

مدلسازی خطای یونسفری با استفاده از تصحیح مؤلفه های مختصات و بردار موقعیت

علیرضا آزموده اردلان

دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده فنی - دانشگاه تهران،

مرضیه باعث

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد ژئودزی گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۰/۵/۳۰، تاریخ تصویب ۸۲/۱۱/۱۸)

چکیده

امروزه یکی از متداولترین روشهای تعیین موقعیت، استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) می باشد. مشاهدات این سیستم آلوده به خطاهای اتفاقی و سیستماتیک مختلفی هستند که یکی از مهمترین آنها، خطای یونسفر است. یونسفر لایه ای از جو است که در ارتفاع ۶۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد. چون یونسفر یک محیط dispersive است، مشاهدات کد و فاز موج حامل به ترتیب دستخوش تأخیر و تقدم می گردند. به علاوه از آنجائیکه یونسفر بعد از خطای SA^۱ بیشترین تأثیر را روی مشاهدات GPS دارد، تلاشهای گسترده ای جهت مدلسازی خطای یونسفر، صورت پذیرفته است. در این مقاله، امکان مدلسازی خطای یونسفری، با استفاده از مشاهدات ایستگاههای دائمی GPS مورد بررسی قرار گرفته است. ایستگاههای دائمی به لحاظ آنکه به طور پیوسته در حال ثبت اطلاعات بوده و موقعیتشان با دقت بالایی معلوم است، ارائه دهنده مشاهدات مناسبی جهت مدلسازی خطاهای مختلف موجود در GPS به ویژه خطای یونسفری، خطای تروپوسفری، خطای مداری، خطای ساعت گیرنده و ماهواره، می باشند. مطالعه خاص این مقاله بر روی مشاهدات جمع آوری شده در ایستگاه دائمی تهران صورت گرفته است. به کمک مشاهدات این ایستگاه مدلی جدید برای حذف خطای یونسفری ارائه شده که قادر به حذف تقریباً ۸۵٪ خطای یونسفر در منطقه ای به وسعت ۱۴۰۰ کیلومتر می باشد.

واژه های کلیدی: خطای یونسفری، GPS، مدلسازی، تبدیل فوریه

مقدمه

یونسفر دومین لایه اصلی اتمسفر بعد از تروپوسفر است که تقریباً محدود به ارتفاع ۶۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتری بالای سطح زمین می باشد. این لایه اتمسفر حاوی الکترونهاي آزاد بوده که وجود آنها بر سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی تأثیر می گذارد. در نتیجه امواج GPS حين عبور از این لایه دستخوش انکسار می گردند.

تأثیر یونسفر روی سیگنالهای الکترومغناطیس بستگی به عوامل مختلفی دارد که برخی از آنها به صورت تناوبی عمل می نمایند. از مهمترین اثرات پریودیکی که در خطای یونسفری موجود است، می توان از فعالیتهای خورشیدی با پریود ۱۱ سال، اثرات ناشی از تغییر فصول و اثر تغییر روز و شب با پریود ۲۴ ساعته نام برد. در این مقاله به بررسی رفتار روزانه یونسفر با آنالیز طیفی مشاهدات ۲۴ ساعته جمع آوری شده در ایستگاه دائمی

مشاهدات GPS، همانند هر مشاهده دیگر آلوده به خطاهای اتفاقی و سیستماتیک مختلفی مانند خطای مداری، خطای تروپوسفری، خطای یونسفری و خطای ساعت ماهواره و گیرنده و ... هستند. از آنجائیکه سیگنالهای ارسالی از ماهواره ها در مسیر خود از لایه های مختلف اتمسفر عبور می نمایند، بررسی تأثیر اتمسفر روی انتشار امواج GPS از اهمیت خاصی برخوردار است. اتمسفر را معمولاً به دو قسمت اصلی تروپوسفر و یونسفر تقسیم می نمایند. علت این تقسیم بندی، تأثیر متفاوت این دو لایه بر امواج GPS است [۱]. تروپوسفر بخش پایینی اتمسفر زمین است که از سطح زمین تا ارتفاع تقریبی ۶۰ کیلومتری ادامه می یابد. انتشار امواج در این محیط مستقل از فرکانس بوده و تنها به درجه حرارت، فشار و فشار بخار آب موجود در هوا بستگی دارد.

ephemerides جهت کاهش خطاهای مداری استفاده نمود. ماحصل این مرحله، چهار سری مؤلفه مختصات X ، Y ، Z و r (طول بردار موقعیت) است که تعداد هر سری بستگی به طول مدت زمان مورد مطالعه دارد. به عنوان مثال اگر از سی روز مشاهدات ۲۴ ساعته با فاصله نمونه برداری ۳۰ ثانیه ای استفاده شود، طول هر سری برابر با $30 \times 24 \times 60 \times 60 \times 30$ خواهد بود.

