مطالعه امکان‌سنجی جایگزینی ترازیابی دقیق با GPS/Levelling در منطقه ایران

حسین مهدی‌زاده[۱] و یحیی جمور[۲*]

[۱]کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر، اهر، ایران

[۲]دانشیار، آموزشکده نقشه‌برداری، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۶

چکیده

امروزه با گسترش استفاده از سامانه تعیین موقعیت جهانی (GPS) این امکان فراهم شده که بتوان ارتفاع ژئودتیک هر نقطه را نسبت به بیضوی مرجع به سادگی با کمترین زمان و هزینه تعیین کرد. با وجود مزایای روش نوین ترازیابی با GPS در برابر ترازیابی سنتی، دسترسی به ارتفاع ارتومتریک نقاط با این روش محدودیت‌هایی دارد. نکته اساسی در این خصوص وجود اختلاف میان سطح مبنای ارتفاعی ترازیابی سنتی (ژئوید) و سطح مبنای ارتفاعی GPS (بیضوی) است که باید اثر آن در ترازیابی‌های نسبی مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش به جنبه‌های مختلف روش ترازیابی با GPS برای کسب بیشترین دقت در مؤلفه ارتفاعی و مقایسه این روش (ترازیابی با GPS) با ترازیابی هندسی (یا ترازیابی سنتی) پرداخته می‌شود. برای بررسی و مطالعه ترازیابی با GPS و میزان دقت قابل حصول، از اطلاعات شبکه ۵۵ کیلومتری فیزیکال ژئودزی و شبکه ژئودینامیک ایران در منطقه آذربایجان و اطلاعات نقاط ژئودزی جزیره قشم استفاده شده است. این اطلاعات در برگیرنده ارتفاعات ارتومتریک و ژئودتیک شبکه نقاط مورد استفاده است که در این پژوهش در ۵ دسته با فواصل مختلف تقسیم و انتخاب شده‌اند. برای محاسبه ارتفاع ژئوید از آخرین مدل ژئوید ملی جاذبی ایران (IRGeoid10) با دقت مطلق متوسط ۲۶ cm± و دقت نسبی متوسط ۲/۸ ppm± استفاده شده است. نتایج حاصل بیانگر کاهش دقت اختلاف ارتفاع ترازیابی با GPS بر حسب افزایش طول خطوط مبناست. محاسبه متغیر k به عنوان معیاری برای تشخیص درجه ترازیابی، نشان می‌دهد که در حال حاضر ترازیابی با GPS در ایران دقتی معادل ترازیابی درجه ۴ فراهم می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: ژئوید، ارتفاع ارتومتریک، ارتفاع بیضوی، GPS، ترازیابی با GPS.

***نویسنده مسئول:** یحیی جمور

E-mail: djamour@ncc.org.ir

۱- پیش‌نوشتار

تعیین اختلاف ارتفاع نقاط از راه ترازیابی هندسی و با بهره‌گیری از دوربین‌های ترازیاب، متداول‌ترین روش در اجرای طرح‌های عمرانی و توسعه کشور است. همچنین از این روش در اجرای طرح های ملی تهیه نقشه برای ایجاد نقاط پایه (کنترل زمینی) برای تبدیل عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای به نقشه استفاده می‌شود. با وجود دقت بالای روش ترازیابی هندسی، 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.

امروزه با گسترش استفاده از سامانه تعیین موقعیت جهانی GPS (Global Positioning System) این امکان فراهم شده است که بتوان ارتفاع ژئودتیک هر نقطه را نسبت به بیضوی مقایسه به راحتی، در کمترین زمان ممکن و با کمترین هزینه تعیین کرد. از سوی دیگر با گسترش روزافزون دقت تعیین موقعیت با GPS، زمینه مطالعات گسترده در خصوص ترازیابی با GPS فراهم شده است. سرعت عمل، کاهش هزینه‌ها، نبود 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، زمان بر و طاقت‌فرساست، ضرورت بررسی و پژوهش جنبه‌های مختلف و موثر بر دقت تعیین ارتفاع با GPS و امکان‌سنجی جایگزینی ترازیابی سنتی با ترازیابی با GPS را بیان می‌کند. از میان سامانه‌های ارتفاعی موجود (دینامیک، نرمال وارتومتریک)، در ایران سامانه ارتفاعی ارتومتریک با سطح مبنای ژئوید انتخاب شده است. نکته اساسی در به کارگیری این روش (ترازیابی با GPS) اختلاف در سطح مبنای ارتفاعی ترازیابی سنتی (ژئوید) و سطح مبنای ارتفاعی GPS (بیضوی) است که باید اثر آن در ترازیابی‌های نسبی مورد توجه قرار گیرد.

به‌طور کلی سه عامل اصلی و مؤثر در تعیین دقت ارتفاع ارتومتریک در ترازیابی با GPS عبارتند از: دقت مدل ژئوید مورد استفاده، منابع خطاهای GPS و طول خطوط مبنا. از آنجایی که مدل ژئوید به‌طور مستقیم در تبدیل ارتفاع بیضوی به ارتفاع ارتومتریک استفاده می‌شود؛ دقت نسبی متوسط آن در تعیین دقت نسبی ارتفاع ارتومتریک مؤثر است. از این رو هر چه مدل ژئوید مورد استفاده در این تبدیل دقیق‌تر باشد؛ ارتفاع ارتومتریک حاصل نیز دقت بیشتری دارد.

از سوی دیگر دقت ذاتی ارتفاع بیضوی از دقت موقعیت مسطحاتی آن کمتر است؛ که این امر ناشی از برخی منابع خطای GPS به عنوان عوامل اصلی محدود کننده دقت ارتفاعی آن است. مهم‌ترین آنها، خطای ساعت گیرنده، خطای تروپسفر و ترکیب هندسی ماهواره ها هستند (Kleijer, 2004). برای رویارویی با آنها می‌توان به استفاده از معادلات تفاضلی در هنگام پردازش داده‌ها، استفاده از مدل‌های استاندارد تصحیح تأخیر تروپسفر، افزایش ارتفاع آنتن (Yahya and NorKamarudin, 2007) و استفاده از گیرنده‌های با قابلیت دیدن همزمان ماهواره‌های دو سامانه تعیین موقعیت GPS و GLONASS برای بهبود مقدار DOP (Dilution Of Precision) اشاره کرد (Sheng, 2005).

یکی دیگر از عوامل محدود کننده دقت تعیین ارتفاع ارتومتریک در روش ترازیابی با GPS، افزایش طول خط مبناست. با افزایش طول خط مبنا، از یک سو دقت نسبی اختلاف ارتفاع ژئوید (ΔN) که حاصل از مدل ژئوید است، و از سوی دیگر میزان بهبود منابع خطای GPS همچون خطاهای مداری، تروپسفر و یونسفر در روش‌های تفاضلی کاهش می یابد.

