

روشی نوین در ارزیابی دقت مدل‌های ژئوپتانسیل در مطالعه منطقه ایران

محمدعلی شریفی^{۱*}، مهدی نیکخو^۲ و مجید عباس‌زاده^۳

^۱ استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۳ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئودزی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۱۰/۸، پذیرش نهایی: ۸۸/۷/۲۱)

چکیده

امروزه با پرتاب ماهواره‌های اختصاصی گرانی‌سنجی، مدل‌های ژئوپتانسیل با پوشش جهانی یکنواخت و با دقت و قدرت تفکیک مکانی زیاد تهیه شده‌اند و ضرایب مربوط به این مدل‌ها به‌طور رایگان در اینترنت موجود است. از این رو استفاده از این مدل‌ها یکی از ساده‌ترین و ارزان‌ترین روش‌های تولید داده‌های گرانی به‌منظور بررسی طول موج‌های بلند میدان گرانی زمین است. البته کماکان مشاهدات زمینی نیز در ایجاد مدل‌های ژئوپتانسیل ترکیبی نقش دارند که با توجه به تراکم و دقت جمع‌آوری این مشاهدات، مدل‌های ژئوپتانسیل در مناطق گوناگون دنیا دارای دقت‌های متفاوت‌اند. بنابراین، کاربران مدل‌های ژئوپتانسیل باید قبل از استفاده از آنها، از دقت مدل‌های گوناگون در منطقه مورد نظر اطمینان حاصل کنند.

در این مقاله به بررسی آخرین مدل‌های ژئوپتانسیل و تعیین بهترین مدل برای منطقه‌ی ایران پرداخته شده است. بدین منظور، ژئوئید حاصل از هریک از این مدل‌ها با ژئوئید حاصل از GPS-leveling مورد مقایسه قرار گرفته است. البته از آنجایی که روی شبکه ترازیبی کشور تصحیح اورتومتریکی اعمال نشده است، مقایسه موردنظر پس از اعمال فیلترهای مکانی مناسب و در آزمایشات‌های گوناگون صورت گرفته است که نتایج به‌دست آمده برخلاف مقایسه‌های قبلی، حاکی از دقت‌تر بودن مدل EIGEN-GL04C در ایران است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های ژئوپتانسیل، واریانس درجه خطا (Error degree variance)، نوفه، فیلترهای مکانی

A New Approach for Evaluation of Global Geopotential Models Case Study: Iran

Sharifi, M. A.¹, Nikkhoo, M.² and Abbaszadeh, M.³

¹Assistant Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

²Graduate Student of Geodesy, Faculty of Surveying Engineering, KNT University of Technology, Tehran, Iran

³Graduate Student of Geodesy, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

(Received: 28 Dec 2008, Accepted: 13 Oct 2009)

Abstract

The Earth's gravity field dedicated missions provide homogeneous and uniformly accurate information on the long wavelengths of the Earth's gravity field. Many different global geopotential models have introduced by Earth and space research centers during the last years.

The geopotential models derived from the GRACE satellite measurements are compared with the other models at different frequency levels. As expected, the achieved results show that the GRACE-derived models are more accurate in low frequency. Although the GRACE-derived models have lower accuracy in medium frequencies they outperform the other alternatives.

Moreover, accuracy of the geopotential models are usually evaluated by comparing the geoidal heights derived from the models with those of the local GPS-leveling stations. Due to the different signal content of two observation types, it may lead to incorrect conclusion. For compatibility, we propose the idea of filtering the high-frequency signals of the GPS-leveling observations. We have employed spatial filters with the uniform and Gaussian kernels to filter the high-frequency components of the terrestrial (GPS-leveling) data.

Herein, we introduce an innovative approach for evaluation of the geopotential models. In the new method, the geoidal height differences over baselines with different length are used for the evaluation of the geopotential models. The models behave differently for the baselines of different lengths and orientations. Sub-meter accuracy can be obtained using different models for baselines with lengths up to 50 km. However, for the longer baselines the geoidal height accuracy behaves differently. Furthermore, the lowest accuracy is observed for the baselines in the south-north direction. It might correspond to the accumulative error of the leveling network of Iran which spans the whole country from the Persian Gulf northward.

It is also recommended to perform data screening and outlier detection for terrestrial data. Among 490 GPS-leveling stations used in this study, 40 stations have been removed because of their significant differences (more than 2 meters) with the global models.

Compared to despite the classical point-wise method, the most recently released model, EIGEN-CG04 is the most accurate one according to our analysis over the GPS-leveling network of Iran.

