نشریه علمی- ترویجی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دوره ششم، شماره ۳، شهریور ماه ۱۳۹۴

کنترل کیفیت و سرشکنی مشاهدات سری دوم شبکه ترازیابی درجه یک ایران و آزمون‌های مربوطه

معصومه آمیغ‌پی*[1]، سیاوش عربی[2]، مرتضی صدیقی[3]

[1] دکتری ژئودزی- کارشناس محاسبات اداره ترازیابی دقیق- سازمان نقشه برداری کشور
amighpey@ncc.org.ir

[2] کارشناس ارشد نقشه برداری- رئیس اداره ترازیابی دقیق- سازمان نقشه برداری کشور
arabi_s@gmail.com

[3] دکتری ژئودزی- مدیر نقشه برداری زمینی - سازمان نقشه برداری کشور
sedighi@ncc.org.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۳، تاریخ تصویب تیر ۱۳۹۴)

چکیده

مشاهدات سری دوم شبکه ترازیابی دقیق کشور به منظور اصلاح نقاط ضعف مشاهدات سری اول، از سال ۱۳۸۰ شروع و در سال ۱۳۸۸ به اتمام رسید. پس از اعمال تصحیحات ارتومتریک، کالیبراسیون، انکسار و ضریب انبساط طولی، آزمون‌های پیش از سرشکنی بر مشاهدات اعمال شد. نتایج این آزمون‌ها، بیانگر بهبود کیفیت مشاهدات پس از اعمال این تصحیحات، اما باقی‌ماندن قسمت عمده‌ای از اثرات سیستماتیک می‌باشد. خطای استاندارد سری دوم مشاهدات شبکه ترازیابی دقیق درجه یک ایران پس از اعمال تصحیحات، $\pm 0.61\frac{mm}{\sqrt{Km}}$ برآورد می‌شود. به منظور دستیابی به ارتفاع نقاط، با معلوم فرض کردن ارتفاع ایستگاه کنار جزرومد سنج اسکلهٔ شهید رجایی، از سرشکنی کمترین مربعات استفاده شد. بیشترین ارتفاع ۲۸۸۷,۸۵۶ متر مربوط به ایستگاه DDDH1110 در جاده جیرفت به بافق در استان کرمان و کمترین ارتفاع ۲۵,۶۷۸- مربوط به ایستگاه AP-C1041 در نشتارود استان مازندران به دست آمد. پایین‌ترین دقت نقاط، مربوط به مسیر DPDQ در منطقه نیک‌شهر در استان سیستان و بلوچستان به مقدار۸ سانتی‌متر بود که یکی از علل آن می تواند بسته نشدن لوپ‌های DP و DQ باشد. آزمون‌های بعد از سرشکنی نشان دهنده کوادراتیک بودن خطای بست ولی نرمال نبودن توزیع باقیمانده-های سرشکنی به علت وجود خطای سیستماتیک باقیمانده در مشاهدات می باشد.

واژگان کلیدی: ترازیابی دقیق، سرشکنی کمترین مربعات، خطای استاندارد مشاهدات شبکه ترازیابی دقیق

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

به طور کلی هر کمیتی که مورد مشاهده قرار می-گیرد، همواره تحت تاثیر دو نوع خطای اتفاقی و سیستماتیک است. در ژئودزی برای محاسبه مجهولات و تعدیل خطاهای اتفاقی مشاهدات در مرحله سرشکنی معمولا از فیلتر کمترین مربعات استفاده می‌شود. این سرشکنی زمانی معتبر خواهد بود که از عدم تاثیر منابع خطاهای سیستماتیک در مشاهدات اطمینان کامل داشته باشیم. برای مقابله با منابع خطاهای سیتماتیک و حذف اثر آنها بسته به نوع و رفتارشان، کالیبراسیون و تنظیم وسایل اندازه‌گیری، اتخاذ شیوه خاص مشاهداتی و محاسبه تصحیح مربوط به خطای سیستماتیک رویکردهایی است که مورد توجه قرار می‌گیرد. در شبکه‌های ارتفاعی، به دلیل حجم زیاد مشاهدات در مقایسه با تعداد مجهولات و وجود منابع مختلف خطاهای سیتماتیک، حساسیت نسبت به خطاهای سیستماتیک زیاد است و ضروری است قبل از سرشکنی، از میزان تاثیر خطاهای سیتماتیک آگاه باشیم، لذا به منظور کنترل کیفیت مشاهدات آزمون‌های پیش از سرشکنی بر مشاهدات انجام می شود.