در این پژوهش به بررسی میزان دقت ارتفاع ارتومتریک حاصل از ترازیابی با GPS بر پایه طول خطوط مبنا و عوامل موثر بر آن پرداخته می شود.

۲- سیر تکاملی مدل‌های ژئوید ایران

اولین ژئوید ایران با بهبود مدل ژئوپتانسیل منطقه‌ای GPM2 (GeoPotential Model 2) با همکاری مؤسسه ایفاگ آلمان، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و سازمان نقشه‌برداری کشور با استفاده از داده‌های ترازیابی به دست آمد (Weber and Zomorrodian, 1988) و مدل موسوم به IRGeoid88 با RMS (Root Mean Square) برابر با ۱/۴ m± ارائه گردید (Weber and Zomorrodian, 1988).

به عنوان یک فعالیت دیگر در این زمینه، مدل IRGeoid88 با استفاده از داده‌های DTM (Digital Terrain Model) با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر از نقشه‌های ۱/۲۵۰،۰۰۰ و مدل ژئوپتانسیل OSU89B بهبود یافت. همچنین در این پژوهش از داده‌های ثقل کهن زمینی تهیه شده توسط دفتر بین‌المللی ثقل‌سنجی BGI (Bureau Gravimetrique International) استفاده شد. برای تبدیل بی‌هنجاری‌های جاذبه (Δg) به ارتفاع‌های ژئوید (N)، فنِ RCR (Remove Compute Restore) و برای محاسبه فرمول انتگرال، روش FFT (Fast Fourier Transform) به کار رفت (Hamesh and Zomorrodian, 1992).

پژوهش دیگری با استفاده از یک روش جدید مبتنی بر فرمول بیضوی برنز بدون استفاده از فرمول استوکس انجام و مدل ژئوید موسوم به IRGeoid01 ارائه شد (Ardalan et al., 2001). در این کار از داده‌های ثقل BGI به همراه داده‌های ثقل فراهم شده روی بنچ‌مارک‌های شبکه ترازیابی درجه یک سازمان نقشه‌برداری کشور (NCC)، داده‌های DTM جهانی GLOBE (Global Land One-km Base Elevation) با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و مدل ژئوپتانسیل جهانی EGM96 (Earth Gravitational Model 1996) و ۲۵۸ نقطه ترازیابی با GPS برای مقایسه با ژئوید جاذبی IRGeoid01 استفاده و در پایان مدل ژئوید حاصل با RMS برابر با ۱/۲۶ m± ارائه شد (Ardalan et al., 2001).

پژوهش بعدی با گسترش مسئله مقدار مرزی بیضوی در محاسبات ژئوید، استفاده از داده‌های ثقل BGI، ۱۰ نقطه با مختصات نجومی درجه اول، داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، داده‌های DTM جهانی GLOBE با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و میدان جاذبی حاصل از بسط هارمونیک‌های بیضوی تا درجه و مرتبه ۳۶۰ انجام شد. همچنین از ۵۱ نقطه ترازیابی با GPS برای مقایسه با ژئوید استفاده و در پایان ژئوید موسوم به IRGeoid05a با انحراف معیار ۱/۰۶۸ m± ارائه شد (Safari et al., 2005).

محصول دیگری موسوم به مدل ژئوید IRGeoid05b با استفاده از روش جاذبی و استفاده از داده‌های ثقل فراهم شده توسط BGI، داده‌های ثقل NCC روی بنچ‌مارک‌های شبکه ترازیابی درجه یک ایران، داده‌های DTM جهانی GLOBE با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و مدل ژئوپتانسیل جهانی GGM02S مبتنی بر داده‌های ماهواره GRACE انجام شد. همچنین از ۲۰۰ نقطه ترازیابی با GPS برای مقایسه با ژئوید به دست آمده (IRGeoid05b) استفاده و در پایان ژئوید حاصل با انحراف معیار ۰/۶۷۲ m± ارائه شد (Nahavandchi and Soltanpour, 2005).

یک پژوهش دیگر با به‌کارگیری فرمول کمترین مربعات اصلاح شده استوکس، استفاده از داده‌های ثقل کهن BGI، داده‌های ثقل NCC روی بنچ‌مارک‌های شبکه ترازیابی درجه یک ایران و بی‌هنجاری‌های جاذبه حاصل از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در دریا صورت گرفت (Kiamehr, 2006). در این پژوهش از داده‌های DEM ۱۵′′ × ۱۵′′ مبتنی بر داده‌های SRTM با قدرت تفکیک ۱۰۰ m، مدل ژئوپتانسیل جهانی GGM02S مبتنی بر داده‌های ماهواره GRACE و از ۲۶۰ نقطه ترازیابی با GPS برای مقایسه با ژئوید به دست آمده شده موسوم به IRGeoid06 استفاده و در پایان مدل ژئوید IRGeoid06 با RMS برابر با ۰/۵۸ m± ارائه شد (Kiamehr, 2006).

آخرین مدل ژئوید ایران موسوم به IRGeoid10 است که با به‌کارگیری انتگرال استوکس، روش remove-restore، روش دوم فشرده‌سازی هلمرت و روش FFT یک‌بعدی به دست آمده است (Hatam, 2010). داده‌های مورد استفاده در این مدل عبارتند از: داده‌های ثقل کهن BGI، مجموعه داده‌های ثقل جدید NCC، داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و داده‌های DTM. همچنین از ۸۱۹ نقطه ترازیابی با GPS برای مقایسه با ژئوید به دست آمده (IRGeoid10) استفاده و در پایان مدل ژئوید یاد شده با انحراف معیار ۰/۲۶ m± ارائه شد (Hatam, 2010). سیر تکاملی مدل‌های ژئوید جاذبی ایران به همراه دقت آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مدل‌های ژئوید ایران.

مدل‌های ژئوید جاذبی در ایران	دقت	تعداد نقاط ترازیابی با GPS	References
IRGeoid88	± ۱/۴(RMS)	---	(Weber and Zomorrodian, 1988)
IRGeoid01	± ۱/۲۶(RMS)	۲۵۸	(Ardalan et al., 2001)
IRGeoid05a	± ۱/۰۶۸(SD)	۵۱	(Safari et al., 2005)
IRGeoid05b	± ۰/۶۷۲(SD)	۲۰۰	(Nahavandchi and Soltanpour, 2005)
IRGeoid06	± ۰/۵۸(RMS)	۲۶۰	(Kiamehr, 2006)
IRGeoid10	± ۰/۲۶(SD)	۸۱۹	(Hatam, 2010)