Key words: Geopotential models, Error degree variance, Noise, Spatial filters

۱ مقدمه

- برآورد مولفه‌های چرخش زمین و پارامترهای حرکت قطبی
هدف این مقاله بررسی موارد فوق نیست و علاقه‌مندان به بررسی موارد فوق می‌توانند به ونیچک مراجعه کنند.
لازم به ذکر است که در محاسبه ضرایب برخی از این مدل‌ها تنها مشاهدات ماهواره‌ای به کار می‌روند و در برخی دیگر از ترکیب مشاهدات ماهواره‌ای و زمینی استفاده می‌شود. به مدل‌های نوع اول، مدل‌های ماهواره‌ای خالص (Satellite-only Global Geopotential Model) گفته می‌شود و نوع دوم، مدل‌های ترکیبی (Combined Global Geopotential Model) نام دارند. امروزه با پیشرفت روش‌های گرانی‌سنجی ماهواره‌ای و همچنین

مدل‌های ژئوپتانسیل که همان ضرایب بسط پتانسیل زمین به هارمونیک‌های کروی (یا بیضوی) هستند، به‌علت استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای با پوشش یکنواخت و تراکم زیاد در تعیین این ضرایب، طول‌موج‌های بلند تابعک‌های میدان گرانی را به‌خوبی نشان می‌دهند. بهره‌گیری از مدل‌های ژئوپتانسیل به‌منظور کاربردهای زیر بسیار مفید است.
- تعیین مدار حرکت یک ماهواره
- تعیین طول‌موج‌های بلند ژئوئید
- تعیین مولفه‌های جذر و مد زمین
- کاربردهای اقیانوس‌شناسی و تعیین جریان‌ات دائم اقیانوسی

از آوردن روابط این ترم‌ها خودداری شده و خوانندگان برای آگاهی بیشتر به (لموین و همکاران، ۱۹۹۸) ارجاع داده می‌شوند.

۲ بررسی واریانس درجه خطای مدل‌های ژئوپتانسیل
با توجه به این که هر یک از مشاهدات به کار رفته در تعیین ضرایب یک مدل ژئوپتانسیل، دارای دقت معلومی‌اند، پس از برآورد مقدار ضرایب، ماتریس کوواریانس یا به عبارت دیگر، دقت تعیین این ضرایب نیز قابل برآورد است. در نتیجه با استفاده از دقت ضرایب پیش گفته می‌توان دقت هر کمیت دیگری مانند بی‌هنجاری پتانسیل، ارتفاع ژئوئید، بی‌هنجاری جاذبه و ... که با به کارگیری این ضرایب به دست می‌آیند را نیز محاسبه کرد. ارتفاع ژئوئید با تقریب کروی از رابطه (۲) به دست می‌آید (ونچک و کراکی واسکی، ۱۹۸۶):

$$N(\theta, \lambda) = -R \sum_{n=2}^M \sum_{m=0}^n [(C_{nm}^N - C_{nm}^S) \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] P_{nm}(\cos \theta) \quad (2)$$

در رابطه فوق، C_{nm} و S_{nm} ضرایب هارمونیک‌های کروی مدل ژئوپتانسیل، C_{nm}^N ضرایب هارمونیک‌های زونال برای بیضوی مرجع است که مقادیر آنها در سایت اینترنتی <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html> در دسترس قرار دارد. حال اگر دقت ضرایب C_{nm} و S_{nm} را به ترتیب با σ_{nm}^C و σ_{nm}^S نشان دهیم، واریانس درجه خطای این کمیت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_n^2 = R^2 \sum_{m=0}^n [(\sigma_{nm}^C)^2 + (\sigma_{nm}^S)^2] \quad (3)$$

در نتیجه دقت ارتفاع ژئوئید محاسبه شده از ضرایب پتانسیل یک مدل تا درجه و مرتبه M برابر است با:

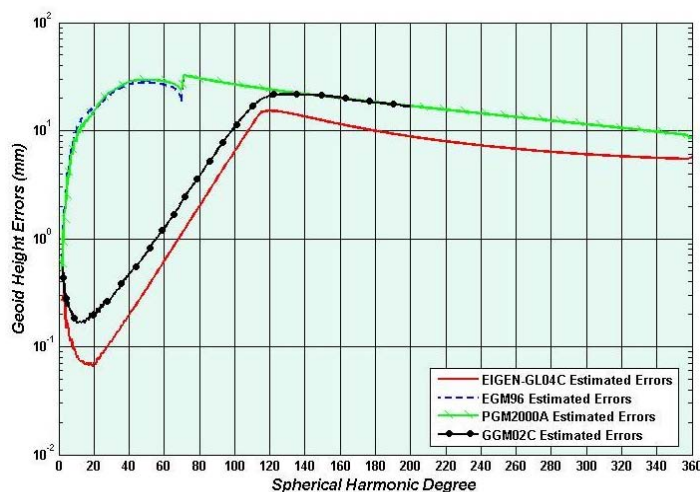
$$\sigma_N = R \sqrt{\sum_{n=2}^M \sum_{m=0}^n [(\sigma_{nm}^C)^2 + (\sigma_{nm}^S)^2]} \quad (4)$$

