

تعیین یک شبه‌زمین‌وار دقیق با استفاده از یکتاسازی سطوح مبنای ارتفاعی با روش تکرار: بررسی موردی برای ایران

الهام شهبازی فراهانی^۱ و حسین زمردیان^{۲*}

^۱شرکت مهندسی مشاور خدمات زمین فیزیک، تهران، ایران
^۲دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۱۰)

چکیده

سطح مرجع قائم، سطحی است که برای اندازه‌گیری ارتفاع نقاط روی سطح زمین به کار می‌رود. یک سطح مرجع قائم را می‌توان با محاسبه عدد ژئوپتانسیل نقطه مشاهده (ایستگاه کشندسنج) با استفاده از ارتفاع بیضوی آن و مقدار گرانی مطلق تعیین کرد. در ایران مبنای سنجش ارتفاع، سطح آب‌های آزاد فلو در دهانه اوندردود تعیین شده است. در این پژوهش ابتدا با استفاده از تعیین ژئوپتانسیل متوسط سطح دریا، سه سطح مبنای ارتفاعی در سواحل جنوبی ایران (ایستگاه‌های کشندسنج بوشهر، هرمزگان و چابهار) تعریف شده است که می‌توان از آنها در حکم سطوح مبنای ارتفاعی محلی استفاده کرد. به‌طور معمول به علت ثابت نبودن سطح دریا، سطوح هم‌پتانسیل که سطوح مبنای محلی را تشکیل می‌دهند بر هم منطبق نیستند و به مقدار نامشخصی از هم انحراف دارند. این انحراف‌ها با کاربرد یک گیرنده سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) با دانستن ارتفاع بیضوی، ارتفاع نرمال اورتومتري و بی‌هنجاری ارتفاعی مبدأ سطح مبنا محاسبه می‌شود. بدین ترتیب سطوح مبنای ارتفاعی محلی به هم مرتبط می‌شوند. یکی از هدف‌های ژئودزی نوین، یکتاسازی جهانی سطوح مرجع ارتفاعی است تا داده‌های ارتفاعی به‌طور صحیحی یکتاسازی شود. بنابراین این سه سطح با استفاده از یک مدل شبه‌زمین‌وار گرانی منطقه‌ای و ارتفاع بیضوی نقاط، یکتاسازی شده‌اند. برای این کار از محاسبه شبه‌زمین‌وار به روش تکرار استفاده شده است. با استفاده از دورافت (Offset) سطح مبنای موردنظر از شبه‌زمین‌وار، بی‌هنجاری‌های گرانی هر سطح مبنا به مدل شبه‌زمین‌وار برگردان شده است. به این منظور از دو مدل ژئوپتانسیل جهانی EGM96 و EGM2008 و داده‌های گرانی شبکه BGI (اداره گرانی‌سنجی جهانی) برای ایران که شامل ۸۵۸۲ ایستگاه اندازه‌گیری است و مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM) با دقت سه ثانیه قوسی استفاده شده است. برگردان‌هایی نیز به کار رفته است تا مشاهدات گرانی به بی‌هنجاری هوای آزاد و بوگه کامل تبدیل شوند.

در خیلی از کشورها به علت فقدان مشاهدات گرانی در سراسر طول خطوط ترازیبی، محاسبه ارتفاع نرمال یا اورتومتري به‌طور صریح امکان‌پذیر نیست. برای غلبه بر این محدودیت، سامانه ارتفاعی نرمال-اورتومتري توسعه یافته است. در این تحقیق نیز به‌منظور برگردان‌های گرانی از سطح زمین به شبه‌زمین‌وار، از سامانه ارتفاعی نرمال-اورتومتري استفاده شده است و بدین منظور ارتفاع نرمال-اورتومتري همه نقاط شبکه BGI که مربوط به ایران است و همچنین ایستگاه‌های کشندسنج بوشهر، هرمزگان و چابهار با استفاده از برنامه‌ای در محیط نرم‌افزار مت‌لب محاسبه شد. پس از سه مرتبه تکرار، دورافت سطوح مبنا همگرا شد و با ایجاد این سطوح مبنا و یکتاسازی آنها، ارتفاع نقاط در محدوده این سه سطح را می‌توان از این سطوح محاسبه کرد. رابطه‌ای نیز برای تعیین وابستگی این انحراف‌ها به ارتفاع سطوح مبنا داده شده است.

باید خاطر نشان کرد که میانگین دورافت‌ها و اطلاعات مربوط به هر سطح مبنا، جداگانه حساب شده است. مبنای این محاسبه تعیین بی‌هنجاری‌های برگردان شده برای همه نقاط سطح مبنا و محاسبه دورافت‌های اولیه هر سطح مبنا بوده است. در نهایت نتیجه‌گیری شد که مدل شبه‌زمین‌وار حاصل از تکرار، نقشی اساسی در یکتاسازی سطوح مبنای ارتفاعی دارد. با مقایسه شبه‌زمین‌وار به‌دست آمده از روش تکرار در این پژوهش، با شبه‌زمین‌وارهای به‌دست آمده در تحقیقات قبلی و انحراف معیار ۰/۶ متر روشن می‌شود که روش تکرار می‌تواند روشی مناسب برای تعیین شبه‌زمین‌وار در مناطق ساحلی باشد. علاوه بر این ترکیب شبه‌زمین‌وار به‌دست آمده با دورافت‌های حاصل می‌تواند سطح بیضوی مرجع را به هریک از سطوح ارتفاعی محلی تبدیل کند.