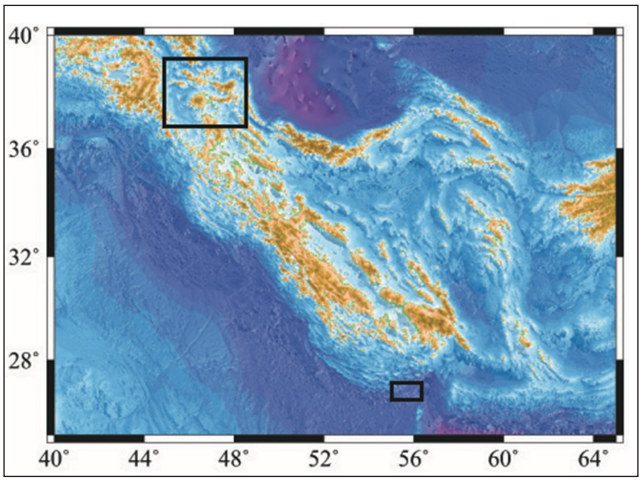
۳- داده‌های مورد نیاز و منطقه مورد مطالعه

به منظور بررسی جایگزینی ترازیابی هندسی با ترازیابی GPS باید از ایستگاه‌هایی استفاده کرد که به‌طور مشترک دارای ارتفاع ژئودتیک و ارتومتریک باشند. در این راستا از اطلاعات ارتفاعی شبکه چندمنظوره فیزیکال ژئودزی و ژئودینامیک ایران موسوم به MPGGNI05 (Multi-purpose Physical Geodesy and Geodynamic Network of Iran 2005) در منطقه آذربایجان، در محدوده جغرافیایی $37^\circ N<\varphi<39^\circ N$ و $45^\circ E<\lambda<49^\circ E$ با تراکم متوسط ۵۵ کیلومتر (۴۵ تا ۶۵ کیلومتر) برای فواصل بیشتر از ۲۰ کیلومتر و همچنین اطلاعات ارتفاعی منطقه قشمدر محدوده جغرافیایی $26/58^\circ N<\varphi<26/92^\circ N$ و $55^\circ E<\lambda<56^\circ E$ با تراکم متوسط ۵ کیلومتر، برای فواصل کمتر از ۲۰ کیلومتر استفاده شده است.

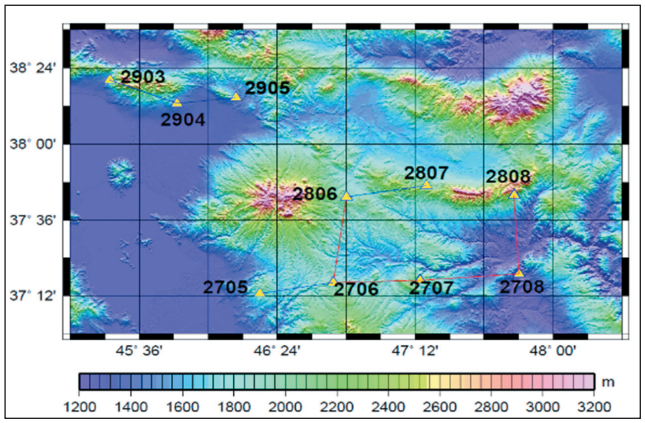
در شکل ۱ موقعیت مناطق مطالعاتی در محدوده جغرافیایی ایران، در شکل ۲ توپوگرافی، موقعیت ایستگاه‌ها و خطوط مبنا در منطقه آذربایجان و در شکل ۳ توپوگرافی، موقعیت ایستگاه‌ها و خطوط مبنا در جزیره قشم نمایش داده شده‌اند.

۴- روش پیشنهادی

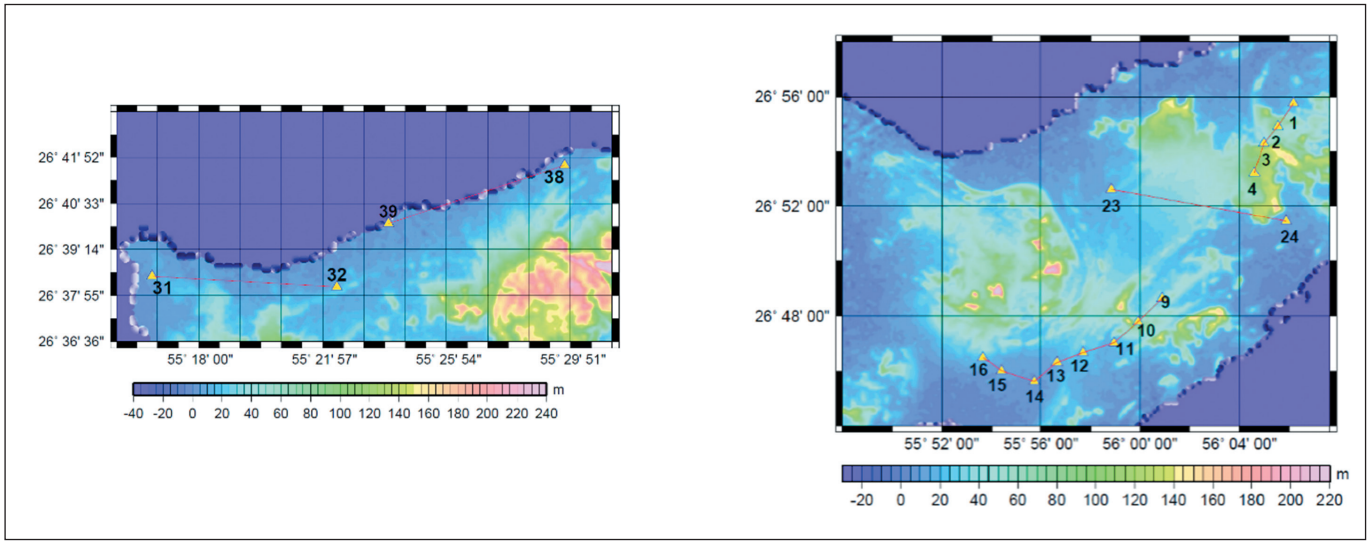
از آنجا که ارتفاع حاصل از ترازیابی با GPS از سطح مبنای بیضوی و ارتفاع ارتومتریک حاصل از ترازیابی هندسی از سطح مبنای ژئوید است؛ بنابراین برای مقایسه دقت نسبی ارتفاع‌های ارتومتریک حاصل از ترازیابی با GPS با ترازیابی مستقیم هندسی، باید ارتفاع‌های بیضوی به ارتفاع‌های ارتومتریک با سطح مبنای ژئوید تبدیل شوند.



شکل ۱- موقعیت مناطق مطالعه در محدوده ایران.



شکل ۲- توپوگرافی، ایستگاه ها و خطوط مبنا با فواصل ۲۰ تا ۶۵ کیلومتر در منطقه آذربایجان.



شکل ۳- توپوگرافی، ایستگاه‌ها و خطوط مبنا برای فواصل ۰/۵ تا ۲۰ کیلومتر در جزیره قشم.

