

ارزیابی مدل‌های جهانی زمینوار GOCE و EGM2008 با نقاط لاپلاس در ایران

رامین کیامهر*^۱ و آزاده چاوشی نژاد^۲^۱گروه نقشه‌برداری، دانشگاه زنجان، ایران^۲گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۱۳)

چکیده

تلفیق مدل‌های زمینوار (ژئوئید) گرانی‌سنجی محلی و جهانی با مدل زمینوار هندسی حاصل از ترازبایی و GPS به صورت گسترده برای کاهش خطاهای مدل‌سازی زمینوار در کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به وجود خطاهای متعدد سامان‌مند (سیستماتیک) در داده‌های ترازبایی و GPS، در این تحقیق اولین بار در ایران زوایای انحراف قائم استروژئوئیدی برای کنترل خطاها و تصحیح مدل‌های زمینوار گرانی‌سنجی جهانی به منزله روشی جایگزین مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور رویه (سطح)‌های تصحیحی دو، سه و چهار پارامتری برای مدل‌سازی انطباق زوایای انحراف قائم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تلفیق انحراف‌های استروژئوئیدی برای ۱۰ نقطه لاپلاس در ایران با مدل‌های GOCE و EGM2008 نشان می‌دهد که با برازش رویه‌های تصحیحی، در معادله‌های دو پارامتری اختلاف انحراف قائم، امکان بهبود مدل‌های جهانی وجود دارد. مقایسه مقادیر انحراف معیار قبل و بعد از برازش در رویه تلفیقی با نقاط مستقل، نشان‌دهنده کاهش مقدار انحراف معیار اختلاف مولفه‌های انحراف قائم در راستای شمالی- جنوبی برای مدل GOCE از ۰.۰۹۵ به ۰.۰۰۳ ثانیه است. همچنین مقدار انحراف معیار اختلاف مولفه‌های انحراف قائم در راستای شرقی- غربی مدل EGM2008 کاهش از ۰.۲۴۶ به ۰.۰۰۸ ثانیه را بعد از برازش نشان می‌دهد. مقادیر انحراف معیار زاویه انحراف قائم برای مدل ۲ پارامتری به‌طور کلی کارکرد بهتری با داده‌های به‌کاررفته در تحقیق حاضر دارد. همچنین مدل EGM2008 با اختلاف کمی انطباق بهتری با داده‌های لاپلاس نشان می‌دهد. علت انطباق بهتر مدل EGM2008 را می‌توان، استفاده گسترده این مدل از داده‌های گرانی‌سنجی زمینی و همچنین داده‌های رقومی ارتفاعی با دقت زیاد دانست. برای برآورد دقیق‌تر کیفیت مدل‌های زمینوار جهانی و محلی و تحقیقات آتی، استفاده از داده‌های لاپلاس با کمیت بیشتر از راه مشاهدات دوربین‌های دیجیتال سمت‌الراس سمت‌القدم (زینت نادیر) با توزیع مناسب در کل کشور توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ژئوئید جاذبی، انحراف‌های قائم، لاپلاس، رویه تصحیحی، EGM2008، GOCE

Evaluation of the EGM2008 and GOCE global geoid models versus the Laplace points in Iran

Ramin Kiamehr^{1*} and Azadeh Chavoshi Nezhad²¹Department of Surveying, University of Zanjan, Iran²Department of Physics, Islamic Azad University, Hamedan Branch, Iran

(Received: 12 June 2013, accepted: 4 March 2014)

Summary

The deflection of vertical components, are the second order spatial derivatives of the gravity potential, efficiently counteract signal attenuation at the low and

*Corresponding author:

kiamehr@kth.se

*نگارنده رابط:

medium frequencies. Regional gravimetric geoid and quasi-geoid models are now commonly fitted to GPS-leveling data, which simultaneously absorb GPS/leveling and quasi/geoid errors due to their inseparability. We propose that independent vertical deflections are used instead as they are not affected by this inseparability problem. The formulation is set out for geoid slopes and changes in slopes. In this research, 10 Laplace points from the Iranian astro-geodetic networks were utilized for calibration and combination of the EGM2008 and GOCE global geoid models. Several two-, three- and four-parameter- models were used as a correction surface for the combination and evaluation of the geoid models. The standard deviation of the deflection of vertical components before and after fitting in geoid models evaluated with independent data. The results showed a significant improvement in the N-S direction of the GOCE model from 0.095 to 0.003 and in the E-W direction of the EGM2008 model from 0.246 to 0.008. To sum up, the two-parameter models worked best among the other corrective surface models. Also, the EGM2008 model gave slightly better results versus the GOCE model. For any future researches, use of homogenous and high quality zenith-nadir digital camera data is strongly recommended.

Keywords: Gravimetric geoid, Laplace points, corrective surface, EGM2008, GOCE

۱ مقدمه

برازش زمینوار (ژئوئید) گرانی سنجی محلی یا مدل‌های شبه‌زمینوار برای داده‌های ترازیبی با GPS به صورت یک الگوی گسترده درآمده است. تلفیق دو مدل گرانی سنجی و هندسی زمینوار، خطاهای مربوط به ترازیبی با GPS و زمینواری را به صورت محسوسی کاهش می‌دهد. با توجه به وجود خطاهای متعدد سامان‌مند در داده‌های ترازیبی و GPS، استفاده از داده‌های مستقل دیگر برای ارزیابی مدل گرانی سنجی و تلفیق مدل‌ها توصیه می‌شود (فدرستون ۲۰۰۴). برای مثال این خطاها در ترازیبی ممکن است شامل خطا در تعیین داده ارتفاعی ترازیبی به خاطر تاثیر توپوگرافی سطح دریا و تصحیح نشدن تاثیر گرانی در مشاهدات شبکه و در GPS شامل خطاهای ناشی از وردسپهر و یون‌سپهر باشد. روش‌های گوناگونی برای برازش این دو رویه توصیه شده و مورد استفاده قرار گرفته است (برای مثال: میلیبرت، ۱۹۹۵؛ جیانگ و دوکوئن، ۱۹۹۶؛ فورسبرگ، ۱۹۹۸؛ کوتساکیس و سیدریس، ۱۹۹۹؛ فوتوپولوس، ۲۰۰۵؛ فدرستون و اسپرول، ۲۰۰۶؛ سلطان‌پور و همکاران، ۲۰۰۶). مدل‌های زمینوار هندسی

تاکنون به صورت گسترده برای ارزیابی مدل‌های زمینوار محلی و جهانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (فدرستون، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۶).