واژه‌های کلیدی: زمین‌وار، شبه‌زمین‌وار، ارتفاع نرمال-اورتومتري، سطح مبنای ارتفاعی محلی

Determination of a precise quasigeoid using the unification of the vertical datum and the iteration method: A case study for Iran

Elham Shahrabi Farahani ^{1*} and Hossein Zomorrodian ²

¹Zamin Physics Consulting Engineers Co., Tehran, Iran

²Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received: 22 April 2013, accepted: 1 November 2014)

Summary

A vertical reference surface was used as a reference to measure the heights of the points on the earth surface. A vertical datum can also be defined by computing the geopotential number of the origin point (tide gauge station) using its ellipsoidal height and absolute gravity value. In this research, after determining the mean geopotential for the sea level, three local vertical datums (LVDs) were described for three tide gauge stations namely, Bushehr, Hormozgan, and Chabahar, on the southern coast of Iran. Since the mean sea level is not constant, the equipotential surfaces which create the local datums are not coincided and show some deviation from each other to an undefined extent. These offsets are calculated by using a Global Navigation Satellite System (GNSS) with ellipsoidal height, normal-orthometric height and height anomaly of the datum. Therefore the data can be related to each other. One goal of the modern geodesy is the global unification of vertical data so that height data from them can be properly integrated. The unification of these LVDs may be performed by using a regional gravimetric quasigeoid model and also the ellipsoidal height data on each datum. For this purpose, the iteration method was applied. Using the LVD offset of the related datum compared to quasigeoid, the gravity anomalies of each datum was reduced to a quasigeoid model. The quasigeoid was computed by combining two global geopotential models, namely EGM96 and EGM2008, with a set of the gravity data obtained from Bureau Gravimetrique International (BGI) including the total number of 8582 stations across Iran and the digital elevation model (DEM) with three arc second resolution. The reductions were applied to the gravity observation to produce the free-air and complete Bouguer anomalies.

Because many countries do not have gravity observations along all the precise leveling routes, the computation of orthometric or normal heights is not strictly possible. To overcome this limitation, the normal-orthometric height system was developed. In this research, the normal-orthometric height system was used to reduce the measured gravity values from the earth surface to the quasigeoid. The normal-orthometric heights for the BGI stations as well as for the tide-gauge stations in Bushehr, Hormozgan and Chabahar were calculated based on a program prepared in Matlab. The solution converged after three iterations. Creating these data, and unification of them, the height of the stations located in the area of these three local vertical data can be calculated. A relation for determination of the dependency of these offsets to the heights of the data was also presented.

It should be noted that the mean offsets and the information relevant to each datum were calculated separately. The base of this calculation was the determination of reduced anomalies for all points of the data and the related preliminary values of the offsets for each datum.

Finally, it may be concluded that the quasigeoid models resulted from the iteration

method perform a vital role in the vertical datum unification. Comparison of such quasigeoids with those obtained in previous researches, and also considering the standard deviation of 0.6 m showed that the iteration method may be a suitable method to determine the quasigeoid in coastal areas. Furthermore, the combination of the described quasigeoids with the obtained offsets can be applied to transfer the reference ellipsoid as a datum to each one of the LVDs.

Keywords: Geoid, quasigeoid, normal-orthometric height, local vertical datum

۱ مقدمه

سطح مرجع قائم، سطحی است که برای اندازه‌گیری ارتفاع نقاط روی سطح زمین به کار می‌رود. سطوح مرجع قائم یا کشندی، براساس سطح دریا و یا براساس مدل‌های بیضوی هستند. به‌طور معمول سطوح مبنای محلی براساس متوسط سطح دریای مشاهده شده در ایستگاه‌های کشندسنج در منطقه موردنظر هستند. ترکیب حرکت زمین‌ساختی (ولمن، ۱۹۷۹؛ والکت، ۱۹۸۴؛ بیون و همکاران، ۲۰۰۴)، توپوگرافی سطح دریا، SST (sea surface topography) و تغییر سطح دریا (هنا، ۱۹۹۰) سبب می‌شود که متوسط سطح دریا در هر کشندسنج روی سطح هم‌پتانسیل یکسانی قرار نگیرد. همچنین تغییرات ارتفاعی محلی در اثر فعالیت آتشفشانی (اتوی و همکاران، ۲۰۰۲) و زلزله‌ها (هندرسن، ۱۹۳۳؛ لسن و اتوی، ۱۹۷۱؛ بینلند و همکاران، ۱۹۹۰؛ بگ و مسونی، ۲۰۰۵) ایجاد می‌شوند. از این رو تشکیل یک سطح مبنای قائم منفرد، منحصراً براساس متوسط سطح دریا، با گذر زمان بعید است.

چون سطح متوسط دریا در اقیانوس‌ها از یک سطح ثابت انحراف دارد معمولاً سطوح هم‌پتانسیل که سطوح مبنای محلی را تشکیل می‌دهند بر هم منطبق نیستند و به مقدار نامشخصی از هم انحراف دارند. اختلاف سطوح مرجع ارتفاعی در نواحی گوناگون ممکن است به ۲ متر برسد (جیا و همکاران، ۲۰۰۲). یکتاسازی سطوح مرجع جهانی یک مسئله مهم در ژئودزی است و از سوی گروه زیادی از محققان بررسی شده است (کلمبو، ۱۹۸۰؛ هک

و رامل، ۱۹۹۰؛ زو و رامل، ۱۹۹۱؛ رپ، ۱۹۹۵؛ سنسو و یوسی، ۱۹۹۵؛ رامل و ایلک، ۱۹۹۵؛ گرافرنده و اردلان، ۱۹۹۷، ۱۹۹۹، ۲۰۰۲؛ نهاوندچی و اسجوبرگ، ۱۹۹۸؛ پن و اسجوبرگ، ۱۹۹۸؛ فدرستون، ۱۹۹۸، ۲۰۰۰؛ پاتنن، ۱۹۹۹؛ رامل، ۲۰۰۰؛ هیپکین، ۲۰۰۲؛ جیکلی، ۲۰۰۰، ۲۰۰۳؛ اردلان و صفری، ۲۰۰۵).

یک روش برای یکتاسازی سطوح مبنای قائم، استفاده از مدل شبه‌زمین‌وار است (رامل و تونیس، ۱۹۸۸؛ هک و رامل، ۱۹۹۰؛ آموس و فدرستون، ۲۰۰۹). با کاربرد یک گیرنده GNSS (Global Navigation Satellite System)، دورافت سطوح مبنای قائم را می‌توان به کمک رابطه (۱) محاسبه کرد (آموس و فدرستون، ۲۰۰۹):

$$O = h - H^{N-O} - \zeta, \quad (1)$$

که در آن O دورافت سطح مبنا از شبه‌زمین‌وار، h ارتفاع بیضوی، H^{N-O} ارتفاع نرمال-اورتومتري و ζ بی‌هنجاری ارتفاعی مبدأ سطح مبنا یعنی ایستگاه کشندسنج هستند و بدین ترتیب این سطوح به هم مرتبط می‌شوند. این فرایند همچنین اجازه می‌دهد که مشاهدات زمین‌مرکز مثل GPS (Global Positioning System) به ارتفاع نرمال-اورتومتري مرتبط با هر سطح مبنا تبدیل شوند.