افزایش تراکم و دقت داده‌های زمینی، شاهد شمار زیادی از مدل‌های ژئوپتانسیل هستیم که از سوی مؤسسات پژوهشی و دانشگاه‌های گوناگون در سراسر دنیا محاسبه و عرضه می‌شوند. دقت و تراکم داده‌های زمینی مورد استفاده در مدل‌های ترکیبی در مناطق گوناگون دنیا، متفاوت است که این مسئله موجب یکسان نبودن دقت این مدل‌ها در آن مناطق می‌شود، از این رو متناسب با نوع کاربرد و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر می‌باید نسبت به گزینش مدل مناسب از بین مدل‌های موجود اقدام کرد. کیفیت مدل‌های ژئوپتانسیل به دو روش متفاوت ارزیابی می‌شود؛ در روش نخست به بررسی واریانس درجه خطای مدل‌ها می‌پردازیم. این پارامتر همان واریانس مجموع جملات هم‌درجه در سری هارمونیک‌های کروی تابع‌های میدان گرانی است که در بخش بعد به آن پرداخته شده است. بعد از مقایسه مدل‌ها، مدلی که دارای واریانس درجه خطای کمینه باشد را در حکم مدل بهینه برمی‌گزینیم. در روش دوم ارتفاع به دست آمده از مدل‌های متفاوت را با ارتفاع ژئوئید حاصل از GPS-Leveling مقایسه و مدل دارای اختلاف کمینه را تعیین می‌کنیم (آزموده اردلان و همکاران، ۱۳۸۵؛ کیامهر و شوبرگ، ۲۰۰۵). بدین ترتیب در روش اول، دقت مدل‌ها و در روش دوم علاوه بر دقت، صحت مدل‌ها را نیز می‌سنجیم.

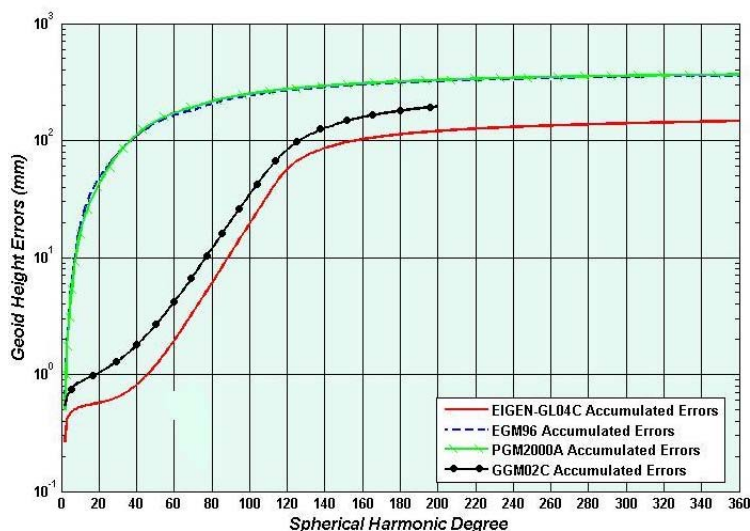
از آنجایی که مقادیر نسبت داده شده به پارامترهای بیضوی مولد میدان گرانی نرمال (جرم بیضوی، پتانسیل روی بیضوی) تنها دقیق‌ترین برآورد از مقادیر این پارامترها در میدان گرانی واقعی زمین است، در محاسبه ارتفاع ژئوئید ایران، اثرات مربوط به نبود برابری جرم واقعی زمین و بیضوی مرجع، نبود برابری پتانسیل جاذبه روی ژئوئید و بیضوی مبنا و ترم‌های تبدیل بی‌هنجاری ارتفاعی روی بیضوی مرجع به ارتفاع ژئوئید در سطح زمین نیز اعمال شده است (نیکخو و عباس‌زاده، ۱۳۸۷) که

با توجه به شکل‌های فوق در می‌یابیم که دو مدل EGM96 و PGM2000A با هم تفاوت زیادی ندارند. همچنین دقت مدل‌های EIGEN-GL04C و GGM02C در طول موج‌های بلند به مراتب از دو مدل قبلی بیشتر است. برای مثال دقت ژئوئید محاسبه شده تا درجه و مرتبه ۸۰ با استفاده از مدل EIGEN-GL04C حدود ۶ میلی‌متر است. در حالی که مقدار مشابه آن در مدل EGM96 به ۲۰۶ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۱). دقت ارتفاع ژئوئید به دست آمده از مدل‌های پیش‌گفته به‌ازای درجات متفاوت در جدول (۱) دیده می‌شود.

واضح است که با مقایسه منحنی واریانس درجه خطای تجمعی مدل‌های پتانسیل متفاوت، می‌توان مدل دقیق‌تر را به راحتی تعیین کرد. شکل ۱ این نکته را به خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل‌های EGM96 و EIGEN-GL04C و PGM2000A و GGM02C در این دو شکل مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. سه مدل اول همگی دارای ضرایب تا درجه و مرتبه ۳۶۰ هستند و مدل چهارم یعنی GGM02C شامل ضرایب تا درجه و مرتبه ۲۰۰ است.



شکل ۱. واریانس درجه خطای ارتفاع ژئوئید به دست آمده از مدل‌های ژئوپتانسیل مورد نظر.



شکل ۲. واریانس درجه خطای تجمعی ارتفاع ژئوئید به دست آمده از مدل‌های ژئوپتانسیل مورد نظر.

جدول ۱. دقت ارتفاع ژئوئید به دست آمده از مدل‌های گوناگون به ازای درجات متفاوت برحسب میلی‌متر.

