

تعیین و بهبود دقت ارتفاع اورتومتريک و ژئودتيک با سامانه NRTK

مطالعه موردی سامانه شمیم

علی فتاح المنان^{۱*}، ایرج جزيرئيان^۲، جمال عسگری^۳

^۱ فارغ التحصيل کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

a.fattah67@gmail.com

^۲ استادیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

jazirian@kntu.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه اصفهان

asgari@eng.ui.ca.ir

(دریافت: خرداد ۱۴۰۲، تصویب: بهمن ۱۴۰۳)

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از شبکه‌های تعیین موقعیت کینماتیک آنی به دلیل مزایای آن، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. دقت و سرعت بالای تعیین موقعیت از بزرگترین مزیت‌های این شبکه‌ها می‌باشد، بنابراین استفاده از مشاهدات در سامانه‌های NRTK در پروژه‌های مطالعاتی و اجرایی جهت تعیین مؤلفه ارتفاعی نقاط که به شکل سنتی زمان‌بر و پرهزینه می‌باشند، مورد توجه می‌باشد. در این مقاله جنبه‌های عملی تعیین ارتفاع به روش تعیین موقعیت آنی در سامانه NRTK مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش اول مقاله، هدف بررسی و تعیین زمان بهینه انجام مشاهدات به روش NRTK و استفاده از تکنیک میانگین‌گیری متحرک جهت دستیابی به بالاترین دقت برای ارتفاع ژئودتیک نقاط می‌باشد. بدین منظور انجام مشاهدات برای ۴ ایستگاه واقع در شهر اصفهان و به مدت ۲۰ دقیقه با نرخ زمانی یک ثانیه تکرار شد. همچنین مشاهدات استاتیک ایستگاه‌ها به منظور استخراج مختصات دقیق آن‌ها نیز انجام گرفت. در بخش دوم با توجه به در اختیار داشتن مدل ژئوئید شهر اصفهان، دقت ارتفاع اورتومتريک حاصل از تعیین موقعیت آنی در سامانه NRTK مورد ارزیابی قرار گرفت. ۳۳ بنچ مارک در سطح شهر اصفهان که داده‌های ترازبایی دقیق آن‌ها نیز موجود بود جهت انجام این ارزیابی در سامانه NRTK مورد مشاهده قرار گرفت. در بخش اول نتایج، با محاسبه RMSE مشاهدات برای هر ایستگاه مشخص گردید که با گذر زمان دقت مشاهدات افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج محاسبات، مشخص شد که دقت مشاهدات پس از گذشت ۱۵ دقیقه از شروع، بالاترین دقت را دارند. از شروع دریافت تصحیحات تا این زمان دقت مشاهدات رو به افزایش بوده و پس از آن روند افزایش دقت تقریباً متوقف می‌شود. بنابراین با استفاده از تکنیک میانگین‌گیری متحرک برای مشاهدات در بازه زمانی محدوده دقیقه پانزدهم، می‌توان به مشاهده‌ای با دقت بالاتر دست یافت. با اعمال این تکنیک، مشاهدات با دقت پایین‌تر از محاسبات خارج شده بنابراین دقت نهایی مشاهده ارتفاع ژئودتیک نقطه مورد نظر افزایش می‌یابد. در بخش دوم نتایج، با محاسبه میانگین RMSE مشاهدات بنچ مارک‌ها، دقت نهایی تعیین ارتفاع اورتومتريک به روش NRTK در منطقه مطالعاتی ۰/۰۲۸۱ متر بدست آمد. حصول این دقت در تعیین ارتفاع اورتومتريک نقاط سبب می‌شود در بسیاری از پروژه‌ها بتوان از عملیات پرهزینه و زمان‌بر ترازبایی سنتی صرف نظر کرد.

واژگان کلیدی: NRTK، RMSE، ارتفاع ژئودتیک، ارتفاع اورتومتريک، ژئوئید محلی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

ترازیابی سنتی در گذشته اصلی‌ترین روش برای تعیین ارتفاع دقیق نقاط روی سطح زمین بوده است. از این روش در پروژه‌های مختلف مانند اجرای طرح‌های ملی تهیه نقشه برای ایجاد نقاط پایه (کنترل زمینی) به منظور تبدیل عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای به نقشه استفاده می‌شود. با وجود دقت بالای روش ترازیابی مستقیم، اجرای این روش بسیار زمان‌بر و پرهزینه و نتایج حاصل تحت تأثیر خطاهای سیستماتیک و اتفاقی بوده و تاکنون روش جایگزینی با همان دقت برای آن متصور نبوده است. در دهه‌های گذشته تلاش‌های زیادی به منظور توسعه یک روش جایگزین برای ترازیابی صورت گرفته است که از میان آن‌ها می‌توان به ترازیابی مثلثاتی دقیق و ترازیابی موتوریزه اشاره داشت.