۲ سطح مبنای ارتفاعی

برای تعریف یک سطح مبنای ارتفاعی، لازم است که نوعی سامانه ارتفاعی و سطح مرجع مربوط به آن انتخاب شود. نوع سامانه ارتفاعی انتخاب شده معمولاً به داده‌ای

که در زمان تعریف سطح مبنا استفاده شده، مرتبط است (می‌توان سامانه را انتخاب کرد و سپس داده لازم را به دست آورد). اکنون سطح مرجع به سامانه ارتفاعی انتخاب شده بستگی دارد. یک سطح مبنای ارتفاعی را می‌توان از راه محاسبه ژئوپتانسیل نقطه مشاهده (ایستگاه کشندسنج) با استفاده از ارتفاع بیضوی آن و مقدار گرانی مطلق تعیین کرد (گرافرند و اردلان، ۱۹۹۷؛ بورشا و همکاران، ۲۰۰۴، ۲۰۰۷).

در این پژوهش به علت اینکه مشاهدات گرانی در سراسر طول خطوط ترازایی موجود نیست، محاسبه ارتفاع نرمال یا اورتومتري به طور صریح امکان پذیر نیست. برای غلبه بر این محدودیت، از سامانه ارتفاعی نرمال - اورتومتري استفاده شده است.

همکاران، ۲۰۰۴، ۲۰۰۷).
 در این پژوهش به علت اینکه مشاهدات گرانی در سراسر طول خطوط ترازایی موجود نیست، محاسبه ارتفاع نرمال یا اورتومتري به طور صریح امکان پذیر نیست. برای غلبه بر این محدودیت، از سامانه ارتفاعی نرمال - اورتومتري استفاده شده است.

در این پژوهش به علت اینکه مشاهدات گرانی در سراسر طول خطوط ترازایی موجود نیست، محاسبه ارتفاع نرمال یا اورتومتري به طور صریح امکان پذیر نیست. برای غلبه بر این محدودیت، از سامانه ارتفاعی نرمال - اورتومتري استفاده شده است.

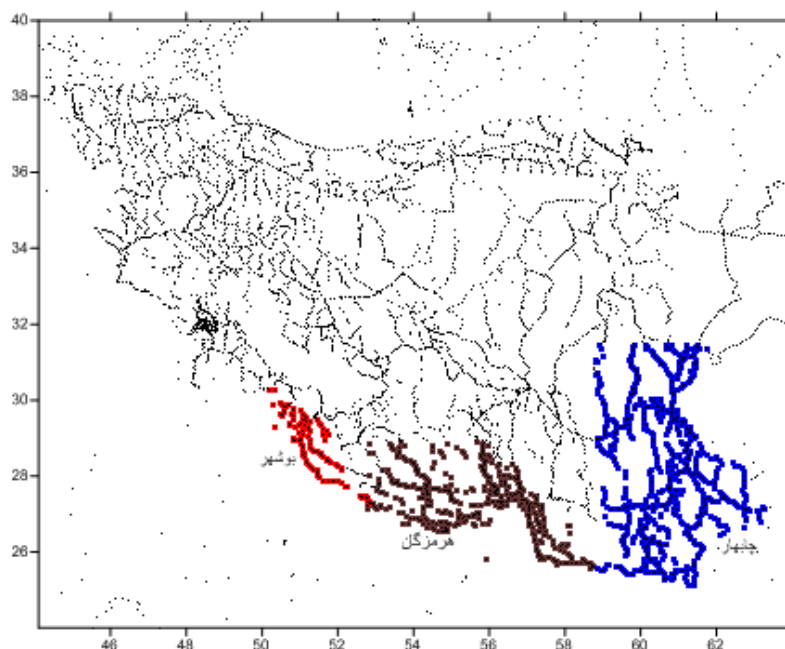
۳ داده‌های گرانی

داده‌های گرانی استفاده شده در این پژوهش بخشی از داده‌های اداره بین‌المللی گرانی سنجی، (BGI Bureau

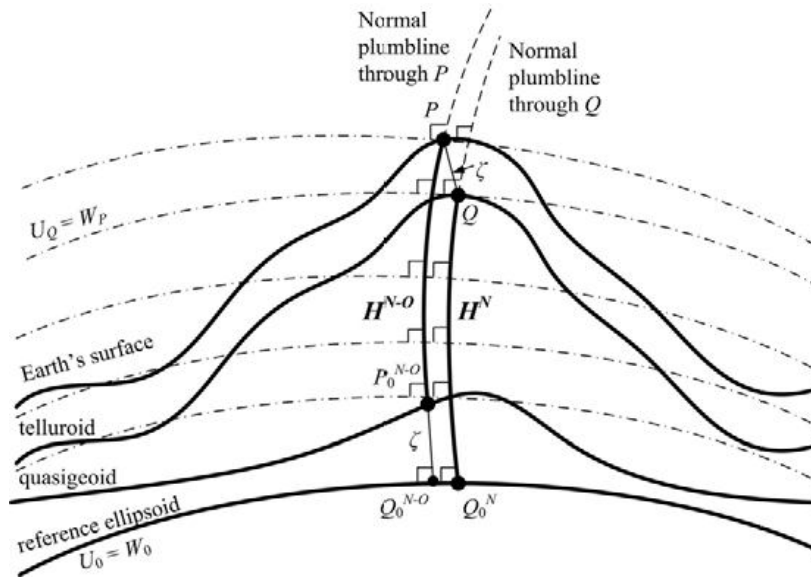
نقاط شبکه BGI در ایران و محدوده سطوح مبنای ارتفاعی محلی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۴ ارتفاع نرمال-اورتومتري

ارتفاع نرمال-اورتومتري در حکم فاصله بین شبه‌زمین وار و سطح زمین در راستای انحنای نرمال بر بیضوی تعریف می‌شود (شکل ۲).



شکل ۱. نقاط شبکه BGI و محدوده سه سطح مبنای ارتفاعی محلی).