برای تبدیل ارتفاع ژئودتیک به ارتفاع ارتومتریک نیاز به یک مدل ژئویید است. در پژوهش حاضر برای این تبدیل از آخرین مدل ژئویید ملی ایران با نام IRGeoid10 با دقت مطلق متوسط ۰/۲۶ m± و دقت نسبی متوسط ۲/۸ ppm± استفاده شده است (Hatam, 2010).

برای بررسی دقت ارتفاع ارتومتریک حاصل از ترازیابی با GPS و ارزیابی اثر طول خطوط مبنا روی آن، از ۵ دسته خطوط مبنا با فواصل متفاوت استفاده شده است که عبارتند از:

- دسته ۱: در منطقه قشم برای فواصل حدود ۱ کیلومتر و کمتر از آن (شکل ۴).
- دسته ۲: در منطقه قشم برای فواصل ۱ تا ۵ کیلومتر (شکل ۵).
- دسته ۳: در منطقه قشم برای فواصل ۵ تا ۲۰ کیلومتر (شکل ۶).
- دسته ۴: در منطقه آذربایجان برای فواصل ۲۰ تا ۴۵ کیلومتر (شکل ۷).
- دسته ۵: در منطقه آذربایجان برای فواصل ۴۵ تا ۶۵ کیلومتر (شکل ۸).

با استفاده از ارتفاع ارتومتریک و ارتفاع بیضوی هر نقطه می‌توان ارتفاع ژئویید هر ایستگاه GPS و سپس تفاضل ارتفاع‌های ژئویید نقاط خط مبنا را به‌صورت زیر به دست آورد (شکل ۹).

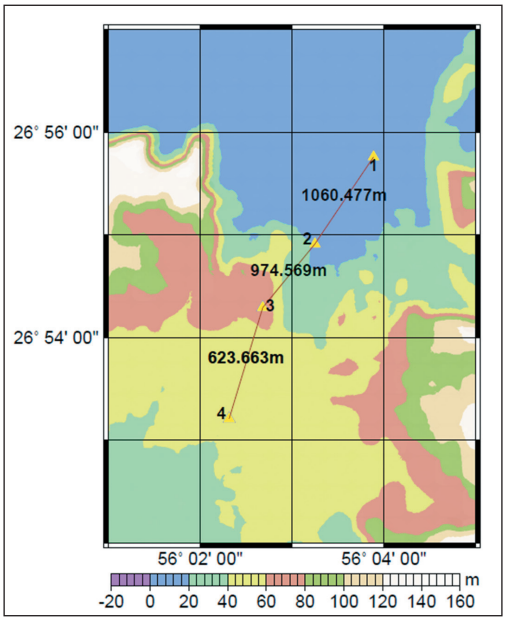
$$\left.\begin{aligned} N_i^{GPS} &= h_i - H_i \\ N_j^{GPS} &= h_j - H_j \end{aligned}\right\} \Rightarrow \Delta N_{ij}^{GPS} = \Delta h_{ij} - \Delta H_{ij} \qquad (۱)$$

که در آن N_i^{GPS} و N_j^{GPS} به ترتیب ارتفاع ژئویید حاصل از GPS در نقاط i و j، h_i و h_j به ترتیب ارتفاع بیضوی در نقاط i و j، H_i و H_j به ترتیب ارتفاع ارتومتریک در نقاط i و j، ΔN_{ij}^{GPS} اختلاف ارتفاع ژئویید حاصل از GPS میان نقاط i و j، Δh_{ij} اختلاف ارتفاع بیضوی میان نقاط i و j و ΔH_{ij} اختلاف ارتفاع ارتومتریک میان نقاط i و j هستند.

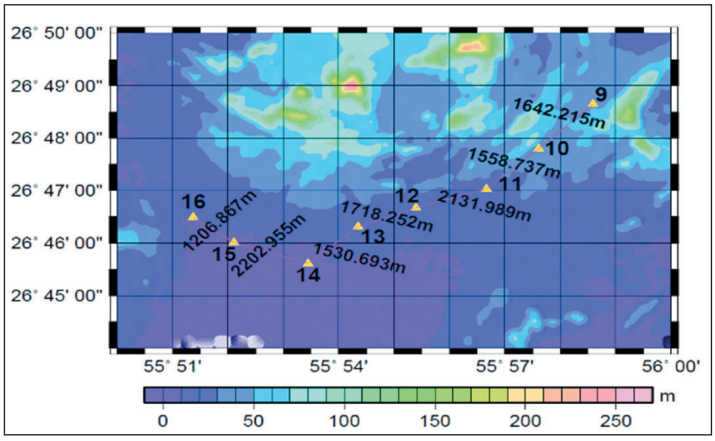
سپس می‌توان با استفاده از مدل ژئویید ملی ایران ارتفاع ژئویید حاصل از مدل ژئویید را برای هر نقطه از نیمرخ؛ و نیز با به‌کارگیری نتیجه حاصل از رابطه ۱ تفاضل اختلاف ارتفاع ژئویید هر طول مبنا را به‌صورت زیر به دست آورد:

$$\left.\begin{aligned} \delta N_i &= N_i^{GPS} - N_i^{Geoid} \\ \delta N_j &= N_j^{GPS} - N_j^{Geoid} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \Delta\delta N_{ij} = \Delta N_{ij}^{GPS} - \Delta N_{ij}^{Geoid} \qquad (۲)$$

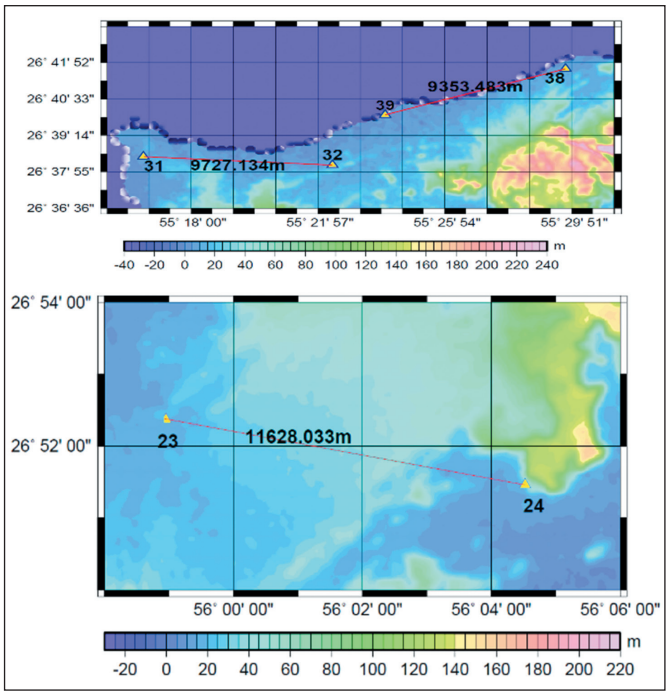
که در آن N_i^{Geoid} و N_j^{Geoid} به ترتیب ارتفاع ژئویید مدل نقاط i و j، δN_i و δN_j به ترتیب تفاضل میان ارتفاع ژئویید حاصل از GPS و ارتفاع ژئویید حاصل از مدل ژئویید در نقاط i و j، ΔN_{ij}^{Geoid} اختلاف ارتفاع ژئویید حاصل از مدل ژئویید میان نقاط i و j و $\Delta\delta N_{ij}$ تفاضل میان δN_i و δN_j هستند.



