

(تاریخ دریافت ۸۳/۵/۲۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۵/۴/۲۹، تاریخ تصویب ۸۵/۷/۸)

در این مقاله روشی عملی برای مدل سازی خطای تروپوسفریک در تعیین موقعیت مطلق با گیرنده‌های تعیین موقعیت جهانی ماهواره‌ای مانند GPS براساس مشاهدات ایستگاههای دائمی تعیین موقعیت ماهواره‌ای ارائه شده است. در این روش مدل ارائه شده برای تصحیح خطای تروپوسفریک بر خلاف روشهای معمول، که مبتنی بر استفاده از اندازه‌گیری شرایط جوی در حین مشاهده می‌باشند، بر مبنای زمان مشاهده صورت می‌گیرد. بر اساس آزمون‌های عددی مدل تصحیح خطای تروپوسفری ارائه شده، می‌توان حدود ۹۸٪ خطای تروپوسفریک را در محل ایستگاه دائمی در روزهای عدم به کار گیری در مدل سازی، حذف نمود. با توجه به نتایج موفقیت آمیز حاصل از آزمون‌های عددی توسعه این روش را برای کل کشور یا کل جهان را توصیه می‌نماییم.

: خطای تروپوسفری - مدل سازی - تعیین موقعیت ماهواره‌ای - GPS - GNSS - سربهای زمانی

موقعیت جهانی (GPS) فعالیت جهت مدل سازی خطای تروپوسفری توجه ویژه پیدا نمود. خلاصه‌ای از این فعالیت‌ها را در مقالات [۵ تا ۳۳] می‌توان یافت. این مقالات مربوط به سال‌های ۱۹۵۹ تا ۲۰۰۳ بوده و مسلماً با توجه به پیچیدگی موضوع، تلاش‌ها هم چنان در جهت مدل سازی خطای انکسار تروپوسفری ادامه دارد. مقاله حاضر بیانگر تلاش گروه مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه تهران در جهت ارائه روشی جدید در جهت مدل سازی خطای تروپوسفری برحسب زمان می‌باشد.

ایده این روش از امکانات و واقعیت‌های ذیل نشأت گرفته شده است:

- وجود و افزایش روزافزون ایستگاه‌های دائمی تعیین موقعیت GPS برای کاربردهای ژئودینامیک و ناوبری.
- معلوم بودن مختصات دقیق ایستگاه‌های دائمی GPS.
- رؤیت وابستگی<sup>۴</sup> خطای تروپوسفری با تغییرات شرایط جوی در مشاهدات دراز مدت GPS.
- تکرار روزانه، فصلی و سالانه خطاهای تروپوسفری.
- امکان یافتن تغییرات روزانه، فصلی و سالانه خطاهای تروپوسفری در سری زمانی مشاهدات ایستگاه‌های دائمی GPS.

توسعه و گسترش کاربرد سیستم‌های ناوبری جهانی ماهواره‌ای (GNSS<sup>۱</sup>) و نیاز روز افزون به دقت‌های بالا توسط این سیستمها، لزوم کاهش و یا حذف در حد امکان خطاها را ایجاب می‌کند. خطاهای اثر گذارنده بر سیستم-های ناوبری جهانی ماهواره‌ای که GPS و GLONASS مثال هایی از آن می‌باشند عمدتاً عبارتند از: (۱) خطای چند مسیره شدن<sup>۲</sup>، (۲) جابجایی مرکز فاز آنتن، (۳) خطاهای بخش‌های الکترونیکی گیرنده، (۴) خطای انکسار یونسفری، (۵) خطای انکسار تروپوسفری. در مورد مدل سازی و کاهش این خطاها تا کنون تلاش‌های بسیاری صورت گرفته و موفقیت‌های بسیار زیادی در مورد مدل سازی و حذف غالب این خطاها حاصل گردیده است. مدل سازی خطای انکسار تروپوسفری در این میان به دلیل تغییرات بسیار زیاد عوامل جوی از دشواری بالایی برخوردار بوده و تا به حال امکان ارائه مدلی که بتواند به صورت موثر در کلیه نقاط جهان به کار برده شود وجود نداشته است. آغاز تلاش‌ها در جهت مدل سازی خطای تروپوسفری به دهه ۶۰ میلادی باز می‌گردد [۱]. از آن پس با ساخت نخستین ماهواره تعیین موقعیت به نام داپلر<sup>۳</sup> تلاش به منظور مدل سازی و حذف خطای تروپوسفری افزایش یافت [۲-۴]. با ایجاد سیستم تعیین

با توجه به نکات مذکور در این مقاله از وابستگی زمانی خطای تروپوسفری به شرایط جوی به عنوان ملاکی جهت مدل سازی خطای تروپوسفری در تعیین موقعیت مطلق استفاده گردید.

سیگنال های ارسالی از ماهواره در مسیر خود از لایه های مختلف اتمسفر عبور کرده و دستخوش انکسار می گردند که بصورت تأخیر در زمان دریافت امواج جلوه گر می شود. تأخیر زمانی اتمسفری سهم عمده ای در خطاهای مشاهدات GPS داشته، از این رو مطالعه اتمسفر و تأثیر آن بر سیگنال های GPS از اهمیت بالایی برخوردار است. اتمسفر از دو بخش اصلی "تروپوسفر" و "یونسفر" تشکیل شده است. یونسفر بخش بالایی اتمسفر است که در ارتفاع حدود ۵۰-۱۵۰۰ کیلومتر واقع شده است و حاوی الکترونهای آزاد می باشد. یونسفر یک محیط دیسپرسیو<sup>۵</sup> بوده و ضریب شکست امواج عبوری از آن به فرکانس امواج بستگی دارد. بدین خاطر با استفاده از یک گیرنده دو فرکانسه می توان اثر انکسار یونسفری را توسط ترکیب خطی فرکانس دو موج حذف نمود.