با توسعه سامانه‌های ناوبری جهانی^۱ GNSS و استفاده‌های روزافزون آن در نقشه‌برداری از سال ۱۹۸۰، پیشرفت قابل توجهی در بحث تعیین موقعیت و تعیین ارتفاع به عنوان یکی از مؤلفه‌های موقعیت به وجود آمد. سرعت عمل، کاهش هزینه‌ها، عدم نیاز به دید مستقیم، آسانی در انجام عملیات ترازیابی، پردازش سریع و آسان داده‌ها، امکان انجام ترازیابی در همه شرایط جوی، امکان انجام ترازیابی در شب و بسیاری مزایای دیگر در برابر ترازیابی سنتی (هندسی، مثلثاتی) که پرهزینه، زمان‌بر و طاقت فرسات، ضرورت بررسی و پژوهش جنبه‌های مختلف و مؤثر بر دقت تعیین ارتفاع با GNSS و امکان‌سنجی جایگزینی آن را با ترازیابی سنتی بیان می‌کند. تحقیقات متعددی برای جایگزینی روش ترازیابی سنتی با روش‌های مبتنی بر داده‌های GNSS انجام گرفته است. اردلان و صفری (۲۰۰۸) روشی مبتنی بر استفاده از GPS/Leveling برای تعیین ژئوئید را در ایران ارائه دادند. ترکیب داده‌های GPS/Leveling با داده‌های گرانی‌سنجی در مساله مقدار مرزی تعیین ژئوئید باعث بهبود دقت ژئوئید شد [۱]. زمرای (۲۰۱۲) به منظور تهیه نقشه منحنی میزان در کشور سودان با استفاده از GPS/Leveling، دستیابی به مقیاس ۱:۵۰۰۰ را امکان‌پذیر دانست [۲]. جمور و مهدی زاده (۲۰۱۸) نشان دادند، که در حال حاضر ترازیابی با GPS در ایران دقتی معادل ترازیابی درجه ۴ را فراهم می‌سازد. در این تحقیق برای محاسبه ارتفاع ژئوئید از آخرین مدل ژئوئید

ملی جاذبی ایران (IRGeoid10) با دقت مطلق متوسط ۲۶ سانتی‌متر استفاده شده است. نتایج حاصل بیانگر کاهش دقت اختلاف ارتفاع ترازیابی با GPS برحسب افزایش طول خطوط مبناست [۳].

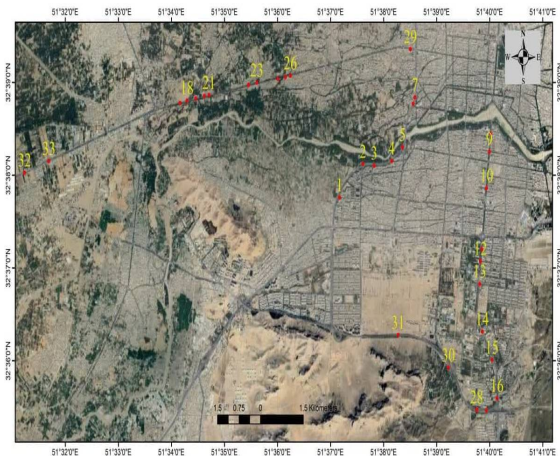
توسعه شبکه‌های تعیین موقعیت آنی کینماتیک^۲ (NRTK)، باعث تسریع در عملیات تعیین موقعیت با دقت بالا در طرح‌ها و پروژه‌های مطالعاتی و اجرایی شده است. با توجه به اینکه تحقیقات گذشته بیشتر مبتنی بر روش استاتیک در تعیین ارتفاع بوده است بنابراین هدف از این تحقیق بررسی و ارائه روش‌هایی جهت استفاده از مشاهدات NRTK به منظور تعیین دقیق ارتفاع ژئودتیک و اورتومتريک (در صورت وجود ژئوئید محلی) می‌باشد. حین اجرای پروژه‌های مطالعاتی و اجرایی در بسیاری از مواقع به علت شرایط فورس مازور و یا جهت کاهش هزینه‌ها، امکان استفاده از روش تعیین موقعیت استاتیک نیست بنابراین استفاده از روش آنی بسیار ضروری می‌باشد به همین جهت اطلاع از روش‌ها و اقداماتی که باعث دستیابی به بالاترین دقت با این روش می‌شود، می‌تواند به اجرای دقیق و در عین حال سریع‌تر پروژه‌ها کمک کند.

۲- منطقه مورد مطالعه

به دلیل میزان فرونشست کمتر در جنوب اصفهان نسبت به سایر مناطق شهر، ۳۳ ایستگاه با توزیع تقریباً یکنواخت در جنوب اصفهان برای انجام این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱). بدین ترتیب، مشاهدات تحت تأثیر این جابه‌جایی‌ها نبوده و ارزیابی نتایج دقیق‌تر می‌باشد.

