

# ارزیابی کارایی تعیین موقعیت مطلق دقیق به عنوان جایگزینی برای تکنیک‌های نسبی

ناصر عبدی<sup>۱</sup>

علیرضا آزموده اردلان<sup>۲</sup>

روح‌الله کریمی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۰۸/۰۶

\*\*\*\*\*

## چکیده

در دهه اخیر استفاده از شیوه تعیین موقعیت مطلق دقیق (Precise Point Positioning) در کاربردهای استاتیک و کینماتیک ماهواره‌ای متداول شده و چندین نرم‌افزار و سایت‌های پردازش برخط متعدد برای این منظور تولید شده‌اند. در این تکنیک از مشاهدات عاری از اثر یونسفر کد و فاز یک گیرنده دو فرکانس به همراه محصولات دقیق مدار و ساعت ماهواره که از سایت‌های مراکز مختلف IGS در دسترس‌اند، استفاده می‌شود. در نتیجه اگرچه در PPP به طور مستقیم نیازی به استفاده از مشاهدات ایستگاه‌های مرجع نیست، اما همچنان وجود یک شبکه مبنایی، حتی با فواصل بلند مانند شبکه IGS برای تولید محصولات دقیق مدار و ساعت ماهواره نیاز خواهد بود. همچنین استفاده از این شیوه تعیین موقعیت در کاربردهای مختلف، نیازمند داشتن دانش کافی از دقت، صحت و روش اجرای آن است. در مقاله حاضر، مشاهدات استاتیک چهار گیرنده GPS دو فرکانس از شبکه ایستگاه‌های دائمی ایران و مشاهدات کینماتیک گیرنده GPS مستقر روی هواپیما، با استفاده از نرم‌افزار برنیز (Bernese) و به دو شیوه مطلق دقیق و نسبی با استفاده از ایستگاه‌ها و محصولات دقیق IGS پردازش شده و نتایج آنها با هم مقایسه شده است. همچنین به منظور تعیین مدت زمان بهینه جمع آوری مشاهدات برای رسیدن به دقت بهتر از ده سانتیمتر در حالت استاتیک، مشاهدات ایستگاه‌های دائمی در هر مرحله با اضافه کردن یک ساعت به مشاهدات قبلی پردازش شدند. در نهایت مشخص شد که با داشتن مشاهدات GPS به مدت زمان بیش از یک ساعت، رسیدن به دقت بهتر از ده سانتیمتر در حالت استاتیک تضمین شده و با استفاده از تکنیک PPP دقت مشاهدات کینماتیک به طور متوسط و در مقایسه با حالت نسبی بهتر از ده و بیست سانتیمتر به ترتیب در حالت دو بعدی و سه بعدی است که می‌تواند در بسیاری از کاربردهای نقشه‌برداری مانند هیدروگرافی و فتوگرامتری کافی باشد.

واژه‌های کلیدی: استاتیک، تکنیک مطلق، تکنیک نسبی، عاری از اثر یونسفر، کینماتیک.

\*\*\*\*\*

۱- دانشجوی دکتری ژئودزی- دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی- پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) Naser.abdi@ut.ac.ir

۲- استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی- پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران Ardalan@ut.ac.ir

۳- استادیار گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری- دانشگاه تفرش Rkarimy@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه

مداری) محاسبه شده و با ارسال آنی آنها از طریق لینک‌های رادیویی یا بستر اینترنتی به سمت کاربران، گیرنده سیار می‌تواند از آنها استفاده کرده و موقعیت دقیق خود را تعیین کند. از آنجا که اساس RTK بر یکسان بودن میزان بایاس‌ها در دو انتهای طول مبناها بنا شده، لذا در این روش برای دستیابی به موقعیت دقیق با محدودیت فاصله مواجه‌ایم (۱۰ تا ۱۵ کیلومتر با تک ایستگاه مرجع<sup>۳</sup> و تا ۱۰۰ کیلومتر با چندین ایستگاه مرجع<sup>۴</sup>). به عبارت دیگر در فواصل بلند به دلیل وجود باقیمانده مدل نشده بایاس‌ها، رفع ابهام فاز میسر نبوده و لذا رسیدن به موقعیت دقیق ایستگاه سیار امکان‌پذیر نیست. در نهایت اگرچه توسط RTK می‌توان به دقت مناسب در تعیین موقعیت رسید، اما هزینه اجرای آن به واسطه نیاز به حداقل دو گیرنده و یا ایجاد و نگهداری شبکه ایستگاه‌های مرجع و لینک‌های ارتباطی، زیاد بوده و همچنین شعاع عملکرد آن محدود است. لذا به منظور بالا بردن شعاع عملیاتی سامانه باید شبکه ایستگاه‌های دائمی را متراکم ساخت. گران بودن ایجاد زیرساخت چنین سامانه‌ای از دیگر معایب آن است. با این وجود به منظور تعیین موقعیت دقیق در مناطق دوردست و خارج از شهرها که با کمبود ایستگاه‌های مرجع و فاصله زیاد بین این ایستگاه‌ها روبرو هستیم چه راه حلی وجود خواهد داشت (Hernández-

*Pajares et al., 2010; Rizos et al., 2012a*)

در پاسخ به این پرسش می‌توان از تکنیکی تحت عنوان تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP)<sup>۵</sup> نام برد که می‌تواند این مشکل را مرتفع سازد. برای برطرف شدن این مسأله و کاهش پیچیدگی‌های اجرایی تکنیک‌های نسبی، تکنیک PPP در سال ۱۹۹۷ با تکیه بر مشاهدات تنها یک گیرنده GPS در آژانس هوانوردی و فضائی ملی آمریکا (NASA)<sup>۶</sup> توسعه داده شد و پس از پیدایش محصولات دقیق سرویس بین‌المللی سیستم‌های ناوبری ماهواره‌ای جهانی (IGS)<sup>۷</sup>

3- Single-RTK

4- Network-RTK

5- Precise Point Positioning

6- National Aeronautics and Space Administration

7- International GNSS Service

تعیین مؤلفه‌های مختصات نقاط در یک سیستم مختصات زمین-ثابت و زمین-مرکز (ECEF)<sup>۱</sup> و با استفاده از اطلاعات معلوم ماهواره‌ها را تعیین موقعیت ماهواره‌ای می‌نامند. تعیین موقعیت ماهواره‌ای با در نظر گرفتن دیدگاه‌های مختلف انواعی دارد که عبارتند از: (۱) مطلق یا نسبی (۲) استاتیک و کینماتیک (۳) پس‌پردازش و آنی. هر عملیات تعیین موقعیت ماهواره‌ای به نوعی ترکیبی از سه دسته‌بندی بالا خواهد بود. دقیق‌ترین شیوه تعیین موقعیت ماهواره‌ای که به صورت عملیاتی باعث حذف شدن یا کاهش یافتن بایاس‌های وابسته به فاصله می‌شود، روش نسبی استاتیک پس‌پردازش است که در محاسبات شبکه‌های دقیق نقشه‌برداری و ژئودزی استفاده می‌شود. در این شیوه با استقرار دو گیرنده در دو انتهای یک فاصله که مختصات یک انتهای آن از قبل معلوم است، مشاهدات همزمان، ثبت شده و طی پردازش‌های آتی در دفتر کار، دقتی در سطح چند میلیمتر تا چند سانتیمتر برای نقطه انتهایی قابل حصول است. نیاز به مشاهدات همزمان حداقل دو گیرنده، معلوم بودن مختصات یک نقطه و رعایت فاصله بین دو ایستگاه با توجه به نوع گیرنده، از عوامل محدود کننده عملیات در این شیوه‌اند. در سال‌های اخیر، شبکه‌های ایستگاه‌های دائمی برای پشتیبانی از این تکنیک در کشورهای مختلف ایجاد شده است. به عبارت دیگر این ایستگاه‌ها، نقش گیرنده مستقر روی نقطه با مختصات معلوم را ایفا کرده و کاربر را از استقرار دو گیرنده به صورت همزمان بی‌نیاز می‌سازند.

همچنین امروزه تعیین موقعیت نسبی کینماتیک آنی (RTK)<sup>۲</sup> روشی شناخته شده برای تعیین موقعیت یک گیرنده سیار (Rover) به صورت آنی و با دقتی در سطح چند سانتیمتر است. در این روش با استفاده از مشاهدات تفاضلی مرتبه دوم فاز موج حامل و مختصات معلوم ایستگاه یا شبکه ایستگاه‌های مرجع، تصحیحات بایاس‌های وابسته به فاصله (تأخیر یونسفری، تأخیر تروپوسفری و اطلاعات

1-Earth-Centered Earth-Fixed

2-Real-Time Kinematic

بین‌المللی PPP، GNSS(IGS) در سال‌های اخیر فراگیر شده و سرویس‌های برخط متعدد یا بسته‌های نرم‌افزاری آفلاین تولید شده توسط آژانس‌های دولتی یا انستیتوهای تحقیقاتی مانند سیستم مرجع مکانی کانادا (CSRS-PPP) تولید شده توسط منابع طبیعی کانادا (NRCAN)<sup>۲</sup> تولید شده توسط دانشگاه کلگری (Calgary)، نرم‌افزار تعیین موقعیت و آنالیز GPS(GAPS) تولید شده توسط دانشگاه نیوبرانزویک (UNB) (RTKLIB)، تولید شده توسط دانشگاه تکنولوژی و علوم دریایی توکیو ارائه دهنده این سرویس هستند (Grinter & Janssen, 2012; Grinter & Roberts 2013; <http://www2.unb.ca>).