Model	n = 40	n = 80	n = 120	n = 200	n = 360
EIGEN-GL04C	0.81	6.03	56.67	120.13	146.65
GGM02C	1.77	11.85	83.06	195.21	-----
PGM2000A	111.48	215.18	274.11	328	365.19
EGM96	109.26	206.2	267.12	322.17	359.97

RMSE تفاوت ارتفاع ژئوئید مدل و تفاوت ارتفاع ژئوئید GPS_Leveling به‌ازای کلیه طول بازهای موجود در منطقه را برای مدل‌های گوناگون تعیین نمود و در نهایت آنها را مقایسه کرد. در اینجا به روش اول، مقایسه مطلق و به روش دوم، مقایسه نسبی می‌گوییم. مقایسه نسبی نسبت به مقایسه مطلق، دارای این برتری است که بایاس‌های موجود در مدل‌ها و مشاهدات ترازبایی و GPS در این روش به‌طورکامل حذف می‌شوند و اثر روندهای موجود روی کمیت‌های پیش‌گفته، در این روش متناسب با طول بازهای موردنظر کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان با دسته‌بندی طول بازهای گوناگون به ازای طول آنها و مقایسه پیش‌گفته در دسته‌های گوناگون، کیفیت مدل‌ها را در طول موج‌های بلند، متوسط و کوتاه آنها، متناسب با انتخاب طول بازهای بلند، متوسط و کوتاه، مورد مطالعه قرار داد. درنهایت، استفاده از هر دو روش فوق در کنار هم پیشنهاد می‌شود.

در جدول ۲ نتایج مقایسه مطلق مدل‌های ژئوپتانسیل موردنظر و نقاط GPS_Leveling در امریکا، کانادا، اروپا، استرالیا عرضه شده است. این جدول از سایت پیش‌گفته استخراج شده است.

همچنین نتایج مقایسه مشابه در ایران در جدول ۳ نشان داده شده است. واضح است که مقادیر عرضه شده در جدول ۲، نتایج به‌دست‌آمده در بخش قبل را تأیید می‌کند؛ اما مطابق جدول ۳ در ایران به چنین نتیجه‌ای نمی‌رسیم.

با توجه به نتایج فوق، واضح است که مدل EIGEN-GL04C دقیق‌ترین مدل در بین مدل‌های فوق است.

۳ مقایسه ارتفاع ژئوئید به‌دست‌آمده از مدل‌های

ژئوپتانسیل و نقاط GPS_Leveling در ایران

روش دیگری که برای بررسی صحت مدل‌های ژئوپتانسیل از آن بهره‌گرفته می‌شود، مقایسه ارتفاع ژئوئید به‌دست‌آمده از آن مدل‌ها و نقاط GPS_Leveling است. اگر فرض کنیم که ارتفاع ارتومتریک H و ارتفاع ژئودتیک h صحیح در نقاط پیش‌گفته در اختیار ما باشد، ارتفاع ژئوئید از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$N = h - H \quad (5)$$

ارتفاع ژئوئید حاصل از رابطه (۵) دارای تمامی طول‌موج‌های متفاوت است و یا به‌عبارتی‌دیگر از نظر طیفی به یک باند خاص محدود نمی‌شود. از این رو می‌توان از آن برای سنجش صحت ارتفاع ژئوئید به‌دست‌آمده از مدل‌های ژئوپتانسیل که فقط شامل باند بسامد محدودی هستند، در مناطق متفاوتی از کره زمین استفاده کرد. به‌این‌ترتیب می‌توان به ازای مدل‌های گوناگون، جذر میانگین مربعات خطاها یا همان (Root Mean Square Error, RMSE) ارتفاع ژئوئید

مدل و ارتفاع ژئوئید GPS_Leveling را محاسبه کرد و در نهایت آنها را باهم مقایسه کرد. همچنین می‌توان

جدول ۲. مقایسه مطلق ژئوئید مدل‌های متفاوت و ژئوئید GPS-Leveling در نقاط گوناگون دنیا برحسب متر.

Model	Nmax	USA 6169 points	Canada 1930 points	Europe 186 points	Australia 201 points
EIGEN-GL04C	360	0.339	0.253	0.335	0.245
GGM02C	200	0.473	0.378	0.487	0.377
PGM2000A	360	0.381	0.364	0.477	0.286
EGM96	360	0.379	0.357	0.484	0.298

جدول ۳. مقایسه مطلق ژئوئید مدل‌های متفاوت و ژئوئید GPS-Leveling در ایران برحسب متر.

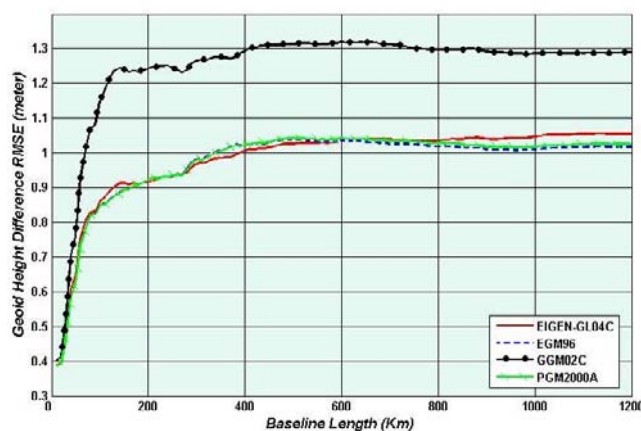
Model	RMSE
EIGEN-GL04C	1.408
GGM02C	1.575
PGM2000A	1.095
EGM96	1.091