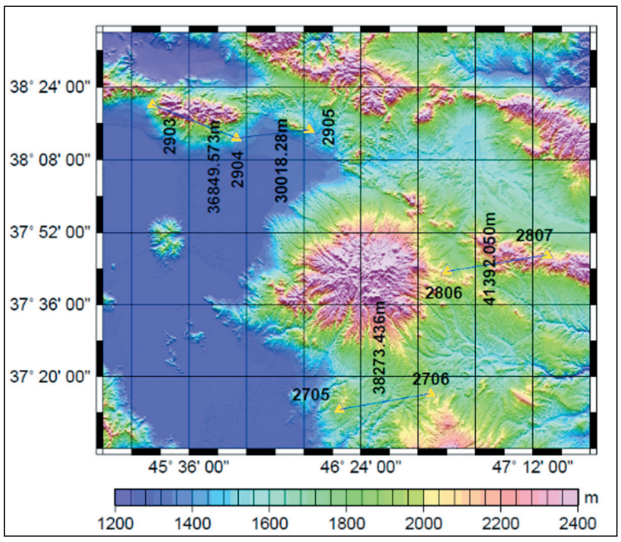
شکل ۴- خطوط مبنای دسته ۱ در منطقه قشم (فواصل کمتر از ۱ کیلومتر).



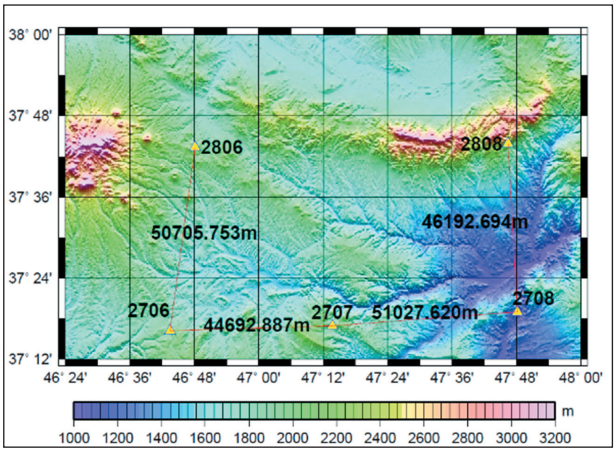
شکل ۵- خطوط مبنای دسته ۲ در منطقه قشم (فواصل ۱ تا ۵ کیلومتر).



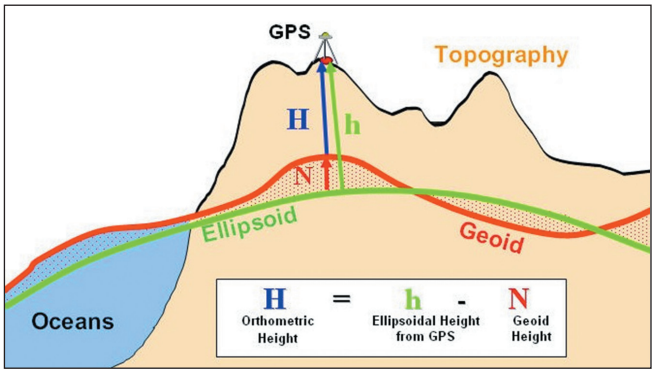
شکل ۶- خطوط مبنای دسته ۳ در منطقه قشم (فواصل ۵ تا ۲۰ کیلومتر).



شکل ۷- خطوط مبنای دسته ۴ در منطقه آذربایجان (فواصل ۲۰ تا ۴۵ کیلومتر).



شکل ۸- خطوط مبنایدسته ۵ در منطقه آذربایجان (فواصل ۴۵ تا ۶۵ کیلومتر).



شکل ۹- ارتباط میان ارتفاع ارتومتریک، ارتفاع بیضوی و ارتفاع ژئویید.

حال با استفاده از قانون انتشار خطاها می‌توان انحراف معیار اختلاف ارتفاع بیضوی خط مبنای ij را برای هر نیمرخ به دست آورد.

$$\left.\begin{matrix}\sigma h_i = 0.02\\ \sigma h_j = 0.02\end{matrix}\right\} \Rightarrow \sigma\Delta h_{ij} = \sqrt{\sigma h_i^2 + \sigma h_j^2} = 0.028\ m \quad (۳)$$

که در آن σh_i و σh_j به ترتیب انحراف معیار ارتفاع بیضوی نقاط i و j و $\sigma\Delta h_{ij}$ انحراف معیار اختلاف ارتفاع بیضوی در خط مبنای ij هستند.

در حالت نسبی برای محاسبه اختلاف ارتفاع ژئویید هر خط مبنا این رابطه برقرار است:

$$\left.\begin{matrix}N_i^{Geoid} = N_i^{GPS} - \delta N_i\\ N_j^{Geoid} = N_j^{GPS} - \delta N_j\end{matrix}\right\} \Rightarrow \Delta N_{ij}^{GPS} = \Delta N_{ij}^{Geoid} + \Delta\delta N_{ij} \quad (۴)$$

و طبق قانون انتشار خطاها برای رابطه ۴، این رابطه برقرار است:

$$\sigma\Delta N_{ij}^{GPS} = \sqrt{(\sigma\Delta N_{ij}^{Geoid})^2 + (\sigma\Delta N_{ij})^2} \quad (۵)$$

که در آن $\sigma\Delta N_{ij}^{GPS}$ انحراف معیار اختلاف ارتفاع ژئویید حاصل از GPS در خط مبنای ij، $\sigma\Delta N_{ij}^{Geoid}$ انحراف معیار اختلاف ارتفاع ژئویید در خط مبنای ij و $\sigma\Delta\delta N_{ij}$: مقدار RMS برای $\Delta\delta N_{ij}$ هستند.

انحراف معیار تفاضل اختلاف ژئویید هر خط مبنا ($\sigma\Delta\delta N_{ij}$) نیز به‌صورت زیر به دست می آید:

$$\sigma\Delta\delta N_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta\delta N_{ij} - \overline{\Delta\delta N}_{ij})^2}{n}} \quad (۶)$$

که در آن $\overline{\Delta\delta N}_{ij}$ متوسط $\Delta\delta N_{ij}$ها و n تعداد خطوط مبنا در نیمرخ مورد نظر هستند.