هدف این مقاله بررسی کارایی PPP از نقطه نظر دقت و مدت زمان همگرایی در مقایسه با روش نسبی در دو حالت استاتیک و کینماتیک است. در این تحقیق از مشاهدات ۴ ایستگاه دائمی GPS از شبکه ایستگاه‌های دائمی ایران (IPGN)<sup>۳</sup> در حالت استاتیک و از مشاهدات گیرنده GPS نصب شده روی هواپیما در حالت کینماتیک استفاده شده و کلیه پردازش‌ها با استفاده از نرم‌افزار برنیز صورت گرفته است. در بخش دوم، مفهوم PPP و معادلات مشاهدات و مدل سرشکنی مورد استفاده ذکر شده و در بخش سوم، استراتژی پردازش با استفاده از نرم‌افزار برنیز تشریح خواهد شد. همچنین در بخش چهارم نتایج عددی مقایسه دو روش مطلق و نسبی در دو حالت استاتیک و کینماتیک آورده شده و بخش پایانی نیز مربوط به نتیجه‌گیری خواهد بود.

## ۲- تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP)

### ۲-۱- مفهوم PPP

تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP) یک شیوه تعیین موقعیت با استفاده از مشاهدات غیرتفاضلی و دو فرکانس (کد و فاز) یک گیرنده تنهاست که اساس آن به کار گرفتن اطلاعات دقیق مداری و ساعت ماهواره‌ها (به عنوان نمونه محصولات IGS) است. PPP می‌تواند در هر نقطه از کره زمین و در هر زمان، بدون نیاز مستقیم به مشاهدات ایستگاه‌های

امکان رسیدن به دقت‌های قابل مقایسه با روش‌های نسبی، توسط آن میسر شد (Anderle, 1976; Zumberge et al., 1997b). در تکنیک PPP به جای استفاده از مشاهدات خام، مشاهدات عاری از اثر یونسفر شبه فاصله و فاز موج حامل به همراه اطلاعات معلوم و دقیق مداری و ساعت ماهواره‌ها (قابل دسترس از IGS)، استفاده می‌شوند. همگرایی سریع در PPP برای رسیدن به دقت بهتر از دسیمتر که می‌تواند آن را به عنوان یک جایگزین مناسب برای RTK مطرح کند، یک فاکتور کلیدی است. به این دلیل به بازه زمانی مشاهداتی بلند برای همگرا شدن PPP نیاز است که این موضوع خود یک چالش بزرگ در اجرای PPP (چنانچه قرار باشد به عنوان جایگزینی برای RTK مطرح شود) خواهد بود (Juan 2012; Rizos et al., 2012a).

از سوی دیگر عدم نیاز مستقیم به مشاهدات ایستگاه‌های مرجع، یکی از مزیت‌های تکنیک PPP نسبت به تکنیک‌های نسبی بوده که باعث برطرف شدن محدودیت شعاع عملکرد (یک اشکال عمده در تکنیک‌های نسبی) می‌شود. اما همچنان وجود شبکه‌ای از ایستگاه‌های مرجع حتی با فواصل بلند (مانند شبکه IGS) برای تولید اطلاعات مورد نیاز اجرای PPP ضروری است (Caissy et al., 2012). در نتیجه مزایای این تکنیک عبارتند از: ۱- عدم نیاز مستقیم به مشاهدات ایستگاه‌های مرجع، ۲- برطرف شدن محدودیت فاصله و ۳- تعیین مختصات در یک چارچوب مرجع یکپارچه جهانی در سراسر کره زمین. در مقابل از مدت زمان بالای همگرا شدن راه حل و عدم پیاده‌سازی الگوریتم آنی این تکنیک در گیرنده کاربر می‌توان به عنوان معایب این روش نام برد. با توجه به دقت تضمین شده PPP و سادگی پردازش‌های مربوط به آن، نسبت به تشکیل دادن طول مبنای شبکه، امکان اجرای PPP در برخی از نرم‌افزارهای پردازش داده نظیر GIPSY/OASIS-II تولید شده توسط لابراتوار پیش رانش جت (JPL)<sup>۱</sup> و Bernese تولید شده توسط انستیتوی نجوم دانشگاه برن اضافه شد. همچنین با در دسترس قرار گرفتن اطلاعات مداری و ساعت دقیق ماهواره‌ها توسط سرویس

2- Natural Resources Canada

3- Iranian Permanent GNSS Network

1- Jet Propulsion Laboratory

خطی عاری از اثر یونسفر شرح داده می‌شوند.

$$P_i = \rho + c(dt^r - dt^s) + T + \frac{f_1^2}{f^2} I_1 + b_{L_i}^r - b_{L_i}^s + \varepsilon_{P_i} \quad (1)$$

$$L_i = \rho + c(dt^r - dt^s) + T - \frac{2}{2} I_1 - \lambda_i N_i + b_{L_i}^r - b_{L_i}^s + \varepsilon_{L_i} \quad (2)$$

جدول ۱: مقایسه‌ای بین خطاها و بایاس‌های اندازه‌گیری که باید در تکنیک‌های تعیین موقعیت PPP و DGPS بکار گرفته شوند.

|                      | تصحیحات                           | PPP | DGPS |
|----------------------|-----------------------------------|-----|------|
| خطاهای مخصوص ماهواره | تصحیحات دقیق ساعت ماهواره         | ✓   | ×    |
|                      | افست مرکز فاز آنتن ماهواره        | ✓   | ✓    |
|                      | تغییرات مرکز فاز آنتن ماهواره     | ✓   | ✓    |
|                      | اطلاعات مداری دقیق ماهواره        | ✓   | ✓/×  |
|                      | تاخیر گروهی تفاضلی                | ✓   | ×    |
|                      | اثر نسبیت                         | ✓   | ×    |
|                      | خطای کوک شدگی فاز آنتن ماهواره    | ✓   | ×    |
| خطاهای مخصوص گیرنده  | افست مرکز فاز آنتن گیرنده         | ✓   | ✓    |
|                      | تغییرات مرکز فاز آنتن گیرنده      | ✓   | ✓    |
|                      | خطای در هم پیچیدن فاز آنتن گیرنده | ✓   | ×    |
| مدلهای ژئوفیزیکی     | کشندهای ناشی از زمین صلب          | ✓   | ×    |
|                      | بارگذاری اقیانوسی                 | ✓   | ×    |
|                      | کشندهای قطبی                      | ✓   | ×    |
|                      | حرکت صفحات تکتونیکی               | ✓   | ×    |
| مدلسازی اتمسفر       | تأخیر تروپوسفری                   | ✓   | ✓    |
|                      | تأخیر یونسفری                     | ×   | ×    |

اندکس فرکانس (i) برابر با ۱ و ۲ بوده و فرکانس‌های موج حامل  $\hat{O}_1=154f_0$  و  $\hat{O}_2=120f_0$  هستند، بطوری که  $\hat{O}_0=10.23\text{MHZ}$  است. نماد  $P_i$  و  $L_i$  به ترتیب معرف مشاهده کد و فاز موج حامل بوده و P فاصله هندسی بین گیرنده و ماهواره، C سرعت نور در خلا، dt خطای ساعت گیرنده،

مرجع، امکان رسیدن به موقعیت دقیق (دسیمتری در حالت کینماتیک و سانتیمتری در حالت استاتیک) را ممکن سازد. عدم نیاز مستقیم به مشاهدات ایستگاه‌های مرجع، خود یکی از مزیت‌های تکنیک PPP نسبت به تکنیک‌های نسبی بوده که باعث برطرف شدن محدودیت شعاع عملکرد می‌شود. اما همچنان وجود یک شبکه ایستگاه‌های مرجع (CORS) حتی با فواصل بلند (مانند شبکه IGS) برای تولید تصحیحات مورد نیاز در اجرای PPP ضروری می‌باشد. مختصات حاصل از تکنیک PPP به دلیل آنکه در چارچوب مرجع جهانی تعیین می‌شوند دارای سازگاری بهتری با یکدیگر هستند، چرا که در شیوه‌های نسبی معلوم بودن مختصات نقاط در یک چارچوب مرجع محلی می‌تواند این سازگاری را برهم بزند (Bakker et al., 2012).

سه فاکتور کلیدی مطرح در مورد PPP عبارتند از:

- داشتن اطلاعات دقیق مداری و ساعت ماهواره‌ها
- مدلسازی دقیق منابع خطای دیگر
- استفاده از مشاهدات فاز موج حامل

(Zumberge 1997a; Zumberge et al., 1997b)

مدلسازی منابع خطا در PPP بسیار پیچیده‌تر از RTK است. RTK از اطلاعات ایستگاه‌های مرجع در سطح یک منطقه برای تشکیل مشاهدات تفاضلی مرتبه دوم که حذف کننده اغلب منابع خطا می‌باشند استفاده می‌کند. اما در PPP، تمامی منابع خطا از قبیل اثرات اتمسفری، اثر نسبیت، جابجایی‌های ایستگاهی در اثر تغییر شکل زمین، تصحیحات مرکز فاز آنتن، اثر در هم پیچیده شدن فاز موج حامل (Wind up) و غیره باید در نظر گرفته شوند (Gao & Kongzhe, 2004; Gao, 2006; Rizos et al., 2012b). مطالب فوق به صورت خلاصه شده در جدول ۱ ارائه شده است.