شبکه درجه یک سراسری ترازیابی دقیق براساس ۹۸ لوپ (۶۸ لوپ بسته و ۳۰ لوپ باز) و ۲۳۹ خط ترازیابی طراحی شد (شکل۱) که از این تعداد خطوط ترازیابی، ۲۳۵ خط ترازیابی بین سال های۱۳۶۰ تا ۱۳۷۶ طبق دستورالعمل مصوب زمان خود و با تجهیزات اپتیکی اندازه-گیری شده است. یکی از نقاط ضعف مشاهدات سری اول این شبکه، طولانی شدن زمان انجام قرائت‌های ترازیابی خطوط و لوپ‌ها بوده است. از آنجا که منطقهٔ ایران از لحاظ ژئودینامیکی منطقه فعالی است، ۱۷ سال مدت زمان مناسبی برای انجام عملیات اجرایی شبکه نبوده است. نقطه ضعف دیگر شبکه، عدم تطابق زمانی در انجام قرائت لوپ‌ها بود که گاهی قرائت خطوط یک لـوپ بیـــش از ۶ سال به طول انجامیده است و با توجه به زلزله‌خیز بودن مناطق مختلف ایران، این مدت زمان طولانی است که یکی از دلایل افزایش خطای بست برخی از لوپ‌ها به بیش از مقدار مجاز است. همچنین اطلاعات جانبی برای اعمال تصحیحات انکسار، کالیبراسیون و ارتومتریک وجود نداشت. مشاهدات سری دوم این شبکه، به منظور بررسی جابجائی‌های ارتفاعی پوسته زمین (ژئودینامیک) و تعیین ارتفاع نقاطی که به دلایل مختلف پس از اندازه گیری سری اول ازبین رفته و مجددا بازسازی شده‌اند، در کمترین بازه زمانی ممکن، بین سالهای ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۸ انجام شد. مشاهدات جدید بر اساس دستورالعمل اصلاح شده ترازیابی درجه یک انجام شده است. در این سری از مشاهدات، ترازیابی خطوط و لوپ های مجاور در حداقل فاصله زمانی ممکن انجام شد. مهمترین بخش‌های تصحیح شده دستورالعمل مربوط به امکان استفاده از دستگاه‌های دیجیتالی مانند دستگاه DINI12 زایس و اندازه‌گیری مشاهدات اضافی برای تصحیح خطاهای سیستماتیک در زمان مشاهدات است. از جمله این اندازه‌گیری‌های اضافی می‌توان به مشاهده دمای هوای محیط در سه ارتفاع شاخص و دمای نوار انوار و فشار محیط اشاره نمود. در این مقاله پس از بررسی خطاهای ترازیابی دقیق و نحوه تصحیح آنها، آنالیز پیش از سرشکنی شامل آنالیز آماری و آنالیز طیفی مشاهدات انجام شده است. سپس مشاهدات تصحیح شده سری دوم شبکه ترازیابی دقیق کشور، به منظور دستیابی به ارتفاع ارتومتریک نقاط سرشکن شده است و پس از آن آنالیزهای بعد از سرشکنی بر شبکه ارتفاعی کشور انجام شده و نتایج آنها آمده است.

شکل۱- مسیرهای ترازیابی درجه یک کشور

۲- بررسی خطاهای ترازیابی دقیق و نحوه تصحیح آن‌ها

نظر به اهمیت تصحیحات مشاهدات ترازیابی دقیق، مهم‌ترین عوامل خطای مشاهدات ترازیابی که شامل خطاهای: نشست وسایل، اثر میدان مغناطیسی، اثر کرویت زمین، درجه‌بندی شاخص، اثر انکسار، اثر درجه حرارت و

اثر عدم توازی سطوح پتانسیل می باشد، ارزیابی و تصحیح شد. خطای نشست وسایل با رعایت تساوی تقریبی تعداد دهنه‌های رفت وبرگشت حذف شد[۱]. از طرفی، در دوربین‌های DINI12 پوشش محافظی قرار داده شده که دستگاه را از اثر میدان مغناطیسی محافظت می‌کند. اثر کرویت زمین نیز با استقرار دوربین در وسط دهنه قابل حذف است. برای محاسبه خطای درجه‌بندی و اعمال تصحیح کالیبراسیون شاخص‌های بارکد، تجهیزات نوری موجود در سازمان نقشه‌برداری جوابگوی دقت لازم برای محاسبه تصحیح نیست و با این تجهیزات تنها می‌توان مجاز بودن شاخص را برای مشاهدات ترازیابی درجه یک تایید نمود. بدین منظور، شاخص‌های بارکد هر ۶ ماه یک‌بار در آزمایشگاه کالیبره می‌شود و شاخص‌های ناسالم تشخیص و حذف می شوند.

برای اعمال تصحیحات انکسار و ضریب انبساط طولی ترمومتر تفاضلی طراحی و ساخته شد. برای محاسبه تصحیح انکسار از مدل بهبود یافته Kukkamaki استفاده شد[۲]. طبق این مدل مقدار تصحیح انکسار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R = 10^{-5}\gamma\left(\frac{S}{50}\right)^{2}.\delta.D \qquad (۱)$$

که در این رابطه، **R** مقدار تصحیح انکسار برای اختلاف ارتفاع هر دهنه، $\boldsymbol{\delta}$ اختلاف درجه حرارت بین ارتفاعات، **S** طول خط دید، **D** اختلاف قرائت‌های جلو و عقب و $\boldsymbol{\gamma}$ ضریب انکسار می‌باشد. بیشینه مقدار این تصحیح برای قطعات ترازیابی با فواصل ۲-۳ کیلومتری، ۰,۰۰۳۳۸۰ متر بوده است. همچنین تصحیح خطای درجه‌بندی و درجه حرارت عبارت است از:

$$h^{cor} = h^{meas}(1 + m^{sxs} + \alpha^{inv}(t^{inv} - t^{ref})) \qquad (۲)$$

که در آن m^{sxs} مقدار تصحیح کالیبراسیون، α^{inv} مقدار ضریب انبساط طولی انوار، t^{inv} دما بر روی شاخص و t^{ref} میزان دمای آزمایشگاه (معمولاً ۲۰ درجهٔ‌سانتیگراد) هنگام کالیبراسیون است. بیشینه مقدار این تصحیح در قطعات ترازیابی در فواصل ۲-۳ کیلومتری ۰,۰۰۲۲۴۵ متر بوده است.