از آنجا که مدل ژئویید ملی ایران دارای دقت نسبی ppm ۲/۸± است (Hatam, 2010)؛ پس:

$$\sigma\Delta N_{ij}^{Geoid}(mm) = 2.8 \times L(km) \quad (۷)$$

که در آن، L طول خط مبنا بر حسب کیلومتر است.

طبق قانون انتشار خطاها برای رابطه ۱، این رابطه برقرار است:

$$\sigma\Delta H_{ij} = \sqrt{\sigma\Delta h_{ij}^2 + (\sigma\Delta N_{ij}^{GPS})^2} \quad (۸)$$

که در آن $\sigma\Delta H_{ij}$ انحراف معیار ΔH_{ij} است.

با استفاده از رابطه ۸ می‌توان دقت نسبی تعیین اختلاف ارتفاع GPS را بر حسب ppm به‌صورت زیر به دست آورد:

$$\sigma_{re.}(ppm) = \frac{\sigma\Delta H_{ij}}{d} \quad (۹)$$

که در آن σ(re.) (ppm) دقت نسبی تعیین اختلاف ارتفاع ارتومتریک حاصل از ارتفاع بیضوی و d طول خط مبنا بر حسب کیلومتر هستند.

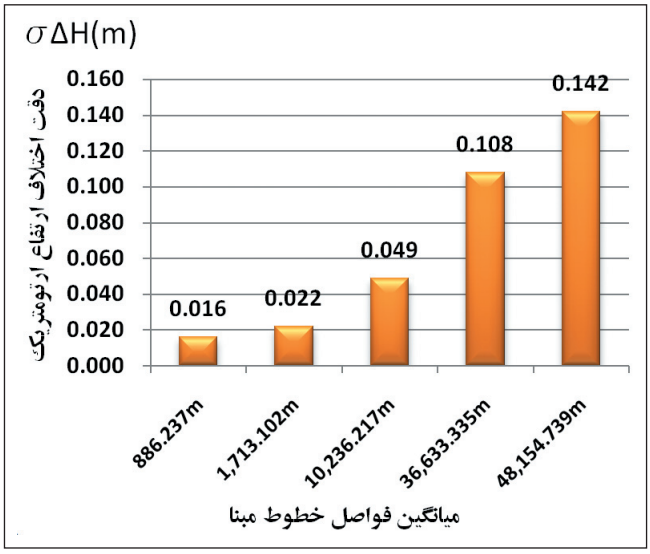
با محاسبه دقت نسبی تعیین اختلاف ارتفاع ارتومتریک حاصل از اندازه‌گیری‌های GPS می‌توان امکان‌سنجی جایگزینی ترازیابی دقیق با ترازیابی با GPS را بررسی کرد.

۵- بحث

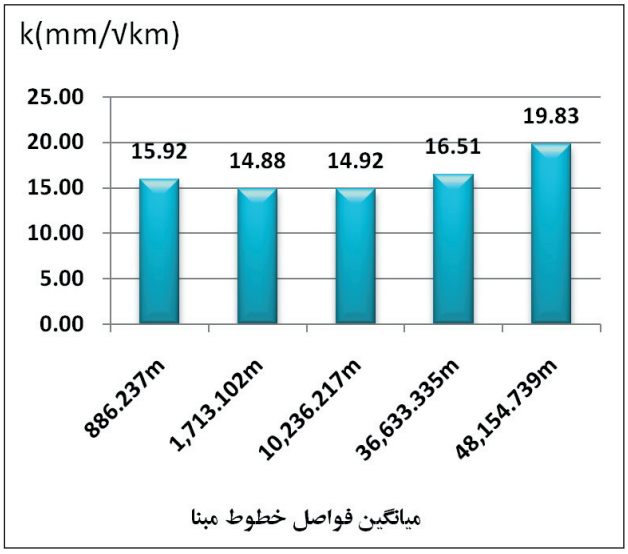
نتایج حاصل از محاسبات عددی در بخش ۴، در جدول ۲ ارائه شده است. محاسبات در ۵ دسته با طول خطوط مبنای مختلف به ترتیب صعودی رده‌بندی شده‌اند. بهترین دقت به دست آمده ±۰/۰۱۶ m برای متوسط طول خطوط مبنا در دسته اول (L<1km) با مقدار ۸۸۶/۲۳۷ m و بدترین دقت ±۰/۱۴۲ m برای متوسط طول خطوط مبنا در دسته پنجم (۴۵ km<L< ۶۵ km) با مقدار ۴۸۱۵۴/۷۳۹ m است. کمیت k به عنوان یک شاخص تعیین کننده درجه ترازیابی در سه حالت کمینه، متوسط و بیشینه به دست آمده است. بهترین مقدار متوسط به دست آمده برای کمیت k، در دسته سوم (۵ km <L< ۲۰ km) با مقدار ۱۵/۳۲ mm/√km و بدترین مقدار در دسته پنجم (۴۵ km <L< ۶۵ km) با مقدار ۲۰/۹۲ mm/√km است. شکل ۱۰ دقت اختلاف ارتفاع حاصل از ترازیابی با GPS نسبت به متوسط فواصل خطوط مبنا در هر دسته را نشان می دهد.

شکل ۱۱ ارتباط متغیر k (mm/√km) به عنوان معیار درجه ترازیابی در شبکه‌های ارتفاعی و متوسط طول خطوط مبنا را نشان می‌دهد.

همچنین مقایسه اختلاف میان اختلاف ارتفاع‌های ارتومتریک و اختلاف ارتفاع‌های بیضوی با اعمال مدل ژئویید (δΔh) و بدون اعمال مدل ژئویید (δΔh*) در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- دقت تعیین اختلاف ارتفاع ارتومتریک در ترازیابی با GPS بر حسب میانگین فواصل خطوط مبنا.



شکل ۱۱- دقت تعیین اختلاف ارتفاع ارتومتریک در ترازیابی با GPS بر حسب مقدار k به عنوان معیار درجه ترازیابی.

جدول ۲- دقت اختلاف ارتفاع ارتومتریک و شاخص درجه ترازیابی (k).

نیمرخ	L (km)	L(ave.) (m)	sΔH(ave.) (m)	k(min) (mm/√km)	k(ave.) (mm/√km)	k(max) (mm/√km)
۱	L<۱	۸۸۶/۲۳۷	۰/۰۱۶	۱۵/۹۲	۱۷/۰۰	۲۰/۵۴
۲	۱<L<۵	۱۷۱۳/۱۰۲	۰/۰۲۲	۱۴/۸۸	۱۶/۸۱	۱۹/۵۵
۳	۵<L<۲۰	۱۰۲۳۶/۲۱۷	۰/۰۴۹	۱۴/۹۲	۱۵/۳۲	۱۵/۳۹
۴	۲۰<L<۴۵	۳۶۶۳۳/۳۳۵	۰/۱۰۸	۱۶/۵۱	۱۷/۸۴	۱۸/۷۵
۵	۴۵<L<۶۵	۴۸۱۵۴/۷۳۹	۰/۱۴۲	۱۹/۸۳	۲۰/۴۶	۲۰/۹۲

جدول ۲- دقت اختلاف ارتفاع ارتومتریک و شاخص درجه ترازیابی (k).