بخش خنثی اتمسفر شامل تروپوسفر، تروپوپاز و استراتوسفر می باشد. پایین ترین بخش اتمسفر تا ارتفاع حدود ۴۰ km ادامه می یابد. اثر این بخش روی مسیر امواج به صورت تأخیر در دریافت بوده که اصطلاحاً انکسار تروپوسفری نامیده می شود. برای امواج با فرکانس زیر ۳۰ GHz تروپوسفر مانند یک محیط غیر دیسپرسیو<sup>۶</sup> است، بدین معنا که تأثیر آن بر روی امواج الکترومغناطیس بستگی به فرکانس امواج نداشته و لذا روش هایی که برای حذف خطای یونسفری با استفاده از فرکانسهای متفاوت وجود دارد، نمی تواند برای حذف اثر تروپوسفری بکار برده شود. تأخیر تروپوسفری بستگی به درجه حرارت، رطوبت و فشار داشته و بر حسب ارتفاع محل مشاهده و توپوگرافی منطقه تغییر می کند. مقدار این خطا حدود ۲-۲/۵m در جهت قائم و ۲۰-۲۸m در زاویه ارتفاعی ۵ درجه می باشد [۳۴]. در تعیین موقعیت نسبی از آنجایی که امواج دریافتی از ماهواره در دو ایستگاه اندازه گیری از محیط تقریباً یکسانی عبور می کند این اثر در تفاضل مشاهدات تا حد زیادی از بین می رود. اما در صورتی که اختلاف ارتفاع دو ایستگاه زیاد بوده و یا طول باز بلند باشد، شرایط جوی در دو سر طول باز دارای اثرات مستقل<sup>۷</sup> گردیده، بدین خاطر مقداری از این خطا حتی

پس از تفاضل مشاهدات همزمان نیز بر روی نتایج باقی می ماند. با توجه به موقعیت ماهواره ها، بیشترین اثر خطای تروپوسفری بر روی ارتفاع بیضوی (مؤلفه سوم) مختصات می باشد. تا کنون مدل های مختلفی برای حذف خطای تروپوسفری ارائه شده است که با استفاده از مشاهده شرایط جوی (مانند دما، فشار و رطوبت) تصحیح تروپوسفری را محاسبه می کند. این تصحیحات اگر بر مبنای مشاهدات جوی در ایستگاه مشاهده انجام پذیرند، تقریبی بوده بنابراین در پروژه هایی که نیازمند به دقت بالا می باشد از دستگاه های گران قیمت رطوبت سنج رادیومتری<sup>۸</sup> (WVR) یا رادیوسوند<sup>۹</sup> استفاده می شود. این روشها تنها برای تعیین موقعیت استاتیک مفید بوده و نمی توانند جوابگوی تعیین موقعیت آنی<sup>۱۰</sup> باشند. بدین خاطر در این مقاله برای پاسخگویی به نیاز حذف خطای تروپوسفری در تعیین موقعیت آنی، مدلی زمانی برای تصحیح این خطا ارائه شده است. پیش از پرداختن به جزئیات این روش، اصول کلی مدل سازی یک پدیده متغیر در زمان، در قالب یک سری زمانی، توضیح داده می شود.

سری زمانی به مشاهداتی از یک پدیده در طی زمان اطلاق می گردد. مدل سازی یک پدیده از طریق یک سری زمانی شامل مراحل ذیل است:

- بررسی رفتار تغییرات زمانی بر اساس دانش فیزیکی و ریاضی از پدیده مورد مشاهده.
- انتخاب توابع پایه با توجه به رفتار سری زمانی.
- برآورد ضرایب توابع پایه

$$l(\tau_i) + r(\tau_i) = \sum_{j=1}^n \lambda_j Q_j(\tau_i) \quad (1)$$

$l(\tau_i)$ : سری زمانی

$r(\tau_i)$ : خطا یا باقیمانده مشاهدات

$\lambda_j$ : ضرایب توابع پایه

$Q_j$ : توابع پایه

در صورت تناوبی بودن سری زمانی بهترین توابع پایه برای مدل سازی، توابع پایه مثلثاتی می باشند [۳۵].

$$l(\tau_j) + r(\tau_j) = a_0 + \sum_{s=1}^{n_j} (a_s \cos(\omega_s \tau_j) + b_s \sin(\omega_s \tau_j)) \quad (2)$$

- اعمال تصحیحات خطای ساعت ماهواره از طریق اطلاعات ارائه شده توسط IGS و NGS در سایت اینترنتی مربوطه.
- استفاده از آنتن چوک رینگ<sup>۱۵</sup> به منظور کاهش احتمال وقوع چند مسیره شدن امواج GPS. به علاوه با توجه به اندازه خطای تروپوسفری، لازم است از مشاهدات فاز موج حامل در تعیین موقعیت (تعیین مختصات) استفاده گردد. با بررسی نرم افزارهای موجود متوجه گشتیم که هیچ یک از نرم افزارهای تجاری موجود امکان تعیین موقعیت مطلق با استفاده از موج حامل را به کاربر نمی‌دهند. لذا بدین منظور نرم افزاری تحت متلب<sup>۱۶</sup> جهت محاسبه مختصات مطلق از طریق فاز موج حامل تهیه و کلیه تصحیحات فوق الذکر را در این نرم افزار منظور گردید.