شکل ۲. ارتفاع‌های نرمال و نرمال-اورتومتري (آموس و فدرستون، ۲۰۰۹).

۵ تعیین ژئوپتانسیل سطح متوسط آب‌های محلی و تعریف سطح مبنای ارتفاعی محلی (Local LVD Vertical Datum):

به‌منظور یکتاسازی سامانه‌های ارتفاعی محلی در سرتاسر جهان، یک راه، نشان دادن رابطه هندسی بین سطح مبنای ارتفاعی محلی و زمین‌وار (یا شبه‌زمین‌وار) یا بین سطوح مبنای ارتفاعی محلی گوناگون است. برای عملی ساختن آن، مقایسه ژئوپتانسیل زمین‌وار با ژئوپتانسیل سطح متوسط آب‌های محلی مورد نیاز است (زایکینگ و ونهای، ۲۰۰۳):

پتانسیل گرانی و پتانسیل گرانی نرمال با بسط‌های هم‌هنگ کروی زیر بیان می‌شود (زایکینگ و ونهای، ۲۰۰۳):

$$W = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{N_{\max}} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n \left(\frac{\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda}{\bar{S}_{nm}} \right) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \right\} + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \theta, \quad (4)$$

$$U = \frac{GM}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\lfloor N_{\max}/2 \rfloor} j_{2n} \left(\frac{a}{r} \right)^{2n} \bar{P}_{2n}(\cos\theta) \right\}, \quad (5)$$

ارتفاع نرمال-اورتومتري با رابطه زیر تعریف می‌شود (آموس، ۲۰۰۷):

$$H^{N-O} = \frac{C'}{\gamma}, \quad (2)$$

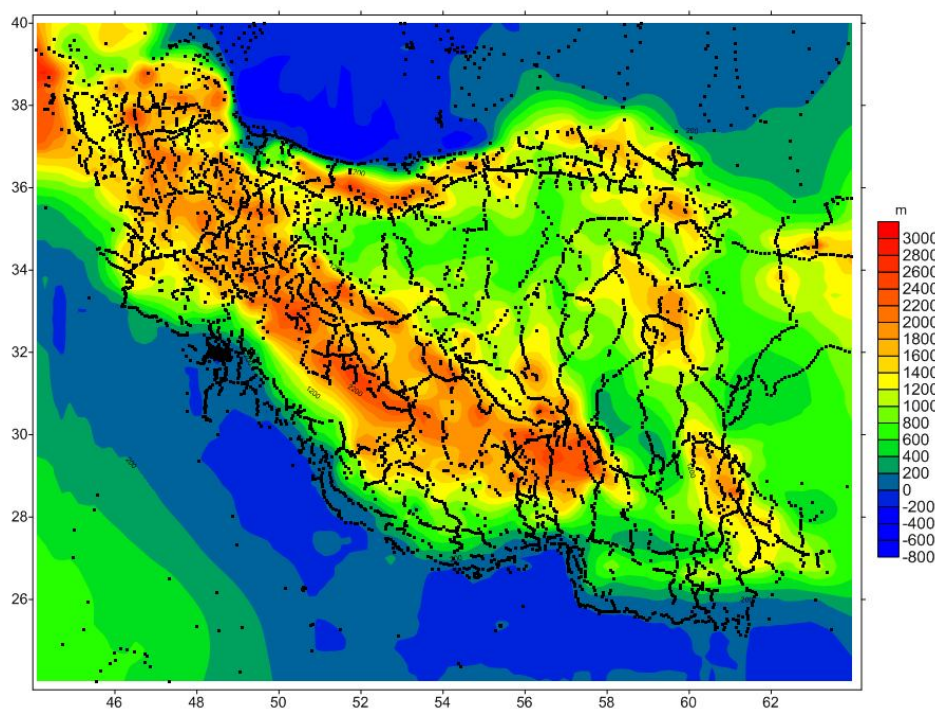
که C' ، ژئوپتانسیل نرمال با رابطه زیر داده می‌شود (آموس، ۲۰۰۷):

$$C' = \int_{P_0}^P \gamma dh. \quad (3)$$

ارتفاع نرمال-اورتومتري ایستگاه‌های کشندسنج هرمزگان، بوشهر و چابهار با استفاده از برنامه‌ای به زبان مت‌کب محاسبه شد که نتایج مربوط به ایستگاه‌های کشندسنج در جدول ۱ داده شده است. شکل ۳ ارتفاع نرمال-اورتومتري سرتاسر ایران را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ارتفاع نرمال-اورتومتري ایستگاه‌های کشندسنج

نام ایستگاه	ارتفاع نرمال-اورتومتري (متر)
بوشهر	۰/۳۳۰۳۹
هرمزگان	۰/۶۱۱۶۵
چابهار	۱/۷۲۸۳۳



شکل ۳. ارتفاع نرمال - اورتومتری نقاط سرتاسر ایران.

به منظور تعریف LVD، ژئوپتانسیل در سه ایستگاه کشندسنج بوشهر، هرمزگان و چابهار تعیین شد. مشخصات این سه ایستگاه در جدول ۲ آمده است. جدول‌های ۳ و ۴ ژئوپتانسیل محاسبه شده ایستگاه‌های کشندسنج را نشان می‌دهند.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های کشندسنج بوشهر، هرمزگان و چابهار.