نیمرخ	L (km)	L(ave.) (m)	L (m)	δΔh (m)	δΔh* (m)
۱	L<۱	۸۸۶/۲۳۷	۶۲۳/۶۶۴	-۰/۰۶۶	-۰/۰۴۳
			۹۷۴/۵۷۰	-۰/۰۳۹	-۰/۰۵۱
			۱۰۶۰/۴۷۷	-۰/۰۴۴	-۰/۰۵۵
۲	۱<L<۵	۱۷۱۳/۱۰۲	۱۲۰۶/۸۶۷	۰/۰۲۹	۰/۰۴۴
			۱۵۳۰/۶۹۴	-۰/۰۷۱	-۰/۱۰۰
			۱۵۵۸/۷۳۷	-۰/۰۶۳	-۰/۰۸۱
			۱۶۴۲/۲۱۶	-۰/۰۶۷	-۰/۰۶۱
			۱۷۱۸/۲۵۳	-۰/۰۳۹	-۰/۰۴۳
			۲۱۳۱/۹۹۰	-۰/۰۳۹	-۰/۰۳۰
			۲۲۰۲/۹۵۵	۰/۰۱۰	۰/۰۵۰
۳	۵<L<۲۰	۱۰۲۳۶/۲۱۷	۹۳۵۳/۴۸۴	۰/۰۷۸	۰/۰۷۰
			۹۷۲۷/۱۳۵	-۰/۳۴۳	-۰/۲۴۱
			۱۱۶۲۸/۰۳۴	-۰/۰۸۸	-۰/۰۲۷
۴	۲۰<L<۴۵	۳۶۶۳۳/۳۳۵	۳۰۰۱۸/۲۸	-۶/۲۳۰	-۶/۱۵۳
			۳۶۸۴۹/۵۷۳	-۱/۳۰۱	-۱/۱۶۰
			۳۸۲۷۳/۴۳۶	-۰/۷۶۵	-۰/۷۱۰
			۴۱۳۹۲/۰۵۰	-۱/۲۶۵	-۱/۱۹۹
۵	۴۵<L<۶۵	۴۸۱۵۴/۷۳۹	۴۴۶۹۲/۸۸۷	-۱/۴۱۰	-۱/۴۵۹
			۴۶۱۹۲/۶۹۵	۱/۴۹۲	۱/۵۱۱
			۵۰۷۰۵/۷۵۴	-۰/۳۲۵	-۰/۴۰۷
			۵۱۰۲۷/۶۲۱	-۲/۱۴۴	-۲/۲۳۶

۶- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش محاسبه و بررسی دقت نسبی اختلاف ارتفاع ارتومتریک حاصل از اندازه‌گیری‌های GPS در فواصل رده‌بندی شده و با استفاده از آخرین مدل ژئویید ملی ایران است. به‌طور کلی دقت مدل ژئویید مورد استفاده، منابع خطاهای GPS و طول خطوط مبنا، سه عامل اصلی و مؤثر در تعیین دقت ارتفاع ارتومتریک با استفاده از روش ترازیابی با GPS هستند. خطای تروپسفر و ترکیب هندسی ماهواره‌ها عوامل اصلی محدود کننده دقت ارتفاعی GPS هستند که برای رویارویی با آنها می‌توان به استفاده از معادلات تفاضلی در هنگام پردازش داده‌ها، استفاده از مدل‌های استاندارد تصحیح تأخیر تروپسفر، افزایش ارتفاع آنتن و استفاده از گیرنده‌های با قابلیت مشاهده همزمان ماهواره‌های دو سامانه تعیین موقعیت (GPS و GLONASS) برای بهبود مقدار DOP اشاره کرد.

یکی دیگر از عوامل محدود کننده دقت تعیین ارتفاع ارتومتریک در روش ترازیابی با GPS، افزایش طول خط مبناست. با افزایش طول خط مبنا، از یک سو دقت نسبی اختلاف ارتفاع ژئویید (ΔN) که حاصل از مدل ژئویید است؛ و از سوی دیگر میزان بهبود منابع خطای GPS همچون خطاهای مداری، تروپسفر و یونسفر در روش‌های تفاضلی کاهش می‌یابند.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که بیشترین دقت تعیین اختلاف ارتفاع ارتومتریک با استفاده از روش ترازیابی با GPS، مقدار متوسط ±۰/۰۱۶ m برای متوسط طول خطوط مبنا در دسته اول (L<۱ km) با مقدار ۸۸۶/۲۳۷ m و کمترین دقت، مقدار متوسط ±۰/۱۴۲m برای متوسط طول خطوط مبنا در دسته پنجم (۴۵km <L< ۶۵ km) با مقدار ۴۸۱۵۴/۷۳۹ m است. بر پایه نتایج به دست آمده در شکل ۱۰، با افزایش طول خط مبنا، دقت تعیین اختلاف ارتفاع ارتومتریک در این روش کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن کمیت k به عنوان یک شاخص تعیین کننده درجه ترازیابی، نتایج حاصل از شکل ۱۱ نشان می‌دهد که کمترین مقدار k برای خط مبنا با طول متوسط ۱۷۱۳/۱۰۲ m در دسته دوم (۱ km <L< ۵ km)، مقدار (mm/√km) ۱۴/۸۸ و بیشترین مقدار برای خط مبنا با طول متوسط ۴۸۱۵۴/۷۳۹ m در دسته پنجم (۴۵ km<L< ۶۵ km) مقدار (mm/√km) ۱۹/۸۳ است. بر این اساس، تعیین اختلاف ارتفاع ارتومتریک به روش ترازیابی با GPS معادل ترازیابی درجه ۴ در ترازیابی هندسی است. دقت نسبی متوسط ترازیابی با GPS با مدل IRGeoid10 برابر ۷/۵۴ ppm و دقت نسبی متوسط ترازیابی با GPS با مدل IRGeoid88، ۳۶ ppm بوده است (Kiamehr, 2001) که در مقایسه با هم بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است.

با گسترش روز افزون فناوری GPS و با توجه به مزایای فراوان ترازیابی با GPS در مقایسه با روش ترازیابی هندسی همچون آسانی در انجام عملیات ترازیابی، عدم نیاز به دید مستقیم، امکان پایش پیوسته جابه‌جایی‌های ارتفاعی، انجام ترازیابی در شب و داشتن صرفه اقتصادی و از سوی دیگر معادل بودن آن با ترازیابی درجه ۴ هندسی می‌توان تا آماده شدن مدل‌های ژئویید دقیق‌تر، در پروژه‌های عمرانی، پایش پیوسته جابه‌جایی‌های ارتفاعی سازه‌های عمرانی و تعیین موقعیت نقاط کنترل در عملیات فتوگرامتری به خوبی از آن بهره برد.