:

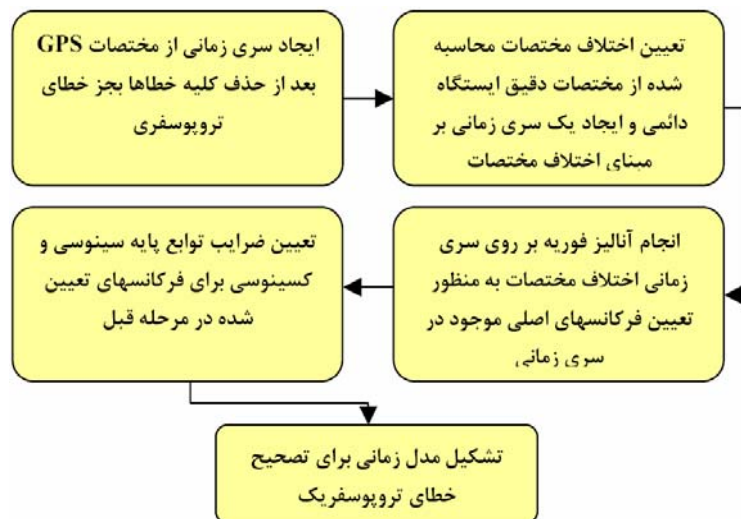
به منظور برآورد عملکرد مدل زمانی خطای تروپوسفری و برآورد دقت آن، مشاهدات یکسال (سال ۲۰۰۰ میلادی) ایستگاه دائمی تهران واقع در سازمان نقشه برداری کشور مورد استفاده قرار گرفت. برای مشخص کردن فرکانس‌های اصلی موجود در سری زمانی مشاهدات ایستگاه دائمی، ابتدا مشاهدات یک ماه این ایستگاه را در اپکهای ۱۵ دقیقه‌ای مورد آنالیز طیفی قرار دادیم. شکل (۲) پاور اسپکتروم این آنالیز را نشان می‌دهد.

در رابطه (۲)  $n_f$  تعداد توابع پایه بر اساس تعداد فرکانس‌های لازم برای مدل سازی سری زمانی است. با در اختیار داشتن سری زمانی  $l(\tau_i)$  و معلوم بودن فرکانسها  $\omega_s$  می‌توان ضرایب مجهول  $a_s$ ،  $b_s$  و باقی مانده‌های  $r(\tau_i)$  را، به عنوان مثال، از طریق سرشکنی کمترین مربعات، محاسبه نمود. برای تعیین فرکانس‌های اصلی  $\omega_s$  یک سری زمانی به عنوان مثال، می‌توان از تبدیل فوریه و پاور اسپکتروم<sup>۱۱</sup> استفاده کرد.

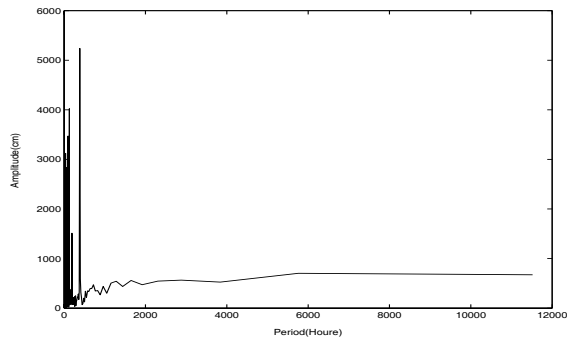
همان گونه که ذکر گردید هدف ما ارائه مدلی بر حسب زمان برای خطای تروپوسفری بوده که بتواند جوابگوی نیاز تعیین موقعیت آنی GPS باشد. برای این منظور لازم است ابتدا یک سری زمانی از مشاهدات GPS تشکیل شود. مناسب‌ترین راه برای این منظور استفاده از مشاهدات ایستگاه‌های دائمی GPS می‌باشد. شکل (۱) مراحل اصلی این روش را نشان می‌دهد.

مهم‌ترین نکته در ایجاد یک سری زمانی بر مبنای اختلاف مختصات GPS به منظور مدل سازی خطای تروپوسفری، حذف کلیه خطاهای GPS بجز خطای تروپوسفری می‌باشد. برای این منظور لازم است به صورت ذیل عمل گردد:

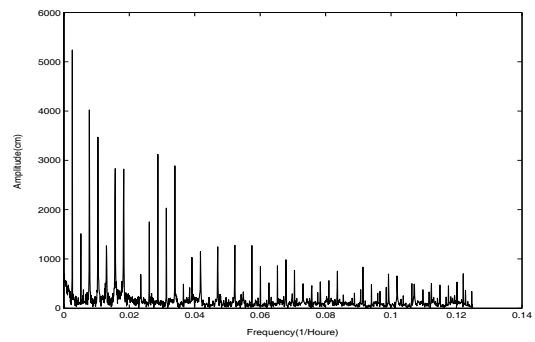
- استفاده از ترکیب خطی L3 مشاهدات بر روی دو موج حامل L1 و L2 به منظور حذف خطای یونسفری.
- استفاده از مختصات دقیق<sup>۱۲</sup> ماهواره‌های GPS. این مختصات دقیق از طریق سایت‌های اینترنتی IGS<sup>۱۳</sup> و NGS<sup>۱۴</sup> آمریکا در دسترس می‌باشند.