مرحله دوم (یافتن فرکانسهای اصلی سری ها به کمک آنالیز طیفی فوریه): در این مرحله انتقال داده ها از فضای مکان به فضای فرکانس صورت می گیرد. در این مرحله، ابتدا نتایج حاصل از پردازش را از مختصات معلوم ایستگاه کم نموده و سپس از روش آنالیز طیفی فوریه جهت کشف فرکانسهای عمده ای که در سریهای بدست آمده از این تفاضل وجود دارند، استفاده می نماییم.

مرحله سوم (تشکیل مدل و بدست آوردن ضرایب مجهول به روش سرشکنی کمترین مربعات): با به کارگیری فرکانسهای حاصل از مرحله قبل می توان مدلی به شکل ذیل برای خطای یونسفری ارائه نمود:

$$i = x, y, z, r \quad d_{ion}^{(i)} = a_0^{(i)} + a_1^{(i)} \cos(\omega^{(i)} t - \varphi^{(i)}) \quad (1)$$

که در رابطه (۱) $\omega^{(i)} = 2\pi f_{\max}^{(i)}$ ، $f_{\max}^{(i)}$ فرکانس اصلی حاصل از آنالیز فوریه، t زمان برحسب ساعت و $a_0^{(i)}$ و $a_1^{(i)}$ و $\varphi^{(i)}$ ضرایبی هستند که باید تعیین شوند. یادآوری می شود که بردار مشاهدات در این سرشکنی، تفاضل مختصات حاصل از پردازش در هر اپک از مختصات معلوم ایستگاه است. با توجه به فرمول ۱ پیداست که معادلات سرشکنی از نوع غیر خطی بوده و باید به روش تکرار حل شوند (جهت اطلاعات بیشتر پیرامون بدست آوردن ضرایب به مرجع [۲] مراجعه شود).

ماحصل کلیه مراحل فوق، مدلی است که تنها به زمان بستگی داشته و می تواند میزان تأثیر یونسفر را در هر زمان دلخواه محاسبه و در اختیار قرار دهد.

مطالعه خاص

جهت آزمایش دقت و وسعت عملکرد روش شرح داده شده، مشاهدات ماه می سال ۲۰۰۰ ایستگاه دائمی تهران مورد استفاده قرار گرفت. از آنجاییکه در برخی از روزها

تهران پرداخته خواهد شده و مدلی جهت تصحیح مؤلفه های مختصات در هر زمان ارائه خواهد شد. جهت استفاده از این مدل، کافیست مشاهدات را بدون اعمال هیچگونه مدلی برای تصحیح خطای یونسفری، پردازش کرده و سپس مدل تصحیح یونسفری را به نتایج حاصل از پردازش اعمال نموده و یا می توان برنامه ای نوشت که حین پردازش، برای هر وحله مشاهده مدل را به مختصات حاصل از سرشکنی در همان وحله زمانی، اعمال نماید.

مدل ناحیه ای خطای یونسفر از طریق تصحیح مؤلفه های مختصات و بردار موقعیت

همانگونه که می دانید، انتقال یک سری اطلاعاتی از حیطة زمان یا مکان به حیطة فرکانس منجر به کشف و بررسی رفتارهای کلی آن سری خواهد شد. در مورد یونسفر نیز چنین است، یعنی با بررسی و آنالیز طیفی یک سری از مشاهدات که تحت تأثیر یونسفر دستخوش تأخیر یا تقدم شده اند، بسته به بازه زمانی مورد مطالعه، می توان اثرات روزانه، فصلی و حتی ۱۱ ساله آن را مدلسازی نمود. در بررسی های انجام شده در این مقاله، جهت مدله نمودن اثرات روزانه یونسفر، یک ماه اطلاعات ایستگاه دائمی تهران مورد استفاده قرار گرفت. بدیهی است که چنانچه اطلاعات در بازه های زمانی طولانی تر مانند سالانه یا ۱۱ ساله مورد بررسی قرار گیرد، با انجام مراحل مشابه با آنچه که در ذیل ذکر خواهد شد، می توان مدلهایی جهت تصحیح فصلی و حتی ۱۱ ساله یونسفر به دست آورد. لازم به ذکر است که جهت ایجاد این مدل باید از مشاهدات ایستگاههایی استفاده نمود که اولاً مختصاتشان معلوم بوده و ثانیاً دارای مشاهدات ۲۴ ساعته در یک فاصله زمانی مشخص باشند که با توجه به شرایط مذکور، ایستگاههای دائمی GPS، یکی از مناسبترین ایستگاهها جهت این امر می باشند. مراحل ایجاد مدل به شرح زیر است:

مرحله اول (به دست آوردن مختصات ایستگاه در هر اپک در فاصله زمانی مورد نظر): این مختصات از طریق پردازش فایل های مشاهداتی، قابل حصول می باشد. لازم به ذکر است که در مرحله پردازش باید سعی شود تا حد امکان خطاهای مؤثر بر مشاهدات، جز خطای تأخیر یونسفری حذف گردد. بدین خاطر لازم است از مدل های تروپوسفری جهت حذف خطای تروپوسفر، precise

می اعمال گردید. نتایج روز بیستم در مقایسه با نتایج حاصل از پردازش اطلاعات با امواج حامل L1 و L3 در جدول (۱) درج شده است. شکل (۴) مقدار باقیمانده نتایج حاصل از اعمال مدل ۲ را در مقایسه با امواج حامل L1 و L3 در روز شانزدهم نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می کنید اعمال مدل باعث متمرکز شدن نتایج حول میانگین گردیده، ولی میانگین بدست آمده از پردازش با موج حامل L3 نسبت به نتایج حاصل از اعمال مدل تصحیح یونسفریک ساخته شده، وضعیت به مراتب بهتری دارند. این امر نشان دهنده اهمیت حضور یک ثابت در مدل می باشد. بدین منظور در مرحله بعد، مدلی به فرم ۱ به اختلاف مؤلفه ها برازش دادیم. نتایج حاصل از اعمال مدل مذکور روی مشاهدات بیستم ماه می به همراه نتایج حاصل از پردازش با امواج حامل L1 و L3 در جدول (۲) و نیز مقادیر باقیمانده در مورد روز شانزدهم در شکل (۵) آورده شده است. ملاحظه می گردد که نتایج به

مشاهدات به صورت ۲۴ ساعته ثبت و ضبط نشده بودند، مجبور شدیم از اطلاعات ۲۵ روز این ماه استفاده کرده و به خاطر گسیختگی مشاهدات اطلاعات را به سه دسته مربوط به تاریخهای: ۲۰۰۰/۵/۴ لغایت ۲۰۰۰/۵/۱۰، ۲۰۰۰/۵/۱۲ لغایت ۲۰۰۰/۵/۱۹ و ۲۰۰۰/۵/۲۲ لغایت ۲۰۰۰/۵/۳۱ تفکیک نماییم. این سه دسته اطلاعات با استفاده از اطلاعات مداری دقیق^۲، مدل تروپوسفری Saastamoinen، روی موج حامل L1 و به صورت مطلق، با نرم افزار Bernese version 4.2 مورد پردازش قرار گرفت. برای افزایش سرعت انجام این مطالعه، به جای پردازش وحله به وحله اطلاعات، از پنجره های مشاهداتی ۱۵ دقیقه ای استفاده گردید.

پس از پردازش اطلاعات مربوط به هر دسته، نتایج حاصل از پردازش را از مختصات معلوم ایستگاه کم نموده و سپس بردار اختلافهای حاصله را آنالیز طیفی کردیم. اشکال (۱)، (۲) و (۳) پریودگرام حاصل از آنالیز طیفی اطلاعات، برای هر چهار مؤلفه X, Y, Z و x را نشان می دهند. همانگونه که مشهود است در کلیه نمودارها ماکزیمم ها، در ساعت حدود ۲۴ اتفاق افتاده است. با یافتن مقدار دقیق فرکانس اصلی هر نمودار، می توان سرعت زاویه ای هر یک از این سریها را با رابطه زیر محاسبه نمود:

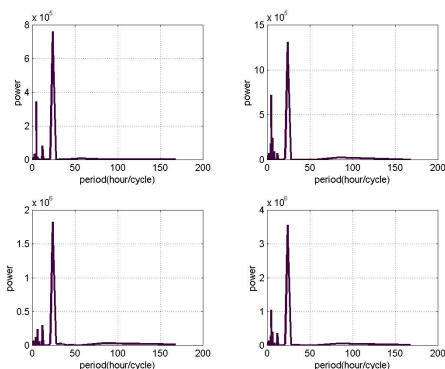
$$\omega_{\max}^{(i)} = 2\pi f_{\max}^{(i)} \quad i = x, y, z, r$$

در مرحله بعد، به منظور تعیین یک ω ی واحد برای این سه دسته، از ω های تعیین شده در هر دسته، متناسب با طول زمانی آنها، میانگین گیری نموده و نتیجه بدست آمده را به عنوان ω در مدل قرار می دهیم.