ایستگاه‌های مورد استفاده توسط شهرداری اصفهان راه‌اندازی شده و اطلاعات مربوط به ارتفاع ترازیابی دقیق آن‌ها، موجود می‌باشد. ترازیابی به‌صورت مجموعه‌ای از لوپ‌های بسته در سطح شبکه طراحی و عملیات ترازیابی دقیق به‌صورت رفت و برگشت در طول خطوط مبنا انجام گرفته است. دقت ترازیابی ایستگاه‌ها مطابق ترازیابی درجه یک است. سطح مرجع ارتفاعی GPS بیضوی WGS84 بوده و ارتفاع حاصل از مشاهدات GPS، ارتفاع ژئودتیک می‌باشد. جهت تعیین ارتفاع ژئودتیک این نقاط، کلیه ایستگاه‌ها به روش NRTK با استفاده از سامانه شمیم سازمان ثبت اسناد و املاک کشور به وسیله گیرنده چند فرکانس مشاهده شدند.

در این تحقیق از ژئوئید محلی شهر اصفهان برای محاسبه ارتفاع اورتومتریک استفاده شده است. دقت مطلق ژئوئید محلی اصفهان یک سانتی متر می باشد.



شکل ۱: پراکندگی ایستگاه‌ها در سطح شهر

۳- تئوری ریاضی

روش تعیین موقعیت آنی کینماتیک (RTK) یکی از روش‌های نسبی تعیین موقعیت است. در این روش یکی از گیرنده‌ها به طور دائمی بر روی یک نقطه با مختصات معلوم تحت عنوان ایستگاه مرجع^۱، استقرار می‌یابد. این گیرنده با استفاده از مشاهدات خود، تصحیحاتی (مشاهدات خام با حجم کاهش یافته) را با استفاده از یک آنتن رادیویی به گیرنده‌ی دوم ارسال می‌کند. گیرنده‌ی دوم که می‌تواند متحرک^۲ باشد، با اعمال این تصحیحات به مشاهدات خود، دقت تعیین موقعیت را بهبود می‌بخشد. در این روش، در شرایطی که گیرنده‌ی متحرک در فاصله‌ی کمتر از ۱۰ کیلومتر نسبت به ایستگاه مرجع قرار داشته باشد، قادر است موقعیت خود را با دقت بالایی به کاربر نشان دهد. با زیاد شدن فاصله‌ی دو گیرنده از یکدیگر، دقت تعیین موقعیت به دلیل وابستگی خطاهای اتمسفری و مدار به فاصله، به تدریج کاهش می‌یابد.

با توجه به معایب روش تعیین موقعیت آنی کینماتیک (RTK) نظیر مشکلات ناشی از فواصل ایستگاهی بلند، شرایط نامساعد یونسفری^۳ و هزینه‌های ناشی از تأسیس ایستگاه‌های مرجع متعدد در یک شبکه، نیاز به ایجاد یک سیستم با دقت بالاتر و هزینه‌ی کمتر احساس می‌شد. از این رو برای غلبه بر

کاستی‌های موجود در روش RTK، از شبکه‌هایی با چندین ایستگاه مرجع، با نام NRTK استفاده می‌شود [۴].

روش NRTK، تکنیک تعیین موقعیت آنی بر اساس استفاده از مشاهدات فاز موج حامل^۴ و با قابلیت تعریف فواصل بین ایستگاهی تا چند ده کیلومتر می‌باشد [۵]. در این شبکه‌ها با استفاده از مشاهداتی که به صورت هم‌زمان در ایستگاه‌های مرجع انجام می‌شود، تصحیحات تروپسفری^۵ و یونسفری تفاضلی بین ایستگاه‌های مرجع محاسبه شده و پس از درون‌یابی به همراه مشاهدات یک ایستگاه به عنوان مستر به گیرنده‌ی سیار ارسال می‌گردد تا این مشاهدات و تصحیحات تعیین موقعیت نسبی انجام دهد.

مؤلفه‌ی ارتفاعی GNSS ارتفاع ژئودتیک بوده و به طور مستقیم ارتباطی با سطوح هم‌پتانسیل میدان جاذبی زمین ندارد در حالیکه در تراز یابی، ارتفاع اورتومتریک مورد نظر می‌باشد. لذا در بسیاری از کاربردها نمی‌توان از آن به طریق مشابه با ارتفاع حاصل از تراز یابی استفاده کرد. در چنین مواردی ارتفاع حاصل از GNSS باید به ارتفاع اورتومتریک تبدیل شود. به منظور تبدیل این ارتفاع به ارتفاع اورتومتریک بایستی ارتفاع ژئوئید (جدایی بیضوی از ژئوئید) با دقت کافی معلوم باشد. برای رسیدن به این هدف در چند دهه گذشته تلاش‌های گسترده‌ای در راستای توسعه روش‌هایی برای تعیین ژئوئید انجام شده است از جمله روش‌های گراویمتری یا در مقیاس محلی روش‌های هندسی با ترکیب مشاهدات GNSS و تراز یابی با هدف دستیابی به دقتی در حد چند سانتیمتر [۶]. به‌طور کلی سه عامل اصلی و مؤثر در تعیین دقت ارتفاع اورتومتریک در تراز یابی با GNSS عبارت‌اند از: دقت مدل ژئوئید مورد استفاده، منابع خطاهای GNSS و طول خطوط مبنا. از آنجایی که مدل ژئوئید به طور مستقیم در تبدیل ارتفاع بیضوی به ارتفاع اورتومتریک استفاده می‌شود، دقت نسبی متوسط آن در تعیین دقت نسبی ارتفاع اورتومتریک مؤثر است. از این رو هر چه مدل ژئوئید مورد استفاده در این تبدیل دقیق‌تر باشد ارتفاع اورتومتریک حاصل نیز دقت بیشتری دارد.