در این حال زوایای انحراف قائمی که به لحاظ استروژئوئیدی مورد مشاهده قرار گرفته است، منبعی از اطلاعات میدان گرانی زمین به دست می‌دهد که مستقل از خطاهای رایج در ترازیبی و GPS است (برای مثال: فدرستون، ۲۰۰۶ و همچنین جکلی، ۱۹۹۹؛ کوهترتیر، ۱۹۹۹، هیرت و فلوئی، ۲۰۰۷؛ هیرت و سیبر، ۲۰۰۸؛ کوهترتیر و عبد-المطاعی، ۲۰۰۷؛ مارتی، ۲۰۰۷؛ مولر و همکاران، ۲۰۰۷). بهره‌گیری از مولفه‌های زوایای انحراف قائم برای تعیین پارامترهای میدان گرانی به صورت گسترده در ژئودزی و ژئوفیزیک به اثبات رسیده است. به علاوه، امروزه دوربین‌های سمت‌الرأس سمت‌القدم (زینت نادیر) رقمی جدید می‌توانند زوایای انحراف قائم استروژئوئیدی را با دقت زیاد مشاهده کند (برای مثال: هیرت و بورکی، ۲۰۰۲؛ هیرت و سیبر، ۲۰۰۷؛ مولر و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین استفاده از زوایای انحراف قائم می‌تواند برای ارزیابی درستی مدل میدان گرانی اهمیت بیشتری پیدا کند (جکلی، ۱۹۹۹؛ فدرستون و مورگان،

GPS قابل محاسبه است. در این مقاله از مختصات نجومی و ژئودتیک ۱۰ نقطه لاپلاس ایران برای به دست آوردن انحراف‌های استروژئوئیدی استفاده شده است (برای مثال: بامفورد، ۱۹۸۰، ص ۲۵۰):

$$\xi_H = (\Phi - \varphi), \quad (1)$$

$$\eta_H = (\Lambda - \lambda) \cos \varphi, \quad (2)$$

اندیس H برای نشان دادن انحراف‌های هلمرت است. در این روابط، (ξ) انحراف قائم در راستای شمال-جنوب و (η) انحراف قائم در راستای شرق-غرب را به دست می‌دهد. مقادیر انحراف در ξ نصف‌النهار شمال مثبت و جنوب منفی و انحراف در η قائم اولیه شرق مثبت و غرب منفی است.

۲-۲ انحراف مدل زمینوار گرانی‌سنجی

این انحراف‌ها در سطح زمینوار قرار دارند و انحراف‌های مطلق پیزتی را می‌توان به‌طور مستقیم با انتگرال وینینگ-مینز محاسبه کرد (برای مثال، هیسکانن و موریتز، ۱۹۶۷، ص ۸۸-۹۴) و یا به‌طور غیرمستقیم از شیب مدل زمینوار گرانی‌سنجی به‌صورت معادله زیر محاسبه کرد (برای مثال: تورگ، ۲۰۰۱، صفحه ۲۰۸):

$$\xi_p = -\frac{\Delta N}{\rho \Delta \varphi}, \quad (3)$$

$$\eta_p = -\frac{\Delta N}{v \Delta \lambda \cos \varphi}, \quad (4)$$

اندیس p برای تمایز انحراف‌های قائم سطحی استروژئودتیک از انحراف‌های پیزتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در معادله‌های (۳) و (۴)، ΔN به تغییرات جدایی گرانی‌سنجی زمینوار-بیضوی در جهت $\Delta \lambda$ و

۲۰۰۷؛ هیرت و همکاران، ۲۰۰۷؛ پاولیس و همکاران، ۲۰۰۸).

با عنایت به وجود خطاهای متعدد مورد اشاره در داده‌های زمینوار هندسی، در این مقاله مولفه‌های زوایای انحراف قائم استروژئوئیدی در ایران برای کنترل خطاها و تصحیح مدل‌های زمینوار گرانی‌سنجی جهانی در حکم یک جایگزین مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش را همچنین می‌توان در ارزیابی تعیین پارامترهای بیضوی مرجع بهینه (محلی یا جهانی) مورد استفاده قرار داد (برای نمونه ماتر، ۱۹۷۰).

در این تحقیق رویه‌های تصحیحی براساس مدل‌های تلفیقی دو، سه و یا چهار پارامتری از داده‌های انحراف قائم مبتنی بر ۱۰ داده لاپلاس و مدل‌های جهانی زمینوار GOCE و EGM2008 بررسی می‌شود.

۲ زمینه و تعریف‌ها

انحراف‌های قائم با توجه به استفاده از بیضوی زمین مرکز (ژئوسنتریک) یا غیرزمین مرکز می‌توانند مقادیر مطلق و نسبی داشته باشند (جکلی، ۱۹۹۹؛ فدرستون و رویگر، ۲۰۰۰). در این تحقیق انحراف‌های قائم مطلق به کار می‌رود، زیرا مدل‌های ژئوئید جهانی نسبت به یک بیضوی مرجع زمین مرکز و مختصات زمینوار تعیین می‌شوند.

۱-۲ انحراف استروژئوئیدی

مشاهدات نجومی روی ستارگان منجر به تعیین مختصات نجومی (طول جغرافیایی Λ و عرض جغرافیایی Φ) نقاط می‌شود. با مقایسه مختصات نجومی هر نقطه با مختصات ژئودتیک زمین مرکز (عرض جغرافیایی φ و طول جغرافیایی λ) همان نقطه امکان محاسبه مولفه‌های انحراف قائم از روابط (۱ و ۲) به شرح زیر فراهم می‌شود. امروزه مختصات ژئودتیک هر نقطه به‌راحتی از راه مشاهدات

از راه تصحیح ارتومتریک است (هیسکانن وموریتز، ۱۹۶۷، ص ۸۸-۹۴؛ تورگ، ۲۰۰۱، ص ۲۱۰). اما این محاسبات هم نیازمند دانستن توزیع دقیق چگالی در طول مسیر خط شاغول است (تنز و همکاران، ۲۰۰۵). در این مقاله از اطلاعات جدیدترین مدل ماهواره‌ای آرژانس فضایی اروپا (GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) و همچنین دقیق‌ترین مدل ترکیبی زمینوار جهانی EGM2008 (پاولیس و همکاران، ۲۰۰۸) برای مدل‌سازی استفاده شده است.