EGM96 در مقایسه با مدل EIGEN-GL04C، انطباق بیشتری با نقاط GPS_Leveling دارد؛ که این بر خلاف نتایج به دست آمده در سه قاره امریکا، اروپا و اقیانوسیه است. به منظور رفع این تناقض، لازم است که کیفیت نقاط GPS_Leveling در ایران مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج حاصل از مقایسه نسبی با استفاده از همه طول بازه‌های موجود در جدول ۴ دیده می‌شود. همچنین مقایسه نسبی صورت گرفته با افزایش تدریجی در ازای طول بازه‌های به کار رفته، در شکل ۳ دیده می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از مقایسه نسبی و مطلق در ایران، در نگاه اول به نظر می‌رسد که مدل

جدول ۴. مقایسه نسبی ژئوئید مدل‌های مختلف و ژئوئید GPS-Leveling در ایران برحسب متر.

Model	RMSE
EIGEN-GL04C	1.0523
GGM02C	1.2901
PGM2000A	1.0217
EGM96	1.0158



شکل ۳. مقایسه نسبی ژئوئید مدل‌های متفاوت و ژئوئید GPS-Leveling در ایران با افزایش تدریجی درازای طول بازه‌ها.

به این نکته که صفر شبکه ارتفاعی ایران در سواحل جنوبی کشور قرار دارد و همچنین با توجه به تغییرات زیاد شتاب گرانی از جنوب کشور به سمت شمال که ناشی از افزایش مناطق کوهستانی در این راستا و افزایش عرض جغرافیایی است، و با در نظر داشتن افزایش مقدار خطاهای سامان‌مند ترازایی در مناطق کوهستانی، انتظار می‌رود که بیشترین اثر روند پیش‌گفته، روی طول بازهای شمالی- جنوبی دیده شود. لازم به ذکر است که از آنجایی که دلیلی بر خطی بودن ماهیت روند یادشده در ایران وجود ندارد، استفاده از تبدیل‌های چهار یا هفت پارامتری و نظایر آنها برای حذف روند، منطقی به نظر نمی‌رسد.

۵ مقایسه نسبی ارتفاع ژئوئید مدل‌های ژئوپتانسیل و

نقاط GPS_Leveling با در نظر گرفتن اثر روند

تا به حال در مقایسه نسبی بین مدل‌ها و نقاط GPS_Leveling به راستای طول بازهای انتخاب شده توجهی نداشتیم و تنها طول آنها را در نظر می‌گرفتیم. علت این امر آن است که در صورت نبود روند، به نظر نمی‌رسد که مقایسه نسبی به آزمون طول بازهای انتخاب شده وابسته باشد، اما در این مقطع که احتمال وجود روند را بررسی می‌کنیم، ناچار به در نظر گرفتن مسئله پیش‌گفته نیز هستیم. در شکل ۵ نتایج مقایسه نسبی روی طول بازهایی که آزمون آنها درباره‌های $[90 - \alpha]$ یا $[270 - \alpha, 270 + \alpha]$ قرارداد، نشان داده شده است. با تغییر α از 0° تا 90° ابتدا تنها طول بازهای شرقی- غربی بررسی می‌شوند و سپس به تدریج دامنه تغییر آزمون طول بازهای افزایش می‌یابد. بدین ترتیب با نزدیک شدن α مقدار به 90° ، اثر طول بازهای شمالی - جنوبی نیز در نتایج آشکار می‌شود. با توجه به شکل ۵ واضح است که به ازای مقادیر $\alpha \leq 70^\circ$ ، مدل EIGEN-GL04C نسبت به سایر مدل‌ها، دارای انطباق بیشتری با نقاط GPS_Leveling است. به این ترتیب با کنار گذاشتن طول