## ۲-۲- معادلات مشاهدات

در این بخش ابتدا معادلات مشاهدات شبه فاصله (کد) و فاز موج حامل GPS و در ادامه توابع مربوط به ترکیب

$$cdt_{L_3}^s = c dt^s + b_{L_3}^s = c dt^s + (\alpha_3 b_{L_1}^s + \beta_3 b_{L_2}^s) \quad (12)$$

همچنین در رابطه ۸،  $\lambda_3$  طول موج ترکیب خطی عاری از اثر یونسفر و  $N_3$  ابهام فاز متناظر با آن است که روابط ۱۳ و ۱۴ نشاندهنده آنها می باشد.

$$\lambda_3 = \frac{2cf_0}{f_1^2 - f_2^2} \quad (13)$$

$$N_3 = 1.7N_1 + 6.0N_{WL} \quad (14)$$

در رابطه ۱۴،  $N_{WL}$  معرف ابهام فاز طول موج وسیع<sup>۱</sup> بوده و برابر با  $N_2 - N_1$  می باشد. همانطور که از روابط قبل برمی آید، چنانچه خطاهای ساعت را برای مشاهدات کد و فاز به صورت جداگانه در نظر بگیریم، ابهام فاز ترکیب خطی عاری از اثر یونسفر عددی صحیح خواهد بود. اما در عمل این فرض واقعیت ندارد، چرا که سیگنالها در گیرنده و در ماهواره توسط یک ساعت یکسان در گیرنده و یک ساعت یکسان در ماهواره تولید می شوند و لذا یک خطای ساعت گیرنده و یک خطای ساعت ماهواره خواهیم داشت.

محصولات دقیق خطای ساعت ماهوارهها که به صورت منظم توسط IGS تولید می شوند، در برگرفته خطای ساعت کد عاری از اثر یونسفر برای ماهوارهها ( $cdt_{P_3}^s$ ) بوده و لذا باید برای گیرندهها در فرآیند PPP خطای ساعت کد عاری از اثر یونسفر گیرنده ( $cdt_{P_3}^r$ ) برآورد شود. لذا معادلات مربوط به PPP به صورت روابط ۱۵ و ۱۶ بازنویسی می گردند.

$$P_3 = \rho + c d r_{P_3} - cdt_{P_3}^s + T + \epsilon_{P_3} \quad (15)$$

$$L_3 = \rho + c d r_{P_3} - cdt_{P_3}^s + T - \lambda_3 N_3 + (b_{L_3}^r - b_{P_3}^r) - (b_{L_3}^s - b_{P_3}^s) + \epsilon_{L_3} \quad (16)$$

با توجه به روابط قبل، چنانچه از خطای ساعت کد عاری از اثر یونسفر ماهواره ( $cdt_{P_3}^s$ ) در رابطه ۱۶ استفاده کنیم و خطای ساعت کد عاری از اثر یونسفر گیرنده ( $cdt_{P_3}^r$ ) را به همراه پارامترهای تروپوسفر و ابهام فاز برآورد کنیم، پارامتر ابهام فاز برآورد شده با رابطه

$$B_3 = -\lambda_3 N_3 + (b_{L_3}^r - b_{P_3}^r) - (b_{L_3}^s - b_{P_3}^s)$$

یک عدد حقیقی بوده و تابعی خطی از پارامتر ابهام فاز صحیح و بایاس های کد و فاز گیرنده و ماهواره خواهد بود.

$dt^s$  خطای ساعت ماهواره،  $T$  تأخیر تروپوسفری،  $I_1$  تأخیر مرتبه اول یونسفری برای فرکانس اول،  $\lambda_1$  طول موج مربوط به فرکانس  $N_{i,i}$  ابهام فاز صحیح،  $b_{pi}^r$  بایاس سخت افزاری کد گیرنده،  $b_{li}^r$  بایاس سخت افزاری فاز گیرنده،  $b_{pi}^s$  بایاس سخت افزاری کد ماهواره،  $b_{li}^s$  بایاس سخت افزاری فاز ماهواره،  $\epsilon_{pi}$  شامل چندمسیری کد و نویز کد و  $\epsilon_{li}$  شامل چند مسیری فاز و نویز فاز مربوط به فرکانس  $i$  هستند.

معادله کلی تشکیل ترکیب خطی از مشاهدات به صورت

روابط ۳ و ۴ هستند.

$$P_{LC} = \alpha P_1 + \beta P_2 \quad (3)$$

$$L_{LC} = \alpha L_1 + \beta L_2 \quad (4)$$

در این روابط  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب ترکیب هستند.

به منظور تشکیل ترکیب خطی عاری از اثر یونسفر ( $L_3$ ) کد و فاز، ضرایب ترکیب به صورت روابط ۵ و ۶ محاسبه می شوند.

$$\alpha_3 = f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2) \quad (5)$$

$$\beta_3 = -f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \quad (6)$$

با جای گذاری روابط ۵ و ۶ در معادلات ۳ و ۴، روابط مربوط به ترکیب خطی عاری از اثر یونسفر کد و فاز به ترتیب، مطابق روابط ۷ و ۸ حاصل خواهند شد.

$$P_3 = \alpha_3 P_1 + \beta_3 P_2 = \rho + c dt_{P_3}^r - cdt_{P_3}^s + T + \epsilon_{P_3} \quad (7)$$

$$L_3 = \alpha_3 L_1 + \beta_3 L_2 = \rho + c d r_{L_3} - cdt_{L_3}^s + T - \lambda_3 N_3 + \epsilon_{L_3} \quad (8)$$

در این  $cdt_{P_3}^r$  روابط خطای ساعت کد گیرنده،  $cdt_{L_3}^r$  خطای ساعت کد ماهواره،  $cdt_{L_3}^s$  خطای ساعت کد گیرنده و  $cdt_{L_3}^s$  خطای ساعت فاز ماهواره هستند که روابط ۹ تا ۱۱ مربوط به آنها می باشند.

$$cdt_{P_3}^r = cdt^r + b_{P_3}^r = cdt^r + (\alpha_3 b_{P_1}^r + \beta_3 b_{P_2}^r) \quad (9)$$

$$cdt_{P_3}^s = c dt^s + b_{P_3}^s = c dt^s + (\alpha_3 b_{P_1}^s + \beta_3 b_{P_2}^s) \quad (10)$$

$$cdt_{L_3}^r = cdt^r + b_{L_3}^r = cdt^r + (\alpha_3 b_{L_1}^r + \beta_3 b_{L_2}^r) \quad (11)$$

$$\underline{x} = [dx \ dy \ dz \ cdt^r \ \Delta T_{wet} \ B_3^1 \ \dots \ B_3^k \ \dots \ B_3^n] \quad (21)$$

در این روابط  $x_0, y_0, z_0$  مقادیر مختصات گیرنده در لحظه دریافت سیگنال،  $z^i, y^i, x^i$  مقادیر مختصات ماهواره در لحظه ارسال و  $\rho_0^i$  فاصله هندسی بین مرکز فاز آنتن گیرنده و مرکز فاز آنتن ماهواره و پس از اعمال اثراتی مطابق با جدول ۲ هستند. خطای ساعت ماهواره به همراه اثر نسبیست است که این اثر به دلیل یکسان نبودن نرخ پیشروی ساعت‌های گیرنده و ماهواره ناشی از سرعت نسبی بین آنها، باید در نظر گرفته شود.  $cdt^r$  خطای ساعت گیرنده و مقادیر  $B_3^i$  ابهام فاز مربوط به مشاهده فاز موج حامل عاری از اثر یونسفر هستند که در فرآیند کمترین مربعات برآورد می‌شوند. لازم به ذکر است تا زمانی که جهش فاز رخ نداده باشد مقادیر ابهام فاز ثابت بوده و تغییر نخواهند داشت.  $T_0^i$  مقدار اولیه برای تأخیر تروپوسفر است که با استفاده از مدل‌ها و توابع تصویر موجود مانند ساستاموینن، هاپفیلد، نیل و غیره برای هر دو مؤلفه خشک و تر و با استفاده از مدل‌های استاندارد برای دما، فشار و رطوبت و با توجه به مختصات گیرنده محاسبه می‌شود. از آنجا که مدل‌های موجود در برآورد مؤلفه تر تأخیر تروپوسفر ضعیف دارند، لذا باقیمانده این اثر ( $\Delta T_{wet}$ ) به عنوان یک مجهول در کنار باقی مجهولات در دستگاه معادلات برآورد شده و در نتیجه از تابع تصویر مربوط به مؤلفه تر ( $M_{wet}^i$ ) در دستگاه معادلات استفاده می‌شود. دستگاه معادلات فوق به روش تکرار حل شده و در هر مرحله با استفاده از موقعیت جدیدی که برای گیرنده به دست می‌آید تمامی مقادیر وابسته به موقعیت گیرنده به هنگام شده و سرشکنی کمترین مربعات دوباره تکرار می‌گردد. این روش تا رسیدن به جواب بهینه تکرار می‌گردد (Subirana et al., 2013).

### ۲-۳- پیش پردازش مشاهدات در نرم‌افزار برنیز

پیش از برآورد مقادیر مجهولات PPP در نرم‌افزار برنیز، پیش پردازش و پالایش مشاهدات به شرح زیر انجام می‌شود:

لذا رفع ابهام فاز به صورت یک عدد صحیح در مدل سنتی PPP با استفاده از روابط ۱۵ و ۱۶ امکانپذیر نیست و در نهایت با استفاده از مشاهدات با مدت زمان بالا و حل ابهام فاز به صورت یک عدد حقیقی مسأله PPP همگرا خواهد شد.

برای تولید مختصات دقیق ماهواره‌ها و همچنین تولید خطای ساعت دقیق ماهواره‌ها ( $cdt_{p_3}^s$ ) به یک شبکه دائمی ایستگاه‌های GNSS مانند IGS نیاز است. با در نظر گرفتن یک اپک مشاهداتی و با توجه به معادلات ۱۵ و ۱۶، چنانچه مشاهدات همزمان به  $n$  ماهواره توسط یک گیرنده صورت پذیرد، تعداد معادلات برابر با  $2n$  و تعداد مجهولات برابر با  $3+1+1+n$  که شامل سه مجهول مختصات، یک مجهول خطای ساعت گیرنده ( $cdt_{p_3}^s$ )، یک مجهول تأخیر تروپوسفری و  $n$  مجهول پارامتر ابهام فاز حقیقی عاری از اثر یونسفر ( $(b_{L_3}^s - b_{p_3}^s) - (-\lambda_3 N_3 + (b_{L_3}^s - b_{p_3}^s))$ ) خواهد بود. در این حالت درجه آزادی دستگاه معادلات، برابر با  $n-5$  می‌شود.