۲-۴ منطقه مورد بررسی

برای این تحقیق محدوده مورد بررسی کشور ایران با حد غربی - شرقی ۴۴ درجه تا ۶۵ درجه و حد جنوبی - شمالی ۲۵ درجه تا ۴۰ درجه و با شبکه‌بندی ۰/۱ درجه در نظر گرفته شد. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق مقادیر پارامترهای زاویه انحراف قائم هستند. زوایای مولفه‌های انحراف قائم حاصل از دو مدل جهانی گرانی‌سنجی GOCE و EGM2008 نسبت به مقادیر استروژئودتیک مورد مقایسه قرار می‌گیرد. برای مدل GOCE مدل GO-CONS-GCF-2-TIM (پیل و همکاران، ۲۰۱۱) بررسی می‌شود. داده‌های این مدل ماهواره‌ای‌اند و داده‌های زمینی در آن هیچ نقشی ندارند و از این رو برای مقایسه مناسب هستند.

۳ روش تحقیق

به کمک مولفه‌های انحراف قائم می‌توان زاویه انحراف قائم θ را با توجه به رابطه زیر تعیین کرد:

$$\theta = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \quad (۷)$$

با استفاده از مختصات (λ, φ) نقاط لاپلاس، امکان تعیین محدوده منطقه مورد نظر برای دریافت داده‌های مدل‌های

$\Delta\varphi$ اشاره می‌کند. در نقطه مورد نظر با عرض ژئودتیک φ ، پارامترهای ν شعاع انحنا قائم اولیه و ρ شعاع نصف‌النهاری هستند.

$$\rho = \frac{a(1-e^2)}{\sqrt{(1-e^2\sin^2\varphi)^3}}, \quad (۵)$$

$$\nu = \frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}}, \quad (۶)$$

در برون مرکزی اولیه و a طول نیم قطر بزرگ بیضوی مرجع است. با توجه به تعیین مختصات ژئودتیک نقاط از راه GPS، در این تحقیق بیضوی مرجع WGS84 مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۳ خمیدگی و پیچش خط شاقول

شاغولی نبودن و خمیدگی مسیر زوایای انحراف قائم و موازی نبودن سطوح هم‌پتانسیل باعث تفاوت زاویه‌دار (کوچک و جزئی) میان انحراف‌های هلمرت و پیزتی می‌شود. این خمیدگی تابع موقعیت سه‌بعدی نقطه مورد نظر در طول مسیر شاغولی است (گرافارند، ۱۹۹۷). در واقع انحراف هلمرت مربوط به نقاط روی سطح زمین و انحراف پیزتی مربوط به نقاط روی زمینوار است. پس بین این دو مقدار انحراف تفاوتی وجود دارد. با توجه به خمیدگی خط شاغولی، در هر صورت مدل‌سازی این خمیدگی پیچیده و مشکل به نظر می‌رسد زیرا تعیین دقیق خمیدگی آنها نیازمند داشتن اطلاعاتی در مورد شکل و توزیع چگالی در طول مسیر خط شاغولی است (هیسکانن وموریتز، ۱۹۶۷، ص ۸۸-۹۴ و بومفورد، ۱۹۸۰، ص ۲۵۰). (۷) در این تحقیق این مقدار کوچک و قابل اغماض فرض می‌شود.

روشی که در مدل‌سازی میدان گرانی استروژئودتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد، محاسبه انحراف خط عمودی

معادله چهار پارامتری بالا مربوط به اختلاف بین مولفه‌های شمال - جنوب (N-S) است. همچنین

$$\delta\eta = b_{00} + b_{10}\varphi + b_{01}\lambda + b_{11}\varphi\lambda, \quad (9)$$

معادله چهار پارامتری اختلاف بین مولفه‌های شرق - غرب (E-W) را نشان می‌دهد. جایی که $\xi = \xi_{astro} - \xi_{grav}$ و $\eta = \eta_{astro} - \eta_{grav}$ تفاوت‌های انحرافی را نشان می‌دهند. ساده‌سازی این مدل‌ها به شکل دو یا سه پارامتری بعداً مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. پارامترهای انحرافی a_{00} و b_{00} در معادله‌های (۸) و (۹) به نمایش تغییرات طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی به صورت متفاوت می‌پردازد، بنابراین خطاهای طول موج متوسط در مدل زمینوار گرانی‌سنجی با این رویه‌های تصحیحی کنترل می‌شود. چهار پارامتر مجهول مدل با نرم‌افزار مت‌کب و به روش کمترین مربعات تعیین می‌شود.

۲-۳ موارد اکتباسی

اختلاف میان انحراف‌های استروژئودتیک و انحراف‌های ناشی از زمینوار گرانی‌سنجی به صورت رویه چهار پارامتری در معادله‌های (۸) و (۹) آورده شده است. روش استاندارد کمترین مربعات برای برآورد پارامترهای مجهول هر مدل استفاده می‌شود. در این میان انحراف معیار ثانیه $\sigma_{\xi\eta} = \sigma_{\xi\varphi} = \pm 1$ براساس برآورد تقریبی از دقت مشاهدات داده‌های انحراف استروژئودتیک در نظر گرفته شده است.

مدل دو پارامتری براساس معادله‌های (۸) و (۹) در دو حالت زیر قابل بررسی است:

$$\delta\xi = a_{00} + a_{10}\varphi, \quad (10)$$

$$\delta\eta = b_{00} + b_{01}\lambda, \quad (11)$$

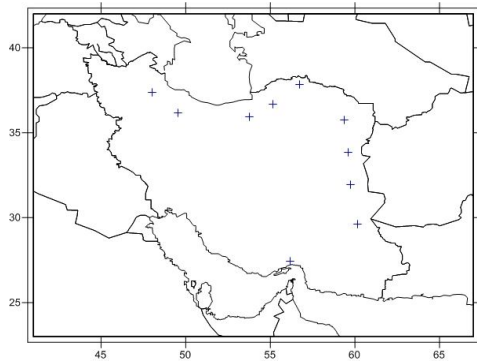
گرانی‌سنجی میسر می‌شود. در این تحقیق برای به دست آوردن داده‌های مدل‌های جهانی از سایت ICGEM استفاده گردید. در این سایت با انتخاب دو مدل گرانی - سنجی EGM2008 و GOCE و تعیین محدوده λ ، φ محدوده داده‌ای لاپلاس، امکان دریافت داده‌های شبکه - بندی شده زمینوار گرانی‌سنجی برای این دو مدل میسر می‌شود. به کمک مختصات نقاط لاپلاس و از طریق فایل شبکه مدل‌های زمینوار جهانی، ارتفاعات متناظر زمینوار برای نقاط لاپلاس از مدل‌های جهانی به روش درونیایی تعیین گردید. از طریق اختلاف ارتفاعات زمینوار تعیین شده از مدل‌های گرانی‌سنجی و به کمک روابط (۳) و (۴) زوایای انحراف قائم گرانی‌سنجی در نقاط لاپلاس تعیین گردید. این مقادیر حاصل تغییرات زمینوار در جهت‌های طول و عرض جغرافیایی بوده و صرفاً براساس مدل‌های گرانی‌سنجی محاسبه شده‌اند.