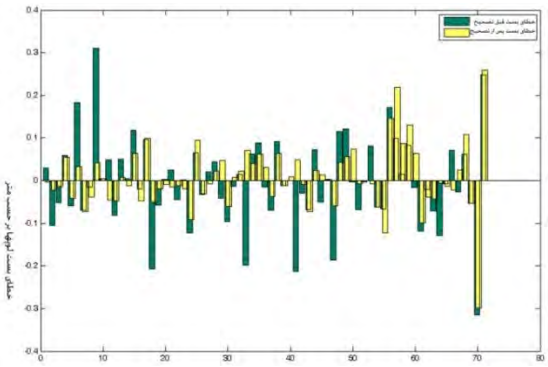
همچنین، اثر عدم توازی سطوح پتانسیل که خود را در خطای بست لوپ نشان می دهد، با استفاده از مشاهدات ثقل شبکه درجه یک ترازیابی بر مشاهدات اعمال شد. روش هلمرت یکی از متداول‌ترین روش‌های محاسبه ارتفاع ارتومتریک در ژئودزی است که برمبنای انتقال به سمت پایین شتاب گرانشی اندازه‌گیری شده در سطح زمین براساس روش پوانکاره-پری استوار است[۳]. مقدار تصحیح ارتومتریک بین دو ایستگاه A و B : OC_{AB} ، از رابطه زیر به دست می آید[۴]:

$$OC_{AB} = \sum_{i=1}^{k}\frac{g_i - \gamma_0}{\gamma_0}\delta n_i + \frac{\overline{g_A} - \gamma_0}{\gamma_0}H_A - \frac{\overline{g_B} - \gamma_0}{\gamma_0}H_B \qquad (۳)$$

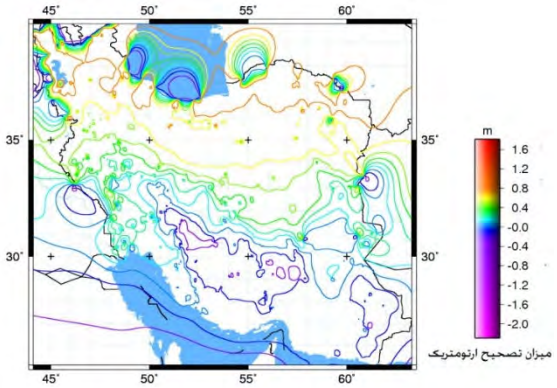
که در این رابطه k تعداد دهنه ها، δn_i اختلاف ارتفاع مشاهداتی در دهنه i ام، γ_0 شتاب ثقل نرمال در عرض جغرافیایی متوسط منطقه، g_i مقدار متوسط شتاب ثقل در سطح زمین در ابتدا و انتهای دهنه i ام، $\overline{g}$ مقدار میانگین شتاب‌ثقل در امتداد خط شاغولی بین سطح و ژئویید می‌باشد که با در نظر گرفتن تقریب هلمرت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{g} = g + 0.0424H \qquad (۴)$$

شکل۲ نمایشی از میزان خطای بست لوپ‌ها قبل و بعد تصحیح می‌باشد. همانطور که از این شکل پیداست، تصحیح ارتومتریک در غالب موارد موجب کاهش خطای بست لوپ شده است. بیشترین میزان تصحیح ارتومتریک، ۰,۲۶۹۵ متر در لوپ AN واقع در مناطق کوهستانی می‌باشد. شکل۳ تصحیح ارتومتریک محاسبه شده در مسیرهای ترازیابی درجه یک کشور را به صورت منحنی میزان نشان می‌دهد. وابستگی ارتفاعی تصحیح ارتومتریک در این شکل به خوبی مشهود می‌باشد.



شکل۲- میزان خطای بست لوپ‌های ترازیابی دقیق قبل (ستون‌های سبز) و بعد تصحیح ارتومتریک (ستون‌های زرد)



شکل۳- تصحیح ارتومتریک محاسبه شده در مسیرهای ترازیابی درجه یک کشور

۳- آزمون و آنالیزهای پیش از سرشکنی

آزمون و آنالیز مشاهدات ترازیابی دقیق پس از اطمینان از رعایت استانداردهای تعیین شده در مرحلهٔ اندازه‌گیری و نیز اعمال تصحیحات لازم بر روی مشاهدات شبکه انجام می‌گیرد. در مرحله اول، پس‌از مشاهده هر قطعه ترازیابی مشاهدات رفت و برگشت با یکدیگر مطابقت داده شده و از لحاظ مجاز بودن اختلاف رفت و برگشت (اختلاف کمتر از $3\sqrt{K}$ میلیمتر) کنترل می‌گردد. پس از اتمام ترازیابی هر خط، معیار کنترل خط نیز بررسی می‌گردد. آزمون‌های پیش از سرشکنی شامل محاسبه خطای استاندارد پیشنهادی ویگنال[۵] ، آنالیز آماری و آنالیز طیفی مشاهدات می‌باشد که میزان حضور خطای سیستماتیک در مشاهدات را ارزیابی می‌کند. در این قسمت نتایج این بررسی‌ها خواهد آمد.

۳-۱- خطای استاندارد شبکه ترازیابی

خطای استاندارد شبکه ترازیابی: η، برای فواصل ۱ تا ۳ کیلومتری از رابطه زیر به دست می‌آید[۵] :

$$\eta_1^2 = (1/4n)(\Sigma \Delta^2/R) \qquad \frac{mm^2}{Km} \qquad (۵)$$

که در این رابطه، Δ خطای رفت و برگشت بین دو نقطه ترازیابی مجاور هم، R فاصله بین دو نقطه و n تعداد قطعات می‌باشد. مطابق این فرمول η_1 برای نقاط ترازیابی مجاور محاسبه گردید. خطای استاندارد سری اول مشاهدات شبکه ترازیابی دقیق درجه یک ایران $\frac{mm}{\sqrt{Km}}$ ۰٫۶۹۶ ± و خطای استاندارد سری دوم مشاهدات این شبکه، $\frac{mm}{\sqrt{Km}}$ ۰٫۵۹۷ ± قبل از اعمال تصحیحات و $\frac{mm}{\sqrt{Km}}$ ۰٫۶۱۱ ± بعد از اعمال تصحیحات به دست آمده است. خطای استاندارد یک شبکه ارتفاعی در لوپ‌ها با فرمول زیر محاسبه می‌شود[۶]:

$$\eta_2^2 = \frac{\Sigma e^2/L}{n} \qquad \frac{mm^2}{Km} \qquad (۶)$$

که در آن e خطای بست حلقه‌ها برحسب mm و L طول حلقه‌ها برحسب Km و n تعداد حلقه‌ها است. برای ۷۰ حلقه موجود η_2 $\frac{mm}{\sqrt{Km}}$ ۳٫۵۰۸۲ ± قبل از اعمال تصحیحات و $\frac{mm}{\sqrt{Km}}$ ۲٫۴۴۰۴ ± پس از اعمال تصحیحات محاسبه گردیده است.

