است. در سال ۲۰۰۲ روگر ضرائب بهترین میانگین را به شرح زیر بیان کرده است که در این تحقیق نیز از آنها استفاده شده است [۲۶]: [۲۷].

$$K_1 = 77.6890 \text{ (hPa)} \quad (8)$$

$$K_2 = 71.2952 \text{ (hPa)} \quad (9)$$

$$K_3 = 3.75463 \text{ (hPa)} \quad (10)$$

مؤلفه‌ی هیدروستاتیک به نسبت مخلوط گازهای خشک وابسته است و به بخار آب که بسیار متغیر می باشد، وابسته نیست و این اجازه‌ی پیش‌بینی بسیار دقیق این مؤلفه بر پایه‌ی پارامترهای سطح را می دهد. ولی شکست پذیری غیرهیدروستاتیک به طور دقیق توسط اندازه گیری های سطح قابل پیش بینی نیست و روش های جایگزین باید بکار گرفته شود.

دو روشی که در حال حاضر به عنوان راه حل برای مسئله تاخیر تروپوسفری مطرح هستند عبارتند از: استفاده از توابع نگاشت و ردیابی اشعه مستقیم.

با استفاده از توابع نگاشت تأخیر کلی مایل به صورت حاصل ضرب تأخیر زینتی و تابع نگاشت در نظر گرفته می شود:

$$\Delta L = \Delta L^z. mf \quad (11)$$

تابع نگاشت، تابعی از زاویه ارتفاعی است و وظیفه آن تصویر کردن مقادیر زینتی در راستای هر امتداد مایل دیگر است.

با توجه به تفکیک تأخیر کلی به دو مؤلفه هیدروستاتیک و غیرهیدروستاتیک می توان نوشت:

با تکنیک های ژئودزی فضایی مثل VLBI و GPS اثر مخرب دارد.

تأخیر کلی معادل است با اختلاف آنچه که در عمل اتفاق می افتد (مسیر واقعی اشعه) و حالت ایده آل (مسیر اشعه هنگام عبور از خلاء)، و تابعی است از اپک (تاریخ و زمان)، موقعیت گیرنده و جهت ماهواره (در چارچوب توپوسنتریک با زاویه ارتفاعی و آزیموت):

$$\Delta L = f(t, \phi, \lambda, h, \epsilon, \alpha) \quad (1)$$

با استفاده از فرمول های زیر می توان تأخیر را بدست آورد [۲۴]، [۲۵]:

$$\begin{aligned} \Delta L &= \int_{\text{ray-path}}^{\text{bent}} n(\ell) d\ell - \int_{\text{line}}^{\text{straight}} d\ell \\ &= \int_R^A (n - 1) d\ell = 10^{-6} \int_R^A N_T d\ell \end{aligned} \quad (2)$$

برای بدست آوردن تأخیر باید رفتار اتمسفر در راستای مسیر سیگنال مشخص باشد. به عبارت دیگر n (ضریب شکست) یا N (شکست پذیری) باید به طریقی معلوم باشد. نسبت سرعت انتشار در خلاء c به سرعت انتشار در محیطی که موج در آن سرعتی برابر v دارد، با ضریب شکست تعریف می شود:

$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

با توجه به آنکه ضریب شکست بسیار نزدیک به یک است، پارامتر دیگری تحت عنوان شکست پذیری تعریف می شود:

$$N = (n - 1) 10^6 \quad (4)$$

اگرچه فرمول های زیادی برای شکست پذیری کلی برای یک نقطه در اتمسفر زمین وجود دارد، در اینجا از فرمول Davis استفاده می شود که شکست پذیری کلی را به دو مؤلفه هیدروستاتیک و غیر هیدروستاتیک تقسیم می کند [۱]، [۲۹].

$$N_T = N_h + N_{nh} \quad (5)$$

شکست پذیری هیدروستاتیک (N_h) به صورت زیر است:

$$N_h = K_1 \frac{p}{T} \quad (6)$$

$$b_h = 0.002905 \quad (16)$$

$$c_h = 0.0649899494936612 \quad (17)$$

$$b_{nh} = 1.4572752e^{-3} \quad (18)$$

$$c_{nh} = 4.3908931e^{-2} \quad (19)$$

با استفاده از ضرائب، توابع نگاشت هیدروستاتیک و غیرهیدروستاتیک بدست می آید. میتوان تأخیرات زینتی را از روش تعیین موقعیت مطلق بدست آورد و در توابع نگاشت مرتبط ضرب کرد تا به تأخیر مایل تبدیل شود.