۴ بررسی کیفیت نقاط GPS_Leveling در ایران

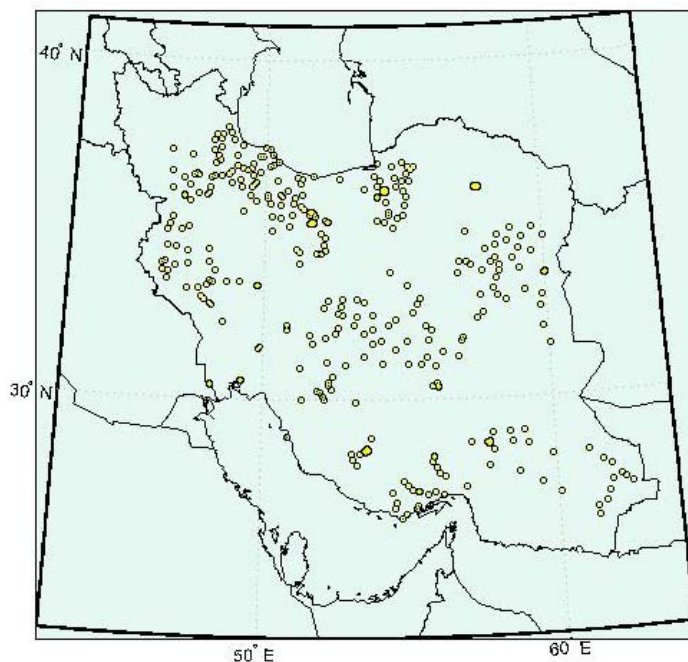
مجموعه نقاط GPS_Leveling موجود در ایران شامل حدود ۴۹۰ نقطه است که پس از حذف نقاط تکراری و نقاط دارای مشاهدات نادرست (نقاطی که اختلاف ارتفاع ژئوئید آنها با ارتفاع ژئوئید مدل EGM96 بیش از ۲ متر است) حدود ۴۵۰ نقطه برای بررسی باقی می‌ماند. هدف اصلی از گردآوری این نقاط، کاربرد آنها در تهیه نقشه‌های پوششی ۱:۲۵۰۰۰ ایران است (نجفی و همکاران، ۲۰۰۴) و بیشتر نقاط پیش‌گفته پنج مارک‌های شبکه‌های درجه دو و سه ترازایی کشورند و شمار اندکی نیز از شبکه درجه یک ترازایی در این مجموعه نقاط وجود دارند. از آنجایی که هیچ برآوردی از دقت مشاهدات صورت گرفته برای این نقاط وجود ندارد، امکان برآورد دقت ارتفاع ژئوئید نیز در این نقاط میسر نیست (نجفی و همکاران، ۲۰۰۴) اما با توجه به نوع شبکه‌های ترازایی و همچنین هدف اصلی ایجاد این نقاط، می‌بایست نوفه قابل توجهی را برای ارتفاع ژئوئید به دست آمده در این نقاط در نظر گرفت که مقدار آن فقط از راه مقایسه با مشاهدات جدیدی که در سازمان نقشه‌برداری کشور صورت می‌گیرد، قابل محاسبه و بررسی است. از سوی دیگر با توجه به این نکته که نوفه مشاهدات، سیگنالی است که قسمت عمده آن را مولفه‌های با بسامد زیاد تشکیل می‌دهند، می‌توان با استفاده از فیلترهای پایین‌گذر (Low pass filter) مناسب، نسبت به حذف یا کاهش اثر نوفه اقدام کرد (گارسیا، ۱۹۸۹؛ اسمیت، ۱۹۹۹). همچنین با توجه به وجود انواع خطاهای سامان‌مند در شبکه‌های ترازایی که رفتار جمع‌شونده دارند و به‌طور ویژه اعمال نشدن تصحیح ارتومتریک به تمامی مشاهدات شبکه‌های ترازایی کشور در گذشته، که دلیل آن نبود پخش یکنواخت مشاهدات گرانی‌سنجی در کل کشور است، وجود خطاهای سامان‌مند در ارتفاع ژئوئید محاسبه شده در این نقاط نیز به صورت یک روند انتظار می‌رود. با توجه

استفاده از فیلترهای مکانی هستیم. فیلترهای یاد شده، در واقع همان فیلتر Moving Average هستند (گارسیا، ۱۹۸۹ و اسمیت، ۱۹۹۹). با اعمال این فیلترها به یک سیگنال، مقدار سیگنال در هر نقطه با میانگین وزن دار خود نقطه و نقاط اطراف آن جایگزین می شود. با توجه به طیف تابع وزن یا کرنل میانگین گیری در فضای بسامد، می توان به نحوه عملکرد این فیلترها روی بسامدهای گوناگون پی برد. برای مثال چنانچه به همه نقاط وزن یکسان تعلق گیرد، کرنل در فضای مکان و فضای بسامد به صورت شکل ۶ خواهد بود. همان طور که از شکل طیف کرنل پیدا است، وجود پیک‌هایی در حاشیه طیف پیش گفته، نشان دهنده این مطلب است که اثر بسامدهای زیاد با استفاده از این کرنل، به طور کامل حذف نمی شود. مورد دیگر، استفاده از تابع نرمال یا کرنل گاوسی است که شکل ۷ تابع و طیف مربوط به آن را نشان می دهد. با استفاده از این فیلتر، اثر بسامدهای زیاد به تدریج محو می شود. در اینجا از نوع خاصی از کرنل گاوسی استفاده کرده ایم که به نام فیلتر Jekeli شناخته می شود. (جکلی، ۱۹۸۱)

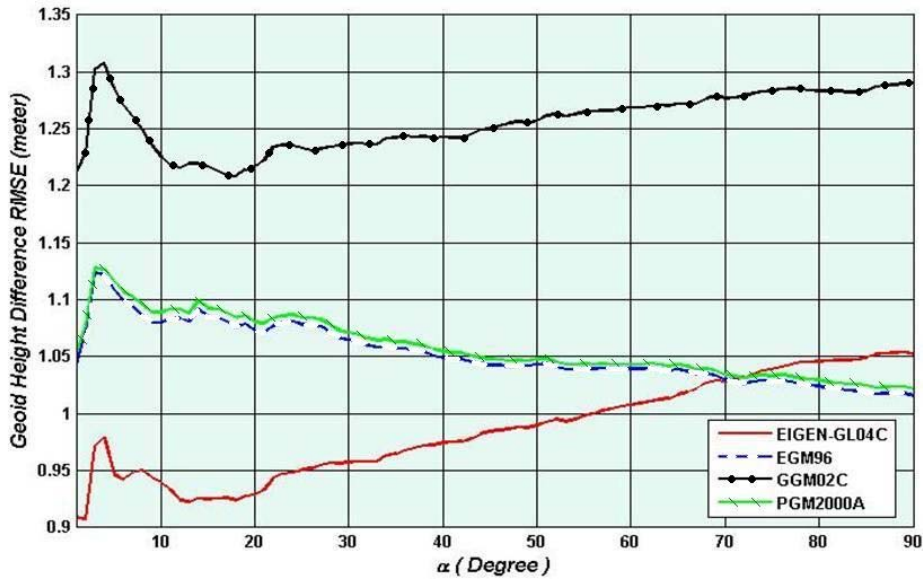
بازهای شمالی- جنوبی، و مقایسه نسبی روی طول بازهای باقی مانده، صرف نظر از درازای طول بازهای، اثر روند کاهش می یابد و برتری مدل EIGEN-GL04C نسبت به سایر مدل ها دیده می شود. البته نتیجه به دست آمده برای مدل GGM02C به این دلیل است که این مدل فقط شامل ضرایب تا درجه و مرتبه ۲۰۰ است و سایر مدل ها تا درجه و مرتبه ۳۶۰ ضرایب پتانسیل را شامل می شوند.

