

آنالیز دقت سرویس‌های آنلاین PPP در تعیین موقعیت استاتیک و برآورد تاخیر تروپوسفری قائم (ZTD)

محمدعربی*^۱، حمیدرضا نانکلی^۲

^۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران، ژئودزی - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم تحقیقات شاهرود
marabimhmd@gmail.com

^۲ دکتری ژئودزی - سازمان نقشه‌برداری کشور
nankaliamid@gmail.com

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۵، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۶)

چکیده

در تکنیک تعیین موقعیت مطلق دقیق PPP، با استفاده از مدار دقیق ماهواره و ساعت دقیق ماهواره می‌توان به دقت‌های در حد سانتی‌متر و یا دسی‌متر رسید. از طرفی امروزه سرویس‌های آنلاین و رایگانی به منظور تعیین موقعیت مطلق دقیق توسعه و گسترش یافته‌اند که بدون نیاز به داشتن اطلاعاتی از پردازش‌های GPS براحتی موقعیت ایستگاه را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. چهار نمونه از سرویس‌های رایگان و آنلاین تعیین موقعیت دقیق عبارت‌اند از: سرویس بین‌المللی تعیین موقعیت مطلق دقیق CSRS-PPP کانادا، نرم‌افزار تعیین موقعیت و آنالیز GPS، GAPS، سرویس اتوماتیک تعیین موقعیت مطلق دقیق APPS و سرویس magicGNSS. هدف از این پژوهش ارزیابی دقت این سرویس‌های آنلاین PPP در تعیین موقعیت استاتیک و همچنین برآورد تاخیر تروپوسفری قائم (ZTD) می‌باشد. بدین منظور تکرارپذیری مختصات را برای دو ایستگاه IGS با نام‌های TEHN و SOFI در بازه زمانی اول فوریه تا ۱۵ فوریه ۲۰۱۵ بررسی خواهیم کرد. مشاهده شد که تکرارپذیری مولفه‌های مسطحاتی از ارتفاعی بهتر است. علاوه بر آن نتایج نشان داد که هر چهار سرویس همخوانی قابل توجهی با همدیگر دارند. بطوری که دقت مولفه‌های مسطحاتی سرویس APPS به طور میانگین حدود ۳ میلی‌متر، سرویس GAPS حدود ۵٫۵ میلی‌متر، سرویس magicGNSS حدود ۵ میلی‌متر و سرویس NRCAN حدود ۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین این مقادیر برای مولفه ارتفاعی به ترتیب برابر با ۵٫۵، ۹٫۵، ۶٫۵ و ۶ میلی‌متر برای سرویس‌های APPS، GAPS، magicGNSS و NRCAN می‌باشد. همچنین مختصات حاصل از این چهار سرویس با مقدار معلوم آن در فریم ITRF2008 مقایسه شد. نتایج نشان داد که دقت مولفه‌های مسطحاتی با استفاده از این سرویس‌های آنلاین زیر سانتی‌متر و در حد چندین میلی‌متر می‌باشد که حد دقت مورد نیاز برای بسیاری از کاربردهای نقشه‌برداری است. در پایان نیز برآورد ZTD حاصل از چهار سرویس آنلاین برای روز اول فوریه ۲۰۱۵ مقایسه نمودیم. بطوری که میانگین قدرمطلق اختلاف بین تاخیر تروپوسفری قائم برآورد شده با سرویس APPS و مقدار رفرانس (تاخیر تروپوسفری قائم کلی یا مجموع تروپوسفر تر و خشک در ایستگاه‌های دائم IGS که در پایگاه اینترنتی IGS در دسترس است) حدوداً برابر با ۳ میلی‌متر، با سرویس GAPS برابر با ۴ میلی‌متر، با سرویس magicGNSS برابر با ۳ میلی‌متر و با سرویس NRCAN برابر با ۵ میلی‌متر می‌باشد.

واژگان کلیدی: تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP)، سرویس‌های آنلاین PPP، تاخیر تروپوسفری، آنالیز دقت، تعیین موقعیت استاتیک

۱- مقدمه

در طول سال‌های اخیر تعیین موقعیت مطلق دقیق^۱ به واسطه کارایی بالایی که در تعیین موقعیت با استفاده از مشاهدات تنها یک گیرنده دارد در بسیاری از کاربردهای علمی و تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقایسه با تعیین موقعیت نسبی، PPP یک روش مقرون به صرفه است چرا که در این روش احتیاجی به داشتن ایستگاه مرجع و انجام مشاهدات همزمان وجود ندارد و مشکل داشتن فاصله از نقطه-ی مرجع نیز مطرح نیست. از جمله کاربردهای دیگر PPP به غیر از تعیین موقعیت، می‌توان به تعیین مدار ماهواره‌های با ارتفاع پایین، هواشناسی با GPS، تعیین دقیق زمان^۲ و کاربردهای ژئودینامیکی اشاره کرد [۳-۱]. برای یک گیرنده دو فرکانسه، تاخیر یونسفری مرتبه اول می‌تواند با استفاده از ترکیب عاری از یونسفر^۳ حذف شود [۵]. بنابراین در تعیین موقعیت مطلق دقیق PPP بجای استفاده از مشاهدات خام کد و فاز، مشاهدات عاری از یونسفر کد و فاز بکار گرفته می‌شود، مانند مدل PPP استاندارد [۱] که در آن از مشاهدات عاری از یونسفر کد و فاز استفاده می‌کند و یا مدل UofC [۶] که در آن از ترکیب عاری از یونسفر مشاهدات کد/فاز بجای ترکیب مشاهده کد و کد استفاده می‌کند. با استفاده از اطلاعات دقیق مدار و ساعت ماهواره و مشاهدات عاری از یونسفر و همچنین اعمال تصحیحاتی به مشاهدات مانند تصحیح خطای پیش‌فاز^۴، جدایی مرکز فاز آنتن^۵ ماهواره و گیرنده، اثر نسبت، تأثیرات جابجایی ایستگاه به واسطه جزر و مد زمین صلب و بارگذاری اقیانوسی، تغییر پارامترهای دوران زمین^۶ و ...، PPP قادر است به دقت‌های سانتی‌متری برسد [۷ و ۸]. هر چند برای رسیدن به دقت‌های سانتی‌متری زمان مشاهده طولانی (۳۰ دقیقه یا بیشتر) برای همگرایی^۷ نیاز است. بنابراین زمان طولانی لازم برای همگرایی یک مساله چالش برانگیز در PPP است [۸]. دقت تعیین موقعیت با PPP و زمان لازم برای همگرایی به تعداد و هندسه ماهواره‌های قابل رویت، کیفیت مشاهدات شبه فاصله کد و پیوستگی مشاهدات فاز و نرخ اندازه‌گیری بستگی دارد [۷].