از سوی دیگر به‌طور ذاتی دقت مؤلفه‌ی ارتفاعی GNSS از دقت موقعیت مسطحاتی آن کمتر است، که این امر ناشی از برخی منابع خطای GNSS به عنوان عوامل اصلی محدودکننده

۴ Carrier phase observation

۵ Troposphere

۱ Base

۲ Rover

۳ Ionosphere

۳-۲- روش ارزیابی مشاهدات

جهت ارزیابی و تجزیه و تحلیل مشاهدات از پارامتر خطای جذر میانگین مربعات RMSE^۴ با رابطه زیر استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(dz_i)^2}{N}} \quad (2)$$

در این رابطه، dz_i اختلاف ارتفاع مشاهده i ام (مشاهده در سامانه NRTK) با ارتفاع به دست آمده از مشاهدات استاتیک بوده و N تعداد مشاهدات است.

۳-۳- روش میانگین‌گیری متحرک

در علم آمار میانگین‌گیری متحرک^۵، به محاسباتی گفته می‌شود که برای تجزیه و تحلیل نقاط داده به وسیله میانگین‌گیری زیرمجموعه‌های مختلفی از کل مجموعه داده انجام می‌شود. در این روش برای هر مشاهده از خود مشاهده و چند مشاهده قبل و بعد از آن میانگین‌گیری کرده و حاصل این میانگین‌گیری به عنوان مقدار آن مشاهده در نظر گرفته می‌شود. این تکنیک دارای یک پارامتر شعاع بازه است که تعداد مشاهدات مورد نیاز قبل و بعد از مشاهده اصلی را مشخص می‌کند. به عنوان مثال اگر این پارامتر برابر ۱۰ قرار داده شود، از ۱۰ مشاهده بعد و ۱۰ مشاهده قبل از هر مشاهده به علاوه خود مشاهده میانگین‌گیری کرده و مقدار جدید مشاهده را برابر حاصل این میانگین‌گیری قرار می‌دهد. برای اول و آخر بازه که به اندازه‌ی کافی مشاهده وجود ندارد، فقط از مشاهداتی که موجود است استفاده می‌شود. مثلاً برای مشاهده‌ی اول فقط از خود مشاهده و ۱۰ مشاهده‌ی بعد، برای مشاهده‌ی دوم از خود مشاهده، ۱۰ مشاهده‌ی بعد و یک مشاهده‌ی قبل استفاده می‌شود و به همین ترتیب تا آخرین مشاهده عمل میانگین‌گیری انجام می‌شود. رابطه این روش به صورت زیر می‌باشد:

$$MA=1/L \sum_{i=t}^{t+L} x_t \quad (3)$$

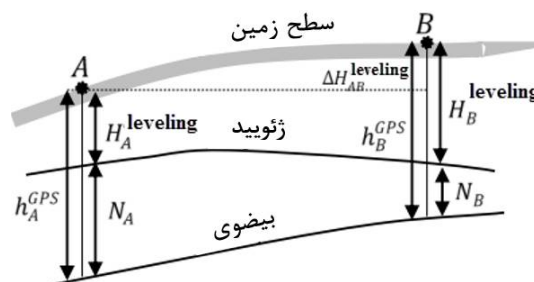
دقت ارتفاعی آن است [۷]. مهم‌ترین آن‌ها، خطای ساعت گیرنده، خطای تروپوسفر و ترکیب هندسی ماهواره‌ها هستند. برای رویارویی با آن‌ها می‌توان به استفاده از معادلات تفاضلی در هنگام پردازش داده‌ها، استفاده از مدل‌های استاندارد تصحیح تأخیر تروپوسفر، افزایش ارتفاع آنتن و ترکیب سامانه‌های متعدد تعیین موقعیت جهت بهبود DOP^۱ اشاره کرد.