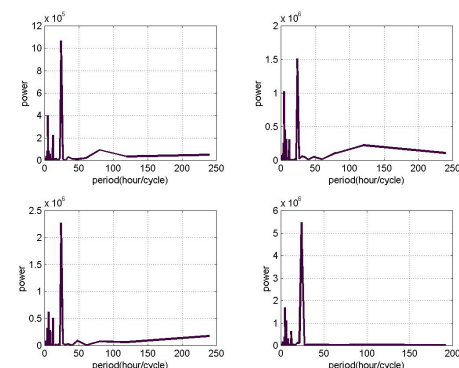
در نخستین مرحله از تست مدل ۱ ابتدا از ضریب a_0 صرف نظر کردیم، یعنی به اختلافات حاصله مدلی به صورت زیر برازش دادیم:

$$d_{ion}^{(i)} = a_1^{(i)} \cos(\omega^{(i)} t - \varphi^{(i)}) \quad i = x, y, z, r \quad (2)$$

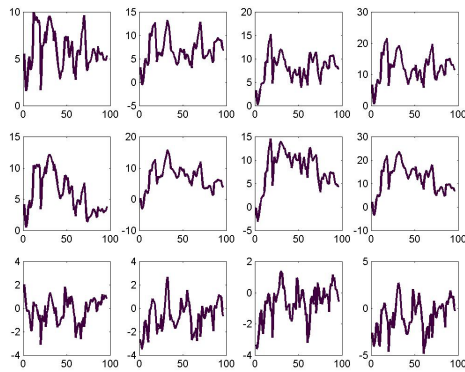
جهت بررسی صحت عملکرد مدل بدست آمده، این مدل روی دو روز مشاهدات ایستگاه دائمی تهران، مربوط به تاریخهای شانزدهم (یکی از روزهایی که مشاهدات آن در آنالیز طیفی جهت ایجاد مدل استفاده شد) و بیستم (روزی که مشاهداتش در آنالیز طیفی استفاده نشد) ماه



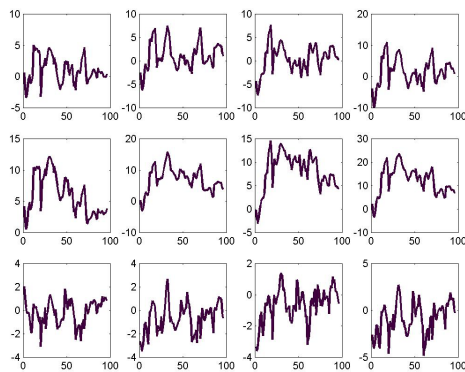
شکل ۱: پریودگرام آنالیز طیفی دسته اول مشاهدات (از تاریخ ۲۰۰۰/۵/۴ تا ۲۰۰۰/۵/۱۰).



شکل ۲: پریودگرام آنالیز طیفی دسته دوم مشاهدات (از تاریخ ۲۰۰۰/۵/۱۲ تا ۲۰۰۰/۵/۱۹).

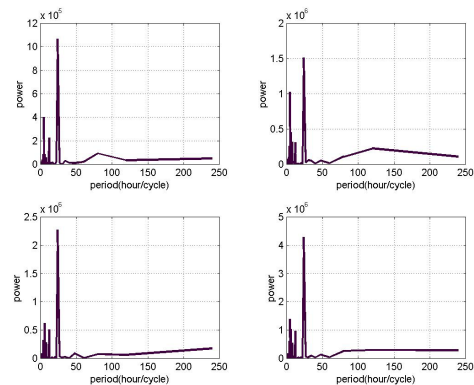


شکل ۴: نمایش باقیمانده ها - شکل های سطرهای اول، دوم و سوم به ترتیب مربوط به باقیمانده های حاصل از اعمال مدل $d_{ion} = a_1 \cos(\omega t - \varphi)$ ، پردازش روی موج حامل L1 و پردازش روی موج حامل L3 نسبت به مختصات معلوم ایستگاه، برای چهار مؤلفه X, Y, Z, r در روز شانزدهم می ۲۰۰۰ می باشد (محور افقی معرف تعداد داده ها و محور قائم معرف باقیمانده ها در موقعیت، بر حسب متر است).