۱-۳ رویه‌های انطباقی

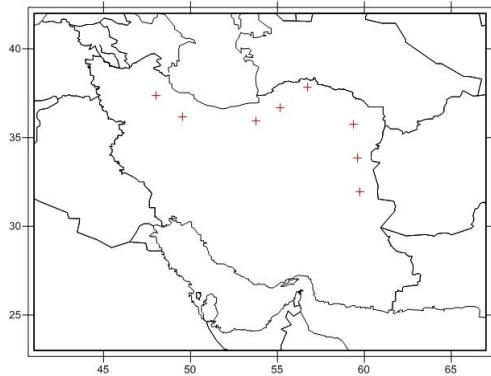
مدل‌های متعددی برای مقایسه زمینوار گرانی‌سنجی و هندسی (ترازیابی - GPS) مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرچقدر درجه رویه بالاتر رود، تموج آن بیشتر می‌شود. یعنی طول موج‌های کوتاه‌تری وارد مسئله می‌شوند. ساده‌ترین شکل این رویه صفحه است که حاوی ضرایب فقط از درجه یک و قسمت ثابت (معادله صفحه) است. استفاده از رویه‌های تصحیحی چهار پارامتری را می‌توان به هیسکانن و موریتز (۱۹۶۷، بخش‌های ۲-۱۸ و ۲-۱۹) نسبت داد.

تفاوت میان انحراف‌های استروژئودتیک و انحراف‌های ناشی از زمینوار گرانی‌سنجی را به صورت رویه چهار پارامتری می‌توان به صورت زیر نشان داد:

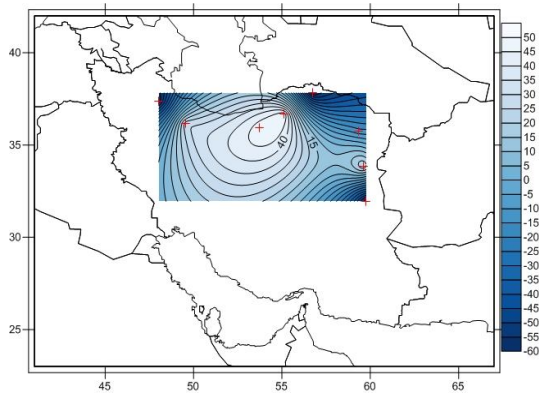
$$\delta\xi = a_{00} + a_{10}\varphi + a_{01}\lambda + a_{11}\varphi\lambda, \quad (8)$$



شکل ۱. پوشش ۱۰ نقطه لاپلاس موجود.



شکل ۲. پوشش ۸ نقطه لاپلاس باقی مانده بعد از حذف نقاط اشتباه.



نقشه ۳. مربوط به (ξ_s) اختلاف بین مولفه‌های شمالی - جنوبی انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل (واحد اعشار ثانیه).

و همچنین:

$$\delta \xi = a_{00} + a_{01} \lambda, \quad (12)$$

$$\delta \eta = b_{00} + b_{01} \varphi, \quad (13)$$

برای مدل سه پارامتری معادله‌های (۸) و (۹) به صورت زیر قابل طرح هستند:

$$\delta \xi = a_{00} + a_{10} \varphi + a_{01} \lambda, \quad (14)$$

$$\delta \eta = b_{00} + b_{10} \varphi + b_{01} \lambda, \quad (15)$$

پارامترهای مدل‌های عملکردی سه پارامتری و دوپارامتری را می‌توان با نرم‌افزار رایانه‌ای مت‌لب و به روش کمترین مربعات تعیین کرد. از این پارامترها در مدل‌های عملکردی دو، سه و چهار پارامتری استفاده می‌شود تا کاربرد تصحیحات برای مدل زمینوار گرانی‌سنجی برآورد شود. این روش برای استفاده در ترازابی با GPS مناسب به نظر می‌رسد (فدرستون و همکاران، ۲۰۰۱)

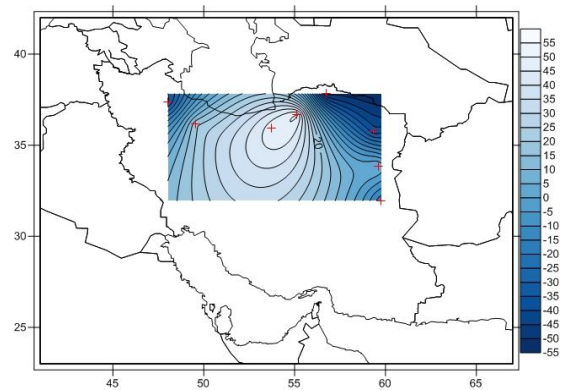
۴ داده‌ها

داده‌های به کار رفته در این تحقیق شامل ۱۰ نقطه موجود لاپلاس در ایران است (شکل ۱). بعد از محاسبات مقادیر اختلاف مولفه‌های انحراف قائم گرانی‌سنجی و هندسی، در تعدادی از نقاط شاهد تفاوت‌های بزرگی هستیم. این نقاط به منزله نقاط اشتباه تلقی می‌شوند. از میان ۱۰ نقطه لاپلاس، ۲ نقطه را که اختلافات زیادی داشتند، درحکم نقاط اشتباه تلقی و حذف کردیم. شکل ۲ موقعیت نقاط باقی مانده را بعد از حذف نقاط اشتباه نشان می‌دهد. شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نقشه منحنی میزان اختلاف مقادیر انحراف قائم هندسی و گرانی‌سنجی را برای مدل‌های EGM2008, GOCE به تفکیک نشان می‌دهند.

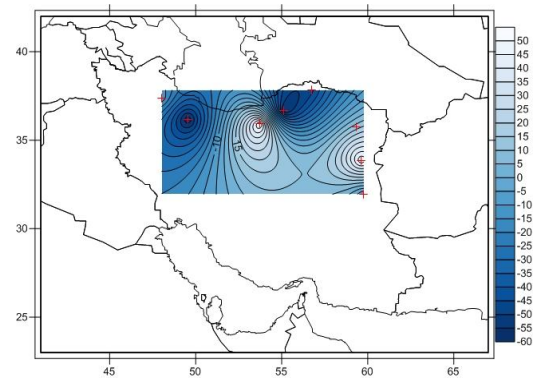
۵ نتایج

برای تحلیل آماری اختلاف مولفه‌های انحراف قائم بین انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل زمینوار گرانی-سنجی به تفکیک در دو راستای شمالی-جنوبی و راستای شرقی-غربی برای ۱۰ نقطه لاپلاس برای دو مدل ماهواره‌ای GOCE و EGM2008 قبل از حذف نقاط اشتباه صورت گرفت. نتیجه این تحلیل آماری به صورت تعیین بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف معیار در جدول ۱ آمده است.