روش مهم دیگر برای مدل کردن تأخیر تروپوسفری، ردیابی اشعه است [25]، [29]. در این روش فرض می شود که سیگنال یک اشعه است و مسیر اشعه از ماهواره تا گیرنده ردیابی می شود. برای محاسبه ی شکست پذیری در مسیر اشعه، احتیاج به مدلی عددی از اتمسفر است. در سالهای اخیر استفاده از مدل های عددی هواشناسی (NWM)^۴ به عنوان مدلی از اتمسفر فراگیر شده است.

برای مطالعه فرمول های این روش به پیوست A و [3] مراجعه کنید.

در گذشته عمدتاً به علت محدودیت های محاسباتی، ردیابی اشعه تنها به عنوان راهی برای ارزیابی مدل های تأخیر تروپوسفری و توابع نگاشت استفاده می شد و خود به عنوان برآوردگر مستقیم استفاده نمی شد. اما در سال های اخیر با افزایش قدرت محاسبات و بهبود قدرت تفکیک مکانی و زمانی NWM ها، این روش به صورت مستقیم و مستقل برای محاسبه تأخیر مایل تروپوسفری بکار می رود [۱۰]. هرچند هنوز هم این روش بخش مهمی در ایجاد برخی توابع نگاشت است.

نشان داده شده است که ردیابی اشعه ای با استفاده از NWM ها، برای تعیین موقعیت دقتی بهتر از سانتی متر را نتیجه خواهد داد [6].

روش های مختلفی برای انجام ردیابی اشعه وجود دارد که این اختلاف به علت تفاوت در الگوریتم و روش های درون یابی مورد استفاده است [21]. مطالعات انجام شده نشان می دهد که استفاده از ردیابی مستقیم اشعه به منظور تعیین تأخیر تروپوسفری، در پردازش داده های VLBI می تواند باعث بهبود دقت در نتایج نهایی، در مقایسه با استفاده از توابع نگاشت شود [20]. برای استفاده

$$\Delta L = \Delta L^z_h \cdot mf_h + \Delta L^z_{nh} \cdot mf_{nh} \quad (12)$$

مدل های تأخیر زینتی و توابع نگاشت مختلفی بر پایه ی داده های تئوری و عملی پیشنهاد شده اند. به عنوان مثال برای مدل های تأخیر زینتی می توان به ساستاموین، بلک-آیسنر و هوپفیلد اشاره کرد و توابع نگاشت Davis, Chao, Marini و Niell از جمله توابع نگاشت متداول هستند [4]، [13]، [24]، [28].

تابع نگاشت GMF از جمله توابعی است که در پردازش داده های GPS استفاده می شود. این تابع نگاشت توسط بوهم و همکاران در سال ۲۰۰۴ مطرح شد [2]. فرم کلی استفاده شده برای این تابع نگاشت بصورت زیر است:

$$mf(e) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{\sin(e) + \frac{1 + \frac{a}{b}}{\sin(e) + \frac{b}{\sin(e) + c}}} \quad (13)$$

که برای بدست آوردن این تابع نگاشت باید زاویه ی ارتفاعی و ضرائب a, b, c مشخص باشد.

این تابع نگاشت بر پایه ی داده هایی از مدل های عددی هواشناسی جهانی ECMWF^۱ ارائه می شود و ضرائب آن از بسط پارامترهای VMF1 به هارمونیک کروی روی یک شبکه جهانی و با استفاده از یک شبکه از پروفیل های متوسط ماهیانه مربوط به درجه حرارت، فشار و رطوبت نسبی از آنالیز دوباره ی داده های چهار ساله ی ECMWF بدست آمده اند. ضریب a از هارمونیک های کروی روی یک شبکه جهانی محاسبه شده است:

$$a = a_0 + A \cos\left(\frac{DOY - 28}{365} \cdot 2\pi\right) \quad (14)$$

$$a_0 = \sum_{n=0}^9 \sum_{m=0}^n p_{nm} (\sin \Phi) [A_{nm} \cos(m\lambda) + B_{nm} \sin(m\lambda)] \quad (15)$$

و ضرائب b و c از تابع نگاشت VMF1 گرفته شده است که در VMF1 برای تعیین ضرائب b و c برای مؤلفه هیدروستاتیک، از تعاریف ارائه شده برای همین ضرائب توسط IMF^۲ و برای مؤلفه ی غیرهیدروستاتیک از تعاریف مربوط به NMF^۳ در عرض ۴۵ درجه استفاده شده است:

^۱ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

^۲ Isobaric Mapping function

^۳ Neill Mapping Function

^۴ Numerical Weather Model

که در این جا ρ فاصله‌ی هندسی بین گیرنده و ماهواره، dt خطای ساعت ماهواره، dT خطای ساعت گیرنده، T_r تأخیر تروپوسفری و ε شامل نویز نسبی است. در فرمول مربوط به مشاهدات فاز علاوه بر پارامترهای ذکر شده، حاصلضرب ابهام فاز در طول موج هم وجود دارد. سپس با استفاده از محصولات IGS خطای ساعت ماهواره از این روابط حذف می‌شود. تأخیر تروپوسفری را هم بصورت حاصلضرب تأخیر زینیتی و تابع نگاشت در نظر می‌گیرند که روابط را به این فرم تبدیل می‌کند:

$$f_p = \rho + cdT + M \times zpd + \varepsilon_p - l_p = 0 \quad (22)$$

$$f_\phi = \rho + cdT + M \times zpd + N\lambda + \varepsilon_\phi - l_\phi = 0 \quad (23)$$

حال اگر معادلات برای مشاهدات هر اپک تشکیل و سرشکن شود، تعیین موقعیت مطلق دقیق در هر اپک ۶ مجهول شامل سه مؤلفه‌ی مختصات گیرنده، تأخیر زینیتی تروپوسفری، خطای ساعت گیرنده و حل ابهام فاز را می‌دهد.

همانطور که ذکر شد با استفاده از توابع نگاشت مختلفی مثل VMF, IMF, GMF, NMF میتوان تأخیر زینیتی را به تأخیر مایل تروپوسفری تبدیل کرد [۲۳]، [۲۲]، [۳]، [۲]، [۲۳].

در مراحل پردازش و برنامه نویسی PPP از تابع نگاشت GMF استفاده می‌شود.

۴- اجرای روش و نتایج عددی

اجرای روش ردیابی اشعه: در مرحله اول با استفاده از روش ردیابی اشعه مقدار تأخیرهای مایل برای تمام ماهواره‌های هر اپک محاسبه می‌شود.

برای شروع این پردازش، ابتدا فایل‌های RINEX برای هر روز پردازش شده و آزمون و زاویه‌ی ارتفاعی مربوط به تمام ماهواره‌های هر اپک استخراج شده و از آنها به همراه اپک مشاهدات در پردازش استفاده می‌شود. سپس با استفاده از داده‌های ECMWF مربوط به ایستگاه مورد نظر (دارای شبکه‌بندی ۰/۱ درجه‌ای) برای هر روز پردازش ردیابی اشعه انجام می‌شود. به این ترتیب با استفاده از فرمول‌های ردیابی اشعه، تأخیر زینیتی و مایل برای تمامی ماهواره‌های هر اپک بدست آمد.

از این روش باید ملاحظات در نظر گرفته شود، که از جمله میتوان به این موارد اشاره کرد: تبدیل ارتفاع ژئوتانسیل به ارتفاع از بیضوی، درونیایی قائم، درونیایی افقی و درونیایی زمانی. برای مطالعه بیشتر در رابطه با این جزئیات به [۲۰] و [۲۱] مراجعه شود.

۳- تعیین موقعیت مطلق دقیق

تعیین موقعیت مطلق دقیق یکی از روش‌های مهم در GPS است. زمانی‌که از مدارهای IGS استفاده شود، مختصات ITRF نقطه در اپک پردازش بدست می‌آید. به این ترتیب قابلیت پردازش داده‌ها با استفاده از تنها یک ایستگاه برای تعیین موقعیت با دقت سانتی‌متری در داخل چارچوب مرجعی که توسط محصولات مدار IGS ایجاد شده است، برای کاربران فراهم شده است. علاوه بر این در روش PPP نیازی به جمع‌آوری داده‌های همزمان از چند ایستگاه مبنا یا شبکه‌ای از ایستگاه‌ها نیست [۱۶]. به‌رغم تلاش‌های زیاد مربوط به اصلاح مدل‌های پردازش و رفع معضلاتی مانند ابهام فاز غیرصحیح و دقت برآورد اثر تروپوسفر، هنوز دقت این روش، به دقت روش‌های نسبی نرسیده است [۱۸].