در نتیجه دستگاه معادلات مسأله PPP در حالت پس پردازش به صورت زیر خواهد بود (Salam, 2005).

$$\underline{l} = \underline{Ax} \quad (17)$$

$$\underline{l} = \begin{bmatrix} P_3^1 - \rho_0^1 + cdt^{s_1} - T_0^1 \\ L_3^1 - \rho_0^1 + cdt^{s_1} - T_0^1 \\ \vdots \\ P_3^n - \rho_0^n + cdt^{s_n} - T_0^n \\ L_3^n - \rho_0^n + cdt^{s_n} - T_0^n \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$T(E) = T_0(E) + M_{wet}(E)\Delta T_{wet} \quad (19)$$

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \frac{x_0 - x^1}{\rho_0^1} & \frac{y_0 - y^1}{\rho_0^1} & \frac{z_0 - z^1}{\rho_0^1} & 1 & M_{wet}^1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x_0 - x^1}{\rho_0^1} & \frac{y_0 - y^1}{\rho_0^1} & \frac{z_0 - z^1}{\rho_0^1} & 1 & M_{wet}^1 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^k}{\rho_0^k} & \frac{y_0 - y^k}{\rho_0^k} & \frac{z_0 - z^k}{\rho_0^k} & 1 & M_{wet}^k & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x_0 - x^k}{\rho_0^k} & \frac{y_0 - y^k}{\rho_0^k} & \frac{z_0 - z^k}{\rho_0^k} & 1 & M_{wet}^k & 0 & \dots & \frac{1}{k} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^n}{\rho_0^n} & \frac{y_0 - y^n}{\rho_0^n} & \frac{z_0 - z^n}{\rho_0^n} & 1 & M_{wet}^n & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x_0 - x^n}{\rho_0^n} & \frac{y_0 - y^n}{\rho_0^n} & \frac{z_0 - z^n}{\rho_0^n} & 1 & M_{wet}^n & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

جدول ۲: مراحل محاسبه مقادیر  $\rho_0^i$

|                 |   |   |   |
|-----------------|---|---|---|
| $x_0, y_0, z_0$ | با استفاده از مشخصات فایل راینکس، پردازش‌های قبلی و یا انتخاب مقدار صفر برای هر سه مؤلفه  | تعیین مقادیر اولیه برای مختصات گیرنده                               | ۱ |
| $t_{emission}$  | به یکی از دو روش زیر:<br>۱- با استفاده از مشاهده شبه فاصله، زمان ثبت شده در گیرنده و خطای ساعت ماهواره<br>۲- با استفاده از مختصات ماهواره، زمان ثبت شده در گیرنده و خطای برآورد شده ساعت گیرنده   | محاسبه زمان ارسال سیگنال از ماهواره                                 | ۲ |
|                 | با استفاده از تکنیک‌های مختلف انترپولاسیون و در چارچوب مرجع ECEF و با اعمال اثر دوران زمین از لحظه ارسال تا دریافت سیگنال   | محاسبه مختصات ماهواره در زمان ارسال سیگنال                          | ۳ |
| $\rho_0^i$      | با استفاده از مقادیر مراحل ۱ و ۳ و همچنین اعمال اثرات زیر:<br>۱- نسبت<br>۲- انحرافات و جابجایی‌های مرکز فاز آنتن ماهواره‌ها<br>۳- انحرافات و جابجایی مرکز فاز آنتن گیرنده<br>۴- در هم پیچیدگی مشاهدات فاز (Wind-up) ناشی از وضعیت نسبی قرارگیری گیرنده و ماهواره در برابر یکدیگر<br>۵- جابجایی‌های ناشی از کشند زمین صلب، بارگذاری اقیانوسی و کشند قطبی | محاسبه فاصله هندسی بین مرکز فاز آنتن گیرنده و مرکز فاز آنتن ماهواره | ۴ |

با رابطه زیر در هر اپک و برای هر ماهواره تشکیل می‌گردد. این ترکیب خطی عاری از اثرات هندسی، ساعت‌های ماهواره و گیرنده، تروپوسفر و یونسفر بوده و فقط در برگیرنده اختلاف ابهام فاز فرکانس اول و فرکانس دوم  $(N_5 = N_2 - N_1)$  به همراه نویز این ترکیب خواهد بود. با استفاده از قانون انتشار خطاها می‌توان دریافت که نویز  $L_6$  حدوداً معادل  $0.7 P_1$  نویز مشاهده  $P_1$  است. (Dach et al., 2007)

$$L_6 = L_5 - P_{NL} = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} \quad (22)$$

برای آشکارسازی جهش‌های فازی، RMS هر کمان مشاهداتی حساب شده و چنانچه مقدار آن بیش از حد آستانه  $0.7 L_5$  سیکل  $L_5$  (ترکیب خطی با طول موج وسیع) باشد، این کمان مشاهداتی به دو بخش تقسیم شده و مجدد RMS هر یک از دو بخش تعیین می‌گردد. بخشی که دارای RMS بزرگتر از حد آستانه باشد، حاوی جهش فاز خواهد بود. این تقسیم کردن تا مشخص شدن لحظه وقوع جهش فاز ادامه می‌یابد. پس از مشخص شدن این لحظه با استفاده از اختلاف بین دو کمان مشاهداتی قبل و بعد از جهش فاز می‌توان مقدار تغییر در  $N_5$  را تعیین کرد. مشاهدات هر کمان به منظور کشف مشاهدات اشتباه با استفاده از شرط ۴

- آشکارسازی جهش‌های فازی

- کشف مشاهدات اشتباه

- هموار سازی مشاهدات کد با استفاده از مشاهدات فاز موج حامل

تمامی این مراحل با استفاده از مشاهدات دو فرکانس شبه فاصله و فاز موج حامل یک گیرنده، برای هر ماهواره، در سطح فایل‌های مشاهداتی Rinex و بدون اطلاعات هندسی ماهواره و گیرنده انجام می‌شوند. خروجی این مرحله مجدداً یک فایل مشاهداتی Rinex و عاری از جهش‌های فازی و مشاهدات اشتباه بوده که حاوی مشاهدات شبه فاصله هموار شده خواهد بود. هر فایل مشاهداتی Rinex به صورت کمان به کمان پردازش می‌شود که هر کمان متناظر با یک عبور ماهواره خواهد بود که در آن جهش فازی رخ نداده است. مشاهدات هر کمان ماهواره در چهار مرحله زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند:

مرحله اول- غربالگری مشاهده  $L_6$  برای آشکارسازی

جهش‌های فازی و مشاهدات اشتباه

در این مرحله با استفاده از مشاهدات کد و شبه فاصله در هر دو فرکانس، ترکیب خطی ملبورن-ووبنا ( $L_6$ ) مطابق

یک مرحله غربالگری دیگر ضروری به نظر می‌رسد. در این مرحله با استفاده از اختلاف مشاهدات فاز موج حامل عاری از اثر یونسفر و مشاهدات شبه فاصله عاری از اثر یونسفر غربالگری انجام خواهد شد. این مشاهده اختلافی حاوی نویزی به میزان سه برابر نویز مشاهده  $P_1$  و حدوداً ۴ برابر مشاهده  $L_6$  است. لذا اختلاف بیش از ۲ متر در مشاهده اختلافی فوق نشان‌دهنده مشاهده اشتباه خواهد بود.

### مرحله چهارم - هموارسازی مشاهدات شبه فاصله با استفاده از مشاهدات فاز موج حامل یک کمان مشاهداتی پالایش شده پیوسته

سطح نویز اندازه‌گیری‌های یونسفر توسط مشاهدات کد بسیار بالاست. لذا می‌توان از مشاهدات فاز موج حامل، برای هموارسازی مشاهدات کد و کاهش سطح نویز آنها استفاده نمود. اندازه‌گیری یونسفر با استفاده از مشاهدات کد هموار شده به مراتب دارای دقت بیشتری خواهد بود. روابط ۲۳ و ۲۴ مربوط به تکنیک هموار سازی می‌باشند.

$$\bar{p}_1(t) = L_1(t) + \bar{p}_1 - \bar{L}_1 + 2 \cdot \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} ((L_1(t) - \bar{L}_1) - (L_2(t) - \bar{L}_2)) \quad (23)$$

$$\bar{p}_2(t) = L_2(t) + \bar{p}_2 - \bar{L}_2 + 2 \cdot \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} ((L_1(t) - \bar{L}_1) - (L_2(t) - \bar{L}_2)) \quad (24)$$

در روابط ۲۳ و ۲۴،  $\tilde{p}_f(t)$  اندازه‌گیری کد هموار شده در یک  $t$  و فرکانس  $\hat{0}$  بوده و  $L_0(t)$  اندازه‌گیری فاز موج حامل در یک  $t$  و فرکانس  $\hat{0}$  است. همچنین  $\bar{L}_0 - \bar{P}_0$  اختلاف متوسط بین تمامی کدهای پذیرفته شده و اندازه‌گیری‌های فاز موج حامل در کمان مشاهداتی جاری و فرکانس  $f$  است (Dach et al., 2007).

### ۳- مجموعه داده‌های مورد استفاده در این تحقیق ۳-۱- محصولات دقیق IGS در رابطه با خطای ساعت و اطلاعات مداری ماهواره‌ها

سرویس بین‌المللی سامانه‌های تعیین موقعیت و ناوبری ماهواره‌ای جهانی (IGS)، مسئولیت جمع‌آوری، ذخیره‌سازی

برابر حد آستانه، غربالگری شده و چنانچه مشاهده‌ای اشتباه تشخیص داده شود هر چهار مشاهده شبه فاصله و فاز موج حامل آن از لیست مشاهدات حذف می‌شود.