۳-۲- آنالیز آماری مشاهدات ترازیابی دقیق سری دوم قبل و پس از اعمال تصحیحات انکسار و ضریب انبساط طولی

از دیگر ابزارهای کنترل کیفیت مشاهدات شبکه‌های ارتفاعی قبل از سرشکنی و ارزیابی میزان حضور خطای سیتماتیک در آنها، آنالیز آماری می باشد. با توجه به دستورالعمل مشاهدات ترازیابی دقیق، کمیت‌های موسوم به کمیت‌های کنترل کیفیت براساس مشاهدات قابل تعریف هستند که این کمیت‌ها در صورت نبود خطاهای سیستماتیک در مشاهدات از نظر آماری از تابع توزیع نرمال پیروی می‌کنند. مهمترین این کمیت‌ها، خطای دهنه، خطای قطعات و خطای خطوط استاندارد شده می‌باشند[۶]. بدین منظور، آنالیز آماری کمیت‌های کنترل کیفیت ترازیابی دقیق قبل و بعد از اعمال تصحیحاتی همچون خطای انکسار و ضریب انبساط طولی انجام شده است[۷]. در این قسمت نتایج آنالیز آماری خطای قطعات مشاهدات سری دوم ترازیابی دقیق کشور، قبل و پس از اعمال تصحیحات انکسار و ضریب انبساط طولی آورده می‌شود.

تعداد کل قطعاتی که در سری دوم شبکهٔ ترازیابی دقیق درجهٔ یک ایران با مشاهده ترمومتر انجام شده است،

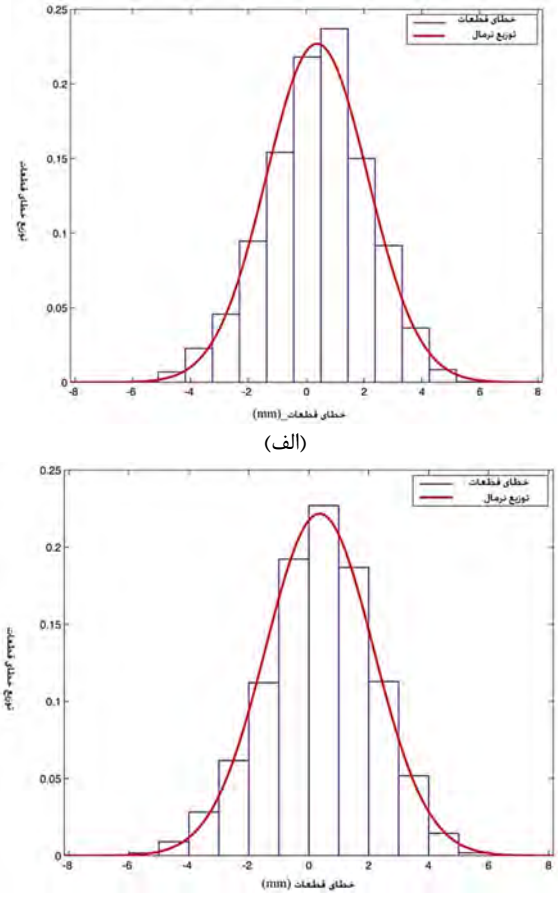
۸۵۴۴ قطعه (۶۲ درصد کل قطعات) بوده است. نمودار توزیع خطای قطعات قبل و پس از اعمال تصحیحات در شکل۴ و مشخصات و پارامترهای آماری آن در جدول۱ آمده است. برای آزمون نرمال بودن توزیع کمیت خطای قطعات، آزمون خوبی برازش توزیع نرمال محاسبه می‌گردد[۸]. مقدار بحرانی در سطح اطمینان ۹۵٪ برای توزیع کای‌اسکوئر برابر ۳۶ /۲۲ است که مقدار آماره برای مشاهدات قبل و بعد تصحیح از این مقدار بزرگتر است، گرچه پس از تصحیح این مقدار به مقدار بحرانی نزدیک تر شده است. در نتیجه در سطح اطمینان ۹۵٪ فرض صفر رد می‌شود، یعنی کمیت خطای قطعات در شبکهٔ ایران قبل و بعد تصحیح دارای توزیع نرمال نیست که این بیانگر تاثیر منابع خطای سیستماتیک باقیمانده در مشاهدات می‌باشد. این منابع شامل خطای انکسار و ضریب انبساط طولی در قطعات فاقد مشاهده ترمومتر، عدم تصحیح کالیبراسیون و همچنین احتمال وجود نوعی خطای ناشناخته سیستماتیک در دستگاه می‌باشد.

کشیدگی ۰/۱۹- نشان می‌دهد که منحنی توزیع خطای قطعات نسبتا متقارن است. از طرفی، تیزی ۰/۰۵- نشان می‌دهد که منحنی توزیع خطای قطعات (ρ_{1s}) نسبت به منحنی توزیع نرمال کمی پخ‌تر است و باتوجه به بزرگ‌بودن واریانس ρ_{1s}، ($\sigma^2\rho_{1s} = 3.23mm^2$) می‌توان نتیجه‌گرفت که $|\rho_{1s}|$ بطور قابل ملاحظه‌ای مخالف صفر بوده ، مشاهدات تحت‌تاثیر خطای سیستماتیک می‌باشند.