شکل ۵: نمایش باقیمانده ها - شکل های سطرهای اول، دوم و سوم به ترتیب مربوط به باقیمانده های حاصل از اعمال مدل $d_{ion} = a_0 + a_1 \cos(\omega t - \varphi)$ ، پردازش روی موج حامل L1 و پردازش روی موج حامل L3 نسبت به مختصات معلوم ایستگاه، برای چهار مؤلفه X, Y, Z, r در روز شانزدهم می در ایستگاه دائمی تهران می باشد. (محور افقی معرف تعداد داده ها و محور قائم معرف باقیمانده ها در موقعیت، بر حسب متر است).

که در آن $\omega_{\max_1}^{(i)} = 2\pi f_{\max_1}^{(i)}$ سرعت زاویه ای مربوط به فرکانس اصلی اول (۲۴ ساعته)، $\omega_{\max_2}^{(i)} = 2\pi f_{\max_2}^{(i)}$ سرعت زاویه ای مربوط به فرکانس اصلی دوم، t زمان بر حسب ساعت و $a_0^{(i)}$ و $a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, \varphi_1^{(i)}$ و $\varphi_2^{(i)}$ مجهولات مدل می باشند.



شکل ۳: پرلودگرام آنالیز طیفی دسته سوم مشاهدات (از تاریخ ۲۰۰۰/۵/۲۲ تا ۲۰۰۰/۵/۳۱).

میزان قابل ملاحظه ای به نتایج حاصل از L3 نزدیک شده اند. در گام بعد، به منظور تعیین حوزه عملکرد مدل ۱، اطلاعات سه ایستگاه شبکه گسل تهران به نامهای P05، P09 و P18، ایستگاه دائمی مشهد و دو ایستگاه دائمی IGS به نامهای KIT3 در ازبکستان و UCLP در لس آنجلس انتخاب و مورد آزمایش قرار گرفتند.

نتایج حاصله در مورد ایستگاههای UCLP و KIT3 به همراه ذکر فواصل این ایستگاهها از ایستگاه مورد مطالعه و تاریخ مشاهدات آنها در جداول (۳) و (۴) آورده شده است. همانگونه که ملاحظه می کنید در مورد ایستگاه UCLP، برخلاف سایر ایستگاهها، نتایج خوبی بدست نیامده است که این امر بیانگر آنست که مدل ارائه شده به صورت ناحیه ای عمل مینماید و طبق بررسیهای به عمل آمده تا فاصله حدود ۱۴۰۰ کیلومتری از ایستگاه (فاصله تقریبی KIT3 از تهران) قابل اعتبار است. با توجه به نتایج بدست آمده میزان دقت مدل روی چهار مؤلفه X, Y, Z, r به ترتیب ۷۹٪، ۹۰٪، ۸۹٪ و ۸۹٪ برآورد می گردد.

در حین انجام بررسی ها، متوجه شدیم که در این سه دسته اطلاعات، غیر از فرکانس ۲۴ ساعته، فرکانس عمده دیگری در حدود ساعت ۵، وجود دارد (اشکال ۱، ۲ و ۳). این امر ما را به این مسئله واداشت که مدل را به صورت زیر تکمیل نماییم:

$$d_{ion}^{(i)} = a_0^{(i)} + a_1^{(i)} \cos(\omega_{\max_1}^{(i)} t - \varphi_1^{(i)}) + a_2^{(i)} \cos(\omega_{\max_2}^{(i)} t - \varphi_2^{(i)})$$

$i = x, y, z, r$

(۳)

جدول ۱: اطلاعات آماری (مینیمم، ماکزیمم، میانگین و انحراف از میانگین) مربوط به مشاهدات روز بیستم می ۲۰۰۰ در ایستگاه دائمی تهران در طول مدت ۲۴ ساعت، حاصل از اعمال مدل

$$d_{ion} = a_1 \cos(\omega t - \varphi)$$

	δX_m (m)	δX_{L1} (m)	δX_{L3} (m)	δY_m (m)	δY_{L1} (m)	δY_{L3} (m)	δZ_m (m)	δZ_{L1} (m)	δZ_{L3} (m)	δr_m (m)	δr_{L1} (m)	δr_{L3} (m)
Min	-۰/۰۶۷۳	-۱/۳۵۸۶	-۲/۴۶۷	-۱/۰۴۸۴	-۳/۷۷۳۰	-۳/۶۶۳۰	-۰/۴۵۰۶	-۳/۸۰۲۰	-۳/۲۲۲۰	-۰/۹۶۲۳	-۵/۲۶۶۰	-۵/۰۸۸۰
Max	۱۱/۰۶۲	۱۳/۷۳۳	۱/۲۷۳۰	۱۶/۰۰۸	۱۸/۳۸۴	۳/۷۸۷۰	۱۵/۱۶۵	۱۶/۷۴۸۶	۱/۷۲۸۰	۲۳/۴۱۹	۷/۵۵۴۹	۴/۰۴۸۰
Mean	۶/۳۳۰۲	۶/۲۶۲۷	-۰/۱۳۵۸	۷/۲۳۸۷	۷/۱۳۴۴	-۰/۴۴۵۲	۸/۶۹۳۰	۸/۵۷۴۲	-۰/۴۵۳۵	۱۲/۸۶۹۶	۱۲/۷۰۰	-۰/۶۱۵۰
Std	۲/۳۳۸۶	۳/۵۸۶۳	۰/۸۵۰۵	۳/۱۲۷۲	۴/۱۵۰۰	۱/۳۵۵۴	۳/۱۱۹۱	۴/۵۷۲۵	۱/۰۸۶۵	۴/۶۹۴۶	۶/۷۳۵۲	۱/۷۴۱۳