### مرحله دوم - استفاده از مشاهده $L_6$ برای تعیین اندازه جهش‌های فازی

تعیین مقدار جهش فاز روی هر دو فرکانس به صورت جداگانه و به منظور اتصال مشاهدات شبه فاصله هموار شده، قبل و بعد از لحظه جهش فاز نیاز است. بدین منظور ترکیب خطی عاری از اثرات هندسی ( $L_4$ ) فقط در کمان‌های مشاهداتی حاوی جهش فاز و با استفاده از رابطه زیر تشکیل می‌گردد. در این مرحله مقدار جهش  $N_5$  از نتیجه مرحله قبل و برای هر جهش فازی مشخص است.

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (23)$$

سپس قبل و بعد از هر جهش فازی یک چند جمله‌ای با استفاده از مثلاً ۱۰ نقطه به مشاهدات  $L_4$  برازش داده شده و اختلاف این دو چند جمله‌ای در لحظه جهش فاز تعیین می‌گردد. چنانچه بخش اعشاری این اختلاف کوچکتر از ۱۰ میلیمتر باشد این اختلاف به عنوان جهش فاز مربوط به مشاهده  $L_4$  پذیرفته شده و با استفاده از آن مقادیر جهش فاز برای هر دو فرکانس به صورت جداگانه مشخص می‌شود. این مقادیر فقط به منظور اتصال مشاهدات در فرآیند هموارسازی مشاهدات کد به کار رفته و از آنجا که جهش فاز به ندرت اتفاق می‌افتد، اصلاح کردن مقادیر جهش فاز در مشاهدات فاز موج حامل ضرورت نداشته و به ازای هر جهش فازی کشف شده یک پارامتر ابهام فاز جدید برای مشاهدات فاز موج حامل مربوطه به دستگاه معادلات افزوده می‌شود (Dach et al., 2007).

### مرحله سوم - غربالگری مشاهده $(L_3 - P_3)$ به منظور کشف مشاهدات اشتباهی که در مرحله ۱ آشکار نشده‌اند.

به دلیل وجود برخی خطاهای سیستماتیک دستگاهی در مشاهده  $L_6$  ممکن است فرآیند کشف مشاهدات اشتباه در مرحله اول به طور کامل موفقیت‌آمیز نباشد. لذا بدین منظور



جدول ۳: محصولات اطلاعات مداری و خطای ساعت IGS

| Type        | Accuracy             | Latency    | Updates                  | Sample Interval          |                           |
|-------------|----------------------|------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Broadcast   | orbits               | real time  | --                       | daily                    |                           |
|             | Sat. clocks          |            |                          |                          | ~100 cm                   |
|             |                      |            |                          |                          | ~5ns RMS<br>~2.5 ns SDev  |
| Ultra-Rapid | orbits               | real time  | at 03, 09, 15, 21<br>UTC | 15min                    |                           |
|             | Sat. clocks          |            |                          |                          | ~5 cm                     |
|             |                      |            |                          |                          | ~3 ns RMS<br>~1.5 ns SDev |
| Ultra-Rapid | orbits               | 3-9 hours  | at 03, 09, 15, 21<br>UTC | 15min                    |                           |
|             | Sat. clocks          |            |                          |                          | ~3 cm                     |
|             |                      |            |                          |                          | ~150 ps RMS<br>~50 psSDev |
| Rapid       | orbits               | 17-41hours | at 17 UTC daily          | 15min                    |                           |
|             | Sat. &Stn.<br>clocks |            |                          | ~2.5 cm                  | 5min                      |
|             |                      |            |                          | ~75 ps RMS<br>~25 psSDev |                           |
| Final       | orbits               | 12-18days  | every Thursday           | 15min                    |                           |
|             | Sat. &Stn.<br>clocks |            |                          | ~2.5 cm                  | Sat.: 30s                 |
|             |                      |            |                          | ~75 ps RMS<br>~20 psSDev | Stn.: 5 min               |

(<http://www.igs.org>)

که از جدول فوق برمی آید محصولات نهائی که پس از حدود ۲ هفته منتشر می شوند دارای بالاترین سطح دقت بوده و لذا در کاربردهای پس پردازش استفاده از آنها توصیه می گردد.

### ۳-۲- مشاهدات GPS

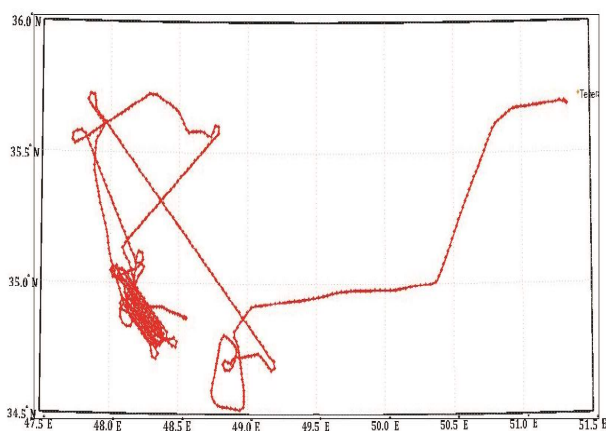
در این مقاله به منظور بررسی صحت نتایج PPP دو سری داده در نظر گرفته شده است. سری اول این داده‌ها شامل مشاهدات استاتیک ۴ ایستگاه دائمی AHVA, SFHN, SNDJ, TORQ از مجموعه ایستگاه‌های شبکه دائمی ایران (IPGN) با نرخ مشاهداتی ۳۰ ثانیه و در روز ۹۰ از سال ۲۰۱۴ است که در این تحقیق همگی این ۴ ایستگاه مجهز به گیرنده دو فرکانس TRIMBLE NETR9 و آنتن TRM57971.00 هستند. مشاهدات این ایستگاه‌ها با در نظر گرفتن کلیه تصحیحات و با استفاده از نرم افزار برنیز در دو حالت PPP و نسبی استاتیک پردازش شده و نتایج آنها

و توزیع مشاهدات ناوبری ماهواره‌ای، با دقتی بالا که تأمین کننده بخش وسیعی از کاربردها باشد را داراست. این داده‌ها همچنین توسط IGS برای تولید محصولات دقیقی که از طریق سایت‌های مختلف IGS در دسترس علاقمندان می باشد، استفاده می شود. به عنوان نمونه در جدول ۳ محصولات IGS در رابطه با اطلاعات مداری و خطای ساعت ماهواره‌ها را مشاهده می کنید (<http://www.igs.org>).

در این مقاله از محصولات دقیق نهائی IGS(Final) به عنوان خطای ساعت ماهواره و اطلاعات مداری استفاده میشود. اطلاعات مداری ماهواره‌ها شامل مختصات‌های X,Y,Z هر ماهواره GPS در هر ۱۵ دقیقه و در سیستم مختصات زمین مرکز و زمین ثابت (ECEF) و همچنین خطای ساعت ماهواره‌ها به صورت یک ضریب ثابت و به ازای هر ۵ دقیقه و یا هر ۳۰ ثانیه در فایل‌های مربوط منتشر می شوند. همانطور

1- Earth Centered Earth Fixed

حالت کینماتیک از مشاهدات یک عملیات پرواز حدود ۶ ساعت در روز ۲۷۶ از سال ۲۰۱۶ استفاده شده است. گیرنده GPS مستقر روی هواپیما از نوع NOV OEM4-G2 و آنتن متصل به آن از نوع ACCG5ANT\_42AT1 هستند. برای کاهش حجم محاسبات، نرخ مشاهدات، ۳۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود. مسیر پرواز هواپیما در مدت زمان مذکور را در نگاره ۲ می‌توانید مشاهده کنید.



نگاره ۲: مسیر حرکت هواپیما

این مشاهدات نیز با در نظر گرفتن کلیه پارامترها و تصحیحات لازم در دو حالت PPP و نسبی کینماتیک پردازش شده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند که در بخش بعدی خواهید دید. برای پردازش نسبی کینماتیک از مشاهدات ۵ ایستگاه دائمی GPS در اطراف منطقه عملیات پرواز که دارای مختصات دقیق هستند، استفاده شده است.

#### ۴- نتایج

به منظور بررسی نتایج حاصل شده، این قسمت را به دو بخش نتایج مشاهدات استاتیک و نتایج مشاهدات کینماتیک تقسیم می‌کنیم.

#### ۴-۱- نتایج مشاهدات استاتیک

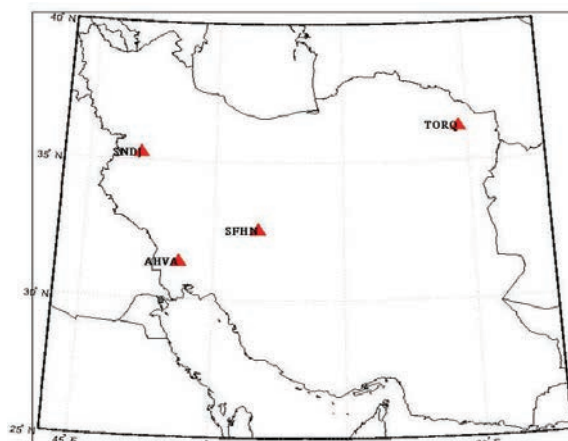
در این بخش اختلاف نتایج راه حل PPP به ازای بازه‌های زمانی ذکر شده در جدول ۴ با نتایج راه حل نسبی

با هم مقایسه شده است که نتایج آن را در بخش بعدی ملاحظه خواهید کرد. به منظور استخراج مختصات دقیق این ایستگاه‌ها از مشاهدات تفاضلی دو گانه فاز موج حامل استفاده شده و مختصات چندین ایستگاه IGS مورد استفاده در پردازش به عنوان قیود وزن‌دار با وزن ۱ میلی متر در نظر گرفته شده است. همچنین برای بررسی حداقل مدت زمان مشاهداتی لازم برای همگرایی کمتر از ۱۰ سانتیمتر بین نتایج مسأله PPP و تکنیک نسبی، مشاهدات این چهار ایستگاه با استفاده از تکنیک PPP و در بازه‌های زمانی مطابق با جدول ۴ پردازش شده‌اند.