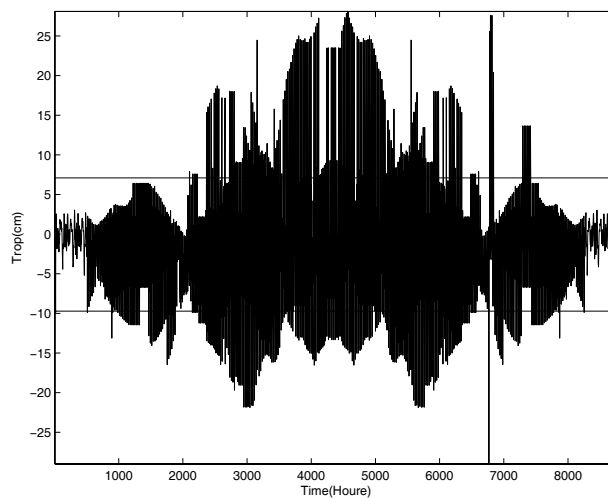
:



(ب)



(الف)



از طریق تبدیل فوریه با استفاده از پاور اسپکتروم، فرکانسهای اصلی سری زمانی، مورد جستجو قرار گرفتند. شکل (۴-الف) نشان دهنده پاور اسپکتروم حاصل است. شکل (۴-ب)، همان شکل (۴-الف) اما بر حسب پریود می باشد.

با توجه به شکل (۳) سری زمانی از پنج موج اصلی با پریودهای ۲۴، ۱۲، ۸، ۴ ساعته و ۳۶۵ روز تشکیل شده است. فرکانس این امواج را می توان به عنوان مقادیر اولیه مدل ذیل در نظر گرفته و از طریق کمترین مربعات مجهولات مدل، شامل ضرایب توابع سینوسی و کسینوسی و نیز مقادیر دقیق تر فرکانس ها را از طریق سری زمانی  $\{\Delta h\}$  بدست آورد.

$$\Delta h(t_i) = a_0 + \sum_{s=1}^5 (a_s^h \cos(\omega_s^h t_i) + b_s^h \sin(\omega_s^h t_i)) \quad (3)$$

معادله فوق یک معادله غیر خطی نسبت به فرکانس  $\omega$  می باشد. این معادله را می توان از طریق بسط

با توجه به شکل (۲) بالاترین فرکانس موجود در سری زمانی دارای تناوب ۴ ساعته است. بنابراین در پردازش سیگنال مشاهدات یک ساله ایستگاه دائمی تهران لازم است مشاهدات را در فواصل زمانی ۲ ساعته پردازش نماییم. در تئوری نمونه برداری چنین فرکانسی را "فرکانس نایکوئیست"<sup>۱۷</sup> می نامند. قبل از انجام آنالیز طیفی بر روی مشاهدات، کلیه تصحیحات ذکر شده در بخش های قبلی اعمال گردیدند.

شکل (۳) نشان دهنده تغییرات اختلاف مختصات محاسبه شده در طی سال ۲۰۰۰ میلادی برای ایستگاه دائمی تهران واقع در سازمان نقشه برداری است. به علاوه با توجه به اینکه بیشترین اثر تأخیر تروپوسفری بر روی مؤلفه ارتفاعی می باشد، مدل سازی اثر تروپوسفری تنها بر روی مؤلفه ارتفاعی (بر حسب ارتفاع بیضوی) انجام گرفته است.

به سری تیلور و صرف نظر نمودن از جملات غیر خطی، خطی به صورت ذیل خطی نمود:

$$l = f(x_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0} (x - x_0)$$

$$\Delta l = A \Delta x \quad (4)$$

به طوری که

$$\Delta l = l - f(x_0)$$

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0}$$

$$\Delta x = x - x_0$$

با تشکیل معادلات بیشتری از مجهولات در معادله (۴) با معلوم بودن ماتریس ضرایب A و بردار مشاهدات جزئی  $\Delta l$  می‌توان بردار مجهولات جزئی  $\Delta x$  را از طریق کمترین مربعات بدست آورد.

$$\Delta x = (A^T P A)^{-1} A^T P \Delta l \quad (5)$$

ضرایب مدل هارمونیک (۳) در پنج فرکانس مذکور برای سری زمانی مورد مطالعه، محاسبه و در جدول (۱) درج گردیده است. لازم به ذکر است که حذف ترند خطی<sup>۱۸</sup> باید قبل از انجام آنالیز طیفی صورت گیرد. عملی که ما نیز در محاسبات خود پیش از آنالیز طیفی انجام دادیم. شکل (۵) نشان دهنده تغییرات بردار اختلاف مختصات تصحیح شده از طریق مدل محاسبه شده می‌باشد.

بر اساس نمودار شکل (۵) و نتایج آماری جدول (۲) به این نتیجه می‌رسیم که اعمال مدل باعث بهبود میانگین بردار اختلاف ارتفاع به میزان ۹۹٪ و بهبود انحراف معیار به میزان ۵۶٪ گردیده است. لازم به توضیح است همان طور که در شکل (۵) ملاحظه می‌گردد، مقدار ماکزیمم ۳۳/۱۵۵ متر موجود در جدول (۲)، مربوط به یک مشاهده پرت بوده که به وضوح فاقد ارزش آماری است. بنابر این مدل بدست آمده، برای حذف خطای تروپوسفری در ایستگاه محاسبه بسیار موفق می‌باشد.