برای شروع پردازش این روش معادلات مشاهدات با در نظر گرفتن همه‌ی خطاها تشکیل می‌شود. امکان تصحیح بسیاری از خطاها با استفاده از داده‌های مناسب وجود دارد. به عنوان مثال IGS که مسئولیت تهیه مدار GPS، تصحیحات ساعت ماهواره، داده‌های GPS و پارامترهای دوران زمین را دارد، عملاً امکان تصحیح بسیاری از خطاها و در نتیجه تعیین موقعیت با دقت بالای GPS را بدون نیاز به مشاهدات همزمان بین ایستگاه مرجع و سیار فراهم کرده است [۱]، [۸]، [۱۶] و یا استفاده از مشاهدات همزمان در دو فرکانس امکان تشکیل معادلات عاری از تأخیر یونسفر را می‌دهد.

بنابراین پردازش PPP ابتدا فرمول‌های عاری از یونسفر برای مشاهدات فاز و کد در یک اپک مشاهداتی به فرم زیر تشکیل داده می‌شود:

$$l_p = \rho + c(dT - dt) + T_r + \varepsilon_p \quad (20)$$

$$l_\phi = \rho + c(dT - dt) + T_r + N\lambda + \varepsilon_\phi \quad (21)$$

اجرای روش تعیین موقعیت مطلق دقیق: در اولین قدم برای اجرای روش تعیین موقعیت مطلق دقیق فایل های RINEX هرروز را، با استفاده از پردازشگر آنلاین در سایت ^۱Nrcan پردازش کرده تا تأخیرهای زینیتی مربوط به هر اپک در یک فایل بدست آید.

سپس تابع نگاشت GMF با توجه به زاویه ای ارتفاعی و اپک مشاهدات، برای هر ماهواره در هر اپک موجود در فایل RINEX به روش ذکر شده در بالا بدست می آید که با ضرب GMF مربوط به هر ماهواره در یک اپک در تأخیر زینیتی بدست آمده برای آن اپک، تأخیر زینیتی به تأخیر مایل تبدیل می شود.

تابع نگاشت GMF برای دو مؤلفه ی هیدروستاتیک و غیرهیدروستاتیک بصورت مجزا محاسبه می شود، در حالیکه تأخیر زینیتی بدست آمده توسط این پردازشگر کلی است و دو مؤلفه ی هیدروستاتیک و غیرهیدروستاتیک آن از یکدیگر تفکیک نشده است. بنابراین به چهار روش مختلف که در زیر توضیح داده خواهد شد، این تابع نگاشت به تأخیرات زینیتی اعمال می شود.

در روش اول از دو مؤلفه ی هیدروستاتیک و غیرهیدروستاتیک بدست آمده برای تابع نگاشت، میانگین معمولی گرفته و در تأخیرهای زینیتی هر اپک ضرب می شود. در روش دوم تنها مؤلفه ی هیدروستاتیک در نظر گرفته شده و با ضرب در تأخیر زینیتی، تأخیر مایل تروپوسفری محاسبه می شود. البته بدیهی است که در نظر گرفتن مؤلفه ی هیدروستاتیک به تنهایی صحیح نیست و باید هر دو را در نظر گرفت. پس در روش سوم میانگین گیری بین دو مؤلفه ی هیدروستاتیک و غیرهیدروستاتیک، به روش وزن دار انجام می شود. همانطور که توضیح داده شد، بخش عمده ی تأخیر مربوط به مؤلفه ی هیدروستاتیک است و باید وزن بیشتری به مؤلفه ی هیدروستاتیک تعلق گیرد. برای وزن دهی مناسب به هر مؤلفه، ردیابی اشعه را برای زاویه ای ارتفاعی ۵ درجه که زاویه ای ارتفاعی بحرانی محسوب می شود، انجام داده و نسبت تأخیر هیدروستاتیک و تأخیر غیرهیدروستاتیک مشخص گردید. با توجه به این نسبت، ۸۸٪ از مؤلفه ی هیدروستاتیک و ۱۲٪ از مؤلفه ی غیرهیدروستاتیک در تأخیر زینیتی ضرب می شود. سپس تأخیر تروپوسفری

بدست آمده از روش ردیابی اشعه برای تمام ماهواره های هر اپک، منهای تأخیر بدست آمده از حاصلضرب GMF در تأخیر زینیتی PPP برای سه حالت مذکور در قبل می شود. در واقع هدف آن است که آن بخش از تأخیر تروپوسفری که توسط پردازش PPP مدل نشده و باقی مانده است، با اعمال این اختلاف مدل شود. سپس این اختلافات بدست آمده به مشاهدات فایل RINEX اعمال می گردد. به این صورت که این اختلاف به مشاهدات کد به صورت مستقیم و بدون تغییر برای هر ماهواره اعمال می شود ولی برای مشاهدات فاز، اختلاف تأخیرها را باید بر طول موج فاز مورد نظر تقسیم کرده و سپس با مشاهدات فاز جمع کرد. پس از اعمال تصحیحات لازم به کلیه ی مشاهدات فایل های RINEX دوباره آنها را وارد پردازشگر آنلاین PPP کرده و مجهولات شامل موقعیت مطلق نقطه بدست می آید.