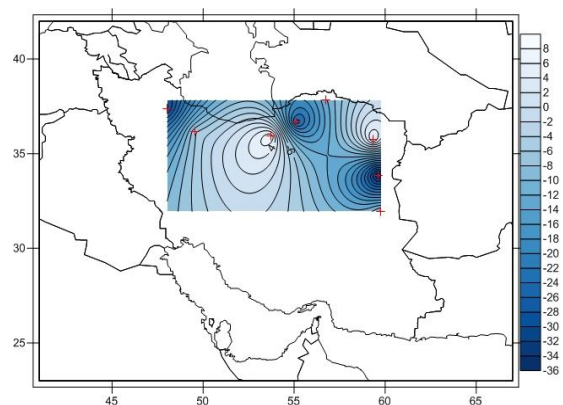
بر اساس این بررسی داده‌های مدل EGM2008 در مورد اختلاف مولفه‌های انحراف قائم بین انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل زمینوار گرانی-سنجی برای ۱۰ نقطه لاپلاس نسبت به مدل GOCE دارای انحراف معیار کوچک‌تری هستند و سازگاری بهتری نسبت به مدل GOCE نشان می‌دهند. در واقع کوچک بودن مقادیر انحراف معیار اختلافات مولفه‌های انحراف قائم بین مدل‌های EGM2008 و داده‌های استروژئوئیدی بر این واقعیت تاکید دارد که مدل EGM2008 انطباق بهتری نسبت به مدل جهانی GOCE با داده‌های لاپلاس به دست می‌دهد. همچنین تحلیل آماری برای مقایسه اختلاف مولفه‌های انحراف قائم بین انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل زمینوار گرانی-سنجی در ۸ نقطه لاپلاس ایران برای دو مدل ماهواره‌ای GOCE و EGM2008 بعد از حذف دو نقطه اشتباه صورت پذیرفت. برای بالاترین درجه هر مدل در داخل سورفر صورت گرفت که نتیجه آن در جدول ۲ آمده است. بر اساس نتیجه این بررسی، داده‌های مدل GOCE در مورد اختلاف مولفه انحراف قائم در راستای شمالی-جنوبی بین انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل زمینوار گرانی-سنجی برای ۸ نقطه لاپلاس نسبت به مدل EGM2008 دارای انحراف معیار کوچک‌تری هستند. و داده‌های مدل EGM2008 در مورد اختلاف مولفه انحراف قائم در



شکل ۴. مربوط به (۱۰) اختلاف بین مولفه‌های شمالی-جنوبی انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل ماهواره‌ای GOCE (واحد اعشار ثانیه).



شکل ۵. مربوط به (۱۰) اختلاف بین مولفه‌های شرقی-غربی انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل EGM2008 (واحد اعشار ثانیه).



شکل ۶. مربوط به (۱۰) اختلاف بین مولفه‌های شرقی-غربی انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل ماهواره‌ای GOCE (واحد اعشار ثانیه).

راستای شرقی - غربی بین انحراف استروژئوئیدی و نسبت به مدل GOCE انحراف معیار کوچک تری دارند. انحراف مدل زمینوار گرانی سنجی برای ۸ نقطه لاپلاس

جدول ۱. تحلیل آماری مربوط به مقدار اختلاف مولفه‌های انحراف قائم بین انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل زمینوار گرانی سنجی در دو راستای شمالی - جنوبی و راستای شرقی - غربی قبل از حذف نقاط اشتباه با ده نقطه لاپلاس ($\xi_H - \xi_{Model} = \eta_H - \eta_{Model}$) .

واحد اعشار ثانیه	$\xi_H - \xi_{EGM2008}$	$\eta_H - \eta_{EGM2008}$	$\xi_H - \xi_{GOSE}$	$\eta_H - \eta_{GOSE}$
Min	-0.1962439	-0.7053344	-0.198751	-0.7486878
Max	1.2586502	0.4876524	1.2563324	0.4867544
Mean	0.1226515	-0.0155429	0.1188853	-0.0190445
STD	0.4090495	0.2912051	0.4090957	0.3029562

جدول ۲. تحلیل آماری مربوط به مقدار اختلاف مولفه‌های انحراف قائم بین انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل زمینوار گرانی سنجی در دو راستای شمالی - جنوبی و راستای شرقی - غربی بعد از حذف نقاط اشتباه با ۸ نقطه ($\xi_H - \xi_{Model} = \eta_H - \eta_{Model}$) .

واحد اعشار ثانیه	$\xi_H - \xi_{EGM2008}$	$\eta_H - \eta_{EGM2008}$	$\xi_H - \xi_{GOCE}$	$\eta_H - \eta_{GOCE}$
Min	-0.1962439	-0.7053344	-0.198751	-0.7486878
Max	0.1365935	0.0397882	0.1133436	0.0419049
Mean	0.005172	-0.0996084	0.001041	-0.1044743
STD	0.0974743	0.2463419	0.0952021	0.2619345

EGM2008 بعد از حذف نقاط اشتباه و قبل از سرشکنی آمده است. در صورت استفاده از تعداد مناسب داده‌های لاپلاس و نبود خطاهای سامانمند، شکل بافت‌نگارها منطبق بر توزیع نرمال خواهد بود.

برای تحلیل بهتر نتایج، در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نمودارهای بافت‌نگار (هیستوگرام) مربوط به اختلاف مولفه‌های انحراف قائم بین انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل زمینوار گرانی سنجی در دو راستای شمالی - جنوبی و راستای شرقی - غربی برای دو مدل ماهواره‌ای GOCE و

لاپلاس ایران، برای داده‌های مدل EGM2008 به دست می‌دهد. همچنین در جدول ۴ نتایج مربوط به پارامترهای رویه‌های تصحیحی دو، سه و چهار پارامتری برای داده‌های مدل GOCE آمده است.