جدول ۲: اطلاعات آماری (مینیمم، ماکزیمم، میانگین و انحراف از مختصات معلوم) مربوط به مشاهدات روز بیستم می ۲۰۰۰ در ایستگاه دائمی تهران در طول مدت ۲۴ ساعت، حاصل از اعمال

$$d_{ion} = a_0 + a_1 \cos(\omega t - \varphi) \text{ مدل}$$

	δX_m (m)	δX_{L1} (m)	δX_{L3} (m)	δY_m (m)	δY_{L1} (m)	δY_{L3} (m)	δZ_m (m)	δZ_{L1} (m)	δZ_{L3} (m)	δr_m (m)	δr_{L1} (m)	δr_{L3} (m)
Min	-۵/۰۰۳۶	-۱/۳۵۸۶	-۲/۴۶۷	-۶/۸۱۳۷	-۳/۷۷۳۰	-۳/۶۶۳۰	-۸/۰۱۱۹	-۳/۸۰۲۰	-۳/۲۲۲۰	-۱۱/۵۲۹	-۵/۲۶۶۰	-۵/۰۸۸۰
Max	۶/۱۰۷۶	۱۳/۷۳۳	۱/۲۷۳۰	۱۰/۲۲۲	۱۸/۳۸۴	۳/۷۸۷۰	۷/۵۳۴۹	۱۶/۷۴۸۶	۱/۷۲۸۰	۱۲/۸۱۵	۷/۵۵۴۹	۴/۰۴۸۰
Mean	۱/۳۸۲۰	۶/۲۶۲۷	-۰/۱۳۵۸	۱/۴۵۹۴	۷/۱۳۴۴	-۰/۴۴۵۲	۱/۱۱۳۵	۸/۵۷۴۲	-۰/۴۵۳۵	۲/۲۷۷۲	۱۲/۷۰۰	-۰/۶۱۵۰
Std	۲/۷۰۳۸	۳/۵۸۶۳	۰/۸۵۰۵	۳/۴۳۴۵	۴/۱۵۰۰	۱/۳۵۵۴	۳/۲۹۲۱	۴/۵۷۲۵	۱/۰۸۶۵	۵/۱۹۰۹	۶/۷۳۵۲	۱/۷۴۱۳

جدول ۳: اطلاعات آماری (مینیمم، ماکزیمم، میانگین و انحراف از مختصات معلوم ایستگاه) مربوط به مشاهدات روز هشتم می ۲۰۰۰ در ایستگاه KIT3 به فاصله ۱۴۲۳/۷۳۶ کیلومتری از ایستگاه دائمی تهران در طول مدت ۱۷ ساعت (از ساعت ۰ تا ۱۷)، حاصل از اعمال مدل $d_{ion} = a_0 + a_1 \cos(\omega t - \varphi)$.