۳-۱- ترازیبی با استفاده از GNSS

استفاده ترکیبی از سه داده ارتفاعی GNSS، ترازیبی و ژئوئید راهکاری کلیدی در بسیاری از کاربردهای ژئودتیک می‌باشد. با وجود اینکه این سه نوع داده ارتفاعی تفاوت بسیاری از نظر مفهوم فیزیکی، سطح مبنا، روش‌های مشاهداتی و دقت دارند، رابطه زیر بین آن‌ها برقرار است:

$$N=h-H \quad (1)$$

که در آن، N ارتفاع ژئوئید، H ارتفاع اورتومتريک و h ارتفاع ژئودتیک می‌باشد (شکل ۲). مسئله‌ی تعیین ژئوئید به روش هندسی، به نوعی بررسی و مدل‌سازی تغییرات ارتفاع ژئوئید حاصل از رابطه (۱) در شبکه‌ای از ایستگاه‌ها با ارتفاع‌های GNSS و ترازیبی معلوم است و خروجی آن یک سطح هندسی پیوسته است که ژئوئید را به بهترین وجه تقریب می‌کند.



شکل ۲: مفهوم GPS/Leveling

دقت ژئوئید حاصل از این روش به چند عامل از جمله تعداد و توزیع نقاط کنترل، کیفیت داده‌ها و روش درون‌یابی یا برازش سطح بستگی دارد [۸]. در مطالعاتی که به صورت موردی در مناطق مختلف جهان انجام شده، تکنیک‌های مختلفی در این مسئله به کار گرفته شده است. از جمله آن‌ها می‌توان به وزن دهی با معکوس فاصله و روش چند سطحی تابع درجه ۴ اسپلاین^۲ و تبدیل موجک^۳ اشاره کرد [۶].

^۴ Root Mean Square Error

^۵ Moving average

^۱ Dilution Of Precision

^۲ Spline

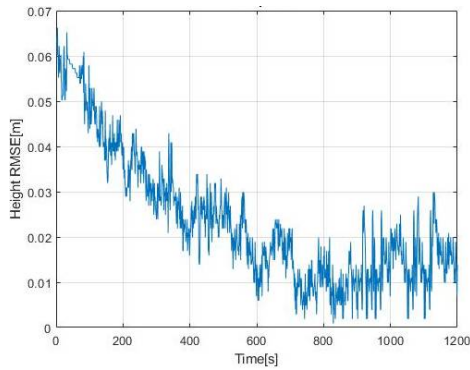
^۳ Wavelet Transform

که در آن L تعداد مشاهده در یک بازه زمانی و x_t مقدار داده t ام می‌باشد.

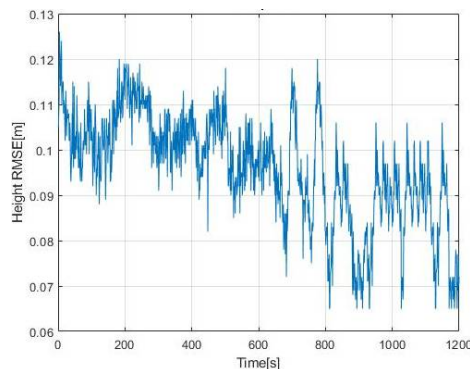
۴- نتایج عددی و بحث

یکی از مهم‌ترین اهداف این تحقیق بررسی امکان جایگزینی و استفاده از مشاهدات NRTK به جای مشاهدات دقیق استاتیک می‌باشد این موضوع در پروژه‌های اجرایی مواقعی که از نظر زمان، امکانات و هزینه، استفاده از روش‌های استاتیک ممکن نیست، بسیار کاربردی می‌باشد. با توجه به مطالب و ضروریات بیان شده مدت زمان انجام مشاهدات ۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد. بنابراین در بخش اول، هدف بررسی و تعیین زمان بهینه در طول مدت زمان انجام مشاهدات و دریافت تصحیحات به روش RTK با سامانه NRTK جهت دستیابی به بالاترین دقت برای ارتفاع ژئودتیک نقاط می‌باشد. بدین منظور ۴ ایستگاه (نقاط ۲۸، ۳۰، ۳۲ و ۳۳) جهت انجام مشاهدات انتخاب شدند و مشاهدات هر نقطه با نرخ زمانی یک ثانیه به مدت ۲۰ دقیقه تکرار شد. بنابراین در پایان انجام مشاهدات، برای هر نقطه ۱۲۰۰ مشاهده ارتفاع جمع‌آوری شد. همچنین مشاهدات استاتیک ایستگاه‌ها به منظور استخراج مختصات دقیق آن‌ها نیز انجام گرفت. در بخش دوم تحقیق با توجه به در اختیار داشتن ژئوئید محلی شهر اصفهان [۹]، دقت ارتفاع اورتومتریک حاصل از تعیین موقعیت آنی در سامانه شمیم مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، ۳۳ بنچ مارک در منطقه مورد مطالعه که ارتفاع اورتومتریک حاصل از ترازبایی دقیق آن‌ها در دسترس بود با روش NRTK مورد مشاهده قرار گرفتند. سپس، با استفاده از روش میانگین‌گیری متحرک ارتفاع دقیق ژئودتیک نقاط و با استفاده از ژئوئید اصفهان ارتفاع اورتومتریک نقاط تعیین شدند.