ارزیابی کیفیت رویه‌های تصحیحی با استفاده از ۳ نقطه لاپلاس که برای برازش مورد استفاده قرار نگرفتند صورت پذیرفت. با قراردادن پارامترهای محاسبه شده و مختصات ژئودتیک ۳ نقطه لاپلاس در معادله‌های مربوط به رویه‌های تصحیحی دو، سه و چهار پارامتری، اختلاف مولفه‌های انحراف قائم بین انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل زمینوار گرانی‌سنجی بعد از برازش تعیین شد. نتایج این بررسی برای دو مدل جهانی در جدول‌های ۵ و ۶ در بین رویه‌های تصحیحی، رویه تصحیحی دو پارامتری (روابط ۱۳-۱۲) اختلاف مولفه‌های انحراف قائم در راستای شمالی-جنوبی و شرقی-غربی دارای کمترین انحراف معیار است. این بررسی نشان‌دهنده انطباق بهینه داده‌های ماهواره‌ای EGM2008 و GOCE با رویه تصحیحی دو پارامتری در منطقه مورد بررسی است. با مقایسه مقادیر آماری انحراف معیار برای اختلاف مولفه‌های انحراف قائم رویه‌های تصحیحی دو، سه و چهار پارامتری دو مدل EGM2008 و GOCE رویه تصحیحی دو پارامتری مربوط به رابطه (۱۳-۱۲) اختلاف مولفه‌های انحراف قائم در راستای شمالی-جنوبی.

۵-۱ تصحیحات و مدل‌های زمینوارهای تلفیقی هدف اصلی این تحقیق از به دست آوردن اختلاف مولفه‌های انحراف قائم بین انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل زمینوار گرانی‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای دو مدل EGM2008, GOCE, حذف خطاهای سامانمند موجود در داده‌های مدل‌های جهانی (و یا محلی) در تعیین زمینوار است. پس از تعیین مقادیر آریبی (بایاس) و تمایل (تیلت) بین دو مدل گرانی‌سنجی و هندسی، نقاط باقی‌مانده که در فرایند سرشکنی مورد استفاده قرار نگرفتند، انطباق بهتری را در مقایسه با مدل اصلی اولیه نشان می‌دهند. به عبارت دیگر استفاده از ایده رویه تصحیحی مبتنی بر داده‌های لاپلاس (و یا ترازبایی و GPS) در عمل باعث حذف خطاهای سامانمند (به خصوص به خاطر اختلاف داده) بین دو رویه می‌شود. با استفاده از این اختلاف مولفه‌های انحراف قائم، برازش شده بر اساس مدل‌های عملکردی دو، سه و چهار پارامتری برای تعیین رویه تصحیحی مناسب‌تر صورت پذیرفت. برای امکان ارزیابی برازش، از میان ۸ نقطه لاپلاسی، ۵ نقطه برای استفاده در مدل برازش و ۳ نقطه دیگر برای ارزیابی رویه‌های تصحیحی استفاده شد. نتیجه این بررسی در جدول‌های ۳ و ۴ برای هر دو مدل جهانی عرضه شده است. جدول ۳ نتایج مربوط به پارامترهای رویه‌های تصحیحی دو، سه و چهار پارامتری مربوط به اختلاف مولفه‌های انحراف قائم بین انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل زمینوار گرانی‌سنجی برای ۵ نقطه از ۸ نقطه

جدول ۳. نتایج به دست آمده برای پارامترهای رویه‌های تصحیحی دو-سه و چهار پارامتری مربوط به اختلاف مولفه‌های انحراف قائم بین انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل زمینوار گرانی‌سنجی برای ۵ نقطه از ۸ نقطه لاپلاس ایران (بعد از حذف نقاط اشتباه) برای داده‌های EGM2008. (واحد اعشار ثانیه).

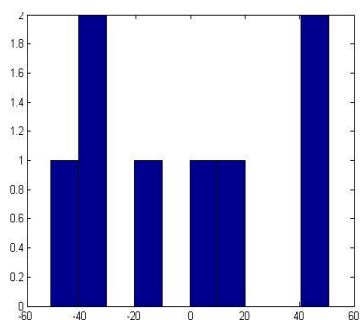
انحراف معادله‌ها	پارامترها	مدل ۲ پارامتری ۱ (۱۰-۱۱)	مدل ۲ پارامتری ۲ (۱۲-۱۳)	مدل ۳ پارامتری (۱۴-۱۵)	مدل ۴ پارامتری (۸-۹)
	a00	3.2674	-0.9103	2.7874	37.93
$\xi - \xi_H$	a10	-5.0757		-6.1057	-60.3298

	a01		1.0025	1.2426	-36.5854
	a11				58.348
	b00	-2.3544	-5.322	-6.152	-217.151
$\eta H - \eta_{EGM}$	b10		8.0512	6.2704	331.8361
	b01	2.3951		2.1485	229.2711
	b11				-350.326

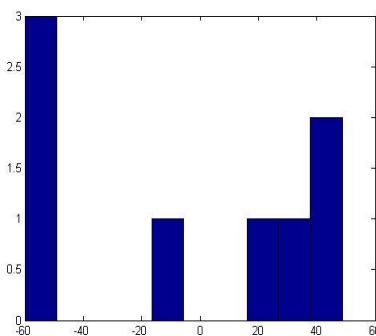
جدول ۴. مانند جدول ۳ ولی برای داده‌های ماهواره‌ای GOCE.

انحراف معادله‌ها	پارامترها	مدل ۱ پارامتری ۱ (۱۰-۱۱)	مدل ۲ پارامتری ۲ (۱۲-۱۳)	مدل ۳ پارامتری ۳ (۱۴-۱۵)	مدل ۴ پارامتری ۴ (۸-۹)
$\xi H - \xi_{GOCE}$	a00	3.429	-0.825	2.9844	42.5685
	a10	-5.3358		-6.2899	-67.3672
	a01		0.9037	1.1511	-41.4579
	a11				65.7224
$\eta H - \eta_{GOCE}$	b00	-2.4714	-5.5107	-6.3832	-234.007
	b10		8.331	6.459	357.6772
	b01	2.5126		2.2585	247.277
	b11				-377.929

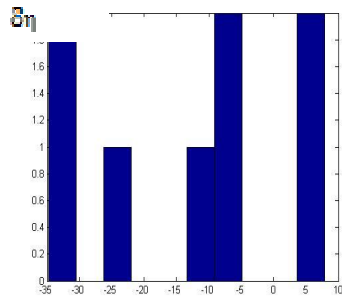
شکل ۸



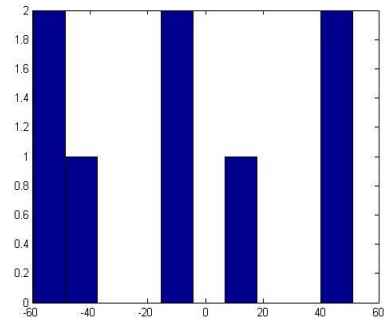
شکل ۸. بافت‌نگار مربوط به (ξ) اختلاف بین مولفه‌های شمالی-جنوبی انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل ماهواره‌ای GOCE (واحد اعشار نانیه).