برای آزمون انحراف میانگین خطای قطعات ($\bar{\delta}$) از صفر، از آماره $|t_{\bar{\delta}}|$ استفاده می‌شود که در رابطه زیر تعریف شده و دارای توزیع t است. فرض صفر $H_0 : \bar{\delta} = 0$ و فرض جایگزین $H_1 : \bar{\delta} \neq 0$ می باشد. فرض صفر پذیرفته می‌شود، اگر داشته باشیم:

$$|t_{\bar{\delta}}| = \frac{\bar{\delta}\sqrt{n}}{\hat{\sigma}} \langle t_{1-\frac{\alpha}{2},f} \qquad (۷)$$

مقدار بحرانی در سطح احتمال $\alpha = 0.05$، ۱/۹۶ است. مقدار آماره $|t_{\bar{\delta}}| = 24.73$ قبل از تصحیح و $|t_{\bar{\delta}}| = 23.51$ بعد از تصحیح می‌باشد که در هر دو بزرگتر از ۱/۹۶ است و فرض صفر رد می‌شود، یعنی میانگین خطای قطعات قبل و بعد تصحیح به طور معنی‌داری از صفر انحراف دارد. از موارد اشاره شده در بالا می‌توان نتیجه گرفت که علی رغم وجود خطای سیتماتیک در مشاهدات، هیچ‌گونه خطای سیستماتیک بزرگ در مشاهدات شبکه وجود ندارد.



شکل ۴- هیستوگرام و منحنی توزیع برآورد شده برای خطای قطعات سری دوم مشاهدات شبکه ترازیابی دقیق درجه یک ایران: الف- قبل از اعمال تصحیحات، ب- پس از اعمال تصحیح

۳-۳- تشخیص تأثیرات سیستماتیک از آنالیز طیفی

از دیگر ابزارهای تشخیص خطای سیتماتیک در مشاهدات، آنالیز طیفی کمترین مربعات است که برای اولین بار توسط ونچیک در سال ۱۹۷۱ ابداع گردیده است[۹]. برای تشخیص خطاهای سیستماتیک مدوله نشده بر روی مشاهدات ترازیابی دقیق، اختلافات بین رفت و برگشت در هر قطعهٔ ترازیابی با توجه به یک آرگومان

ذخیره می‌شود تا یک دستهٔ داده‌ها را ایجاد نماید. این اختلافات مقادیر تابع هستند و پارامترهای مناسب انتخاب شده آرگومان هستند. در اینجا آرگومان، ممکن است میانگین اختلاف ارتفاع قطعه، متوسط شیب زمین در امتداد خط ترازیابی و ... باشد. زمانی‌که یک دستهٔ داده‌ها ساخته شد، تابع دانسیتهٔ طیفی برای این دسته از داده‌ها به کمک یکی از تکنیک‌های تئوری تقریب تشکیل می‌شود. به دلیل هم فاصله نبودن دسته داده ها، روش آنالیز طیفی کمترین مربعات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول۱- مشخصات آماری خطای قطعات قبل و پس از تصحیح

شاخص	قبل از تصحیحات	بعد از تصحیحات
تعداد قطعات	۱۳۸۰۲	۱۳۸۰۲
میانگین خطای قطعات	۰,۳۷۰	۰,۳۶
واریانس خطای قطعات	۳,۰۸۵	۳,۲۳
کمترین مقدار خطای قطعات	-۶,۷	-۷,۶۵
بیشترین مقدار خطای قطعات	۷,۱	۷,۲۰
تعداد قطعات با مقدارخطای مثبت (٪)	۸۱۴۸ (۵۹,۰۳)	۸۱۸۲ (۵۹,۲۸)
تعداد قطعات با مقدار خطای منفی (٪)	۵۴۴۲ (۳۹,۴۳)	۵۵۹۲ (۴۰,۵۲)
تعداد قطعات با مقدار خطای برابر صفر (٪)	۲۱۲ (۱,۵۴)	۲۸ (۰,۲۰)
طول متوسط قطعات بر حسب متر	۲۲۵۱,۴۸	۲۲۵۱,۴۸
کمینه مقدار طول قطعات بر حسب متر	۲۹,۰۵	۲۹,۰۵
بیشینه مقدار طول قطعات بر حسب متر	۹۷۱۰,۶	۹۷۱۰,۶
کشیدگی	-۰,۱۹۲	-۰,۱۹۵
تیزی	-۰,۰۵	۰,۰۱۸
مقدار آماره آزمون خوبی T برازش	۲۰۰,۵۷۲	۱۳۳,۵۱
مقدار بحرانی آزمون خوبی برازش	۲۲,۳۶	۲۲,۳۶
مقدار آماره آزمون انحراف میانگین خطای قطعات از صفر	۲۴,۷۳	۲۳,۵۱
مقدار بحرانی آزمون انحراف میانگین خطای قطعات از صفر	۱,۹۶	۱,۹۶

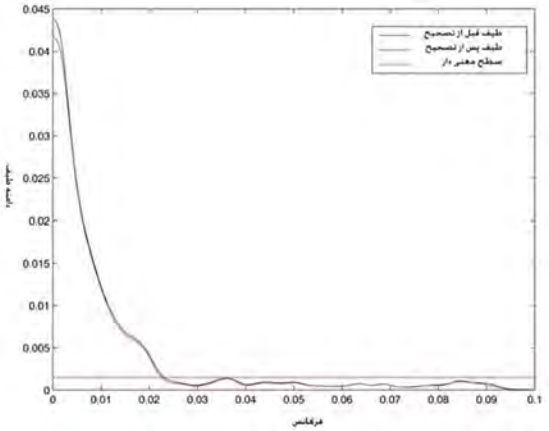
برای یک بردار $f(x_i), i = 1,2,...,n$ متشکل از آرگومان x_i، هدف یافتن بردار طیف $S(w_j)$ بر حسب آرگمان فرکانس: w_j است. با در نظر گرفتن توابع پایه $\sin(w_j t)$ و $\cos(w_j t)$ به دنبال یافتن برداری مانند P هستیم که نزدیکترین بردار به بردار f باشد:

$$P = \hat{c}_1 \cos(w_j t) + \hat{c}_2 \sin(w_j t) \qquad (۸)$$

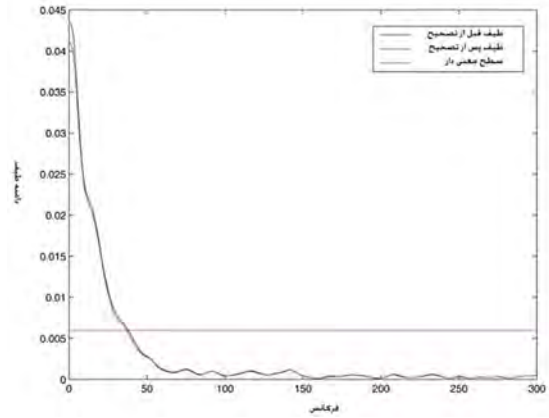
طبق آنالیز کمترین مربعات، مقادیر طیفی تابع f از رابطه زیر به دست می آید:

$$s(w_j) = \frac{f^T P(w_j)}{f^T f} \qquad (۹)$$

وقتی که طیف مستقل دستهٔ داده‌ها محاسبه شد، فرکانس‌های پایین نشان دهندهٔ وجود مؤلفه‌هایی با پریود بلند در سری داده‌ها هستند. بنابراین، از آنجا که اعوجاجات سیستماتیک اغلب دارای پریود بلند هستند، خود را در شروع طیف نشان می‌دهند. اگر این مؤلفه‌ها از نظر آماری بامعنی باشند، اعوجاجات سیستماتیکی هستند که ما درپی یافتن آن‌ها هستیم. شکل ۵ نتایج طیف‌های نرمال شده خطای قطعات مشاهدات ترازیابی نسبت به دو آرگمان اختلاف ارتفاع وشیب، قبل و پس از تصحیح و سطح معنی‌دار را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها خط آبی طیف نرمال قبل از اعمال تصحیحات و خط قرمز طیف نرمال پس از اعمال تصحیحات را نشان می‌دهد و خط صورتی سطح معنی‌دار را مشخص کرده است. همانطور که در این اشکال دیده می‌شود، با وجود رفتار مشابه فرم طیفی مشاهدات قبل و بعد از اعمال تصحیحات، پس از اعمال تصحیحات انکسار و ضریب انبساط طولی شاهد جهش‌های کوتاه‌تر سری اطلاعاتی هستیم، گرچه پس از اعمال تصحیحات هنوز شاهد پیک‌های معنی‌داری در فرکانس‌های پایین هستیم که این نمایانگر باقی ماندن مقدار قابل توجهی از اثرات سیستماتیک در مشاهدات است.



(الف)



(ب)

شکل ۵- طیف نرمال خطای قطعات قبل و بعد از اعمال تصحیحات نسبت به آرگمان: الف- اختلاف ارتفاع، ب- شیب

۴- سرشکنی یک پارچه شبکه ترازیابی درجه یک سراسری سری دوم بعد از اعمال تصحیحات ارتومتریک و انکسار

پس از انجام محاسبات اولیه و کنترل‌های مربوطه می‌بایست خطاهای موجود شبکه را تعدیل نمود. روش متداول سرشکنی داده‌های ترازیابی، روش کمترین مربعات می‌باشد. اطلاعات ورودی برای سرشکنی مشاهدات شبکه ارتفاعی عبارت است از اختلاف ارتفاع بین قطعات، وزن مشاهدات و نقاط یا نقطهٔ ارتفاعی مبنا.

طبق تعریف، سطح مبنای ارتفاعی ژئویید است. ژئویید سطح هم پتانسیلی است که کمترین فاصله را نسبت به سطح متوسط دریاهای آزاد دنیا دارد. حداقل زمان لازم مشاهدات جزرومدسنج‌ها برای تعیین نقطه مبنای ارتفاعی ۱۸/۶ سال است. مدیریت آبنگاری سازمان نقشه‌برداری کشور از سال ۱۳۶۸ به بعد اقدام به تأسیس ایستگاه‌های جزرومدنگار خودکار در بنادر مهم خلیج‌فارس و دریای عمان نمود. در حال‌حاضر پنج ایستگاه دائمی در بنادر چابهار، شهید رجایی، بوشهر، کنگان و اسکلهٔ امام‌حسن(ع) نصب‌شده است. جزر و مد نگارهای خودکار نصب‌شده در این ایستگاه‌ها، از نوع مکانیکی و ساخت A.OTT کشور آلمان است. از آنجا که ایستگاه DN-G.1001 در کنار مهم‌ترین بندر کشور، اسکلهٔ شهیدرجایی بندرعباس قرار دارد و بیشترین جمع‌آوری اطلاعات جزرو مدی نیز مربوط به این ایستگاه است، از بین پنج جزر و مد سنج سازمان نقشه‌برداری، جزر و مد سنج اسکلهٔ شهیدرجایی بندرعباس در کنار نقطه DN-G1001 به‌عنوان مبنای شبکه ارتفاعی کشور درنظر گرفته شد. اطلاعات جزرومدسنج اسکلهٔ شهید رجایی بندرعباس بعد از یک دورهٔ زمانی ۱۹ ساله مشاهدات، با استفاده از نرم افزار foreman به صورت هارمونیک مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت و سطح متوسط دریا تخمین زده شد. سپس با استفاده از مشاهدات ترازیابی دقیق ارتفاع ایستگاه DN-G.1001 نسبت به این سطح، ۳,۷۲۳۰ متر محاسبه شده است.