جدول ۴: بازه‌های زمانی مشاهدات مورد استفاده در پردازش PPP

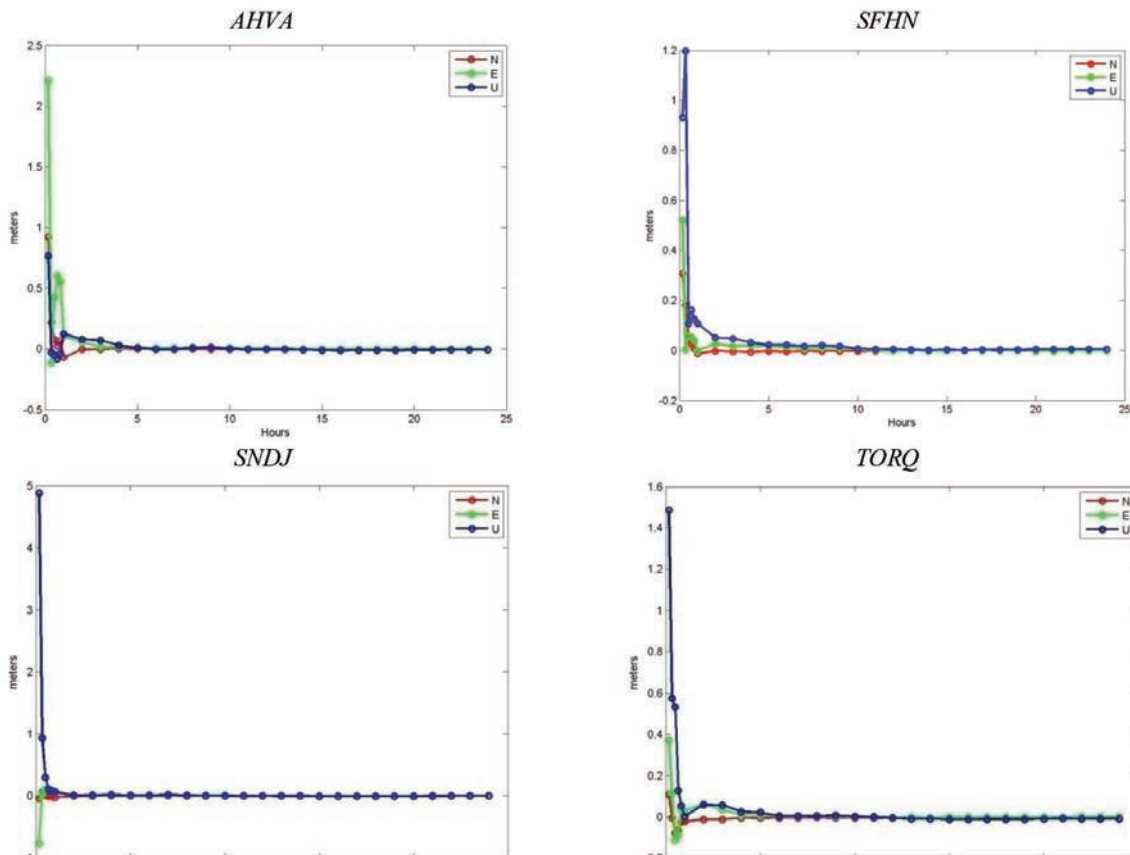
| Session | Start Time | End Time |
|---------|------------|----------|
| 1       | 00:00:00   | 00:15:00 |
| 2       | 00:00:00   | 00:30:00 |
| 3       | 00:00:00   | 00:45:00 |
| 4       | 00:00:00   | 01:00:00 |
| 5       | 00:00:00   | 02:00:00 |
| ...     | 00:00:00   | ...      |
| 25      | 00:00:00   | 22:00:00 |
| 26      | 00:00:00   | 23:00:00 |
| 27      | 00:00:00   | 24:00:00 |

در نگاره ۱ توزیع مکانی ۴ ایستگاه AHVA, SFHN, SNDJ, TORQ را مشاهده می‌نمائید.



نگاره ۱: توزیع مکانی ایستگاه‌های دائمی مورد استفاده در این تحقیق

همچنین برای بررسی صحت نتایج تکنیک PPP در



نگاره ۳: اختلاف مختصات حاصل از تکنیک‌های PPP استاتیک و نسبی استاتیک برای هر سه مؤلفه مختصاتی N, E, U برای چهار ایستگاه AHVA, SFHN, SNDJ, TORQ

(محورهای افقی و عمودی به ترتیب نمایانگر زمان و میزان اختلاف به واحد متر هستند)

در حال حاضر این چارچوب مرجع، ITRF2008 است. لذا به منظور مقایسه نتایج PPP با روش نسبی، راه حل تعیین موقعیت نسبی نیز با استفاده از ایستگاه‌های دائمی IGS و در چارچوب مرجع ITRF2008 پردازش شده‌اند (Altamimi et al., 2011).

#### ۴-۲- نتایج مشاهدات کینماتیک

پس از پردازش مشاهدات گیرنده مستقر روی هواپیما در دو حالت PPP و نسبی کینماتیک با استفاده از نرم‌افزار برنیز، مقدار اختلاف روی هر سه مؤلفه مختصاتی X, Y, Z محاسبه شده و سپس با استفاده از روابط ترانسفورماسیون بین سیستم‌های مختصات ژئودتیکی (G) و ژئودتیکی محلی (LG) اختلاف مختصات محلی N, E, U محاسبه شدند. در نگاره ۴ می‌توانید اختلاف نتایج حاصل از تکنیک

که هر دو با استفاده از نرم‌افزار برنیز و اعمال کلیه تصحیحات لازم انجام شده‌اند را برای ۴ ایستگاه دائمی GPS در نگاره ۳ مشاهده می‌کنید. این اختلافات در هر سه مؤلفه عرض، طول و ارتفاع ژئودتیکی آورده شده‌اند. همانطور که از نگاره ۳ و جداول ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت، با مشاهدات GPS بیش از یک ساعت می‌توان به همگرایی بهتر از ۱۰ سانتی‌متر رسید. لذا مدت زمان همگرایی بالا خود یکی از معایب تکنیک PPP نسبت به روش‌های نسبی یا تفاضلی است. همگرایی بهتر از ۱۰ سانتی‌متر، یعنی از آن مدت زمان به بعد اختلاف بین نتایج راه حل PPP و نسبی کمتر از ۱۰ سانتی‌متر خواهد بود. نکته قابل ذکر دیگر در این قسمت، چارچوب مرجع مورد استفاده در پردازش‌هاست. نتایج PPP در چارچوب مرجعی بیان می‌شود که مختصات دقیق ماهواره‌ها در آن بیان شده‌است.

جدول ۵: نتایج اختلاف مختصات حاصل از تکنیک‌های PPP استاتیک و نسبی استاتیک  
 برای هر سه مولفه مختصاتی N, E, U برای ایستگاه‌های AHVA, SFHN