گفتنی است که این جایگزینی برای خیلی از کشورها به‌طور کامل انجام شده است؛ مانند فرانسه که دارای یک مدل ژئویید دقیق با دقت یک تا سه سانتی‌متر است. از این راه یک بهبود قابل ملاحظه در تولید مشاهدات و نتایج شبکه‌های دقیق ارتفاعی به وجود آمده است. این بهبود برای انجام کارهای زیربنایی و نیز حفظ و نگهداری شبکه‌های موجود از لحاظ هزینه و زمان بسیار اهمیت دارد. در ایران، با توجه به دقت قابل استفاده در بهترین مدل‌های ژئویید موجود (با دقت دو تا سه دسی‌متر)، بخشی از فعالیت‌های ایجاد و گسترش و نیز حفظ و نگهداری شبکه‌های ارتفاعی، می‌توانند با روش پیشنهادی در این مقاله جایگزین شوند و بهینه‌سازی‌های در خور توجهی از دید زمان و هزینه به وجود آید.

نتایج حاصل بر پایه مدل ژئویید ملی موسوم به IRGeoid10 به عنوان آخرین مدل ژئویید ایران با دقت مطلق متوسط ۲۶ cm± و دقت نسبی متوسط ۲/۸ ppm± است و می‌توان برای تعیین میزان کارایی آن، مدل‌های دیگر را برای تعیین اختلاف ارتفاع ارتومتریک به کار برد و نتایج را مقایسه کرد.

با توجه به اینکه تروپسفر در هر ۱۰۰ متر اختلاف ارتفاع خط مبنا ۵-۲± cm خطا ایجاد می‌کند (Gurtner et al., 1989)؛ حتی‌الامکان از خطوط مبنا با اختلاف ارتفاع کمتر استفاده می‌شود.

در صورت نامطلوب بودن مقدار DOP در یک منطقه می‌توان از مشاهدات سامانه‌های GLONASS و یا GALILEO برای بهبود مقدار DOP استفاده کرد.

با توجه به اینکه صرف نظر کردن از تغییرات مرکز فاز آنتن گیرنده سبب چند سانتی‌متر خطای ارتفاعی می‌شود؛ بنابراین باید در پردازش داده‌ها از مدل‌های تصحیح مربوط استفاده شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از سازمان نقشه‌برداری کشور و همه کادر فنی برای تأمین داده‌های مورد نیاز این پژوهش و به ویژه از جناب آقای دکتر حاتم برای کمک‌ها و مشاوره‌های بی‌دریغشان سپاسگزاری می‌شود. این پژوهش از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر برگرفته شده است.

References

Ardalan, A. A., Hatam, Y., Sharifi, M. A., Safari, A., Ghazavi, K. and Motagh, M., 2001- High resolution geoidof Iran. Technical report, NCC, Iran, 155 pp.

Gurtner, W., Beutler, G., Botton, S., Rothacher, M., Geiger, A., Kahle, H. G., Schneider, D. and Wiget, A.,1989- The use ofthe Global Positioning System in mountainous areas,ManuscriptaGeodetica, 14, 53-60.

Hamesh, M. and Zomorrodian, H., 1992, Iranian gravimetric geoid determination, second step. NCC J Surveying 6: 17-24, 52-63.

Hatam, Y., 2010- Establishment of multi-observations geodetic and gravimetric networks and determination of geoid in Iran , France, University of Montpellier 2.

Kiamehr, R., 2001- Potential of Iranian geoid for GPS/Levelling, National Cartographic Center of Iran, Geomatics 80 Conference, Tehran, Iran.

Kiamehr, R., 2006- A strategy for determining the regional geoid by combining limited ground data withsatellite-based global geopotential and topographical models: a case study of Iran. J Geoid 79: 602-612.

Kleijer, F., 2004- Troposphere Modeling and Filteringfor Precise GPS Leveling, Delft University of Technology, Netherlands,pp. 3.

Nahavandchi, H. and Soltanpour, A., 2005- High resolution geoid determination, Iranian Gravimetric geoid 2005 (IRGG05), Technical report, NCC, Iran, 121 pp.

Safari, A., Ardalan, A. A. and Grafarend, 2005-A new ellipsoidal gravimetric, satellite altimetry and astronomic boundary value problem, a case study: The geoid of Iran. J. Geodyn., 39: 545-568.

Sheng, L., 2005- The Feasibility of Replacing Precise Leveling with GPS for Permafrost Deformation Monitoring, Department of Geomatics Engineering, University of Calgery, UCGE Reports Number 20232.

Weber, G. and Zomorrodian, H., 1988- Regional geopotential model improvement for the Iranian geoiddetermination. Bull. Géod., 62: 125-141.

Yahya, M. H. and NorKamarudin, Md., 2007, The impact of tropospheric delay towards the accuracy of GPS height determination, Malaysia, UniversitiTeknologi Malaysia pub.

The feasibility of replacing precise levelling with GPS in Iran

H. Mahdizadeh[1] and Y. Djamour[2*]

[1]M.Sc., Islamic Azad University, Ahar Branch, Ahar, Iran

[2]Associate Professor, Geomatics College, National Cartographic Center, Tehran, Iran

Received: 2015 October 14 Accepted: 2016 January 16

Abstract

Today, with the use of Global Positioning System (GPS), it is possible to determine the geodetic height (relative to a Reference Ellipsoid) in easy mode with less time and cost. Despite of some advantages for leveling with GPS (GPS/Levelling) relative to traditional leveling, there is an important limitation which indicates the difference between Ellipsoid (as the reference datum for geodetic height) and Geoid (as the reference datum for orthometric height) named geoidal height. In order to achieve maximum accuracy in height component and then evaluating the quality results, different aspects of GPS/Levelling are considered in this study. In order to study the Feasibility of replacing precise levelling with GPS in Iran, a part of 55 km physical geodesy and geodynamic network in Azerbaijan region as well as the dense geodetic multipurpose network in Qeshm island were used. Based on different distances between each couple of points, this information, consisting of Orthometric and Geodetic heights for each point, is classified in 5 groups. The last Geoid model of Iran (IRGeoid10) with an absolute average accuracy of ±26 cm and a relative average accuracy of ±2.8 ppm are used for geoidal height. Obtained results show the accuracy of leveling height difference with GPS would be reduced by increasing the length of baseline. Index K as a criterion for determining level degree was calculated. This index shows that levelling with GPS in Iran could provide a precision of 4th degree leveling which can serve many engineering applications.

Keywords: Geoid, Orthometric height, Geodetic height, GPS, levelling with GPS

For Persian Version see pages 185 to 192

*Corresponding author: Y. Djamour; E-mail: djamour@ncc.org.ir