برای بررسی توانمندی مدل در پیش بینی خطای تروپوسفری در زمان های دیگر، میزان اثر آن بر روی مشاهدات خود ایستگاه در زمانهای دیگر را مورد آزمایش قرار دادیم. برای این منظور مشاهدات ایستگاه در ۲۱ آگوست ۲۰۰۲ برای مدت ۲۴ ساعت توسط نرم افزار تولید شده محاسبه و مانند آنچه که در بخش قبل ذکر گردید در فواصل زمانی ۲ ساعته مورد پردازش و سرشکنی قرار

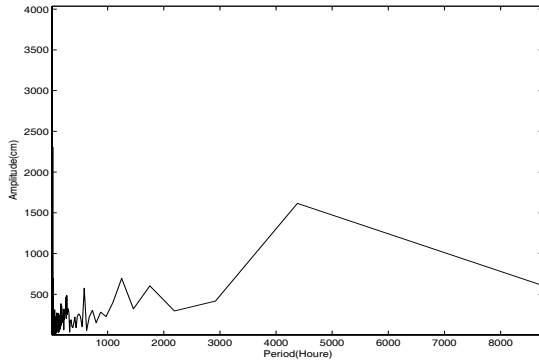
گرفت. حاصل پردازش، سری زمانی اختلاف مختصات نسبت به مختصات معلوم ایستگاه می‌باشد. شکل (۶-ب) نمایش سری مشاهدات بعد از اعمال مدل تصحیح خطای تروپوسفری محاسبه شده می‌باشد. بررسی‌های آماری نتایج حاصل در جدول (۳) آورده شده است. بر اساس نتایج حاصل، مدل محاسبه شده، باعث بهبود میانگین بردار اختلاف ارتفاع به میزان ۹۸٪ و بهبود انحراف معیار به میزان ۷۶٪ برای مشاهدات ۲ سال بعد از زمان مدل سازی گردیده است. بنابراین مدل مذکور برای پیش بینی در زمان های دیگر نیز مناسب می‌باشد.

برای بررسی میزان وابستگی محلی مدل مذکور یک آزمایش صحرائی ترتیب و چند ایستگاه در فواصل و آزیموت های مختلف در نظر گرفته شد. این ایستگاه ها شامل یک ایستگاه در فاصله تقریباً 1m از ایستگاه دائمی و چهار ایستگاه دیگر (B, C, D, E) در فواصل و آزیموتها مشخص شده در جدول (۴) نسبت به ایستگاه مورد مطالعه (S) می‌باشند. ایستگاه مورد مطالعه همان ایستگاه دائمی GPS سازمان نقشه برداری کشور است. شکل (۷) نشان دهنده وضعیت این چند ایستگاه نسبت به هم می‌باشد.

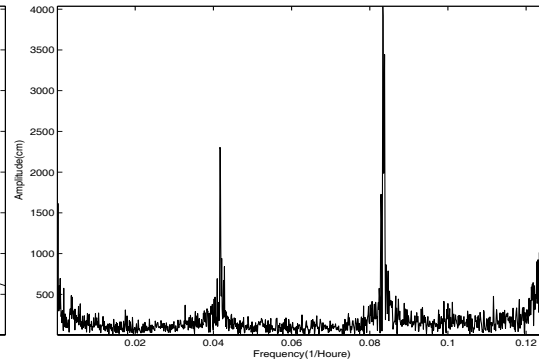
مشاهدات ایستگاه (A) در ۱۷ سپتامبر ۲۰۰۲ برای مدت ۲۴ ساعت انجام و مانند حالت قبل مورد پردازش قرار گرفت. حاصل پردازش، سری زمانی اختلاف مختصات نسبت به مختصات معلوم ایستگاه است. شکل (۸-الف) نمایش سری زمانی تغییرات مولفه ارتفاعی و میزان تطابق مدل محاسبه شده با این تغییرات در ایستگاه A است. شکل (۸-ب) نمایش دهنده تغییرات مولفه ارتفاعی بعد از اعمال تصحیح خطای تروپوسفری ایستگاه دائمی GPS می‌باشد. همان گونه که در شکل (۸-الف) ملاحظه می‌گردد، تصحیح خطای تروپوسفری حاصل از مدل، کاملاً با تغییرات مولفه ارتفاعی هم‌فاز بوده، اما به دلیل اختلاف دامنه نتوانسته کلیه تغییرات مولفه ارتفاعی را حذف و تغییرات نشان داده شده در شکل (۸-ب) همچنان بر روی مولفه ارتفاعی باقی مانده است. با توجه به جدول (۵) مقادیر ماکزیمم و مینیمم خطا در ایستگاه A کاهش یافته به ویژه میانگین قدر مطلق خطا از ۲ به ۰/۹۶ سانتیمتر و انحراف معیار از ۳/۰۱ به ۲/۲ کاهش یافته است. همچنین مشاهدات ایستگاههای (B, C, D, E) که هر کدام تقریباً

در چه فاصله زمانی انجام شده، با نتایج حاصل از مدل در زمان متناظر هر یک مقایسه و نتایج حاصل در جدول (۵) ارائه شده است.