| AHVA     |        |        |        |       |       | SFHN     |        |        |       |       |       |
|----------|--------|--------|--------|-------|-------|----------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Time(Hr) | N(m)   | E(m)   | U(m)   | 2D    | 3D    | Time(Hr) | N(m)   | E(m)   | U(m)  | 2D    | 3D    |
| 0.17     | 0.923  | 2.212  | 0.768  | 2.397 | 2.517 | 0.17     | 0.307  | 0.521  | 0.932 | 0.605 | 1.111 |
| 0.33     | 0.218  | -0.119 | -0.028 | 0.248 | 0.250 | 0.33     | 0.181  | 0.004  | 1.198 | 0.181 | 1.212 |
| 0.5      | 0.078  | 0.426  | -0.052 | 0.433 | 0.436 | 0.5      | 0.047  | 0.056  | 0.107 | 0.073 | 0.130 |
| 0.67     | 0.027  | 0.605  | -0.079 | 0.606 | 0.611 | 0.67     | 0.024  | 0.053  | 0.161 | 0.058 | 0.171 |
| 0.83     | 0.068  | 0.555  | -0.035 | 0.559 | 0.560 | 0.83     | 0.007  | 0.040  | 0.125 | 0.041 | 0.131 |
| 1        | -0.070 | 0.103  | 0.126  | 0.125 | 0.177 | 1        | -0.012 | -0.002 | 0.108 | 0.012 | 0.109 |
| 2        | -0.003 | 0.056  | 0.081  | 0.056 | 0.099 | 2        | -0.002 | 0.027  | 0.052 | 0.027 | 0.059 |
| 3        | -0.001 | 0.018  | 0.069  | 0.018 | 0.071 | 3        | -0.004 | 0.017  | 0.048 | 0.017 | 0.051 |
| 4        | 0.002  | 0.017  | 0.029  | 0.017 | 0.034 | 4        | -0.006 | 0.020  | 0.032 | 0.021 | 0.038 |
| 5        | 0.001  | 0.014  | 0.011  | 0.014 | 0.018 | 5        | -0.003 | 0.016  | 0.022 | 0.016 | 0.027 |
| 6        | 0.001  | 0.009  | -0.003 | 0.009 | 0.010 | 6        | -0.005 | 0.014  | 0.022 | 0.015 | 0.027 |
| 7        | 0.001  | 0.009  | -0.004 | 0.009 | 0.010 | 7        | -0.002 | 0.008  | 0.017 | 0.008 | 0.019 |
| 8        | 0.000  | 0.013  | 0.011  | 0.013 | 0.017 | 8        | -0.003 | 0.010  | 0.021 | 0.010 | 0.023 |
| 9        | -0.002 | 0.013  | 0.012  | 0.013 | 0.018 | 9        | -0.003 | 0.010  | 0.016 | 0.010 | 0.019 |
| 10       | -0.002 | 0.009  | 0.000  | 0.009 | 0.009 | 10       | -0.003 | 0.005  | 0.008 | 0.006 | 0.010 |
| 11       | 0.000  | 0.007  | -0.003 | 0.007 | 0.008 | 11       | -0.002 | 0.001  | 0.006 | 0.002 | 0.006 |
| 12       | -0.001 | 0.004  | -0.004 | 0.004 | 0.006 | 12       | 0.000  | -0.001 | 0.005 | 0.001 | 0.005 |
| 13       | -0.001 | 0.004  | -0.003 | 0.004 | 0.005 | 13       | 0.000  | 0.000  | 0.003 | 0.000 | 0.003 |
| 14       | -0.001 | 0.002  | -0.006 | 0.002 | 0.006 | 14       | 0.001  | -0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.003 |
| 15       | 0.000  | 0.003  | -0.010 | 0.003 | 0.010 | 15       | -0.001 | -0.001 | 0.004 | 0.001 | 0.004 |
| 16       | 0.000  | 0.003  | -0.011 | 0.003 | 0.011 | 16       | 0.000  | 0.000  | 0.001 | 0.000 | 0.001 |
| 17       | 0.000  | 0.002  | -0.010 | 0.002 | 0.010 | 17       | 0.000  | 0.000  | 0.004 | 0.000 | 0.004 |
| 18       | 0.000  | 0.003  | -0.010 | 0.003 | 0.010 | 18       | -0.001 | 0.000  | 0.003 | 0.001 | 0.003 |
| 19       | -0.001 | 0.003  | -0.011 | 0.003 | 0.011 | 19       | -0.001 | 0.000  | 0.003 | 0.001 | 0.003 |
| 20       | 0.000  | 0.004  | -0.008 | 0.004 | 0.009 | 20       | -0.002 | 0.000  | 0.005 | 0.002 | 0.005 |
| 21       | 0.001  | 0.003  | -0.007 | 0.003 | 0.008 | 21       | -0.002 | 0.000  | 0.005 | 0.002 | 0.005 |
| 22       | 0.001  | 0.002  | -0.006 | 0.002 | 0.006 | 22       | -0.001 | 0.000  | 0.005 | 0.001 | 0.005 |

جدول ۶: نتایج اختلاف مختصات حاصل از تکنیک‌های PPP استاتیک و نسبی استاتیک برای هر سه مولفه مختصاتی  
 SNDJ, TORQ برای ایستگاه‌های N, E, U

| SNDJ     |        |        |        |       |       | TORQ     |        |        |        |       |       |
|----------|--------|--------|--------|-------|-------|----------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Time(Hr) | N(m)   | E(m)   | U(m)   | 2D    | 3D    | Time(Hr) | N(m)   | E(m)   | U(m)   | 2D    | 3D    |
| 0.17     | -0.041 | -0.770 | 4.882  | 0.771 | 4.943 | 0.17     | 0.109  | 0.371  | 1.487  | 0.387 | 1.536 |
| 0.33     | 0.056  | 0.028  | 0.935  | 0.063 | 0.937 | 0.33     | -0.005 | 0.115  | 0.574  | 0.115 | 0.585 |
| 0.5      | 0.014  | 0.112  | 0.301  | 0.113 | 0.321 | 0.5      | -0.079 | -0.114 | 0.533  | 0.139 | 0.551 |
| 0.67     | -0.005 | 0.116  | 0.109  | 0.116 | 0.159 | 0.67     | -0.064 | -0.089 | 0.127  | 0.110 | 0.168 |
| 0.83     | -0.006 | 0.103  | 0.088  | 0.103 | 0.136 | 0.83     | -0.024 | 0.040  | 0.054  | 0.047 | 0.071 |
| 1        | -0.019 | 0.075  | 0.066  | 0.077 | 0.102 | 1        | -0.023 | 0.029  | 0.003  | 0.037 | 0.037 |
| 2        | -0.001 | 0.012  | 0.013  | 0.012 | 0.018 | 2        | -0.011 | 0.061  | 0.059  | 0.062 | 0.086 |
| 3        | 0.000  | 0.017  | 0.012  | 0.017 | 0.021 | 3        | -0.011 | 0.035  | 0.057  | 0.037 | 0.068 |
| 4        | 0.000  | 0.010  | 0.016  | 0.010 | 0.019 | 4        | -0.004 | 0.010  | 0.025  | 0.011 | 0.027 |
| 5        | -0.001 | 0.005  | 0.012  | 0.005 | 0.013 | 5        | -0.006 | 0.008  | 0.022  | 0.010 | 0.024 |
| 6        | 0.000  | 0.005  | 0.011  | 0.005 | 0.012 | 6        | -0.004 | 0.005  | 0.006  | 0.006 | 0.009 |
| 7        | -0.001 | 0.010  | 0.016  | 0.010 | 0.019 | 7        | -0.004 | 0.003  | 0.006  | 0.005 | 0.008 |
| 8        | -0.001 | 0.012  | 0.010  | 0.012 | 0.016 | 8        | -0.003 | 0.003  | 0.004  | 0.004 | 0.006 |
| 9        | -0.001 | 0.011  | 0.006  | 0.011 | 0.013 | 9        | -0.005 | 0.003  | 0.008  | 0.006 | 0.010 |
| 10       | -0.001 | 0.009  | 0.005  | 0.009 | 0.010 | 10       | -0.005 | 0.002  | 0.003  | 0.005 | 0.006 |
| 11       | 0.000  | 0.006  | 0.003  | 0.006 | 0.007 | 11       | -0.005 | 0.002  | -0.001 | 0.005 | 0.005 |
| 12       | -0.001 | 0.005  | 0.003  | 0.005 | 0.006 | 12       | -0.004 | -0.002 | -0.005 | 0.004 | 0.007 |
| 13       | -0.001 | 0.003  | 0.002  | 0.003 | 0.004 | 13       | -0.005 | -0.001 | -0.009 | 0.005 | 0.010 |
| 14       | 0.000  | 0.002  | 0.001  | 0.002 | 0.002 | 14       | -0.004 | -0.002 | -0.009 | 0.004 | 0.010 |
| 15       | -0.001 | 0.003  | -0.002 | 0.003 | 0.004 | 15       | -0.004 | -0.001 | -0.011 | 0.004 | 0.012 |
| 16       | 0.000  | 0.004  | -0.004 | 0.004 | 0.006 | 16       | -0.004 | 0.000  | -0.011 | 0.004 | 0.012 |
| 17       | -0.001 | 0.003  | -0.005 | 0.003 | 0.006 | 17       | -0.003 | 0.001  | -0.012 | 0.003 | 0.012 |
| 18       | -0.001 | 0.004  | -0.005 | 0.004 | 0.006 | 18       | -0.003 | 0.001  | -0.012 | 0.003 | 0.012 |
| 19       | -0.002 | 0.004  | -0.004 | 0.004 | 0.006 | 19       | -0.004 | 0.001  | -0.011 | 0.004 | 0.012 |
| 20       | -0.001 | 0.004  | -0.002 | 0.004 | 0.005 | 20       | -0.004 | 0.001  | -0.009 | 0.004 | 0.010 |
| 21       | -0.002 | 0.004  | -0.001 | 0.004 | 0.005 | 21       | -0.004 | 0.001  | -0.008 | 0.004 | 0.009 |
| 22       | -0.001 | 0.004  | 0.000  | 0.004 | 0.004 | 22       | -0.003 | 0.002  | -0.009 | 0.004 | 0.010 |

و از تصاویر فوق نیز برمی آید رسیدن به دقت میانگین بهتر از ۱۰ سانتیمتر در حالت دو بعدی و سه بعدی با استفاده از تکنیک PPP میسر است. البته همانطور که انتظار می رود چنانچه فقط هدف، تعیین مختصات مسطحاتی باشد دقت تکنیک PPP به طور قابل ملاحظه ای نسبت به حالت سه بعدی بهتر خواهد بود.

جدول ۷: نتایج عددی مقایسه تکنیک های PPP نسبی و کینماتیک نسبی

| کمیت          | دو بعدی (2D) | سه بعدی (3D) |
|---------------|--------------|--------------|
| میانگین       | ۰/۰۳۶        | ۰/۰۸۰        |
| انحراف معیار  | ۰/۰۲۳        | ۰/۰۴۴        |
| بیشترین مقدار | ۰/۱۶۵        | ۰/۳۱۶        |
| کمترین مقدار  | ۰/۰۰۳        | ۰/۰۰۶        |

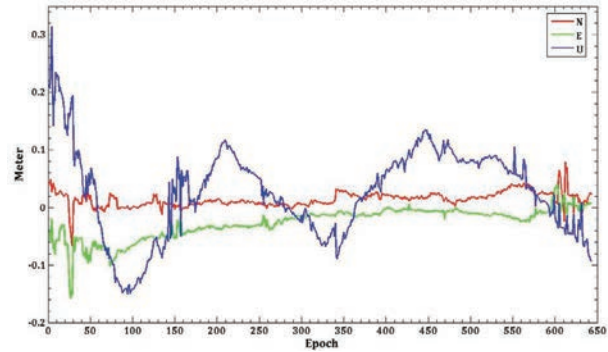
به طور کلی با توجه به اینکه در کاربردهای کینماتیک، تعیین مختصات در هر اپک مد نظر است، لذا می توان گفت که دقت تکنیک PPP در حالت کینماتیک با صرف نظر کردن از اپک های آغازین و چنانچه تمامی اثرات به خوبی مدل شده باشند در حالت سه بعدی بهتر از دو دسیمتر و در حالت دو بعدی بهتر از یک دسیمتر خواهد بود. البته تمامی این دقت ها همانند حالت استاتیک در مقایسه با نتایج حاصل از تکنیک نسبی که در آخرین چارچوب مرجع ماهواره ها (به عنوان نمونه ITRF2008) حاصل شده اند، بیان می شوند.