شکل ۷. بافت‌نگار مربوط به (ξ) اختلاف بین مولفه‌های شمالی-جنوبی انحراف استروژئوئیدی و انحراف مدل EGM2008 (واحد اعشار نانیه).



شکل ۱۰. بافت‌نگار مربوط به $(\delta\eta)$ اختلاف بین مولفه‌های شرقی - غربی انحراف استروژئوتییدی و انحراف مدل ماهواره‌ای GOCE (واحد اعشار ثانیه).



شکل ۹. بافت‌نگار مربوط به $(\delta\eta)$ اختلاف بین مولفه‌های شرقی - غربی انحراف استروژئوتییدی و انحراف مدل EGM2008 (واحد اعشار ثانیه).

جدول ۵. نتایج ارزیابی رویه‌های تصحیحی دو- سه و چهار پارامتری برای اختلاف مولفه‌های انحراف قائم بین انحراف استروژئوتییدی و انحراف مدل زمینوار گرانی‌سنجی بعد از برازش این رویه‌ها و حذف نقاط اشتباه برای مدل EGM2008 () $\xi_H - \xi = \text{Model } \delta\eta$, $\eta_H - \eta = \text{Model } \delta\zeta$ (واحد اعشار ثانیه).

پارامترها	مدل ۲ پارامتری ۱		مدل ۲ پارامتری ۲		مدل ۳ پارامتری		مدل ۴ پارامتری	
	(۱۰-۱۱)		(۱۲-۱۳)		(۱۴-۱۵)		(۸-۹)	
	$\delta\zeta$	$\delta\eta$	$\delta\zeta$	$\delta\eta$	$\delta\zeta$	$\delta\eta$	$\delta\zeta$	$\delta\eta$
EGM2008	(N-S)	(E-W)	(N-S)	(E-W)	(N-S)	(E-W)	(N-S)	(E-W)
Min	0.1021	0.1255	0.1277	-0.8345	0.2663	-0.4174	0.0675	0.9723
Max		0.1424	0.1348	-0.3011	0.6796	-0.0171	0.1017	3.2587
Mean	0.27	0.134833	0.1316	-0.5674	0.473133	-0.216166	0.0861	2.108533
STD	0.168150	0.008587	0.003601	0.266700	0.206650	0.200158	0.017296	1.143263
θ STD	0.168		0.267		0.287		1.14	

جدول ۶. مانند جدول ۵ ولی برای مدل ماهواره‌ای $\xi = \xi_H - \text{model}$, $\zeta = \zeta_H - \text{model}$ GOCE () $\delta\zeta = \eta_H - \eta$.

پارامترها	مدل ۲ پارامتری ۱		مدل ۲ پارامتری ۲		مدل ۳ پارامتری		مدل ۴ پارامتری	
	(۱۰-۱۱)		(۱۲-۱۳)		(۱۴-۱۵)		(۸-۹)	
	$\delta\zeta$	$\delta\eta$	$\delta\zeta$	$\delta\eta$	$\delta\zeta$	$\delta\eta$	$\delta\zeta$	$\delta\eta$
GOCE	(N-S)	(E-W)	(N-S)	(E-W)	(N-S)	(E-W)	(N-S)	(E-W)
Min	0.1015	0.1302	0.1107	-0.8673	0.2537	-0.4288	-0.011	1.0507
Max	0.455	0.1479	0.1171	-0.3153	0.6786	-0.0168	0.0682	3.537
Mean	0.278	0.139966	0.114233	-0.5909	0.466266	-0.221666	0.03023	2.28626

STD	0.17675	0.008991	0.003251	0.27600	0.212450	0.206009	0.03970	1.24321
θ STD	0.177		0.276		0.295		1.243	

اذعان داشت که استفاده از مدل دو پارامتری به‌طور کلی کارکرد بهتری با داده‌های به‌کاررفته در تحقیق دارد. همچنین مدل EGM2008 با اختلاف کمی انطباق بهتری با داده‌های لاپلاس نشان می‌دهد. با توجه به استفاده از داده‌های گرانی زمینی در مدل EGM2008 و به‌خصوص داده‌های مدل رقومی جهانی ارتفاعی SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) این امر قابل توجیه است. با توجه به تعداد بسیار محدود داده‌های لاپلاس به‌کاررفته در این تحقیق، توصیه می‌شود در تحقیقات آتی، از داده‌های بیشتر و با کیفیت بهتر در ارزیابی استفاده شود. ذکر این نکته ضروری است که کیفیت داده‌های لاپلاس استفاده شده در این تحقیق با توجه به قدمت داده‌های نجومی به‌کاررفته در آن و وابستگی داده‌های ژئودتیکی به داده‌های شبکه GPS درجه ۱ که با دستگاه‌های تک‌بسامدی اندازه‌گیری شده‌اند، مناسب نیست. در هر صورت، امروزه با استفاده از دوربین‌های سمت‌الرأس سمت‌القدم رقمی می‌توان در مدت‌زمان کوتاهی، انحراف‌های استروژئودتیکی (نقاط لاپلاس) را با دقت بسیار زیاد اندازه‌گیری و برای ارزیابی دقیق رویه‌های تصحیحی در آینده استفاده کرد.

منابع

- Bomford, G. 1980, Geodesy: 4th edn. Oxford University Press, Oxford.
- Farin, G.E., 2001, Curves and Surfaces for CAGD: A Practical Guide: 5th edn. Morgan Kaufmann, San Francisco.
- Featherstone, W. E., 1999, The use and abuse of vertical deflections: The Australian Surveyor, 86-96.
- Featherstone, W. E., 2001, Absolute and relative testing of gravimetric geoid models using global positioning system and orthometric

مربوط به مدل GOCE نسبت به مدل EGM2008 دارای کمترین انحراف معیار است هرچند اختلاف مقدار انحراف معیار بین این دو مدل ناچیز است ولی نتایج مربوط به مدل GOCE بهبود یافته‌تر هستند. برای اختلاف مولفه‌های انحراف قائم در راستای شرقی-غربی رویه تصحیحی دو پارامتری مربوط به رابطه (۱۱-۱۰) مربوط به مدل EGM2008 نسبت به مدل GOCE دارای کمترین انحراف معیار است. در این مورد هم اختلاف مقدار انحراف معیار بین این دو مدل ناچیز است. ولی نتایج مربوط به داده‌های مدل EGM2008 بهبود بهتری با داده‌های زمینی (نقاط لاپلاس) دارند.