برای فاصله زمانی یک ساعت در ۲۶ ژوئن ۲۰۰۱ انجام شده‌اند به صورت یکجا مورد پردازش و سرشکنی قرار گرفته‌اند و نتیجه این محاسبات یک مختصات برای هر ایستگاه در زمان مشاهده بود. با توجه به اینکه این نتایج

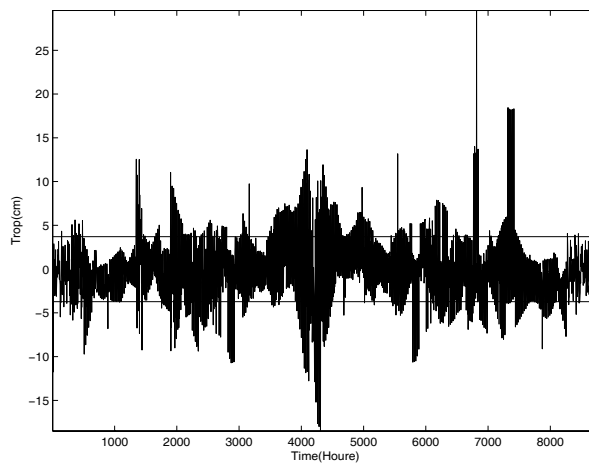


(ب)

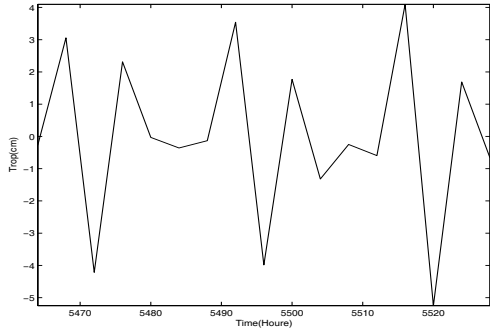


(الف)

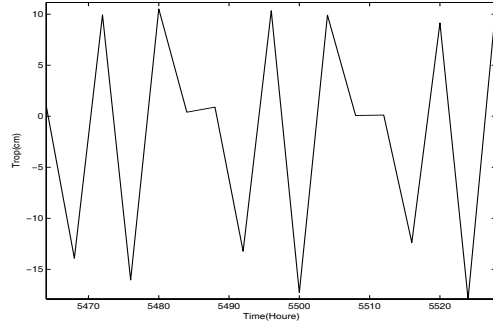
ضرایب	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
مدل	_____	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
$dh$	۳/۶۴۷	۱/۹۰۹	۳/۶۴۷	-۲/۰۷۵	-۰/۵۲۵	-۱/۳۰۹
	-۰/۵۳۵	۰/۰۰۰	۰/۵۳۵	-۰/۳۵۴	-۰/۱۷۱	_____



	بردار اختلاف ارتفاع بر حسب متر	بردار اختلاف ارتفاع تصحیح شده به متر
min	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲
max	۲۸/۹۹۷	۳۳/۱۵۵
mean	-۱/۳۰۹	-۰/۰۰۷
std	۸/۴۰۳	۳/۷۱۱



(ب)

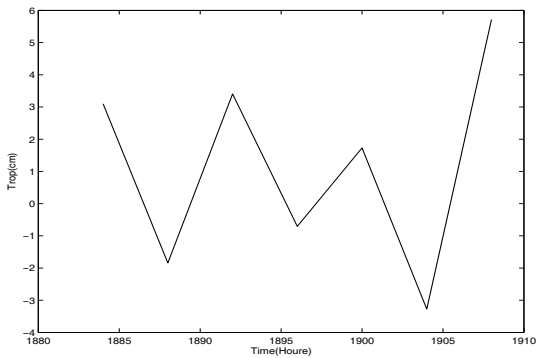
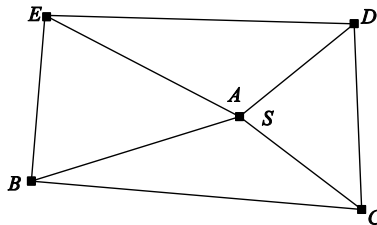


(الف)

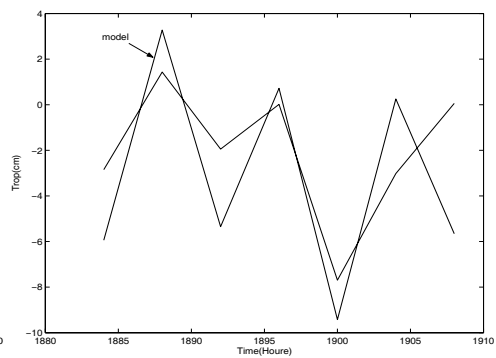
	بردار اختلاف ارتفاع بر حسب متر	بردار اختلاف ارتفاع تصحیح شده بر حسب متر
min	۰/۰۷۴	۰/۰۳۰
max	۱۷/۹۰۹	۵/۲۴۷
mean	-۱/۶۰۴	-۰/۰۳۵
std	۱۱/۱۲۱	۲/۶۶۹

**B C D E**

ایستگاه	فاصله از ایستگاه مورد مطالعه (m)	(rad)
B	۳۱۱۰۴/۱	۲۳۸/۱۳
C	۲۸۴۳۶/۷	۱۳۷/۲۴
D	۳۲۲۳۳/۲	۳۰۹/۱۶
E	۲۶۷۲۰/۷	۴۳/۵۰



(ب)



(الف)

**A**

A

	بردار اختلاف ارتفاع بر حسب متر	بردار اختلاف ارتفاع تصحیح شده بر حسب متر
min	۰/۰۱۶	۰/۷۰۶
max	۷/۶۹۵	۵/۷۱۵
mean	-۲/۰۰۱	-۰/۹۶۲
std	۳/۰۰۸	۲/۲۱۵

:

ایستگاه	اختلاف ارتفاع بر حسب متر	درصد بهبود توسط مدل
B	۱۰/۶۰۹	%۵۲
C	۱۰/۸۱۳	%۵۳
D	۱۰/۵۹۷	%۵۲
E	۱۰/۹۰۱	%۵۳

انحراف معیار به میزان ۷۶٪ برای مشاهده دو سال بعد از زمان مدل سازی گردیده است.