در روش چهارم میانگین وزن دار GMF که توضیح داده شد را در تأخیر زینیتی PPP ضرب کرده و تأخیر بدست آمده را منهای تأخیرهای تروپوسفری بدست آمده از روش ردیابی اشعه کرده (علامت اختلاف تأخیرها با حالت های قبلی متفاوت است) و پس از اعمال با روش مذکور به فایل های RINEX، دوباره پردازش PPP انجام می شود.

نتایج عددی: برای اینکه بتوان مقایسه ای بر روی نتایج روش های مختلف داشت، از فایل های مربوط به ایستگاه Tsukuba واقع در ژاپن شامل RINEX و SP3 و ECMWF در بازه زمانی ۱۲ الی ۲۶ اوت ۲۰۰۸ استفاده شده است. مزیت این ایستگاه این است که در بازه ی زمانی مورد نظر دارای رطوبت زیادی است و بنابراین در شرایطی بحرانی نتایج مورد ارزیابی قرار می گیرند.

پس از انجام کلیه ی مراحل توضیح داده شده در بالا و پردازش ها برای فایل های هرروز، باید راه حلی برای مقایسه نتایج حاصل، در نظر گرفته شود. برای مقایسه بین روش ها از مختصات ITRF ایستگاه استفاده شده است. مختصات ITRF برای هر ایستگاه در هرروز از سایت ^۲ITRF قابل دریافت است. بنابراین مختصات ایستگاه Tsukuba برای هرروز استخراج شده و با مختصات تعیین شده در چهار روش توضیح داده شده، مقایسه می شود. از آنجا که بازه ی زمانی مورد نظر کوچک است و تغییرات قابل توجهی ندارد،

^۲ http://itrf.ensg.ign.fr/site_info_and_select/solutions_extraction.php

^۱ http://www.geod.nrcan.gc.ca/products-produits/ppp_e.php

انتظار می‌رود که تأثیر تروپوسفر بیشتر روی مؤلفه‌ی ارتفاعی باشد و بنابراین شکل ۱ می‌تواند معیار مناسب‌تری برای مقایسه باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در این شکل، مشاهده می‌شود که نمودار مربوط به اصل فایل‌های RINEX این بازه‌ی زمانی و نمودار نتایج حالت چهارم (میانگین وزن دار GMF)، به مختصات ITRF نقطه نزدیک‌تر است.

جدول ۱- انحراف معیار اختلاف مولفه‌های محاسبه شده با دو روش

مختلف با مختصات ITRF

Height	Easting	Northing	انحراف معیار
۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۴۰	فایل RINEX خام دریافتی برای هر روز (استفاده از تابع نگاشت)
۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۳۳	میانگین‌گیری وزن دار از مؤلفه‌ی هیدروستاتیک (۰/۸۸) و غیرهیدروستاتیک (۰/۱۲) GMF و ضرب در تأخیرات زنیته هر ایک با علامت معکوس

انحراف معیار اختلاف نتایج این دو روش با مختصات ITRF ایستگاه، برای هر سه مؤلفه در جدول ۱ آورده شده است. دیده می‌شود که انحراف معیار بدست آمده با استفاده از روش ارائه شده کمتر از انحراف معیاری است که برای مؤلفه‌های مختصات با استفاده از توابع نگاشت بدست می‌آید. با این روش نتایج تعیین موقعیت مطلق دقیق بهبود یافته است و به مختصات ITRF ایستگاه نزدیک‌تر از مختصات بدست آمده از سایر روش‌هاست.