۶ نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده بعد از برازش رویه‌های تصحیحی دو، سه و چهار پارامتری برای مدل‌های EGM2008 و GOCE بیانگر حصول به‌ترین انطباق بین مدل‌های جهانی زمینوار با زمینوار هندسی در رویه با مدل ۲ پارامتری است. مقایسه مقادیر انحراف معیار قبل و بعد از برازش بین مدل‌های گرانی‌سنجی و هندسی کاهش انحراف معیار اختلاف مولفه‌های انحراف قائم در راستای شمالی-جنوبی را برای مدل GOCE از ۰.۰۹۵ به ۰.۰۰۳ ثانیه نشان می‌دهد. مقدار انحراف معیار اختلاف مولفه‌های انحراف قائم در راستای شرقی-غربی برای مدل EGM2008 کاهش محسوس از ۰.۲۴۶ به ۰.۰۰۸ ثانیه را نشان می‌دهد. افزایش مقدار انحراف معیار برای اختلاف مولفه‌های انحراف قائم می‌تواند بیانگر کیفیت ضعیف انحراف‌های استروژئودتیکی باشد. با بررسی و مقایسه مقادیر انحراف معیار زاویه انحراف قائم در جدول‌های ۵ و ۶ می‌توان

- Jiang Z, Duquenne, H., 1996, On the combined adjustment of a gravimetrically determined geoid and GPS leveling stations: *J. Geod.* **70**(8), 505-514. doi:10.1007/s001900050039
- Kotsakis, C., Sideris, M. G., 1999, On the adjustment of combined GPS/leveling/geoid networks: *J. Geod.*, **73**(8), 412-421. doi:10.1007/s001900050261
- Mather, R. S., 1970, The geodetic orientation vector for the Australian geodetic datum: *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **22**(1), 55-81. doi:10.1111/j.1365-246X.1971.tb03583.x
- Milbert, D.G., 1995, Improvement of a high resolution geoid model in the United States by GPS height on NAVD88 benchmarks: *Int. Geoid. Serv. Bull.*, **4**, 13-36.
- Müller A, Bürki B, Limpach P, Kahle HG, Grigoriadis VN, Vergos GS, Tziavos IN (2007) Validation of marine geoid models in the North Aegean Sea using satellite altimetry, marine GPS data and astrogeodetic measurements, in: Kiliçoğlu A, Forsberg R (eds) Gravity Field of the Earth, General Command of Mapping, Ankara Pail R., Bruinsma S., Migliaccio F., Förste C., Goiginger H., Schuh W.-D., Höck E., Reguzzoni M., Brockmann J. M., Abrikosov O., Veicherts M., Fecher T., Mayrhofer R., Krasbutter I., Sansò F., and Tscherning C. C. 2011, First GOCE gravity field models derived by three different approaches: *Journal of Geodesy*, **85**(11), 819-843. doi: 10.1007/s00190-011-0467-x
- Paulis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., and Factor, J. K., 2008, An earth gravitational model to degree 2160: EGM2008. EGU General Assembly, Vienna
- Soltanpour, A., Nahavandchi, H., and Featherstone, W. E., 2006, The use of second-generation wavelets to combine a gravimetric geoid model with GPS-leveling data: *J. Geod.*, **80**2, 82-93. doi:10.1007/s00190-006-0033-0
- Tenzer, R., Vaníček, P., and Santos, M., Featherstone, W.E., Kuhn, M., 2005, The rigorous determination of orthometric heights: *J. Geod.*, **79**(1-3), 82-92. doi:10.1007/s00190-005-0445-2
- Torge, W., 2001, *Geodesy: 3rd Edn.* de Gruyter, Berlin.
- height data: *Comput. Geosci.* **27**(7), 807-814. doi:10.1016/S0098-3004(00)00169-2
- Featherstone, W. E., 2004, Evidence of a north-south trend between AUSGeoid and AHD in southwest Australia: *Surv. Rev.*, **37**(291), 334-343.
- Featherston, W. E., 2006, Yet more evidence for a north-south slope in the AHD: *J. Spat. Sci.*, **51**(2), 1-6; corrigendum in **52**(1), 65-68.
- Featherston, W.E, Rüeger, J.M., 2000, The importance of using deviations of the vertical in the reduction of terrestrial survey data to a geocentric datum: *Trans. Tasman Surv.*, **1**(3), 46-61 (erratum in *Aust. Surv.* **47**(1), 7).
- Featherston, W.E, Sproule, D.M., 2006, Fitting AUSGeoid98 to the Australian height datum using GPS data and least squares collocation: application of a cross validation technique: *Surv. Rev.*, **38**(301): 573-582.
- Featherston, W. E., Morgan, L., 2007, Validation of the AUSGeoid98 model in Western Australia using historic astrogeodetically observed deviations of the vertical: *J. R. Soc. West. Aust.*, **90**(3), 143-149.
- Featherston, W. E., and Lichti, D. D., 2009, Fitting gravimetric geoid models to vertical deflections: *J. Geod.*, **83**, 583-589. doi: 10.1007/s00190-008-0263-4
- Forsberg, R., 1998, Geoid tailoring to GPS with example of a 1-cm geoid of Denmark: *Finnish Geodetic Institute Report* **98**(4): 191- 198
- Fotopoulos, G., 2005, Calibration of geoid error models via a combined adjustment of ellipsoidal, orthometric and gravimetric geoid height data: *J. Geod.* **79**(1-3), 111-123. doi:10.1007/s00190-005-0449-y
- Grafarend, E. W., 1997, Field lines of gravity, their curvature and torsion, the Lagrange and the Hamilton equations of the plumbline: *Ann. Geophys.*, **40**(5), 1233-1247.
- Heiskanen, W. A., and Moritz, H., 1967, *Physical Geodesy*: Freeman, San Francisco.
- Hirt, C., Seiber, G., 2007, High – resolution local gravity field determination at the sub-millimeter level using a digital zenith camera system: in Tregoning P, Rizos C (eds) *Dynamic Planet*, Springer, Berlin, pp 316-321.
- Jekeli, C., 1999, An analysis of vertical deflections derived from high-degree spherical harmonic models: *J. Geod.*, **73**(1), 10-22. doi:10.1007/s001900050213