• مدل حاصل بدین طریق بسیار وابسته به مکان ایستگاه دائمی GPS بوده بطوری که صحت مدل برای حذف خطای تروپوسفری در ایستگاهی به فاصله ۱ متر به ۵۲٪ کاهش یافته و این درصد موفقیت در حذف خطای تروپوسفری همچنان برای نقاط در فواصل ۳۱ کیلومتر، ۲۸ کیلومتر، ۳۲ کیلومتر و ۲۶ کیلومتر از ایستگاه دائمی بکار رفته در مدل سازی، در حد ۵۲٪ باقی می ماند.

• بنابر این مدل تروپوسفری حاصل می تواند کمک بسیاری در تعیین موقعیت آنی دقیق و تقریباً عاری از اثر خطای تروپوسفری در ایستگاه دائمی نماید که جهت مقاصد ناوبری، به عنوان مثال مخابره تصحیحات DGPS حائز اهمیت بسیار می باشد.

این پژوهش با استفاده از اعتبارات دانشگاه تهران و به عنوان طرح شماره ۸۱۵۱۰۰۷/۱/۰۴ انجام شده است که بدین وسیله مراتب تشکر و قدرانی نویسندگان از دانشگاه تهران اعلام می گردد. از داوران محترم مقاله که با نظرات و پیشنهادهای خود موجبات بهبود نگارش را پدید آوردند، سپاسگزاری می گردد.

با توجه به محاسبات و مشاهدات انجام گرفته پیام

اصلی مقاله را می توان در عبارت ذیل خلاصه نمود:

"ایستگاه های دائمی تعیین موقعیت GPS که برای اهداف ژئودینامیک و ناوبری ایجاد گردیده اند می توانند به عنوان ابزاری در جهت مدل سازی خطای تروپوسفری در تعیین موقعیت آنی با GPS بکار روند."

نتایج حاصل از مشاهدات صورت گرفته به طور خلاصه به شرح ذیل می باشد:

- اثر خطای تروپوسفری در سری زمانی تشکیل داده از مشاهدات ایستگاه های دائمی GPS قابل رؤیت است.
- خطای تروپوسفری در ایستگاه های دائمی GPS دارای خاصیت تکرار شونده بوده و از این خاصیت می توان به عنوان ملاکی در مدل سازی تجربی خطای تروپوسفری بهره جست.
- بر اساس مطالعه موردی انجام شده در ایستگاه دائمی سازمان نقشه برداری کشور واقع در تهران، مدل تصحیح تروپوسفری بدست آمده از طریق آنالیز طیفی مشاهدات این ایستگاه دائمی می تواند باعث بهبود میانگین بردار اختلاف ارتفاع به میزان ۹۹٪ و بهبود انحراف معیار به میزان ۵۶٪ در همان محدوده زمانی مدل سازی گردد. این مدل همچنین باعث بهبودی میانگین بردار اختلاف ارتفاع به میزان ۹۸٪ و بهبود



- 
- 2 - Hopfield, H. S. (1963). "The effect of tropospheric refraction on the Doppler shift of a satellite signal." *Journal of Geophysical Research*. Vol. 68, PP. 5157-5168.
  - 3 - Hopfield, H. S. (1969). "Two-quadratic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 74, PP. 4487-4499.
  - 4 - Hopfield, H. S. (1971). "Tropospheric effect on electromagnetically measured range: Prediction from surface weather data." *Radio Science*, Vol. 6, PP. 357-367.
  - 5 - Schmidt, J. R. (1975). *Computer error analysis of tropospheric effects for the NAVSTAR Global Positioning System*. MS thesis, U.S. Air Force Institute of Technology, GE/EE/75-7.
  - 6 - Hopfield, H. S. (1978). "Tropospheric correction of electro-magnetic ranging signals to a satellite: Study of parameters." *Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Distance Measurement and the Influence of Atmospheric refraction*, Ed. P. Richardus, Wageningen, The Netherlands, 23-28 May, 1977, Netherlands Geodetic Commission, Delft, The Netherlands, PP. 205-215.
  - 7 - Hartmann, G. K. and Leitinger, R. (1984). Range errors due ionospheric and tropospheric effects for signal frequencies above 100 MHz. *Bulletin Geodesique*. Vol. 58, PP. 109-136.
  - 8 - Askne, J. and Nordius, H. (1987). Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science*. Vol. 22, PP. 379-386.
  - 9 - Altshuler E.E. (1998). "Tropospheric range-error corrections for the Global Positioning System," *IEEE Trans. Antennas Propagat*. Vol. 46, PP. 643-649.
  - 10 - Bar-Sever, Y. E., Kroger, P. M. and Borjesson, J. A. (1998). "Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver." *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, No. B3, PP. 5019-5036.
  - 11 - Chang, C. C. and Tseng, C. L. (1999). "Testing on tropospheric modelling for GPS tracking stations in Taiwan." *Geomatics Research Australasia*. Vol.70, PP. 77-94.
  - 12 - Collins, P. and Langley, R. B. (1999). *Tropospheric delay prediction for the WAAS user*, GPS World. Vol. 10, No. 7, PP.52-58.
  - 13 - Mendes, V. B. and Langley, R. B. (1999). *Tropospheric zenith delay prediction accuracy for high-precision GPS positioning and navigation*. Navigation. Vol. 46, PP.1, PP. 25-34.
  - 14 - Ruffini, G. et al. (1999). "Estimation of tropospheric zenith delay and gradients over the Madrid area using GPS and WVR data." *Geophys. Res. Lett*. Vol. 26, No. 4, PP. 447-450.
  - 15 - Flores, A., Ruffini, G. and Rius, A. (2000) "4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays." *Ann. Geophysicae*. Vol. 18, No. 2, PP. 223-234.
  - 16 - Flores, A., Escudero, A., Sedo ,M. J. and Rius, A. (2000). "A near real time system for tropospheric monitoring using IGS hourly data." *Earth Planets and Space*. Vol. 52, No. 10, PP. 681-684.
  - 17 - Flores, A. et al. (2000). "Sensing atmospheric structure: Tropospheric tomographic results of the small-scale GPS campaign at the Onsala Space Observatory." *Earth Planets and Space*, Vol. 52, No. 11, PP. 941-945.
  - 18 - Hay, C. and Wong, J. (2000). *Enhancing GPS: Tropospheric delay prediction at the Master control Station*. GPS World. Vol. 11, No.1, PP. 56-62.
  - 19 - Hirahara, K. (2000). "Local GPS tropospheric tomography." *Earth Planets and Space*. Vol. 52, No. 11, PP. 935-939.
  - 20 - Boehm, J., Schuh, H. and Weber, R. (2001). "Comparison of tropospheric gradients determined by VLBI and GPS." *Phys. Chem. Earth*. Vol. 26, No. A6-8, PP. 385-388.
  - 21 - Ge, M., Calais, E. and Haase, J. (2001). "Automatic orbit quality control for near real-time GPS zenith tropospheric delay estimation." *Phys. Chem. Earth*. Vol. 26, No. A3, PP. 177-181.
-