مجهولات PPP شامل سه مولفه مختصات گیرنده، خطای ساعت گیرنده، تاخیر تروپوسفری و ابهام فازها می‌باشد. به روش‌های مختلفی با ترم تاخیر تروپوسفری رفتار می‌شود. به عنوان مثال در مراجع [۸] و [۹] کل تاخیر قائم تروپوسفری (ZTD)^۸ به عنوان مجهول برآورد می‌شوند در حالیکه [۶] تاخیر خشک را مدل و تاخیر تروپوسفر را به عنوان مجهول برآورد می‌کنند.

در سال‌های اخیر تعدادی سرویس‌های آنلاین رایگان تعیین موقعیت با GPS گسترش یافته‌اند. این سرویس‌ها برای کاربران GPS مناسب است چرا که بدون داشتن اطلاعاتی از پردازش‌های GPS به راحتی موقعیت ایستگاه را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. چهار نمونه از مشهورترین سرویس‌های رایگان و آنلاین تعیین موقعیت دقیق عبارت‌اند از:

۱. سرویس بین‌المللی تعیین موقعیت مطلق دقیق PPP-CSRS^۹ کانادا
۲. نرم‌افزار تعیین موقعیت و آنالیز GPS GAPS^{۱۰}
۳. سرویس اتوماتیک تعیین موقعیت مطلق دقیق APPS^{۱۱}
۴. سرویس magicGNSS

این سرویس‌های آنلاین می‌تواند با دریافت فایل مشاهداتی، مختصات نقطه و همچنین خطای تروپوسفری قائم را محاسبه و در اختیار کاربران قرار بدهد. هدف از این پژوهش ارزیابی دقت تعیین موقعیت مطلق دقیق و همچنین بررسی دقت تاخیر تروپوسفری قائم برآورد شده با استفاده از سرویس‌های آنلاین PPP می‌باشد. بدین منظور از مشاهدات ایستگاه‌های دائمی GPS متعلق به شبکه IGS استفاده می‌کنیم.

در این پژوهش به این سوال پاسخ داده خواهد شد که آیا با استفاده از این سرویس‌ها می‌توان به حد مجاز دقت‌های مورد نیاز در نقشه برداری رسید یا خیر؟

۲- تعیین موقعیت مطلق دقیق

بر خلاف روش تعیین موقعیت نسبی، خطاهای متداول در تعیین موقعیت مطلق دقیق حذف نمی‌شود. به عنوان مثال در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق،

^۸ Zenith troposphere delay

^۹ Canadian Spatial Reference System

^{۱۰} GPS Analysis and Positioning Software (GAPS)

^{۱۱} Automatic Precise Positioning Service (APPS)

^۱ Precise Point Positioning (PPP)

^۲ Time Transfer

^۳ Ionospheric Free (IF)

^۴ Phase Wind up

^۵ Antenna Phase Center Offset

^۶ Earth Rotation Parameter (ERP)

^۷ Convergence

به معادله مشاهده (۱)، معادله عاری از یونسفر کد (P3) و به معادله مشاهده (۲)، معادله عاری از یونسفر فاز (L3) می‌گویند.

بنابراین پارامترهایی که در تعیین موقعیت مطلق دقیق به عنوان مجهول برآورد می‌شوند، عبارتند از مختصات گیرنده، خطای ساعت گیرنده، تاخیر تروپوسفری و ابهام فاز. مدل ارائه شده در روابط (۱) و (۲)، صرفاً یک مدل اولیه است. به منظور تعیین موقعیت مطلق دقیق بایستی مدل اصلاح شده استفاده شود. مدل اصلاح شده شامل ترم‌های اضافی نظیر پارامترهای جزر و مدی، بارگذاری اتمسفری، تأثیرات توجیه زمین، حرکات پوسته زمین، آفست مرکز فاز آنتن ماهواره و گیرنده، خطای ساعت ماهواره، خطای پیچش فاز^۱، بایاس تفاضلی کد^۲، بایاس تفاضلی فاز^۳ و اثر نسبیت می‌باشد. به ترم‌های اضافه شده به مدل اولیه، پارامترهای تعیین موقعیت مطلق می‌گویند [۱۰-۸].

امروزه سرویس‌های آنلاینی به منظور پردازش مشاهدات و تعیین موقعیت مطلق دقیق PPP توسعه داده شده است. حسن استفاده از این سرویس‌ها در این است که کاربر بدون نیاز به داشتن اطلاعاتی در زمینه پردازش، می‌تواند به تعیین موقعیت نقطه خود با دقت مورد انتظار بپردازد. در بخش بعدی، چهار سرویس آنلاین PPP معرفی خواهند شد.

۳- سرویس‌های آنلاین تعیین موقعیت مطلق دقیق PPP

نحوه کار با سرویس‌های موجود بدین گونه است که پس از آپلود فایل RINEX^۴ مشاهداتی در وب سایت مربوطه توسط کاربر، مشاهدات توسط این سرویس‌ها پردازش خواهد شد. این سرویس‌ها عبارتند از:

- ۱- سرویس بین‌المللی تعیین موقعیت مطلق دقیق CSRS-PPP گسترش داده شده توسط اداره منابع طبیعی کانادا [۱۲]
- ۲- نرم‌افزار تعیین موقعیت و آنالیز GPS، GAPS گسترش داده شده توسط دانشگاه New Brunswick (UNB)

خطاهای عمده مربوط به ماهواره مانند خطای ساعت ماهواره، آفست مرکز فاز آنتن ماهواره‌ها، خطای پیچش فاز و نیز خطاهای عمده مربوط به گیرنده مانند خطای آفست مرکز فاز آنتن گیرنده، پیچش فاز مربوط به آنتن گیرنده بایستی لحاظ شوند. از جمله خطاهای دیگر تأثیر گذار در تعیین موقعیت مطلق می‌توان به تاخیرات یونسفری و تروپوسفری اشاره کرد. راه حل مقابله با تاخیر یونسفری، استفاده از ترکیب عاری از یونسفر (ترکیبی از دو فرکانس L1 و L2) می‌باشد. در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق، تاخیر تروپوسفری به عنوان مجهول قابل برآورد می‌باشد. مدل مورد استفاده برای تعیین موقعیت مطلق دقیق، (مدل عاری از یونسفر برای مشاهدات کد و فاز) به صورت زیر می‌باشند [۱۰ و ۱۲]:

$$P_3 = \frac{P_{r,L1}^s f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{P_{r,L2}^s f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (۱)$$

$$= \rho_r^s + c(\delta_r - \delta^s) + T_r^s + e_{r,L}^s$$

$$L_3 = \frac{\lambda_1 \varphi_{r,L1}^s f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_1 \varphi_{r,L2}^s f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (۲)$$

$$= \rho_r^s + c(\delta_r - \delta^s) + T_r^s + \frac{\lambda_1 N_{r,L1}^s f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_1 N_{r,L2}^s f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} + e_{r,L}^s$$