	δX_m (m)	δX_{L1} (m)	δX_{L3} (m)	δY_m (m)	δY_{L1} (m)	δY_{L3} (m)	δZ_m (m)	δZ_{L1} (m)	δZ_{L3} (m)	δr_m (m)	δr_{L1} (m)	δr_{L3} (m)
Min	-۵/۳۵۵۶	۰/۸۳۵۰	-۰/۶۶۵۰	-۴/۹۸۲۳	۱/۳۹۷۰	-۱/۴۲۳۰	-۵/۹۴۳۰	۰/۸۹۶۰	-۰/۷۴۴۰	-۸/۱۰۹۷	۲/۴۰۲۸	-۱/۴۶۹۸
Max	۰/۲۵۹۳	۷/۳۲۵۰	۱/۹۳۵۰	۵/۳۸۹۰	۱۲/۷۶۷	۳/۷۸۷۰	۵/۳۷۳۱	۱۵/۱۶۶۰	۴/۴۴۶۰	۶/۱۶۱۵	۲۰/۹۰۲	۵/۷۵۸۵
Mean	-۲/۲۰۹۰	۳/۶۸۸۲	۰/۳۲۰۶	-۰/۰۷۶۹	۶/۶۹۶۳	۰/۸۲۴۵	-۰/۰۸۸۹	۸/۴۸۳۶	۰/۶۷۲۵	-۱/۰۳۴۹	۱۱/۲۴۹	۱/۱۱۰۴
std	۲/۵۵۸۳	۳/۹۴۹۸	۰/۶۵۱۴	۲/۲۷۷۰	۷/۱۷۵۷	۱/۲۲۴۳	۲/۵۲۹۴	۹/۱۸۶۷	۱/۰۳۶۱	۳/۲۸۰۴	۱۲/۰۱۴۹	۱/۵۹۴۴

جدول ۴: اطلاعات آماری (مینیمم، ماکزیمم، میانگین و انحراف از مختصات معلوم ایستگاه) مربوط به مشاهدات روز ششم می ۲۰۰۰ در ایستگاه UCLP به فاصله ۱۰۴۳۵/۰۹۷ کیلومتری از ایستگاه دائمی تهران در طول مدت ۱۷ ساعت (از ساعت ۰ تا ۱۷) حاصل از اعمال مدل $d_{ion} = a_0 + a_1 \cos(\omega t - \varphi)$.

	δX_m (m)	δX_{L1} (m)	δX_{L3} (m)	δY_m (m)	δY_{L1} (m)	δY_{L3} (m)	δZ_m (m)	δZ_{L1} (m)	δZ_{L3} (m)	δr_m (m)	δr_{L1} (m)	δr_{L3} (m)
Min	-۹/۸۰۵۸	-۵/۲۰۰۰	-۱/۱۳۰۰	-۱۲/۶۱۳	-۹/۲۱۰۰	-۱/۰۷۰۰	-۸/۰۳۹۸	۱/۴۱۲۰	-۰/۷۴۸۰	-۱۲/۲۲۹	-۰/۲۰۸۹	-۲/۰۵۰۰
Max	-۲/۷۳۶۰	۱/۸۰۰۰	۱/۵۸۰۰	-۳/۳۰۶۲	۰/۷۱۰۰	۱/۸۳۰۰	۳/۹۳۵۵	۸/۴۴۲۰	۱/۶۶۲۰	۶/۵۷۲۳	۱۳/۴۸۶	۱/۷۱۴۱
Mean	-۷/۱۷۹۰	-۱/۲۳۲۲	۰/۰۰۳۷	-۸/۳۳۷۳	-۲/۸۰۹۰	۰/۰۹۶۳	-۳/۰۲۱۶	۳/۷۳۵۷	۰/۱۱۲۳	-۵/۸۴۲۶	۴/۶۲۰۶	-۰/۰۰۹۱
std	۷/۳۸۹۰	۲/۰۳۶۱	۰/۶۶۱۴	۸/۷۲۲۹	۳/۸۴۵۳	۰/۷۳۳۹	۴/۴۷۳۷	۴/۲۱۳۹	۰/۴۹۸۰	۷/۸۷۶۷	۵/۷۷۰۴	۰/۹۳۰۶

توجه: در کلیه جداول δX_m ، δY_m و δZ_m اختلاف مختصات تصحیح شده توسط مدل از مختصات معلوم ایستگاه، δX_{L1} ، δY_{L1} و δZ_{L1} اختلاف مختصات حاصل از پردازش با موج حامل L1 از مختصات معلوم ایستگاه، δX_{L3} ، δY_{L3} و δZ_{L3} اختلاف مختصات حاصل از پردازش با موج حامل L3 از مختصات معلوم ایستگاه، δr_m اختلاف طول بردار موقعیت حاصل از اعمال مدل مذکور از طول بردار موقعیت معلوم ایستگاه، δr_{L1} اختلاف طول بردار موقعیت حاصل از پردازش با موج حامل L1 از طول بردار موقعیت معلوم ایستگاه و δr_{L3} اختلاف طول بردار موقعیت حاصل از پردازش با موج حامل L3 از طول بردار موقعیت معلوم ایستگاه می باشد.

جدول ۶: درصد بهبود حاصل از اعمال مدل

$d_{ion} = a_0 + a_1 \cos(\omega t - \phi)$ روی مشاهدات روز دهم می در

ایستگاه دائمی KIT3.