۶ کاهش اثر نوفه مشاهدات و طول موج های کوتاه با فیلترهای مکانی

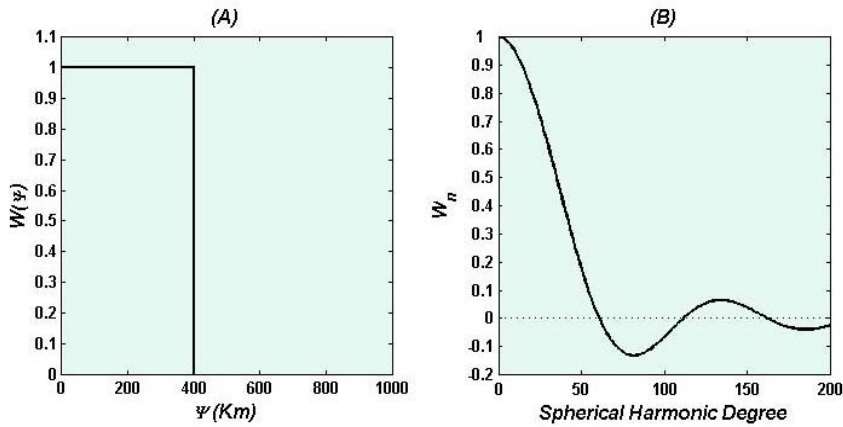
همان طور که پیش از این نیز گفتیم، به منظور کاهش اثر نوفه موجود، باید از یک فیلتر پایین گذر استفاده کنیم. عمل فیلتر کردن یک سیگنال را می توان در هر دو فضای مکان و بسامد عملی ساخت، اما برای این کار در فضای بسامد، سیگنال پیش گفته می باید روی یک شبکه منظم از نقاط، نمونه برداری شده باشد. از آنجاکه در مسئله فعلی، نقاط ما دارای پراکندگی غیر یکنواخت اند، ناچار به



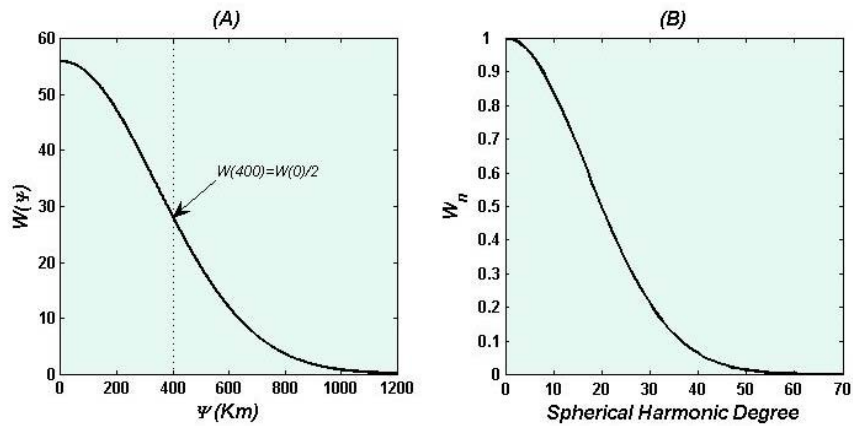
شکل ۴. پراکندگی نقاط GPS-Leveling موجود در ایران.



شکل ۵. مقایسه نسبی ژئوئید مدل‌های متفاوت و ژئوئید GPS-Leveling در ایران در آزمایش‌های متفاوت.



شکل ۶. (A) کرنل میانگین‌گیری یکنواخت به شعاع ۴۰۰ کیلومتر در فضای مکان (B) طیف کرنل فوق در فضای بسامد.



شکل ۷. (A) کرنل میانگین‌گیری گاوسی به شعاع ۴۰۰ کیلومتر در فضای مکان (B) طیف کرنل فوق در فضای بسامد.

می‌شود، دقیق‌ترین و صحیح‌ترین مدل ژئوپتانسیل در ایران به دست آمد. با این مقایسه، اعمال اثرات گرانی بر داده‌های ترازبایی ایران به منظور تهیه شبکه ارتفاعات اورتومتریک اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد. البته پردازش داده‌های مبنا در چنین مقایسه‌هایی نیز یادآوری می‌شود.