که در آن

f فرکانس موج حامل مربوطه ($f1$ یا $f2$)، $P_{r,L}^s$ مشاهده کد بین ماهواره s و گیرنده r در فرکانس $f1$ یا $f2$ ، ρ_r^s فاصله هندسی بین ماهواره در لحظه ارسال و مرکز فاز آنتن گیرنده در لحظه دریافت بر حسب متر، c سرعت نور، δ^s خطای ساعت ماهواره و δ_r خطای ساعت گیرنده بر حسب ثانیه، T_r^s خطای تروپوسفر بر حسب متر، $\varphi_{r,L}^s$ مشاهده فاز بین ماهواره s و گیرنده r در فرکانس $L1$ یا $L2$ بر حسب دور، λ طول موج مربوطه بر حسب متر، $N_{r,L}^s$ ابهام فاز بر حسب دور، $\varepsilon_{r,L}^s$ خطای اندازه‌گیری مشاهده فاز در فرکانس $L1$ یا $L2$ به واسطه نویز گیرنده و یا خطای چندمسیری و $e_{r,L}^s$ خطای اندازه‌گیری مشاهده کد در فرکانس $L1$ یا $L2$ به واسطه نویز گیرنده و یا خطای چندمسیری می‌باشند.

^۱ Phase wind-up

^۲ Differential Code Bias (DCB)

^۳ Differential Phase Bias (DPB)

^۴ Receiver Independent Exchange

- ۳- سرویس اتوماتیک تعیین موقعیت مطلق دقیق APPS گسترش داده شده توسط JPL^۱
- ۴- سرویس magicGNSS گسترش داده شده توسط GMV

۳-۱- سرویس بین‌المللی تعیین موقعیت مطلق دقیق CSRS-PPP

این سرویس توسط سازمان نقشه‌برداری و ژئودتیک (GCD) کانادا طراحی و ایجاد شده است. این سرویس می‌تواند هم در حالت استاتیک و یا در حالت کینماتیک با استفاده از اطلاعات مداری دقیق و ساعت ماهواره پردازش انجام دهد. ورودی این سیستم فایل‌های RINEX^۲ (یا فرمت فشرده RINEX با نام Hatanaka) می‌باشد. اطلاعات اضافی مانند نوع مشاهدات، مختصات اولیه گیرنده، مدل و ارتفاع آنتن که در تعیین موقعیت مطلق دقیق استفاده می‌شود، مستقیماً از فایل ارسالی توسط کاربر قابل استخراج است. برای استفاده از این سیستم کافی است که در سایت مربوطه به آدرس زیر عضو شده و از طریق لینک موجود و یا نرم‌افزار PPP direct فایل مورد نظر را ارسال کرد.

<http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-ouils/ppp.php>

پس از ارسال فایل‌ها توسط کاربر و با گذشت تنها چند دقیقه (با توجه به حجم فایل‌های ارسالی)، نتایج تعیین موقعیت مطلق دقیق که شامل برآورد مجهولات، نمودارهای کاربردی و سایر اطلاعات مفید دیگر می‌باشد، برای ایمیل کاربر ارسال خواهد شد.

۳-۲- نرم‌افزار تعیین موقعیت و آنالیز GPS (GAPS)

سرویس GAPS، امکان تعیین موقعیت مطلق دقیق توسط تنها یک گیرنده در دو حالت استاتیک و کینماتیک را فراهم می‌سازد. استفاده از اطلاعات مدار دقیق و ساعت دقیق ماهواره‌ها (تولیدات سرویس IGS)، امکان رسیدن به دقت‌های سانتی‌متری در حالت استاتیک و دقت‌های دسی‌متری در حالت کینماتیک را فراهم می‌سازد. این سرویس توسط لینک زیر قابل دسترسی است:

<http://gaps.gge.unb.ca/>

پس از ورود به این سایت و انتخاب گزینه Submit Observation File وارد صفحه بعد خواهیم شد. این صفحه شامل چند بخش است، بخش اول این صفحه با عنوان Select Input File امکان ارسال فایل RINEX مشاهداتی را فراهم می‌کند. در سایر قسمت‌های این صفحه می‌توان اطلاعات پردازش از جمله نوع پردازش (استاتیک یا کینماتیک)، زاویه Cut off angle و ... را به دلخواه تغییر داد. پس از انتخاب فایل مورد نظر و انتخاب Process نتایج پردازش به ایمیلی که در این صفحه وارد کردیم، ارسال خواهد شد.

۳-۳- سرویس اتوماتیک تعیین موقعیت مطلق دقیق APPS

این سرویس فایل‌های مشاهداتی GPS را دریافت و با استفاده از تکنولوژی پیشرفته تعیین موقعیت GPS توسط JPL موقعیت گیرنده GPS چه در حالت استاتیک یا کینماتیک (در حال حرکت)، را محاسبه می‌کند. سرویس APPS اطلاعات زیر را به کار می‌برد:

- تولیدات آنی مدار GPS و ساعت ماهواره JPL
- تولیدات روزانه و هفتگی مدار دقیق GPS و تولیدات ساعت
- نرم‌افزار GIPSY-OASIS به منظور پردازش مشاهدات GPS

این سرویس توسط لینک زیر قابل دسترسی است:

<http://apps.gdgps.net/>

پس از انتخاب فایل RINEX مورد نظر و انتخاب گزینه Upload، پس از گذشت چند دقیقه نتایج پردازش ظاهر می‌شود. فایل خلاصه پردازش فایل ارسالی با فرمت *.sum.Z قابل دانلود است. این فایل شامل اطلاعات پردازش و خروجی از جمله مختصات برآورد شده ایستگاه و دقت برآورد آن می‌باشد.

۳-۴- سرویس تعیین موقعیت مطلق دقیق magicGNSS

این سرویس از طریق لینک زیر قابل دسترسی است:

<http://magicgnss.gmv.com/ppp/>

این سرویس نیز امکان تعیین موقعیت مطلق دقیق در دو حالت استاتیک و کینماتیک را فراهم می‌سازد. تنها

^۱ Jet Propulsion Laboratory (JPL)

^۲ Geodetic Survey Division

^۳ Receiver Independent Exchange

پردازش و نتایج پردازش می‌باشد. خواننده علاقه‌مند جهت آشنایی با جزئیات بیشتر می‌تواند به آدرس اینترنتی این سرویس مراجعه نماید.