پارامترها	در صد بهبود دقت پس از اعمال مدل یونسفری (معیار سنجش مختصات و طول بردار موقعیت حاصل از پردازش با موج حامل L3)	در صد بهبود دقت پس از اعمال مدل یونسفری (معیار سنجش مختصات و طول بردار موقعیت حاصل از پردازش با موج حامل L3)
مختصه X	۴۰/۱۱	۲۴/۸۸
مختصه Y	۹۸/۹۵	۸۴/۶۵
مختصه Z	۹۸/۹۵	۹۰/۲۵
طول بردار موقعیت r	۹۰/۸۰	۷۸/۸۴

نتایج حاصله نشان داد که اعمال مدل فوق روی مشاهدات ایستگاههای دیگر باعث بیشتر شدن خطاها نسبت به مدل شده است. بنابراین مشخص گردید که فرکانس اصلی دوم در نمودارها احتمالاً مربوط به یکی از بایاسهای دستگاهی ایستگاه بوده و به همین دلیل فقط نتایج مربوط به ایستگاه دائمی تهران را بهبود داده است. در جداول (۵) و (۶) دقتهای بدست آمده در ایستگاههای KIT3 و P05 با استفاده از مدل ۱ آورده شده است. با توجه به این جداول و با توجه به مطالب ذکر شده در فوق می توان چنین نتیجه گرفت که جهت ایجاد یک مدل ناحیه ای برای یونسفر در یک بازه زمانی معین، مدل ۱ بهترین مدل بوده که در بازه زمانی مورد مطالعه قادر است خطای یونسفر را تا شعاع تقریبی ۱۴۰۰ کیلومتر از ایستگاه دائمی به میزان ۰.۸۵٪ حذف نماید.

نتیجه گیری

در این مقاله مدلی جهت حذف خطای یونسفری ارائه شد که بهترین مزیت آن نسبت به مدل‌های موجود، سادگی محاسبات جهت بدست آوردن مدل می باشد. نتایج بررسی های انجام شده در این مقاله نشان داد که این مدل قادر است به طور متوسط تا ۰.۸۵٪ خطای یونسفری را در تعیین موقعیت مطلق حذف نموده و به همین جهت مدل مناسبی برای گیرنده های تک فرکانسه و به ویژه گیرنده های دستی که غالباً به منظور تعیین موقعیت مطلق به کار می روند، می باشد. همچنین در این بررسیها مشخص گردید که حوزه عملکرد این مدل به صورت ناحیه ای بوده و تا شعاع تقریبی ۱۴۰۰ کیلومتری ایستگاه دائمی با دقت بالایی قابل استفاده می باشد.

جدول ۵: درصد بهبود حاصل از اعمال مدل

$d_{ion} = a_0 + a_1 \cos(\omega t - \phi)$ روی مشاهدات روز بیست و

دوم می ۲۰۰۰ در ایستگاه P05 به فاصله ۱۰/۰۴۹ کیلومتری

از ایستگاه دائمی تهران .

پارامترها	در صد بهبود دقت پس از اعمال مدل یونسفری (معیار سنجش مختصات و طول بردار موقعیت حاصل از پردازش با موج حامل L3)
مختصه X	۹۳/۵۳
مختصه Y	۹۵/۰۴
مختصه Z	۹۳/۲۲
طول بردار موقعیت r	۹۳/۹۷

مراجع

- 1- Hugentobler, U., Schaer, S. and Fridez, P. (2001). *Manual of Bernese software*, Version 4.2. Astronomical Institute, University of Berne. Berne Switzerland.
- 2 – Bloomfield, P. (1975). *Fourier analysis of time series: an introduction*. John Wiley & Sons, New York.
- 3 – Brigham, E. O. (1974). *The fast fourier transform*. Prentice-Hall Publication. New Jersey.
- 4 – Brigham, E. O. (1988). *The fast fourier transform and its applications*. Prentice-Hall Publication. New Jersey.
- 5 – Cannon, M. E. (1997). *Sattelite Positioning*. Lectures Note 561 of the Department of Geomatics Engineering, University of Calgary. Calgary, Canada.

-
- 6 – Dettmering, D. (2003). *Der Nutzung des GPS zur dreidimensionalen Ionosphärenmodellierung*. Technical report no. 2003.1 of Department of Geodesy and Geoinformatics. University of Stuttgart. Stuttgart, Germany.
- 7 – Leick, A. (1995). *GPS satellite surveying*. John Wiley & Sons. New York.
- 8 – Seeber, G. (2003). *Satellite geodesy: foundations, methods and applications*. de Gruyter. Berlin-New York.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Selective Availability
- 2 - Precise ephemerides