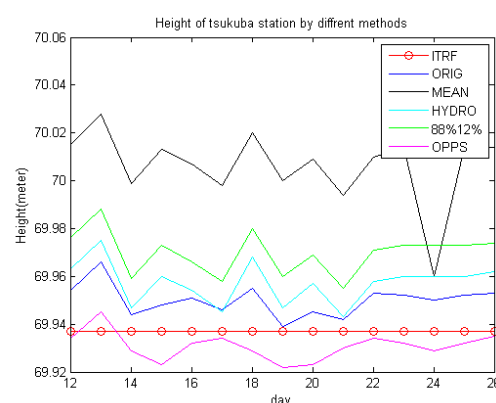
۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با بررسی نتایج بدست آمده در این مقاله مشخص شد که استفاده از مدل‌های عددی هواشناسی در روش ردیابی اشعه و محاسبه‌ی تأخیر مایل تروپوسفری با در نظر گرفتن وضعیت هواشناسی و اعمال اختلاف این تأخیر و تأخیر تروپوسفری PPP به فایل‌های مشاهدات RINEX باعث بهبود نتایج تعیین موقعیت مطلق دقیق به خصوص در مؤلفه‌ی ارتفاعی می‌شود و بهبود در مقدار تکرارپذیری تعیین موقعیت نسبت به مختصات ITRF ایجاد می‌کند. این می‌تواند نشانگر آن باشد که در نظر گرفتن شرایط آب

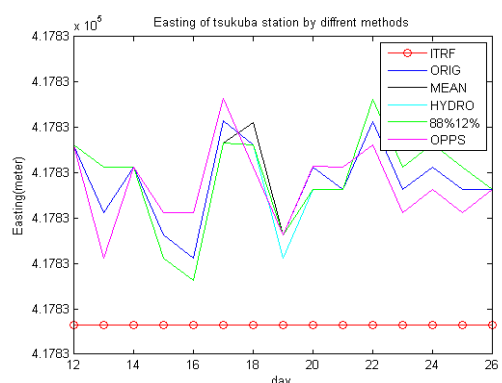
مختصات ITRF برای این ایستگاه در بازه‌ی زمانی موردنظر یکسان و به شرح زیر است:

$$\begin{aligned}\Phi &= 36^{\circ}06'20.0744'' \\ \Lambda &= 140^{\circ}05'13.6174'' \\ H &= 69.37\end{aligned}$$

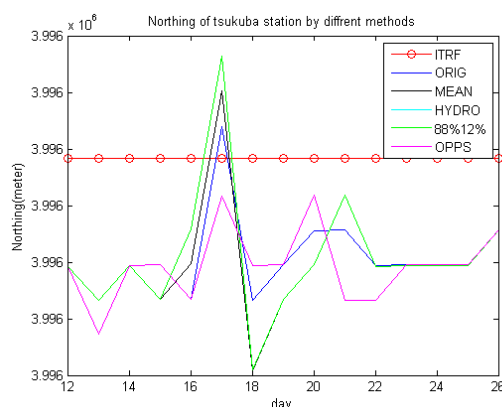
ابتدا مختصات ژئودتیک بدست آمده برای ایستگاه در این روش‌ها به مختصات UTM تبدیل می‌شود و نمودار مختصات‌های هر روش برای بازه‌ی زمانی ۱۵ روزه رسم می‌گردد.



شکل ۱- مؤلفه‌ی ارتفاعی محاسبه شده با پنج روش متفاوت



شکل ۲- مؤلفه‌ی شرقی محاسبه شده با پنج روش متفاوت



شکل ۳- مؤلفه‌ی شمالی محاسبه شده با پنج روش متفاوت

$$z_1 = r_1 \quad (A-4)$$

$$y_1 = 0 \quad (A-5)$$

$$z_2 = z_1 + s_1 \sin \theta_1 \quad (A-6)$$

$$y_2 = y_1 + s_1 \cos \theta_1 \quad (A-7)$$

زوایای متناظر از مرکز زمین برابر است با:

$$\eta_1 = 0 \quad (A-8)$$

$$\eta_2 = \arctan(y_2/z_2) \quad (A-9)$$

با اعمال قانون اسنل، زاویه θ_2 و e_2 می‌توانند تعیین شوند:

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{n_1}{n_2} \cos(\theta_1 + \eta_2)\right) \quad (A-10)$$

$$e_2 = \theta_2 - \eta_2 \quad (A-11)$$

برای سایر لایه‌ها یک حلقه که برای لایه‌ی ۲ تا k-1 قابل اجرا است، در نظر گرفته می‌شود:

$$s_i = -r_i \sin \theta_i + \sqrt{r_{i+1}^2 - r_i^2 \cos^2 \theta_i} \quad (A-12)$$

$$z_{i+1} = z_i + s_i \sin \theta_i \quad (A-13)$$

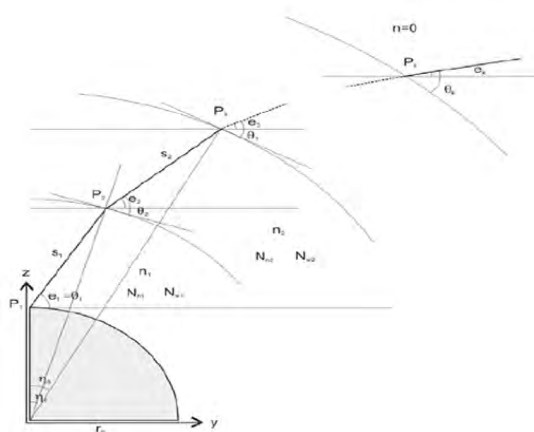
$$y_{i+1} = y_i + s_i \cos \theta_i \quad (A-14)$$

$$\eta_{i+1} = \arctan(y_{i+1}/z_{i+1}) \quad (A-15)$$

$$\delta_{i+1} = \eta_{i+1} - \eta_i \quad (A-16)$$

$$\theta_{i+1} = \arccos\left(\frac{n_i}{n_{i+1}} \cos(\theta_i + \delta_{i+1})\right) \quad (A-17)$$

$$e_{i+1} = \theta_{i+1} - \eta_{i+1} \quad (A-18)$$



شکل A ردیابی اشعه

با استفاده از معادلات فوق، تمام فواصل S_i بین نقاط و زاویه‌ی ارتفاعی خروجی e_k شناخته شده است. پس از آن،

و هوایی در تعیین موقعیت، مفید است و افزایش دقت را به همراه دارد.

با توجه به اینکه در حال حاضر انحراف معیار مؤلفه‌ها نسبت به پردازش فایل‌های اصلی RINEX بهبود یافته است، اگر این رفتار به صورت بلند مدت در پردازش سایر ایستگاه‌ها در سایر زمان‌ها نیز مشاهده شود، نزدیک شدن مختصات به مختصات ITRF قابل استفاده است. البته ممکن است استفاده از روش ردیابی اشعه سه بعدی و یا در نظر گرفتن وزن مناسب‌تری جهت میانگین‌گیری بین مؤلفه‌های تابع نگاشت، بهبود بیشتری ایجاد کند.

سپاسگزاری

از پروفسور یوهانس بوهم از دانشگاه صنعتی وین، گروه ژئودزی پیشرفته به دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های مدل هواشناسی عددی ECMWF تشکر و قدردانی می‌شود.

پیوست A: محاسبات ردیابی اشعه

جزئیات، روابط و فرمول‌های ارائه شده در این پیوست در مرجع [۳] قابل مشاهده است.

برای محاسبه‌ی تأخیر مایل با استفاده از روش ردیابی اشعه، ابتدا باید شکست‌پذیری هیدروستاتیک و غیرهیدروستاتیک برای هر لایه ارتفاعی مشخص باشد. برای تعیین این موارد به صورت زیر عمل می‌شود: ابتدا فاصله تا مرکز زمین توسط اضافه کردن شعاع زمین به ارتفاع لایه‌ها مشخص می‌شود:

$$r_i = r_0 + h_i \dots \quad i = 1, \dots, k \quad (A-1)$$

اگر زاویه‌ی ارتفاعی اولیه e_1 معلوم باشد، برای نقطه‌ی P1 در نظر گرفته می‌شود (شکل A را ببینید):

$$\theta_1 = e_1 \quad (A-2)$$

سپس فاصله‌ی بین نقطه اول و دوم به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$s_1 = -r_1 \sin \theta_1 + \sqrt{r_2^2 - r_1^2 \cos^2 \theta_1} \quad (A-3)$$

و مختصات ژئوسنتریک برای نقاط P1 و P2 برابر می‌شود با:

تأخیر هیدروستاتیک ds_h و تأخیر مسیر مرطوب ds_w ، در امتداد اشعه‌ی خم شده را می‌توان با جمع تعیین کرد.