۴- ارائه نتایج عددی

به منظور بررسی عملکرد سرویس‌های آنلاین PPP در برآورد موقعیت و همچنین در برآورد تاخیر تروپسفری قائم (ZTD)، در این بخش از مشاهدات مربوط به ایستگاه‌های دائمی متعلق به شبکه IGS با نام‌های TEHN واقع در تهران و SOFI واقع در بلغارستان استفاده می‌کنیم. جدول‌های (۱) و (۲)، اطلاعات مربوط به این ایستگاه‌های دائمی را نشان می‌دهد.

مشاهدات دو فرکانسه توسط این سیستم پشتیبانی می‌شوند. مشاهدات قابل پردازش توسط magicGNSS مشاهدات سیستم‌های GPS و GLONASS است. نحوه کار بدین صورت است که کاربر یک ایمیل به آدرس magicppp@gmv.com ارسال می‌نماید. عنوان ایمیل ارسالی Static و یا Kinematic (بسته به نوع پردازش مد نظر) می‌باشد. همچنین می‌بایست فایل RINEX مشاهداتی مد نظر نیز ضمیمه ایمیل فرستاده شود (ماکزیمم دو فایل در حالت استاتیک می‌تواند فرستاده شود). فایل‌های راینکس فرستاده شده می‌تواند در فرمت راینکس فشرده (Hatanaka Rinex 2.10 or 2.11) و یا غیرفشرده باشد. پس از ارسال ایمیل نتایج پردازش به ایمیل کاربر ظرف مدت کوتاهی فرستاد خواهد شد. ایمیل ارسالی شامل یک فایل PDF همراه با جزئیات کامل

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های دائمی مورد استفاده

نام سایت	Tehran	Sofia / Bulgaria
ID چهار کاراکتره معرف ایستگاه	TEHN	SOFI
شهر	Tehran	Sofia
کشور	Iran	Bulgaria
صفحه تکتونیک	EURASIAN	EURASIAN
عرض جغرافیایی	35.6973 deg	42.5561 deg
طول جغرافیایی	51.3341 deg	23.3947 deg
نوع گیرنده	ASHTECH UZ-12	AOA SNR-8000 ACT
نوع آنتن	ASH701945B_M SNOW	AOAD/M_T NONE
فاصله زمانی مشاهدات جمع آوری شده	۳۰ ثانیه	۳۰ ثانیه

معرفی شده، از مشاهدات GPS مربوط به ایستگاه‌هایی با موقعیت معلوم استفاده می‌کنیم (جدول ۱ و ۲). روند کار بدین صورت است که ابتدا فایل‌های مشاهداتی مربوط به ایستگاه‌های با مختصات معلوم را توسط سرویس‌های تعیین موقعیت مطلق دقیق معرفی شده پردازش می‌نماییم. سپس تکرارپذیری مختصات حاصل از این چهار سرویس را در طول دوره زمانی مورد نظر بررسی می‌کنیم. مختصات ارائه شده توسط این چهار سرویس آنلاین در فریم ITRF2008 در اپک مشاهدات محاسبه شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر، مختصات به UTM تبدیل و سپس تکرار پذیری مسطحاتی و ارتفاعی به طور جداگانه بررسی خواهد شد.

شکل (۱)، نمودار تکرارپذیری مختصات مسطحاتی حاصل از چهار سرویس آنلاین را برای ایستگاه‌های TEHN و SOFI در بازه زمانی اول تا ۱۵ فوریه ۲۰۱۵ را نشان می‌دهد.

داده‌های مربوط به این دو ایستگاه برای سال ۲۰۱۵، روزهای اول تا ۱۵ فوریه از سایت زیر دانلود شد:

<http://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily>

در ادامه نتایج عددی در دو بخش ارائه خواهد شد:

- آنالیز و مقایسه دقت مختصات حاصل از چهار سرویس شامل بررسی تکرارپذیری^۱ مختصات و مقایسه مختصات محاسبه شده با مقادیر معلوم مختصات
- آنالیز دقت ZTD برآورد شده حاصل از چهار سرویس

۴-۱- آنالیز دقت مختصات

به منظور ارزیابی دقت نتایج حاصل از سرویس بین-المللی تعیین موقعیت مطلق دقیق با چهار سرویس آنلاین

^۱ Repeatability

به منظور بررسی دقیق‌تر، جدول (۲) تهیه شده است. در این جدول همانطور که مشاهده می‌کنید، انحراف معیار مختصات (مسطحاتی و ارتفاعی) برای هر دو ایستگاه ارائه شده است.

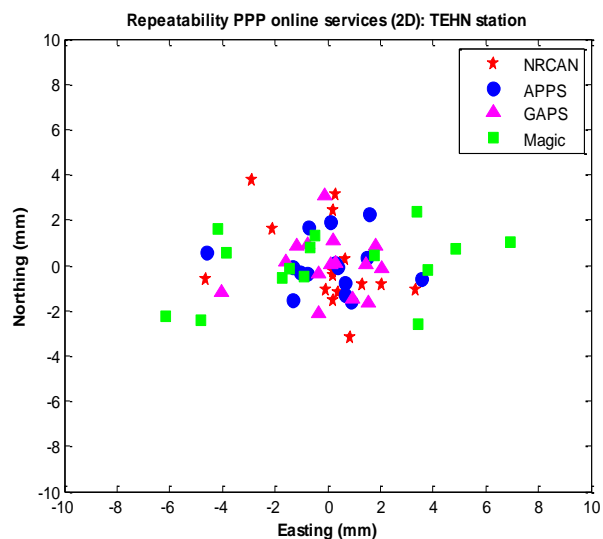
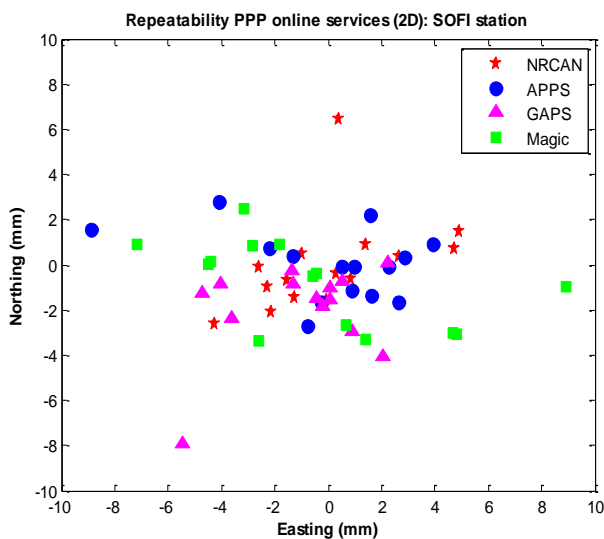
همچنین شکل (۲)، نمودار تکرارپذیری برای مولفه ارتفاعی این دو ایستگاه را نشان می‌دهد. در این شکل محور افقی معرف DOY (Day of year) روز از سال است (روز ۳۲ تا ۴۶ از سال ۲۰۱۵ معادل اول تا ۱۵ فوریه ۲۰۱۵).