تقدیر و تشکر

نگارنده نخست از حمایت مالی دانشگاه تهران در قالب طرح شماره ۲۷۸۵۹/۱/۱ تقدیر و تشکر می‌نماید. همچنین از سازمان نقشه برداری جمهوری اسلامی ایران به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های GPS-leveling مورد استفاده در این مقاله، سپاسگزاری می‌شود.

منابع

آزموده اردلان، ع.، صفری، ع. ر. و جموری، ی.، ۱۳۸۵، مقایسه مدل‌های ژئوپتانسیل جدید در منطقه جغرافیایی ایران از راه تابعک‌های متفاوت میدان گرانی. مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۲، شماره ۳، صفحه ۱۰۷-۱۱۶.

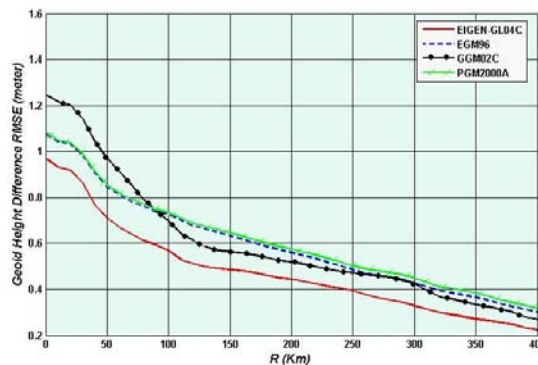
نجفی، م.، حاتم، ی.، وثوقی، ب.، باقربندی م.، اسحاق م. و گلی، م.، ۲۰۰۴، گزارش فنی مدل ژئوئید، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، بخش پژوهش سازمان نقشه برداری (NCC)، پروژه To-Tak، ایران. نیک‌خو، م. و عباس‌زاده، م.، ۱۳۸۷، تبدیل آنومالی ارتفاعی روی بیضوی به ارتفاع ژئوئید در سطح زمین با استفاده از ضرایب مدل‌های ژئوپتانسیل در ایران. سومین همایش مقابله با سوانح طبیعی، دانشگاه تهران.

GarciaA, L., 1989, Probability and Random Processes for Electrical Engineering, Addison-Wesley Series in Electrical and Computer Engineering.

Hofmann, B. and Moritz, H., 2006, Physical Geodesy. Springer Wien NewYork, Second corrected edition.

Jekeli, C., 1981, Alternative Methods To Smooth

حال با اعمال فیلتر پیش‌گفته روی ارتفاع ژئوئید به دست آمده از مدل‌ها و نقاط GPS_Leveling، به بررسی نتایج می‌پردازیم. در شکل ۸ نتایج اعمال این فیلتر به ازای شعاع‌های گوناگون و به ازای $\alpha = 25^\circ$ دیده می‌شود.



شکل ۸. مقایسه نسبی ژئوئید مدل‌های متفاوت و ژئوئید GPS-Leveling در ایران پس از اعمال فیلتر گاوسی به شعاع R.

با توجه به شکل فوق، ملاحظه می‌شود که با افزایش تدریجی شعاع کرنل گاوسی، اختلاف بین RMSE مدل‌های EIGEN-GL04C و EGM96 افزایش می‌یابد که علت این امر حذف نوفه مشاهدات است. با افزایش مقدار R بیشتر از ۱۵۰ کیلومتر دیده می‌شود که RMSE مدل‌های پیش‌گفته به هم نزدیک می‌شوند که علت آن حذف طول موج‌های کوتاه سیگنال ارتفاع ژئوئید علاوه بر نوفه است که باعث کم‌رنگ شدن برتری مدل EIGEN-GL04C می‌شود. اما نکته جالب توجه در این بین، بهبود RMSE مدل GGM02C با حذف طول موج‌های کوتاه سایر مدل‌ها است که نشان‌دهنده کیفیت بهتر این مدل در طول موج‌های کمتر از درجه ۲۰۰ نسبت به دو مدل EGM96 و PGM2000A است.

۷ بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله با برطرف کردن خطاهای بزرگ، اثرات سامان‌مند و خطاهای اتفاقی در مشاهدات زمینی‌ای که ژئوئید محاسبه شده از مدل‌های ژئوپتانسیل با آنها مقایسه

- The Earth's Gravity Field. Report No.327, Department of Geodetic Science and Surveying, Ohio State University 1958 Neil Avenue, Columbus, Ohio 43210, United States of America.
- Kiamehr, R. and Sjoberg, L. E., 2005, Comparison of the qualities of recent global and local gravimetric geoid models in Iran. *J. Studio Geophysica et Geodetica*, volume **49**,289-304.
- Lemoine, F. G., Kenyon, S. C., Pavlis, N. K., Rapp, R. H. and Olson, T. R., 1998, The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96.
- Smith, S. W., 1999, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Second Edition, California Technical Publishing, San Diego, California.
- Vanicek, P. and Krakiwsky, E., 1986, *Geodesy: The Concepts*. Elsevier Science Publishing Company, Second Edition.
- Vanicek, P. and Nikolaos, T. Christou., 1993, *Geoid and its Geophysical Interpretations*: CRC Press (Boca Raton, FL).