- 
- 22 - Haase, J., Vedel, H., Ge, M. and Calais, E. (2001). "GPS zenith tropospheric delay (ZDT) variability in the Mediterranean." *Phys. Chem. Earth*. Vol. 26, No. A6-8, PP. 439-443.
- 23 - Kleijer, F. (2001). "Mapping function induced bias in tropospheric delay estimation using GPS." *Phys. Chem. Earth*. Vol. 26, No. A6-8, PP. 467-470.
- 24 - Penna, N., Dodson, A. and Chen, W. (2001). "Assessment of EGNOS tropospheric correction model." *J. Navig.* Vol. 54, No. 1, PP. 37-55.
- 25 - Rocken, C., Sokolovskiy, S., Johnson, J. M. and Hunt, D. (2001). "Improved mapping of tropospheric delays." *J. Atmos. Oceanic Technol.* Vol. 18, No.7, PP. 1205-1213.
- 26 - Tsujii, T., Wang, J., Rizos, C., Harigae, M. and Inagaki, T. (2001). "Tropospheric delay mitigation for high-altitude vehicle positioning." *Geomatics Research Australasia*. Vol. 75, PP. 87-106.
- 27 - Zhang, J. and Lachapelle, G. (2001). "Precise estimation of residual tropospheric delays using a regional GPS network for real-time kinematic applications." *J. Geod.* Vol. 75, No. 5-6, PP. 255-266.
- 28 - Van der Hoeven, A., Hanssen, R. F. and Ambrosious, B. (2002). "Tropospheric delay estimation and analysis using GPS and SAR interferometry." *Phys. Chem. Earth*. Vol. 27, No. A4-5, PP. 385-390.
- 29 - Ao, C. O., Meehan, T. K., Hajj, G. A., Mannucci A. J. and Beyerle, G. (2003). "Lower tropospheric refractivity bias in GPS occultation retrievals." *J. Geophys. Res.* Vol. 108, No. D18, PP. ACL6/1-16.
- 30 - Chen, C. S., Kuo, L. C. and Chang, Y. M. (2003). "Strategies to mitigate the tropospheric error in GPS height." *Geomatics Research Australasia*, Vol. 78, PP. 37-65.
- 31 - Iwabuchi, T., Miyazaki, S., Heki, K., Naito, I. and Hatanaka, Y. (2003). "An impact of estimating tropospheric delay gradients on tropospheric delay estimations in the summer using the Japanese nationwide GPS array." *J. Geophys. Res.* Vol. 108, No. D10, PP. ACL10/1-16.
- 32 - Haase, J., Ge, M. R., Vedel, H. and Calais, E. (2003). "Accuracy and variability of GPS tropospheric delay measurements of water vapor in the western Mediterranean." *J. Appl. Meteor.* Vol. 42, No. 11, PP. 1547-1568.
- 33 - Miyazaki, S., Iwabuchi, T., Heki, K. and Naito, I. (2003). "An impact of estimating tropospheric delay gradient on precise positioning in the summer using the Japanese nationwide GPS array." *J. Geophys. Res.* Vol. 108, No. B7, PP. ETG3/1-11.
- 34 - Leick, A. (1994). *GPS satellite surveying*. John Wiley & Sons. New York.
- 35 - Vanicek, P. and Krakiwsky, E. (1986). *Geodesy the Concepts*. Elsevier Science Publishers B.V. The Netherlands. 2<sup>nd</sup> edition 1986.

1 - Global Navigation Satellite System ( GNSS )  
 2 - Multipath  
 3 - Doppler Satellite  
 4 - Correlation  
 5 - Dispersive  
 6 - Non- dispersive  
 7 - Decorrelation Effects  
 8 - Water Vapor Radiometer  
 9 - Radiosonde  
 10 - Real Time Positioning  
 11 - Power Spectrum  
 12 - Precise Ephemeris

13 - International GPS Service (IGS)  
 14 - National Geological Survey (NGS)  
 15 - Chock Ring  
 16 - MATLAB ®  
 17 - Nyquist Frequency  
 18 - Linear Trend

---