پیش از شروع محاسبات و سرشکنی مشاهدات، مدل ریاضی و ماتریس واریانس- کوواریانس مشاهدات باید معلوم گردند. مدل ریاضی پارامتریک سرشکنی شبکه ارتفاعی به‌صورت زیر است که در آن نقطه یا نقاطی که معمولا به جزرومدسنج‌ها بسته شده و یا ارتفاعات آن‌ها با دقت‌های بالا معلوم است، ثابت فرض می‌شوند.

$$\Delta h_{ij} + v_{ij} = H_j - H_i \qquad (۱۰)$$

به‌طوری‌که H_i و H_j: ارتفاعات نقاط i و j مجهولات مساله، Δh_{ij}: اختلاف ارتفاع مشاهداتی بین این دونقطه و v_{ij}: خطای مشاهدات می‌باشد. ماتریس وزن مشاهدات با فرض استقلال مشاهدات و تناسب واریانس‌ها با طول مسیر ترازیابی تعیین می‌گردد که در این حالت ماتریسی قطری مطابق زیر است:

$$P_l = \sigma_0^{\,2} C_l^{\,-1} \qquad (۱۱)$$

$$C_l = diag(\sqrt{L_i}) \qquad (۱۲)$$

در این رابطه L طول مسیر ترازیابی به کیلومتر است و $\sigma_0{}^2$ از محاسبه خطای استاندارد لوپ‌های شبکه ترازیابی تخمین زده می‌شود. برای به‌دست‌آوردن خطای استاندارد لوپ‌های شبکه ترازیابی از رابطه ویگنال (رابطه ۶) استفاده شده که مقدار $2.4404\ \frac{mm}{\sqrt{Km}}$ به‌دست آمده و این مقدار برای تمام نقاط یکسان درنظر گرفته شده است. پس از سرشکنی ارتفاعات، باقیمانده‌های مشاهدات سرشکن شده محاسبه و مطابق رابطه ۱۳ در تعیین واریانس فاکتور ثانویه: $\hat{\sigma}_0^2$ ، به‌کار می‌رود و با اعمال فاکتور واریانس ثانویه دقت مجهولات: $\hat{C}_{\hat{x}}$، از رابطه ۱۴ برآورد می‌شود.

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{V}^T P \hat{V}}{df} \qquad (۱۳)$$

$$\hat{C}_{\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T C_l^{-1} A)^{-1} \qquad (۱۴)$$

در این روابط $\hat{V}$ بردار باقیمانده ، df درجه آزادی و A ماتریس ضرایب می‌باشد.

به منظور سرشکنی مشاهدات سری دوم شبکه ارتفاعی درجه یک ایران به روش کمترین مربعات، از نرم‌افزار Geolab استفاده گردیده است. تعداد نقاط ارتفاعی تعدیل شده ۱۳۴۸۹ ایستگاه و درجه آزادی سرشکنی ۶۹ می‌باشد. جدول‌های۲و۳ نتایج آماری سرشکنی مشاهدات خام و تصحیح شده را نشان می‌دهد. همانطور که نتایج این جدول‌ها نشان می دهد، اعمال تصحیحات موجب بهبود دقت شبکه شده است. پایین‌ترین دقت نقاط، مربوط به مسیر DPDQ در منطقه نیک شهر در استان سیستان و بلوچستان به مقدار۸ سانتی‌متر بود که یکی از علل آن می‌تواند بسته نشدن لوپ‌های DP و DQ باشد. بیشترین ارتفاع ۲۸۸۷,۸۵۶ متر مربوط به ایستگاه DDDH1110 در جاده جیرفت به جاده بافق در استان کرمان و کمترین ارتفاع ۲۵,۶۷۸- مربوط به ایستگاه AP-C1041 در نشتارود استان مازندران به دست آمده است.

جدول ۲- نتایج آماری سرشکنی مشاهدات خام

آماره	ارتفاع (متر)	دقت (متر)
مینیمم	-۲۴,۶۹۷	۰,۰۰۴
ماکزیمم	۲۸۸۷,۵۰۹	۰,۱۰۲
میانگین	۱۱۰۴,۲۶۹	۰,۰۷۳

جدول ۳- نتایج آماری سرشکنی مشاهدات تصحیح شده

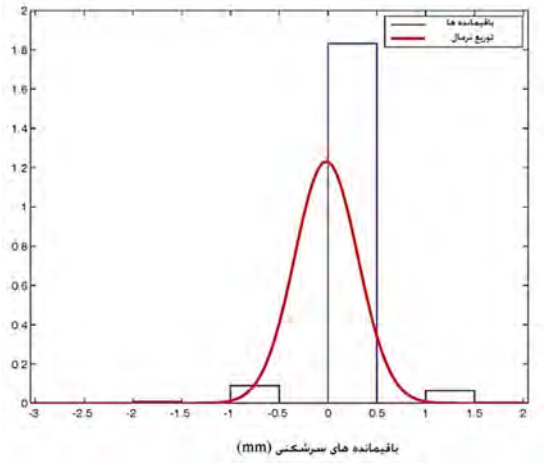
آماره	ارتفاع (متر)	دقت (متر)
مینیمم	-۲۵,۶۷۸	۰,۰۰۴
ماکزیمم	۲۸۸۷,۸۵۶	۰,۰۸
میانگین	۱۱۰۹,۳۵۵	۰,۰۵۹

۵- آزمون‌های بعد از سرشکنی

در بررسی کیفیت نتایج بعد از سرشکنی مشاهدات، آزمون‌هایی که در مورد تابع چگالی احتمال مفروض انجام می‌گیرد، شامل آزمون‌های نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها($\bar{r}$) و فرم کوادراتیک خطای بست (آزمون فاکتور واریانس) می‌باشد. برای آزمون نرمال بودن توزیع کمیت، آزمون خوبی برازش توزیع نرمال، روی آمارهٔ با توزیع کای‌اسکوئر و درجهٔ آزادی f محاسبه می‌گردد. بدین منظور آزمون خوبی برازش نرمال بر روی باقیمانده ها اعمال شد که در سطح اطمینان ۹۵٪ این آزمون رد شد (جدول۴). شکل ۶ نشان‌دهنده توزیع باقی مانده هاست که انحراف آن از تابع توزیع نرمال (منحنی قرمز) در این شکل مشهود است.