لذا ممکن است در مقایسه با چارچوب مرجع محلی، این دقت ها حاصل نشود که در آن صورت استفاده از پارامترهای ترانسفورماسیون برای تبدیل مختصات از چارچوب مرجع جهانی (ITRF2008) به چارچوب مرجع محلی و یا بالعکس امری ضروری خواهد بود.

#### ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

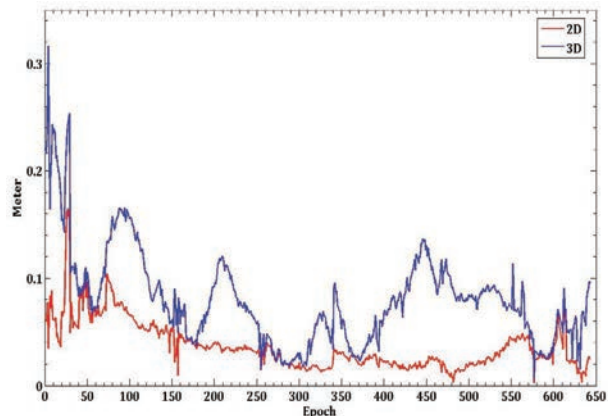
در این مقاله کارایی تکنیک PPP به عنوان جایگزینی

PPP کینماتیک و نتایج حاصل از شیوه کینماتیک نسبی را روی هر سه مؤلفه N,E,U که متناظر با عرض، طول و ارتفاع ژئودتیکی هستند را مشاهده نمایید.



نگاره ۴: اختلاف مختصات حاصل از تکنیک های PPP کینماتیک و نسبی کینماتیک برای هر سه مؤلفه مختصاتی (محورهای افقی و عمودی به ترتیب نمایانگر شماره اپک های مشاهداتی و میزان اختلاف به واحد متر هستند)

همچنین در نگاره ۵ این اختلاف در حالت دو بعدی یا مسطحاتی (2D) و سه بعدی (3D) نمایش داده شده است.



نگاره ۵: اختلاف مختصات دو بعدی و سه بعدی تکنیک های PPP نسبی و نسبی کینماتیک

(محورهای افقی و عمودی به ترتیب نمایانگر شماره اپک های مشاهداتی و میزان اختلاف به واحد متر هستند)

نتایج عددی مقایسه فوق را نیز می توانید در جدول ۷ مشاهده نمایید. همانطور که در این جدول مشاهده می شود

استفاده از تکنیک PPP قابل دستیابی خواهد بود. در نهایت برای مطالعات بعدی پیشنهاد می‌گردد به منظور بالا بردن سرعت همگرایی و دقت نتایج PPP نسبت به روش‌های نسبی، از مشاهدات سامانه‌های ناوبری دیگر نظیر GIONASS و BeiDou استفاده گردد.

#### ۶- تشکر و قدردانی

در پایان از مسئولین سازمان نقشه‌برداری کشور بخصوص مهندس رجب‌زاده معاونت محترم فنی سازمان و مهندسین اداره عملیات عکسبرداری هوایی و اداره ژئودزی و ژئودینامیک که امکان انجام این تحقیق را میسر نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داریم. همچنین از مسئولین محترم نشریه اطلاعات جغرافیایی (سپهر) که زحمات زیادی را در مراحل داوری، پذیرش و چاپ این مقاله متحمل شدند نیز تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### ۷- منابع و مآخذ

1. Altamimi, Z., Collilieux, X. & Métivier, L. (2011). ITRF2008: An improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 85(8), 457-473.
2. Anderle, R.J. (1976). Point positioning concept using precise ephemeris. *Proceedings of the International Geodetic Symposium, Las Cruces, New Mexico*, 47-75.
3. Bakker, P., Van Der Marel, H. & Petovello, M. (2012). Single-versus dual-frequency Precise Point Positioning. *Inside GNSS*, 7(4): 30-35.
4. Caissy, M., Agrotis, L., Weber, G., Hernandez-Pajares, M. & Hugentobler, U. (2012). Innovation: The International GNSS Real-Time Service. *GPS World*, 23(6): 52-58.
5. Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P. & Meindl, M. (2007). *Bernese GPS Software Version 5.0 User Manual*. University of Bern, Switzerland.
6. Gao, Y. & Kongzhe, C. (2004). Performance analysis of Precise Point Positioning using real-time orbit and clock products. *Journal of Global Positioning Systems*,

برای روش‌های نسبی یا تفاضلی از دو منظر دقت و سرعت همگرایی مورد بررسی قرار گرفت.

بدین منظور از دو دسته مشاهدات استاتیک و کینماتیک استفاده شد. مشاهدات استاتیک مربوط به ۴ ایستگاه دائمی از شبکه IPGN به نام‌های AHVA, SFHN, SNDJ, TORQ بوده در روز ۹۰ از سال ۲۰۱۴، با نرخ ۳۰ ثانیه هستند. این مشاهدات با در نظر گرفتن کلیه تصحیحات لازم و با استفاده از محصولات دقیق IGS به دو روش PPP استاتیک و نسبی استاتیک و با استفاده از نرم‌افزار برنیز پردازش شده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شدند. برای بدست آوردن موقعیت دقیق این ایستگاه‌ها به روش نسبی استاتیک از ۱۰ ایستگاه اطراف ایران استفاده شد. همچنین برای دستیابی به مدت زمان بهینه برداشت مشاهدات در روش PPP برای رسیدن به اختلاف کمتر از ۱۰ سانتیمتر با روش نسبی، مشاهدات این چهار ایستگاه با بازه‌های زمانی متفاوت پردازش شدند.

در نهایت مشخص شد که برای رسیدن به دقت بهتر از ۱۰ سانتیمتر در تعیین موقعیت به روش PPP، مشاهدات با مدت زمان بیش از ۱ ساعت نیاز است که این موضوع خود عمده‌ترین نقطه ضعف تکنیک PPP نسبت به روش‌های نسبی است.

در بخش بعد با استفاده از مشاهدات یک روز گیرنده مستقر روی هواپیما در یک عملیات پرواز به مدت زمان حدودی ۶ ساعت، کارایی تکنیک PPP در حالت کینماتیک مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش نیز مشاهدات GPS به دو روش PPP کینماتیک و نسبی کینماتیک و با اعمال کلیه تصحیحات لازم و با استفاده از نرم‌افزار برنیز پردازش شدند.

از مقایسه نتایج، مشخص شد که چنانچه هدف از تعیین موقعیت، فقط تعیین مؤلفه‌های مسطحاتی باشد (مانند اکثر عملیات‌های هیدروگرافی) می‌توان دقتی بهتر از ۱۰ سانتیمتر و چنانچه هدف تعیین مؤلفه‌های سه بعدی باشد (مانند عملیات فتوگرامتری) دقتی بهتر از ۲۰ سانتیمتر با

5005-5017.

18. <http://www.igs.org/products>

19. <http://www2.unb.ca/gge/Resources/PPP/OnlinePPPs.html>.

3(1-2), 95-100.

7. Gao, Y. (2006). Precise Point Positioning and its challenges. Inside GNSS, 1(8), 16-18.

8. Grinter, T. & Janssen, V. (2012). Post-processed Precise Point Positioning: A viable alternative?. Proc. APAS2012, Wollongong, Australia, 83-92.

9. Grinter, T. & Roberts C. (2013). Real Time Precise Point Positioning: Are We There Yet?. International Global Navigation Satellite Systems Society. IGSS Symposium 2013

10. Hernández-Pajares, M., Juan, J. M., Sanz, J., Aragón-Angel, A., Ramos-Bosch, P., Samson, J., Tossaint, M., Albertazzi, M., Odijk, D., Teunissen, P. J., G, de., Bakker, P., Verhagen, S., & van der Marel, H. (2010). Wide area RTK: High precision positioning on a continental scale. Inside GNSS, 5(2), 35-46.

11. Juan, J. M., Hernández-Pajares, M., Sanz, J., Ramos-Bosch, P., Aragón-Àngel, A., Orús, R., Ochieng, W., Feng, S., Jofre, M., Coutinho, P., Samson, J., & Tossaint, M. (2012). Enhanced Precise Point Positioning for GNSS Users. IEEE., 0196-2892

12. Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C. & Grinter, T. (2012a). Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End?. presented at FIG Working Week 2012, Italy.

13. Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C. & Grinter, T. (2012b). PPP versus DGNSS. Geomatics World, 20 (6), 18-20.

14. salam, A. (2005). Precise Point Positioning Using Un-Differenced Code and Carrier Phase Observations. Ph.D thesis, University of Calgary, Canada.

15. Subirana, J., Zornoza J.J. & Hernández-Pajares, M. (2013). GNSS DATA PROCESSING. European Space Agency (ESA).

16. Zumberge, J., Watkins, M. M., Webb, F. H. (1997a). Characteristics and applications of precise GPS clock solutions every 30 seconds, Journal of Navigation, 44(4), 449-456.

17. Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins M. & Webb F. (1997). Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research, 102(3),