جدول ۲- تکرارپذیری سرویس‌های آنلاین PPP

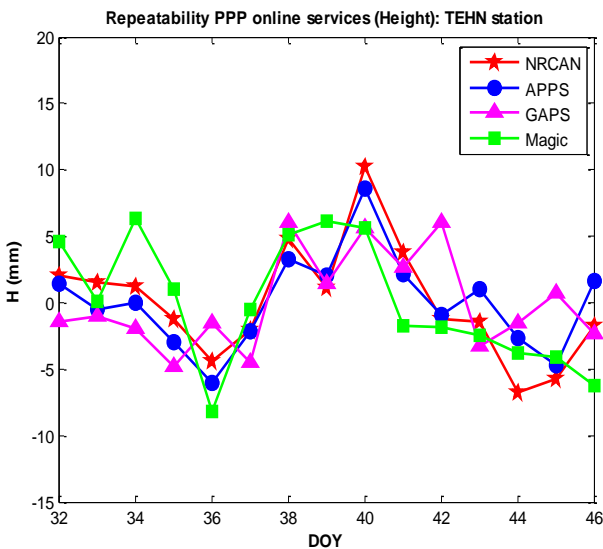
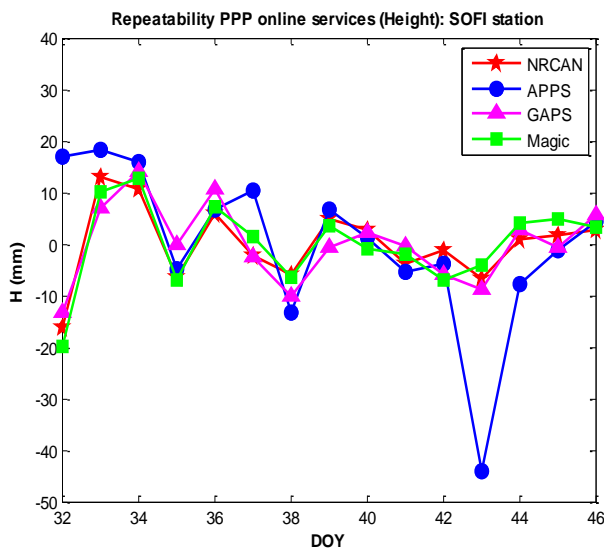
σ_H (mm)	$\sigma_{2D} = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2}$ (mm)	σ_N (mm)	σ_E (mm)	سرویس	ایستگاه
3.6	2.2	1.2	1.8	APPS	TEHN
3.5	2.0	1.3	1.5	GAPS	
4.7	4.2	4.7	3.9	magicGNSS	
4.3	2.7	4.3	1.9	NRCAN	
7.5	3.6	1.5	3.2	APPS	SOFI
15.4	9.1	7.7	4.8	GAPS	
8.2	5.9	8.2	4.6	magicGNSS	
7.4	3.4	7.4	2.6	NRCAN	

حدود ۳ میلی‌متر، سرویس GAPS حدود ۵,۵ میلی‌متر، سرویس magicGNSS حدود ۵ میلی‌متر و سرویس NRCAN حدود ۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین این مقادیر برای مولفه ارتفاعی به ترتیب برابر با ۶,۵، ۹، ۵، ۶ و ۶ میلی‌متر برای سرویس‌های APPS، GAPS، magicGNSS و NRCAN می‌باشد.

همانطور که از جدول (۲) مشخص است و از قبل انتظار داشتیم، تکرارپذیری مولفه‌های مسطحی از ارتفاعی بهتر است. دلیل این امر این است که دقت مولفه ارتفاعی نسبت به مولفه‌های مسطحی پایین‌تر است. علاوه بر آن مشاهده می‌شود که هر چهار سرویس همخوانی قابل توجهی با همدیگر دارند. بطوری که دقت مولفه‌های مسطحی سرویس APPS به طور میانگین



شکل ۱- نمودار تکرار پذیری مسطحی ایستگاه‌های TEHN و SOFI



شکل ۲- نمودار تکرار پذیری ارتفاعی ایستگاه‌های SOFI و TEHN

جدول ۳- مختصات معلوم دو ایستگاه در ITRF08 (اپک مرجع: اول ژانویه ۲۰۱۷)

TEHN	$X = 4443535.144445 (m)$
	$Y = 3086141.051043 (m)$
	$Z = 366854.451752 (m)$
SOFI	$X = 4319371.879723 (m)$
	$Y = 1868687.999777 (m)$
	$Z = 4292064.039224 (m)$

جدول ۴- سرعت ایستگاه‌ها

TEHN	$Vel X = -22.54 (mm/yr)$
	$Vel Y = 14.43 (mm/yr)$
	$Vel Z = 16.52 (mm/yr)$
SOFI	$Vel X = -16.17 (mm/yr)$
	$Vel Y = 17.83 (mm/yr)$
	$Vel Z = 8.51 (mm/yr)$

اکنون با داشتن سرعت ایستگاه می‌توان مختصات معلوم دو ایستگاه در اپک مرجع را به اپک مشاهدات منتقل کرد. یدین منظور از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}^t = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}^{t_{ref}} + 10^{-3} \begin{pmatrix} Vel X \\ Vel Y \\ Vel Z \end{pmatrix} (t - t_{ref}) \quad (3)$$

که در آن t لحظه زمانی دلخواه (بر حسب سال)، t_{ref} اپک مرجع (بر حسب سال)، $(Vel X \ Vel Y \ Vel Z)^T$ بردار سرعت مولفه‌های X, Y, Z بر حسب میلی‌متر بر سال (جدول ۴)، $(X \ Y \ Z)_{t_{ref}}^T$ مختصات در لحظه t_{ref} (جدول ۳) و $(X \ Y \ Z)_t^T$ مختصات در اپک دلخواه t می‌باشد.