جدول۴- پارامترهای آزمون توزیع نرمال باقیمانده ها

$\aleph^2_{7,95\%}$	آماره T	درجه آزادی
۱۴,۰۶۷۱	۳,۴۷۲۲×۱۰ ^۱۰	۷



شکل ۶- توزیع باقیمانده های سرشکنی و تابع توزیع نرمال آن

برای آزمون کوادراتیک بودن خطای بست در صورتی که σ_0^2 مشخص باشد، آماره y (رابطه ۱۵) باید از تابع چگالی احتمال کای اسکوئر با درجه آزادی f در سطح

اطمینان $1-\alpha$ پیروی کندکه به طور معمول این آزمون در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام می‌شود.

$$y = \frac{df\sigma_0^2}{\sigma_0^2} \qquad (۱۵)$$

برای خطای بست سری دوم مشاهدات شبکه ترازیابی کشور، این آزمون در سطح اطمینان ٪۹۵ پذیرفته شد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

آنچه از آنالیز آماری و طیفی مشاهدات ترازیابی درجه یک پس از اعمال تصحیات انکسار و ضریب انبساط طولی پیداست، کاهش خطای سیستماتیک در مشاهدات، اما باقی ماندن قسمت عمده‌ای از اثرات سیستماتیک پس از اعمال این تصحیحات می‌باشد. این اثرات می تواند ناشی از عدم اعمال تصحیح کالیبراسیون شاخص‌ها باشد که به دلیل نداشتن تجهیزات اینترفرامتری قابل اعمال نبوده و با تجهیزات اپتیکی نیز این تصحیح برای شاخص‌های بارکد دقت کافی را ندارد. علاوه بر آن، وجود نوعی از خطای سیستماتیک ناشناخته در دستگاه ترازیاب نیز می تواند از عوامل وجود خطای سیستماتیک در مشاهدات باشد. بررسی آماری مشاهدات نشان‌دهنده بهبود کیفیت مشاهدات سری دوم شبکه ترازیابی دقیق نسبت به مشاهدات سری اول می‌باشد که مرهون زمان‌بندی مناسب انجام مشاهدات (در فاصله زمانی ۸ سال) و قرائت همزمان مسیرهای مجاور و البته اعمال تصحیحات لازم بر مشاهدات می‌باشد.

آن‌چه که در مورد نتایج این شبکه می‌توان اظهار داشت این است که علی‌رغم وجود خطاهای سیستماتیک باقیمانده در شبکهٔ ترازیابی کشور، با انتخاب فواصل تکرار مناسب، می‌توان از این شبکه در مطالعات وضعیت ژئودینامیکی ایران و بررسی تغییرات ارتفاعی در نواحی اطراف گسل‌های فعال بهره‌جست. همچنین، غیر از مناطق فرونشست، می‌توان از ارتفاعات سرشکن‌شده برای کارهای مهندسی و عمرانی در تهیهٔ نقشه‌های بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس استفاده نمود. از دستاوردهای سری دوم مشاهدات شبکه ترازیابی کشور می‌توان به اعمال تصحیحات به مشاهدات، ایجاد یک شبکه ملی قابل اعتماد و کشف حداقل ۳۵ منطقه فرونشست اشاره نمود. در ادامه کار، تثبیت سطح مبنای شبکه ارتفاعی کشور با پردازش اطلاعات هر پنج ایستگاه جزرومدسنج موجود امری لازم و ضروری می‌باشد. همچنین نصب ایستگاه دائم GPS در محل جزرومدسنج‌های ارتفاعی به منظور پایش تغییر موقعیت این نقاط باید مورد توجه قرار گیرد.

مراجع

[۱] عربی، س.، مالکی، ا.، کوه‌زارع، ، ا.، ایازیان‌ماوی، م.، معینی،ح.، جوادی،م. (۱۳۸۵). " ترازیابی دقیق در ایران". ناشر: سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران.

[2] KAKKURI, J., (1983). “About the future use of the Kukkamaki leveling refraction formula”. Contributions to the Workshop on Precise Leveling. Precise Leveling, P235-250.

[3] Helmert, F. R. (1890). “Die Schwerkraft im Hochgebirge, insbesondere in den Tyroler Alpen”. Veroff. Konigl. Preuss. Geod. Inst., No. 1.

[4] Heiskanen, W. A., and Moritz, H. (1967).” Physical Geodesy”. WH Freeman & Co, San Francisco, USA, 364.

[5] Bomford, G. (1977). “Geodesy”. Oxford University.Third edition with correction.

[۶] معمارزاده، ی. (۱۳۸۰). " آنالیز آماری مشاهدات شبکه ترازیابی دقیق درجه یک ایران". همایش ژئوماتیک ۱۳۸۰، سازمان نقشه برداری کشور

[۷] آمیغ پی، م.، عربی، س. (۱۳۹۰). " گزارش کنترل کیفیت مشاهدات سری دوم شبکه ترازیابی دقیق درجه یک ایران". سازمان نقشه برداری کشور، تهران.

[۸] هاشمی پرست، س.م.(۱۳۸۵). " آمار و احتمال در مهندسی و علوم". جلد اول، چاپ پنجم، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

[9] VANICEK, P. (1971). “Further development and properties of the spectral analysis by least Squares”. Astrophysics and Space Science, 12, pp.10-73.