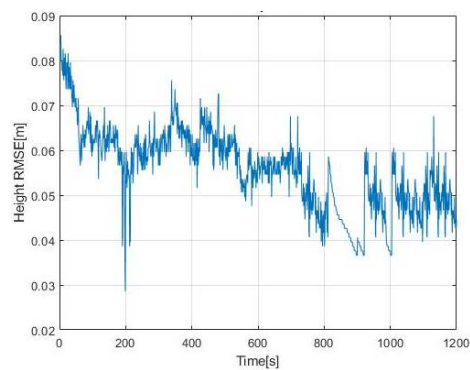
در بخش اول، هدف بررسی دقت تکرار مشاهده ارتفاع ژئودتیک به مدت ۲۰ دقیقه با نرخ یک ثانیه از زمان شروع دریافت تصحیحات در سامانه NRTK می‌باشد، بر اساس شکل (۳)، تغییرات RMSE مشاهدات برای هر ۴ نقطه، تا حدود دقیقه ۱۵ رو به کاهش می‌باشد و از این زمان به بعد تقریباً ثابت می‌شود. محور افقی زمان انجام مشاهدات ارتفاع ژئودتیک می‌باشد که با نرخ ۱ ثانیه تکرار شده است. محور عمودی هم میزان اختلاف ارتفاع روش استاتیک با روش آنی در هر اپک زمانی می‌باشد.



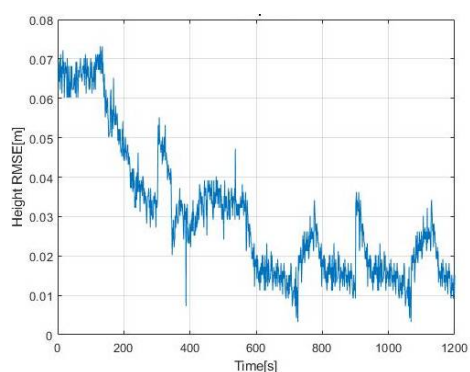
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۳: مشاهدات ۴ نقطه مورد مطالعه. الف) نقطه ۲۸ ب) نقطه ۳۰ ج) نقطه ۳۲ د) نقطه ۳۳

جدول (۱) میانگین RMSE برای ۱۲۰۰ مشاهده برای ۴ نقطه را نشان می‌دهد.

جدول ۱: میانگین RMSE نقاط مورد مطالعه

نقاط	۲۸	۳۰	۳۲	۳۳
میانگین RMSE (متر)	۰/۰۲۳۷	۰/۰۹۵۹	۰/۰۵۵۷	۰/۰۳۰۵

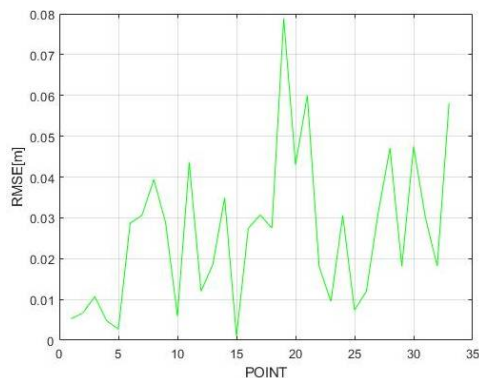
سپس با استفاده از تکنیک میانگین‌گیری متحرک، بازه‌ای شامل ۳۰۰ مشاهده (۱۵۰ مشاهده قبل از اپک ۹۰۰ و ۱۵۰ مشاهده بعد از آن) که کمترین میزان RMSE را دارند برای هر نقطه انتخاب شد. شکل (۴) میزان پراکندگی RMSE چهار نقطه مورد ارزیابی را نشان می‌دهد. پس از اعمال تکنیک میانگین‌گیری متحرک برای هر ۴ نقطه، میانگین RMSE مشاهدات باقیمانده را محاسبه می‌کنیم. این مقادیر در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲: میانگین RMSE نقاط مورد مطالعه بعد از اعمال تکنیک