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	ارتفاع بیضوی (متر)
بوشهر	۲۸/۹۸۹۶۶	۵۰/۸۳۷۴۶	-۲۰/۱۴۹۵
هرمزگان	۲۷/۱۰۱۸۰	۵۶/۰۷۳۹۱	-۲۶/۴۲۴۱
چابهار	۲۵/۳۱۳۵۵	۶۰/۶۲۱۳۸	-۲۶/۳۰۷۶

جدول ۳. ژئوپتانسیل در ایستگاه‌های کشندسنج با استفاده از مدل

EGM96

ایستگاه کشندسنج	ژئوپتانسیل (m^2/s^2)
هرمزگان	۶۲۵۹۳۰۱۵/۴۸۵۵
چابهار	۶۲۵۹۸۲۱۷/۷۲۷۶
بوشهر	۶۲۵۸۷۲۶۴/۰۲۳۱

که GM حاصل ضرب ثابت گرانش جهانی نیوتن و جرم زمین، r شعاع زمین مرکز، a شعاع زمین، λ طول جغرافیایی و θ متمم عرض جغرافیایی است. بعد از به دست آوردن ژئوپتانسیل در ایستگاه کشندسنج می‌توان جابه‌جایی قائم نسبی زمین‌وار را از سطح متوسط آب‌های محلی به دست آورد (زایکینگ و ونهای، ۲۰۰۳):

$$\Delta h = -\frac{(W_i - W_0)}{\gamma'_0}, \quad (6)$$

که W_i ژئوپتانسیل در ایستگاه کشندسنج تعریف شده روی یک سطح مبنای ارتفاعی محلی و W_0 ژئوپتانسیل زمین‌وار است و در اینجا معلوم فرض شده است، γ'_0 گرانی نرمال در ایستگاه کشندسنج است. در اصل اگر موقعیت ایستگاه کشندسنج با GPS معلوم باشد، جابه‌جایی قائم سطح متوسط آب‌های محلی اطراف آن تعیین خواهد شد؛ زیرا پتانسیل گرانی و پتانسیل گرانی نرمال را می‌توان از روابط بالا محاسبه کرد.

جدول ۴. ژئوپتانسیل در ایستگاه‌های کشندسنج با استفاده از مدل

EGM2008

ایستگاه کشندسنج	ژئوپتانسیل (m^2/s^2)
هرمزگان	۶۲۵۸۰۵۴۶/۳۹۵۶
چابهار	۶۲۵۸۳۲۴۱/۱۲۴۱
بوشهر	۶۲۵۸۱۷۵۴/۹۸۴۳

۶ طرح محاسبه شبه‌زمین‌وار با روش تکرار:

هدف از یکتاسازی سطوح مبنای ارتفاعی، تعیین رابطه‌ای بین این سطوح مبنای است تا ارتفاع نقاط روی هر سطح مبنای را بتوان در یک سامانه مشترک بیان کرد. سطوح مبنای محلی که براساس سطح متوسط دریا در ایستگاه‌های کشندسنج هستند، نسبت به یکدیگر انحراف دارند. وقتی مشاهدات براساس ارتفاع‌ها از یک سطح مبنای ارتفاعی محلی برگردان شود (مانند برگردان‌های گرانی) و با مشاهدات دیگری که با استفاده از ارتفاع‌های مربوط به سطح مبنای ارتفاعی محلی مجاور برگردان شده‌اند، ترکیب شود، این ترکیب باید تعدیل شود، زیرا ارتفاع‌ها به یک سطح مرجع مشترک برگردان نشده‌اند. این اثر در مسئله یکتاسازی سطوح مبنای را لاسکوسکی تعیین کرده است (لاسکوسکی، ۱۹۸۳). او یک تصحیح دورافت سطح مبنای ($\delta\Delta g$) پیشنهاد کرد تا مشاهدات گرانی تصحیح و به یک سامانه مرجع مشترک برای محاسبه شبه‌زمین‌وار تبدیل شود. $\delta\Delta g$ تصحیح مرتبه اول گرانی هوای آزاد برحسب میلی‌گال است (آموس و فدرستون، ۲۰۰۹):

$$\delta\Delta g = \Delta g^* - \Delta g = \frac{\partial g}{\partial h} O \cong 0.3086O, \quad (7)$$

که:

$$\Delta g^* = g_{obs} - \frac{\partial g}{\partial h} (h_D + O) - \gamma,$$

$$\Delta g^* = g_{obs} - \frac{\partial g}{\partial h} h_D - \gamma,$$

که O دورافت سطح مبنای ارتفاعی، g_{obs} مقدار گرانی مشاهده شده، $\partial\gamma/\partial h$ گرادیان قائم گرانی نرمال، h_D

اختلاف ارتفاع بین سطح نقطه اندازه‌گیری و نقطه متناظرش روی سطح مبنای ارتفاعی و γ گرانی نرمال است. در رابطه (۷) لازم نیست که از تصحیح مرتبه دوم استفاده شود زیرا اختلاف ارتفاع ناچیز است ($O \leq 2m$). محدودیت فرایند لاسکوسکی این است که باید اندازه دورافت سطح مبنای قائم قبل از این که بتوان تصحیح را برای محاسبه شبه‌زمین‌وار به کار برد، مشخص باشد. در بسیاری موقعیت‌ها، این انحراف مشخص نیست؛ مانند جایی که امکان اندازه‌گیری مستقیم بین سطوح مبنای وجود ندارد. بدین ترتیب طرح یکتاسازی شبه‌زمین‌وار با روش تکرار مطرح شد و برای برآورد اولیه دورافت بین سطوح مبنای، از شبه‌زمین‌وار گرانی سنجی استفاده شد. سپس تابع تصحیح ارتفاع لاسکوسکی برای تصحیح مقادیر بی‌هنجاری گرانی در اثر دورافت سطوح مبنای به کار رفت.

۷ تعیین وابستگی دورافت‌ها به ارتفاع

با استفاده از رابطه زیر، دورافت سطوح مبنای از شبه‌زمین‌وار به ارتفاع سطوح مبنای مرتبط می‌شود (آموس و فدرستون، ۲۰۰۹):

$$H_a^{N-O} = h + \zeta + O_a. \quad (8)$$

رابطه (۹) با مشتق‌گیری از رابطه (۸) به‌منظور تعیین میزان وابستگی دورافت سطوح مبنای از شبه‌زمین‌وار به ارتفاع سطح مبنای به‌دست آمده است:

$$(9)$$

$$dO = dh \left\{ \gamma_a \left(1 + f^* \sin^2 \phi - \frac{1}{4} f_4 \sin^2(2\phi) \right) \left[1 - \frac{2h(1+f+m-2f\sin^2\phi)}{a} + \frac{3h^2}{a^2} \right] \right. \\ + \frac{GM}{\gamma} \sum_{n=2}^M a^n (n+1) r^{-(n+2)} \sum_{m=0}^n (\delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \\ \left. + \frac{1}{r} \left[h + \frac{a}{1-e^2} \cos\phi \cos\lambda + \frac{a}{1-e^2} \cos\phi \sin\lambda + \frac{a}{1-e^2} (1-e^2) \sin\phi \right] \right. \\ \left. \left[\gamma_a \left(1 + f^* \sin^2 \phi - \frac{1}{4} f_4 \sin^2(2\phi) \right) \left(1 - \frac{2\zeta(1+f+m-2f\sin^2\phi)}{a} + \frac{3\zeta^2}{a^2} \right) \right] \right. \\ \left. \left[\frac{1}{\gamma} + \frac{2C^*(1+f+m-2f\sin^2\phi)}{a^2\gamma^2} + \frac{3C^{*2}}{a^2\gamma^3} \right] - 1 - \frac{R}{4\pi\gamma} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi S^M(\cos\psi) \sin\psi \right. \\ \left. \left[0.3086 + \left(GM \sum_{n=2}^M (n+2) a^n (n-1) r^{-(n+3)} \right) \right. \right. \\ \left. \left. \frac{1}{r} \left(h + \frac{a}{1-e^2} \cos\phi \cos\lambda + \frac{a}{1-e^2} \cos\phi \sin\lambda + \frac{a}{1-e^2} (1-e^2) \sin\phi \right) \right. \right. \\ \left. \left. \sum_{m=0}^n (\delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos\theta) \right] \right] d\psi d\alpha \Big\}.$$

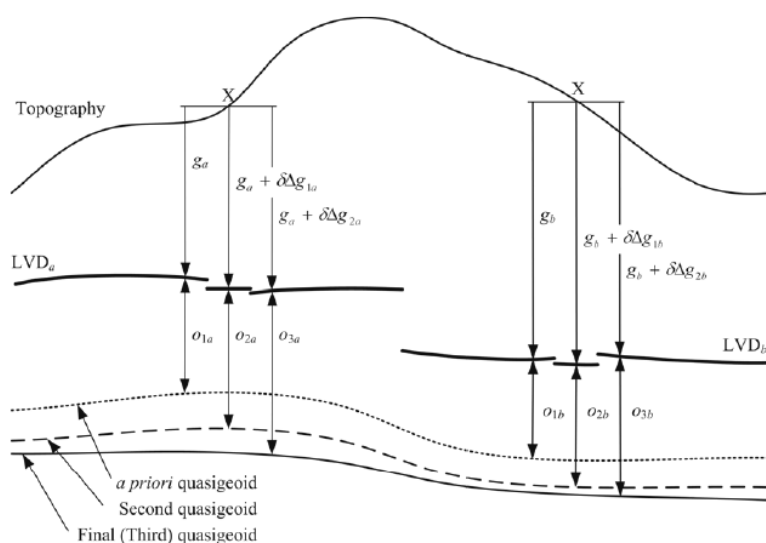
$$O_{1a} = \zeta_1 + (H_a^{N-O} - h), \quad (10)$$

میانگین دورافت‌ها و اطلاعات آماری مربوط برای هر سطح مبنا در جدول ۵ آمده است. برای مثال در محدوده سطح مبنای ارتفاعی بوشهر ۱۲۱ نقطه از نقاط شبکه BGI وجود داشت که برای این نقاط با استفاده از بی‌هنجاری‌های گرانی برگردان شده همه نقاط شبکه BGI در ایران و طرح استوکس تعمیم یافته، شبه زمین وار اولیه محاسبه شد. سپس با استفاده از رابطه (۱۰) دورافت‌های اولیه برای این ۱۲۱ نقطه به دست آمد. برای ایستگاه‌های بوشهر، هرمزگان و چابهار، اختلاف بین بیشینه و کمینه دورافت‌ها به ترتیب ۱/۳۰۴۴، ۱/۶۹۳۳، ۱/۶۹۹۲ و مقدار انحراف معیار به ترتیب ۰/۱۷۹۱، ۰/۲۰۵۶، ۰/۲۳۹۶ به دست آمد.

دو ردیف آخر جدول ۵ به ترتیب، اطلاعات آماری همه ۱۹۶۷ نقطه روی یک سطح مبنای منفرد (وقتی که دورافت‌های سطوح مبنا نادیده گرفته شوند) و اطلاعات آماری این نقاط را زمانی که دورافت متوسط برای هر سطح مبنا از دورافت هر نقطه کاهش یابد (یعنی متوسط صفر) نشان می‌دهند.

که f^* ، f_4 ، f و m ضرایب مربوط به بیضوی مرجع، γ گرانی نرمال روی بیضوی، a شعاع متوسط زمین، r فاصله از مرکز زمین، e^2 خروج از مرکز بیضوی مرجع، C' عدد ژئوپتانسیل نرمال و ζ_1 بی‌هنجاری ارتفاعی است.

۸ اجرای محاسبه شبه زمین وار با روش تکرار در ایران در مرحله اول بی‌هنجاری‌های گرانی اولیه کل نقاط شبکه BGI به سطوح مبنای ارتفاعی مربوط که از یکدیگر انحراف دارند (مانند سطوح a یا b در شکل ۴)، برگردان شدند (شهرابی، ۱۳۹۱). سپس با استفاده از این بی‌هنجاری‌های گرانی برگردان شده و طرح استوکس تعمیم یافته، شبه زمین وار اولیه در ۱۹۶۷ نقطه شبکه BGI که به محدوده سه سطح مبنای ارتفاعی تقسیم شده‌اند محاسبه شد که در شکل ۴ با نقطه چین نشان داده شده است. جایی که دو سطح مبنای ارتفاعی به هم می‌رسند پله‌ای در شبه زمین وار محاسبه شده ایجاد می‌شود که در نتیجه دورافت است. دورافت‌های اولیه برای هر سطح مبنا (O_{1a}, O_{1b}) با استفاده از ارتفاع بیضوی و شبه زمین وار گرانی سنجی اولیه (ζ_1) ، ارزیابی شد:



شکل ۴. طرح یکناسازی شبه زمین وار با روش تکرار (آموس و فدرستون، ۲۰۰۹). (۲۰۰۹)

۹ تصحیح دورآفت سطح مبنا:

شبه‌زمین‌وار خیلی کوچک است و از لحاظ آماری قابل توجه نیست. برای تأیید اینکه تکرار همگرا می‌شود، فرایند برای سومین بار تکرار شد. اختلاف بین دورآفت‌های دومین و سومین شبه‌زمین‌وار محاسبه شده خیلی ناچیز و از لحاظ آماری غیر قابل توجه است. این شبه‌زمین‌وار در مرز سطوح مبنا نرم‌تر از دومین شبه‌زمین‌وار است.