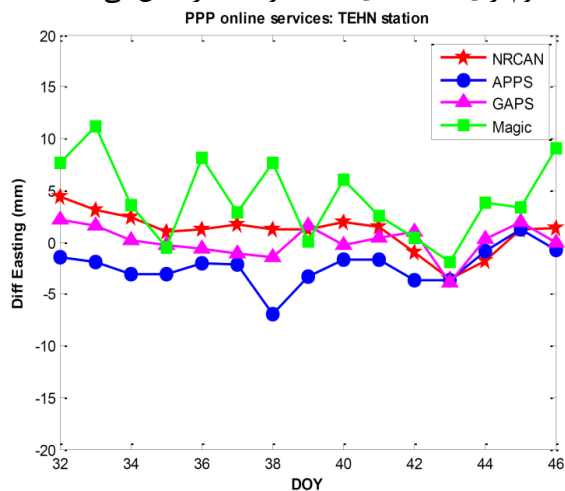
در ادامه قصد داریم به منظور ارزیابی صحت نتایج حاصله، مختصات‌های برآورد شده برای ایستگاه مورد نظر را با مختصات دقیق این ایستگاه مقایسه نماییم. مختصات دقیق ایستگاه از طریق آدرس زیر قابل استخراج است:

<http://sideshow.jpl.nasa.gov/post/tables/table1.html>

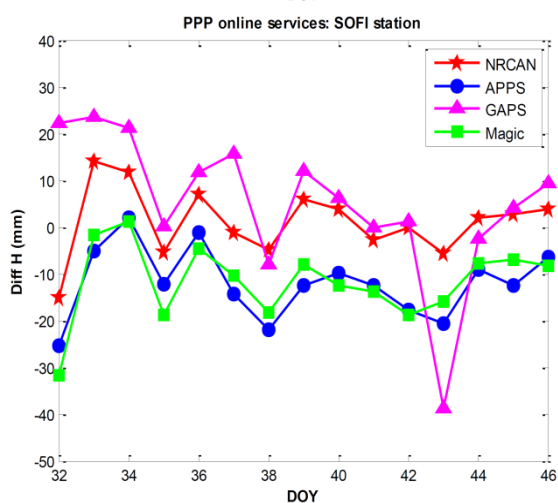
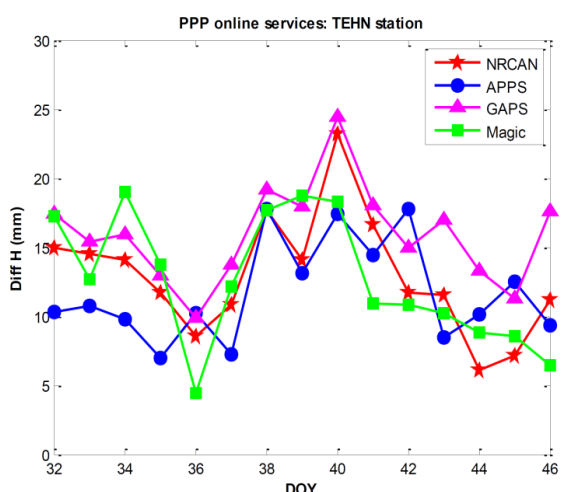
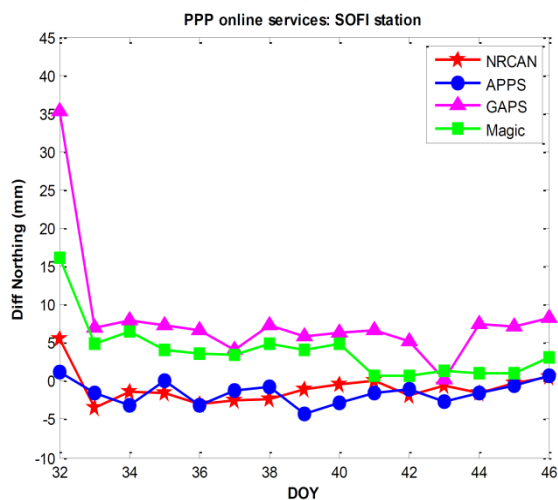
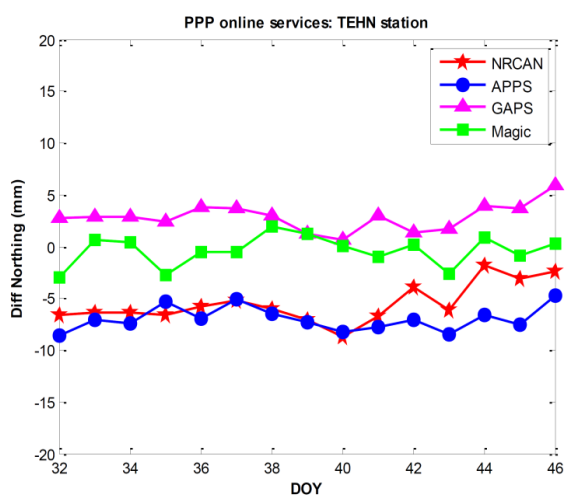
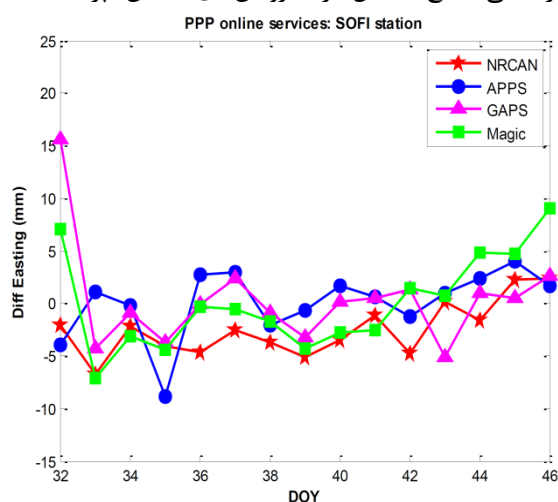
جدول (۳) مختصات معلوم دو ایستگاه در فریم ITRF^۱ 2008 در اپک مرجع اول ژانویه ۲۰۱۷ نشان می‌دهد. نکته مهم این است که این چهار سرویس مختصات ایستگاه را در چارچوب ITRF2008 در اپک مشاهدات محاسبه می‌کنند [۱۳]. بنابراین لازم است به منظور مقایسه درست، مختصات مربوط به اپک‌های مرجع یکسان باشد. مختصات یک نقطه در یک اپک را می‌توان با استفاده از مدل‌های حرکت تکتونیک به اپک دلخواه منتقل کرد. مدل‌های مختلفی وجود دارد که از میان آنها در این تحقیق از مدل NUVEL-1A استفاده شده است [۱۴]. محاسبه سرعت ایستگاه با استفاده از نرم‌افزار برخط Plate Motion Calculator که در سایت <http://www.unavco.org> قرار دارد انجام شده است. نحوه کار بدین صورت است که بایستی موقعیت جغرافیایی نقطه در نرم‌افزار آنلاین مزبور وارد شود و سرعت در فرمت‌های مختلف (محلی یا ITRF) به عنوان خروجی این نرم‌افزار ارائه خواهد شد. جدول (۴)، بردار سرعت ایستگاه‌ها محاسبه شده توسط مدل برخط CGPS2004(NNR) را بر حسب میلی‌متر بر سال ارائه می‌دهد.