$$ds_h = \sum_{i=1}^{k-1} s_i N_{hi} \quad (A-19)$$

$$ds_w = \sum_{i=1}^{k-1} s_i N_{wi} \quad (A-20)$$

مشابه آن تأخیر در راستای زنیته هم قابل محاسبه است:

$$dz_h = \sum_{i=1}^{k-1} dh_i N_{hi} \quad (A-21)$$

$$dz_w = \sum_{i=1}^{k-1} dh_i N_{wi} \quad (A-22)$$

مراجع

- [1] Abdel-salam, M. A. T. (2005). Precise point positioning using un-differenced code and carrier phase observations (Vol. 69, No. 04).
- [2] Böhm, J., Niell, A., Tregoning, P., & Schuh, H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33(7), L07304.
- [3] Boehm, J., & Schuh, H. (2004). Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophysical Research Letters*, 31(1).
- [4] Chao, C. C. (1972). A model for tropospheric calibration from daily surface and radiosonde balloon measurements. Tech. Memo. 391-350, Jet Propul. Lab.
- [5] Collins, P. (2008, January). Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities. In *Proc. ION NTM* (pp. 720-732).
- [6] Cove, K. (2005). Improvements in GPS tropospheric delay estimation with numerical weather prediction. University of New Brunswick (Canada).
- [7] Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C., & Liu, J. (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, 82(7), 389-399.
- [8] Gendt, G. (1996, March). Comparison of IGS troposphere estimations. In *Proceedings of 1996 IGS Analysis Center Workshop*, RE Neilan, PA Van Scoy and JF Zumberge, Eds. IGS Central Bureau, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA (pp. 151-164).
- [9] Héroux, P., & Kouba, J. (1995). GPS precise point positioning with a difference. *Geomatics*, 95, 13-15.
- [10] Hobiger, T., Ichikawa, R., Takasu, T., Koyama, Y., & Kondo, T. (2008). Ray-traced troposphere slant delays for precise point positioning. *Earth Planets Space*, 60(5), e1-e4.
- [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. *Journal of Geophysical Research*, 113(D20), D20302.
- [12] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (1993). *Global positioning System. Theory and Practice*. Global Positioning System. Theory and practice., by Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J.. Springer, Wien (Austria), 1993, 347 p., ISBN 3-211-82477-4, Price DM 79.00. ISBN 0-387-82477-4 (USA), 1.
- [13] Hopfield, H. S. (1969). Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical research*, 74(18), 4487-4499.

- [14] Klobuchar, J. (1996). Ionospheric effects on GPS. *Global Positioning System: Theory and applications.*, 1, 485-515.
- [15] Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS solutions*, 5(2), 12-28.
- [16] Kouba, J. (2009). A guide to using International GNSS Service (IGS) products. Unpublished (available electronically at <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>).
- [17] Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J. P., Broca, P., & Cerri, L. (2009). Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination. *Navigation*, 56(2), 135.
- [18] Leick, A. (2004). *GPS satellite surveying*. John Wiley & Sons.
- [19] Mendes, V. B., & Langley, R. B. (1994, August). A comprehensive analysis of mapping functions used in modeling tropospheric propagation delay in space geodetic data. In Cannon, ME, G. Lachapelle (Hg.): *Proc. of the Inter. Symp. on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS 94)*, Banff (pp. 87-98).
- [20] Nafisi, V., Madzak, M., Böhm, J., Ardalan, A. A., & Schuh, H. (2012). Ray-traced tropospheric delays in VLBI analysis. *Radio Science*, 47(2).
- [21] Nafisi, V., Urquhart, L., Santos, M. C., Nievinski, F. G., Bohm, J., Wijaya, D. D., ... & Gegout, P. (2012). Comparison of ray-tracing packages for troposphere delays. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 50(2), 469-481.
- [22] Niell, A. E. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 101(B1), 3227-3246.
- [23] Niell, A. E. (2000). Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS. *Earth Planets and Space*, 52(10), 699-702.
- [24] Niell, A. (2003). The IMF mapping functions. In *GPSMet Workshop*.
- [25] Nievinski, F. G., & Santos, M. C. (2010). Ray-tracing options to mitigate the neutral atmosphere delay in GPS. *Geomatica*.
- [26] Rocken, C., Sokolovskiy, S., Johnson, J. M., & Hunt, D. (2001). Improved mapping of tropospheric delays. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(7), 1205-1213.
- [27] Rüeger, J. M. (2002, April). Refractive index formulae for radio waves. In *FIG XXII International Congress* (pp. 19-26).
- [28] Saastamoinen, J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *Geophysical Monograph Series*, 15, 247-251.
- [29] Urquhart, L. (2011). Assessment of tropospheric slant factor models: Comparison with three dimensional ray-tracing and impact on geodetic positioning. *Geodesy and Geomatics Engineering Technical Reports*; 275.
- [30] Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, 102(B3), 5005-5017