جدول ۷ مقایسه دورآفت محاسبه شده از سه شبه‌زمین‌وار مدل شده را مقایسه می‌کند که نشان می‌دهد دورآفت‌های محاسبه شده همگرا شده‌اند. شبه‌زمین‌وار گرانی سنجی همگرا شده نماینده یک سطح تصحیح شده است که وقتی با دورآفت سطوح مبنای موردنظر ترکیب شود، می‌تواند در حکم یک سطح تبدیل از بیضوی مرجع (در اینجا WGS84) به هریک از سطوح مبنای محلی به کار رود. برای مثال با استفاده از رابطه (۸) ارتفاع بیضوی را می‌توان به ارتفاع نرمال-اورتومتري تبدیل کرد و می‌توان گفت که سطوح مبنای ارتفاعی محلی یکتا شده‌اند.

یک تصحیح دورآفت $\delta\Delta g$ برای هر سطح مبنای محلی با استفاده از متوسط دورآفت‌های به‌دست آمده (جدول ۵) و رابطه (۷) محاسبه شد. سپس به بی‌هنجاری‌های گرانی اولیه اضافه شد و با استفاده از این بی‌هنجاری‌های گرانی تصحیح شده دومین شبه‌زمین‌وار محاسبه شد. پله در دومین شبه‌زمین‌وار در مرزهای سطوح مبنا در مقایسه با شبه‌زمین‌وار اولیه نرم‌تر شده است زیرا دورآفت‌ها با کاربرد تصحیح دورآفت که در بالا توضیح داده شد، بهتر مدل شده‌اند. دوباره ارتفاع بیضوی اولیه با دومین شبه‌زمین‌وار برای ارزیابی دورآفت سطوح مبنای ارتفاعی محلی (O_{2a}, O_{2b}) به کار می‌رود. جدول ۶ اطلاعات آماری دومین شبه‌زمین‌وار را نشان می‌دهد. برای ایستگاه-های بوشهر، هرمزگان و چابهار اختلاف بین بیشینه و کمینه دورآفت‌ها به ترتیب $۱/۳۰۵۳$ ، $۱/۶۹۲$ ، $۱/۶۹۷۲$ و مقدار انحراف معیار به ترتیب $۰/۱۷۹۲$ ، $۰/۲۰۵۵$ ، $۰/۲۳۳۸$ به‌دست آمد. با مقایسه جدول‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود که تفاوت بین دورآفت‌های محاسبه شده اولین و دومین

جدول ۵. اطلاعات آماری شبه‌زمین‌وار اولیه با نقاط BGI روی سطوح مبنای ارتفاعی محلی.

نام ایستگاه	نقاط	بیشینه دورآفت	کمینه دورآفت	متوسط دورآفت	انحراف معیار
بوشهر	۱۲۱	۰/۵۳۸۵	-۰/۷۶۵۹	-۰/۱۴۳۳	۰/۱۷۹۱
هرمزگان	۵۱۸	۰/۹۹۹۴	-۰/۶۹۳۹	۰/۷۰۸۶	۰/۲۰۵۶
چابهار	۱۳۲۸	۱/۹۹۹۶	۰/۳۰۰۴	۱/۶۸۱۲	۰/۲۳۹۶
همه داده‌ها	۱۹۶۷	۱/۹۹۹۶	-۰/۷۶۵۹	۱/۳۱۱۴	۰/۶۰۵۵
همه داده‌ها، سطح مبنای متوسط صفر	۱۹۶۷	۱/۹۶۴۳	(-۹)^(۴)	-۰/۰۰۱	۰/۲۲۱۴

جدول ۶. اطلاعات آماری دومین شبه‌زمین‌وار با نقاط BGI روی سطوح مبنای ارتفاعی محلی.

نام ایستگاه	نقاط	بیشینه دورآفت	کمینه دورآفت	متوسط دورآفت	انحراف معیار
بوشهر	۱۲۱	۰/۵۳۹۹	-۰/۷۶۵۴	-۰/۱۴۳۰	۰/۱۷۹۲
هرمزگان	۵۱۸	۰/۹۹۸۲	-۰/۶۹۳۸	۰/۷۰۷۴	۰/۲۰۵۵
چابهار	۱۳۲۸	۱/۹۹۴۶	۰/۲۹۷۴	۱/۶۷۸	۰/۲۳۳۸
همه داده‌ها	۱۹۶۷	۱/۹۹۴۶	-۰/۷۶۵۴	۱/۳۰۹۰	۰/۶۰۴۵
همه داده‌ها، سطح مبنای متوسط صفر	۱۹۶۷	۱/۹۶۰۹	(-۹)^(۳)	-۰/۰۰۰۹	۰/۲۲۱۵

جدول ۷. مقایسه دورآفت‌های به‌دست آمده در فرایند تکرار، (متر).

نام ایستگاه	اولین دورآفت‌ها	دومین دورآفت‌ها	سومین دورآفت‌ها
بوشهر	-۰/۱۴۳۳	-۰/۱۴۳۰	-۰/۱۴۳۰
هرمزگان	۰/۷۰۸۶	۰/۷۰۷۴	۰/۷۰۷۵
چابهار	۱/۶۸۱۲	۱/۶۷۸	۱/۶۷۸

جدول ۸. مقایسه اختلاف بی‌هنجاری‌های ارتفاعی محاسبه شده در این پژوهش و بی‌هنجاری‌های ارتفاعی موجود (متر).