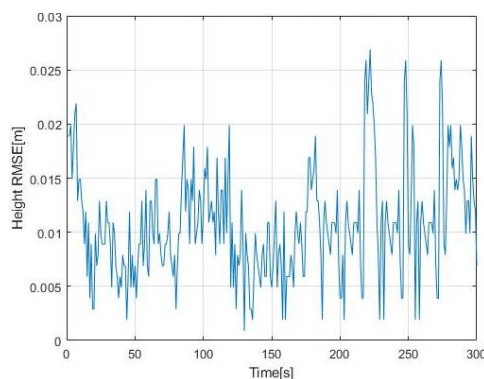
میانگین‌گیری متحرک

نقاط	۲۸	۳۰	۳۲	۳۳
میانگین RMSE (متر)	۰/۰۱۰۷	۰/۰۸۶۷	۰/۰۴۶۳	۰/۰۱۶۸

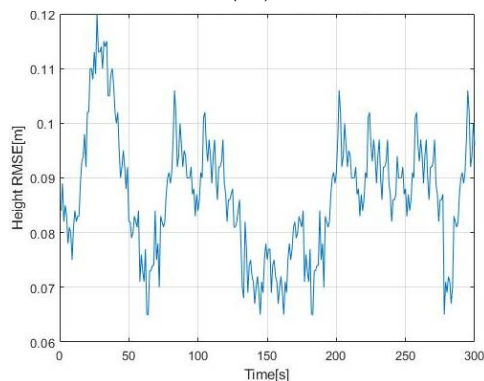
در بخش دوم که هدف ارزیابی دقت ارتفاع اورتومتريک حاصل از مشاهدات NRTK می‌باشد، RMSE مربوط به ۳۳ نقطه که ارتفاع ترازیبی آن‌ها موجود بود، محاسبه شد، که در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل محور افقی نقاط و محور عمودی میزان اختلاف ارتفاع ترازیبی دقیق و ارتفاع اورتومتريک حاصل از مشاهدات NRTK می‌باشد.



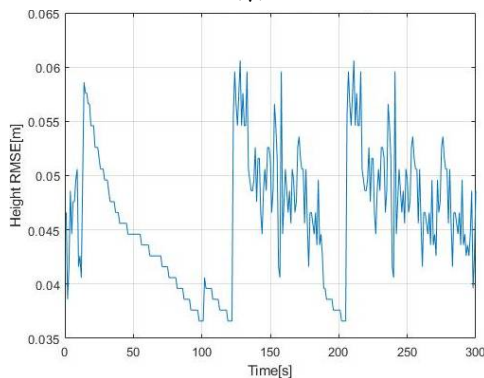
شکل ۵: RMSE مشاهدات ۳۳ نقطه مورد مطالعه جهت ارزیابی دقت تعیین ارتفاع اورتومتريک



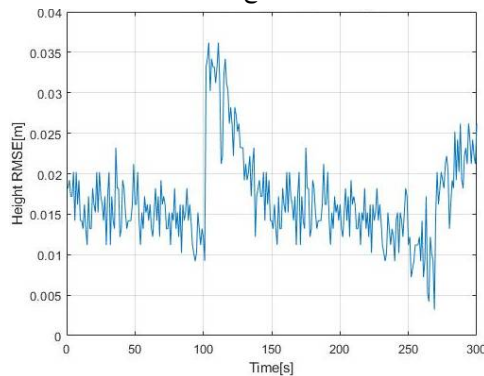
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۴: مشاهدات ۴ نقطه مورد مطالعه بعد از اعمال تکنیک میانگین‌گیری متحرک. (الف) نقطه ۲۸ (ب) نقطه ۳۰ (ج) نقطه ۳۲ (د) نقطه ۳۳

سپس RMSE نقاط جهت برآورد دقت ارتفاع اورتومتریک حاصل از مشاهدات NRTK محاسبه شد. جدول (۳) میانگین، بیشترین و کمترین مقدار RMSE مشاهدات را نشان می‌دهد.

جدول ۳: میانگین RMSE ۳۳ نقطه مورد مطالعه

بیشترین مقدار RMSE (متر)	کمترین مقدار RMSE (متر)	میانگین مقدار RMSE (متر)
۰/۰۷۸۹	۰/۰۰۲۷	۰/۰۲۸۱

با توجه به نتایج مشاهدات این بخش اختلاف دو ارتفاع اورتومتریک محاسباتی و مشاهداتی به طور میانگین ۰/۰۲۸۱ متر می‌باشد. همچنین بیشترین اختلاف ۰/۰۷۸۹ و کمترین اختلاف ۰/۰۰۲۷ متر است. این اختلاف متأثر از عوامل متعددی از جمله خطای مشاهدات، دقت سامانه شمیم، دقت ژئوئید محلی شهر اصفهان، شرایط محیطی نقاط و دیگر عوامل می‌باشد. اما در کل این اختلاف در بسیاری از کاربردها و پروژه‌های اجرایی قابل صرف نظر کردن بوده و می‌توان از مشاهدات NRTK جهت تعیین ارتفاع استفاده کرد.

با توجه به دقت تعیین ارتفاع اورتومتریک با استفاده از مشاهدات NRTK و ژئوئید محلی شهر اصفهان و بر اساس درجه‌بندی‌های مختلف ترازیبی، در جدول (۴) استفاده از روش NRTK جهت تعیین ارتفاع اورتومتریک برای طول‌های ترازیبی که این دقت را تأمین می‌کند ارائه شده است. به طور مثال در صورتی که هدف ترازیبی درجه یک باشد اگر طول مسیر ترازیبی از ۴۴ کیلومتر بیشتر باشد می‌توان از مشاهدات NRTK، ارتفاع اورتومتریک نقاط مورد نظر را تعیین کرد.