^۱ International Terrestrial Reference Frame

شکل (۳) اختلاف مختصات حاصل از چهار سرویس با مختصات معلوم برای ایستگاه‌های SOFI و TEHN را نشان می‌دهد.



پس از انتقال مختصات به ایک مشاهدات، می‌توان به اعتبارسنجی نتایج حاصل از سرویس‌های آنلاین پرداخت.



شکل ۳- اختلاف مختصات حاصل از چهار سرویس با مختصات معلوم برای ایستگاه‌های SOFI و TEHN

استفاده از این سرویس‌های آنلاین زیر سانتی‌متر و در حد چندین میلی‌متر می‌باشد. که حد دقت مورد نیاز برای بسیاری از کاربردهای نقشه برداری است.

جدول (۵)، میانگین اختلاف مختصات محاسبه شده و مختصات معلوم برای دو ایستگاه برای مولفه‌های مسطحاتی و ارتفاعی را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشخص است، دقت مولفه‌های مسطحاتی با

جدول ۵- میانگین اختلاف مختصات محاسبه شده و مختصات معلوم برای مولفه‌های مسطحاتی و ارتفاعی

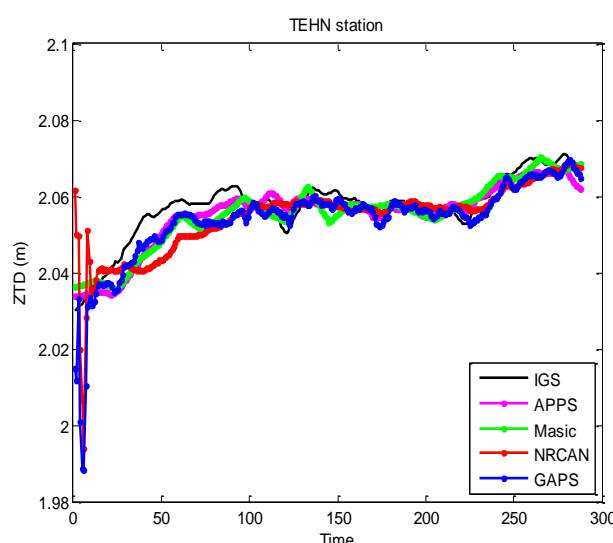
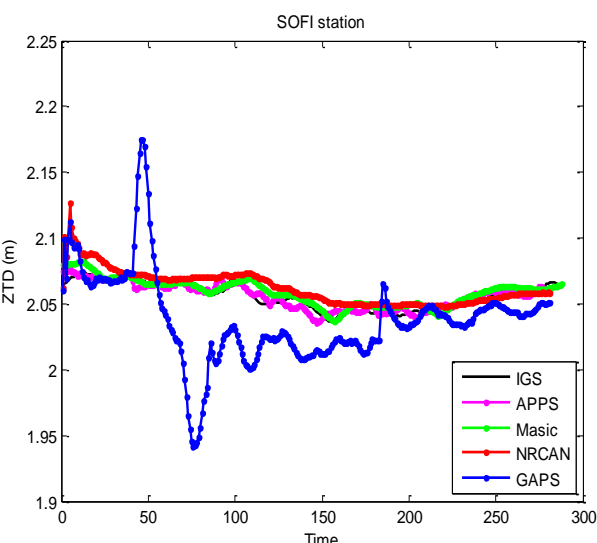
ایستگاه	سرویس	ΔE (mm)	ΔN (mm)	$\sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2}$ (mm)	ΔH (mm)
TEHN	APPS	-2.3	-6.9	7.3	11.7
	GAPS	0.1	2.8	2.8	15.9
	magicGNSS	4.2	-0.4	4.2	12.6
	NRCAN	1.06	-5.5	5.6	12.9
SOFI	APPS	0.1	-1.5	1.5	-11.9
	GAPS	0.4	8.1	8.1	5.2
	magicGNSS	0.1	4.0	4.0	-11.8
	NRCAN	-2.5	-0.9	2.6	1.1

۴-۲- آنالیز ZTD برآورد شده

همانطور که در بخش مقدمه گفته شد، علاوه بر مختصات، این سرویس‌ها تاخیر تروپوسفری قائم (ZTD) را نیز برآورد می‌کنند. جهت اعتبارسنجی نتایج، از برآورد تاخیر تروپوسفری قائم کلی (مجموع تروپوسفر تر و خشک) در ایستگاه‌های دائم IGS که در آدرس اینترنتی زیر در دسترس است، استفاده خواهیم نمود.

<http://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/troposphere/zpd/>

فرمت این فایل‌ها بصورت zpd می‌باشد. مقدار تاخیر تروپوسفریک ارائه شده در این فایل در هر ایستگاه به عنوان یک مقدار رفرانس در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از سرویس‌های آنالیز PPP با آن سنجیده می‌شود. نتایج این بخش برای یک روز دلخواه (اول فوریه ۲۰۱۵) و برای دو ایستگاه ارائه شده است. لازم به ذکر است، تاخیر تروپوسفری ارائه شده در فایل‌های ZPD هر ۳۰۰ ثانیه (۵



شکل ۴- برآورد ZTD حاصل از چهار سرویس آنالیز و مقدار مرجع خروجی فایل ZPD برای ایستگاه‌های SOFI و TEHN

۵- خلاصه و نتیجه‌گیری

امروزه تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP) به عنوان بهبود یافته روش تعیین موقعیت مطلق استاندارد (SPP) جای خود را در میان جامعه ژئودزی و ژئوماتیک باز کرده است. تفاوت اصلی بین PPP و SPP در استفاده از مشاهدات دقیق تر فاز بجای مشاهدات کم دقت کد و استفاده از مدار دقیق ماهواره و ساعت دقیق ماهواره بجای استفاده از افریس منتشره می‌باشد. مدار دقیق و ساعت دقیق ماهواره‌ها توسط سرویس بین المللی IGS و یا سرویس‌های دیگر تولید و از طریق اینترنت قابل دسترسی می‌باشد. از تکنیک تعیین موقعیت دقیق (PPP) با استفاده از تنها یک گیرنده می‌توان به دقت‌های در حد سانتی‌متر و یا دسی‌متر رسید. PPP یک روش مقرون به صرفه است چرا که در این روش هیچ احتیاجی به داشتن ایستگاه مرجع وجود ندارد و مشکل داشتن فاصله از نقطه‌ی مرجع نیز مطرح نیست. همچنین هزینه‌ی استفاده از دو گیرنده همزمان نیز وجود ندارد. بعلاوه PPP هم برای پردازش مشاهدات استاتیک و هم کینماتیک در دو حالت آبی و پس پردازش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

از طرفی امروزه سرویس‌های آنلاین و رایگانی به منظور تعیین موقعیت مطلق دقیق توسعه و گسترش یافته‌اند. این سرویس‌ها برای کاربران GPS مناسب است چرا که بدون داشتن اطلاعاتی از پردازش‌های GPS براحتی موقعیت ایستگاه را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. چهار نمونه از مشهورترین سرویس‌های رایگان و آنلاین تعیین موقعیت دقیق عبارت‌اند از: سرویس بین‌المللی تعیین موقعیت مطلق دقیق CSRS-PPP کانادا، نرم‌افزار تعیین موقعیت و آنالیز GPS، GAPS، سرویس اتوماتیک تعیین موقعیت مطلق دقیق APPS و سرویس magicGNSS. این سرویس‌ها علاوه بر موقعیت نقطه، تاخیر تروپسفری قائم (ZTD) را نیز برآورد می‌نماید.

هدف از این پژوهش ارزیابی دقت این سرویس‌های آنلاین PPP در تعیین موقعیت استاتیک و همچنین برآورد ZTD می‌باشد. بدین منظور تکرارپذیری مختصات را برای

دو ایستگاه IGS با نام‌های TEHN و SOFI در بازه زمانی اول فوریه تا ۱۵ فوریه ۲۰۱۵ بررسی کردیم. مشاهده شد که تکرارپذیری مولفه‌های مسطحاتی از ارتفاعی بهتر است. دلیل این امر این است که دقت مولفه ارتفاعی نسبت به مولفه‌های مسطحاتی پایین‌تر است. علاوه بر آن نتایج نشان داد که هر چهار سرویس همخوانی قابل توجهی با همدیگر دارند. بطوری که دقت مولفه‌های مسطحاتی سرویس APPS به طور میانگین حدود ۳ میلی‌متر، سرویس GAPS حدود ۵٫۵ میلی‌متر، سرویس magicGNSS حدود ۵ میلی‌متر و سرویس NRCAN حدود ۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین این مقادیر برای مولفه ارتفاعی به ترتیب برابر با ۵٫۵، ۹٫۵، ۶٫۵ و ۶ میلی‌متر برای سرویس‌های APPS، GAPS، magicGNSS و NRCAN می‌باشد.

همچنین در ادامه مختصات حاصل از این چهار سرویس با مقدار معلوم آن مقایسه شد. نکته مهم در انجام این مقایسه این بود که مختصات حاصل از سرویس‌های PPP در چارچوب ITRF2008 در اپک مشاهدات می‌باشند در حالیکه اپک مرجع مختصات معلوم این نقاط روز اول ژانویه ۲۰۱۷ بود. بنابراین با استفاده از سرعت ایستگاه (محاسبه شده با مدل NNR-IA-NUVEL)، مختصات را به اپک دلخواه منتقل کرده و با نتایج PPP مقایسه نمودیم. نتایج نشان داد که دقت مولفه‌های مسطحاتی با استفاده از این سرویس‌های آنلاین زیر سانتی‌متر و در حد چندین میلی‌متر می‌باشد. که حد دقت مورد نیاز برای بسیاری از کاربردهای نقشه برداری است.

در پایان نیز برآورد ZTD حاصل از چهار سرویس آنلاین و مقدار مرجع خروجی فایل ZPD برای ایستگاه‌های TEHN و SOFI برای روز اول فوریه ۲۰۱۵ مقایسه نمودیم. بطوری که میانگین قدرمطلق اختلاف بین تاخیر تروپسفری قائم برآورد شده با سرویس APPS و مقدار رفرانس حدوداً برابر با ۳ میلی‌متر، با سرویس GAPS برابر با ۴ میلی‌متر، با سرویس magicGNSS برابر با ۳ میلی‌متر و با سرویس NRCAN برابر با ۵ میلی‌متر می‌باشد.

- [1] Zumberge, J.F., Hein, 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". *J Geophys Res.*, 102(B3):5005-5017
- [2] Bertiger, W., Desai, S.D., Haines, B. et al (2010), "Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data". *J Geodesy*, 84(5):327-337
- [3] Grinter, T., Roberts, C., (2011), "Precise point positioning: where are we now?", International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS symposium 2011, Sydney, NSW, Australia, 15-17, November
- [4] Grinter, T., Roberts, C., (2013), "Real time precise point positioning: are we there yet?" International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS symposium outrigger, Gold Coast, QLD, Australia, 16-18 July
- [5] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasele, E., (2008), "GNSS Global Navigation Satellite Systems – GPS, GLONASS, Galileo & more". Springer, Wien New York.
- [6] Gao, Y., Shen, X., (2002), "A new method for carrier phase based precise point positioning". *Navigation*, 49(2):109-116.
- [7] Bisnath, S., and Gao, Y., (2007), "Current state of precise point positioning and future prospects and limitations". In: *Observing our changing earth*, IAG Symp, 133, 615-624.
- [8] Kouba, J., Héroux, P., (2001), "Precise point positioning using IGS orbit and clock products". *GPS Solut*, 5(2):12-28.
- [9] Witchayangkoon, B., (2000), "Elements of GPS precise point positioning. PhD dissertation", University of Maine, Orono, Maine. Available at www.spatial.maine.edu/SIEWEB/thesesdissert.htm.
- [10] Leick A., (2004), "GPS Satellite Surveying", 3rd Edition. Wiley
- [11] Natural Resources Canada Geodetic Survey Division (2004), "On-Line Precise Point Positioning Project-How To Use Document". V. 1.1, 2004.
- [12] Seeber G., (2003), "Satellite geodesy". De Gruyter, Berlin.
- [13] Altamimi, Z., Collilieux, X., Me'tivier, L., (2011), "ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame". *J Geodesy* 85(8):457-473
- [14] DeMets, C., R.G. Gordon, D.F. Argus, and S. Stein, (1994), "Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions", *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2191-2194.