جدول ۴: طول ترازیبی بهینه جهت تعیین ارتفاع اورتومتریک با روش NRTK

ردیف	درجه ترازیبی	حداقل طول ترازیبی (کیلومتر)
۱	درجه ۱	۴۴
۲	درجه ۲	۱۱
۳	درجه ۳	۵/۵

۵- نتیجه‌گیری

استفاده از تعیین موقعیت آنی در پروژه‌ها و طرح‌های اجرایی و مطالعاتی با توجه به مزیت‌های آن مانند کاهش زمان و هزینه، بسیار لازم و کاربردی می‌باشد. به خصوص زمانی که امکان استفاده از روش استاتیک نباشد. لذا بررسی دقت روش NRTK و تعیین مدت زمان بهینه جهت دستیابی به مولفه ارتفاعی، جهت استفاده در این پروژه‌ها بسیار ضروری می‌باشد. بدین منظور این تحقیق در دو بخش، استفاده از روش تعیین موقعیت آنی را جهت تعیین مولفه ارتفاعی مورد ارزیابی قرار داد. در بخش اول هدف تعیین زمان بهینه به منظور دستیابی به بالاترین دقت جهت تعیین مولفه ارتفاعی GNSS می‌باشد. در بخش دوم هدف تعیین ارتفاع اورتومتریک با استفاده از مشاهدات NRTK و ژئوئید محلی منطقه مطالعاتی است.

جهت تعیین ارتفاع ژئودتیک به صورت آنی با استفاده از سامانه‌های NRTK از زمان شروع دریافت تصحیحات، دقت مشاهدات به مرور افزایش می‌یابد. این روند تا حدود دقیقه ۱۵ ادامه دارد و بعد از آن ثابت می‌شود. بنابراین جهت دستیابی به مشاهدات با دقت بالاتر به صورت آنی، با استفاده از روش NRTK، تکنیک میانگین‌گیری متحرک برای مشاهدات در محدوده دقیقه ۱۵ استفاده شد و خروجی آن به عنوان دقیق‌ترین مشاهده قابل استفاده می‌باشد. استفاده از این روش در مواقعی که نیاز به مشاهدات با دقت بالا (در حد مشاهدات استاتیک) می‌باشد ولی به دلیل محدودیت زمان، انجام مشاهدات استاتیک امکان پذیر نیست، پیشنهاد می‌گردد.

در بخش دوم با توجه به انجام مشاهدات و ارزیابی آن‌ها، دقت تعیین ارتفاع اورتومتریک با استفاده از روش NRTK و همچنین ژئوئید محلی شهر اصفهان ۰/۰۲۸۱ متر برآورد شد. بنابراین توصیه می‌شود در پروژه‌هایی که دقت ارتفاعی آن در حد دقت مذکور می‌باشد از این روش استفاده گردد.

با توجه به اینکه منطقه مطالعاتی تحقیق حاضر صرفاً در مناطق شهری انتخاب شده بود و با توجه به اینکه بسیاری از پروژه‌های بزرگ کشور در مناطق خارج از شهر قرار دارند و از ایستگاه‌های مرجع سامانه‌های NRTK فاصله زیادی دارند، بررسی دقت‌ها و چالش‌های احتمالی روش آنی در این مناطق، برای تحقیقات آتی در این زمینه پیشنهاد می‌گردد.

- [۱] Ardalan, A. A and Safari, A. "Proposing a Method for Combining the Geoid Resulting from GPS/Leveling with Gravity Measurement in a Boundary Value Problem of Geoid Determination." *Earth and Space Physics* 34.3 (2008) (In Persian).
- [۲] Mohammed, NagiZomrawi. "Levelling with GPS." *International Journal of Computer Science and Telecommunications* 3.7 (2012): 109-113.
- [۳] Mehdizadeh, H. and Jamour, Y. "Feasibility Study of Replacing Accurate Leveling with GPS/Levelling in the Iranian Region." *Quarterly Journal of Earth Sciences* 27.107 (2018): 185-192 (In Persian).
- [۴] Joubert, N., T.G. Reid and F. Noble. Developments in modern GNSS and its impact on autonomous vehicle architectures. in 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 2020. IEEE.
- [۵] Rizos, C. and S. Han, Reference station network based RTK systems-concepts and progress. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2003. 8(2): p. 566-574.
- [۶] S. M. Khazraei, V. Nafisi, S. A. Monadjemi, J. Asgari, A. R. Amiri-Simkooei. Precise local geoid modelling using GPS/Leveling data and artificial intelligence techniques case study: shahin-shahr Isfahan. *JGST* 2015; 4 (3) :225-238 (In Persian).
- [۷] Kleijer, Frank. "Troposphere modeling and filtering for precise GPS leveling." (2004).
- [۸] Khazraei, S. M., Nafisi, V., Amiri-Simkooei, A. R., & Asgari, J. (2017). Combination of GPS and leveling observations and geoid models using least-squares variance component estimation. *Journal of surveying engineering*, 143(2), 04016023.
- [۹] <https://cetold.ui.ac.ir/~j.maleki/geoid/>.