کمینه اختلاف‌ها	بیشینه اختلاف‌ها	میانگین اختلاف‌ها	انحراف معیار	جذر میانگین مربعات
-۲/۱۰۸	۱/۰۹۱	-۰/۳۹۱	۰/۶۴۴	۰/۷۵۴

شبه‌زمین‌وار برای این مناطق ساحلی به‌دست آمد. مقایسه شبه‌زمین‌وار به‌دست آمده از روش تکرار با شبه‌زمین‌وارهای به‌دست آمده در تحقیقات قبلی از سوی سایر محققان (مثلاً معززی، ۱۳۸۹) و نیز با توجه به انحراف معیار ۰/۶ متر نشان می‌دهد که با استفاده از روش تکرار می‌توان شبه‌زمین‌وار دقیق در مناطق ساحلی را تعیین کرد. ترکیب شبه‌زمین‌وار تعریف شده و دورآفت‌های به‌دست آمده را می‌توان به مثابه یک سطح تبدیل از بیضوی مرجع به هریک از سطوح مبنای ارتفاعی محلی به‌کار برد.

منابع

شهرابی، ا.، ۱۳۹۱، تعیین یک شبه‌زمین‌وار دقیق با استفاده از یکتاسازی سطوح مبنای ارتفاعی با روش تکرار (مطالعه موردی برای ایران): پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات.
 معززی، س.، ۱۳۸۹، مقایسه نتایج مؤلفه‌های پنج مدل ژئوپتانسیل جهانی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های زمینی و معرفی مدل ژئوپتانسیل بهینه‌ای برای ایران: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات.

Amos, M. J., 2007, Quasigeoid Modelling in New Zealand to unify Multiple Local Vertical Datums: PhD. thesis, department of spatial sciences, Curtin University of Technology, Perth.

Amos, M. J., and Featherstone, W. E., 2009, Unification of New Zealand's local vertical

۱۰ مقایسه شبه‌زمین‌وار به‌دست آمده از روش تکرار با شبه‌زمین‌وار موجود

با استفاده از روش تکرار بی‌هنجاری ارتفاعی برای نقاطی از شبکه BGI که مربوط به جنوب ایران است به‌دست آمد و با اطلاعات موجود (معززی، ۱۳۸۹) مقایسه آماری صورت گرفت و انحراف معیار ۰/۶ متر به‌دست آمد. اطلاعات آماری این مقایسه در جدول ۸ آورده شده است.

۱۱ نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش تعیین سطح مبنای ارتفاعی محلی در سواحل جنوبی ایران بوده است.

با استفاده از محاسبه پتانسیل گرانی از راه دو مدل ژئوپتانسیل جهانی EGM96 و EGM2008 در ایستگاه‌های کشندسج بوشهر، هرمزگان و چابهار، سطوح مبنای ارتفاعی محلی تعیین شد که می‌توان برای تعیین ارتفاع نقاط در محدوده این سه ایستگاه از این سطوح مبنای ارتفاعی استفاده کرد. برای تعیین ارتفاع نقاط شبکه موردنظر از سطوح مبنای ارتفاعی محلی از سامانه ارتفاعی نرمال-اورتومتري استفاده شد و ارتفاع نرمال-اورتومتري نقاط شبکه BGI و ایستگاه‌های کشندسج محاسبه شد. از اختلاف این ارتفاع‌ها، ارتفاع نقاط شبکه از سطوح مبنای محلی به‌دست آمد. بی‌هنجاری ارتفاعی در نقاطی از شبکه BGI که در محدوده این سه سطح مبنای ارتفاعی محلی هستند با استفاده از روش تکرار ارزیابی شد و

- and the AUSGeoid98: Geomatics Research Australasia, **73**, 33–54.
- Featherstone, W. E., and Kirby, J. F., 2000, The reduction of aliasing in gravity anomalies and geoid heights using digital terrain data: *Geophys. J. Int.*, **141**(1), 204–212.
- Grafarend, E. W., and Ardalan, A. A., 1997, W0: An estimate of the Finnish Height Datum N60, epoch 1993.4 from twenty-five GPS points of the Baltic sea level project: *Journal of Geodesy*, **71**(11), 673–679.
- Grafarend, E. W., Ardalan, A. A., 1999, World geodetic datum 2000: *Journal of Geodesy*, **73**, 611–623.
- Grafarend, E. W., Ardalan, A. A., 2002, Time evolution of a world geodetic datum. In: *Proceedings of International Association of Geodesy symposium*, vol 125, Vistas for Geodesy in the New Millennium, Budapest, Hungary, 2–7, Springer Verlag, Berlin, 114–123.
- Hannah, J., 1990, Analysis of mean sea level data from New Zealand for the period 1899 – 1988: *Journal of Geophysical Research*, **95**(B8), 12399–12405.
- Heck, B., and Rummel, R., 1990, Strategies for solving the vertical datum problem using terrestrial and satellite data. In: Sunkel H, Baker T (eds) *Sea surface topography and the geoid*: Springer, Berlin, 116–128.
- Henderson, J., 1933, The geological aspects of the Hawkes Bay earthquakes: *The New Zealand Journal of Science and Technology*, **15**(1), 38–75.
- Hipkin, R.G., 2002, Vertical datum defined by $W_0 = U_0$: Theory and practice of a modern height system. In: *proceedings of third meeting of the international gravity and geoid commission*, Thessaloniki, Greece, 26–30.
- Hofmann-Wellenhof, B., and Moritz, H., 2006, *Physical Geodesy*: Springer, Wein New York.
- Huang, J., and Véronneau, M., 2005, Applications of downward-continuation in gravimetric geoid modelling: Case studies in Western Canada: *Journal of Geodesy*, **79**, 135–145.
- Jekeli, C., 2000, Heights, the geopotential, and vertical datums, report 459, department of geodetic and geoinformation science, The Ohio State University, Columbus.
- Jekeli, C., 2003, On monitoring a vertical datum with satellite altimetry and water-level gauge data on large lakes: *Journal of Geodesy*, **77**, 447–453.
- Jiao, W.H., Wei, Z.Q., Ma, X., Sun, Z.M., and Li, Y.C., 2002, The origin vertical shift of national datums: Iterative gravimetric quasigeoid computations: *Journal of Geodesy*, **83**, 57–68.
- Ardalan, A.A., and Safari, A., 2005, Global height datum unification: A new approach in gravity potential space: *Journal of Geodesy*, **79**, 512–523.
- Beanland, S., Blick, G. H., and Darby, D. J., 1990, Normal faulting in a back-arc basin: Geological and geodetic characteristics of the 1987 Edgecumbe earthquake, New Zealand: *Journal of Geophysical Research*, **95**(B4), 4693–4707.
- Beavan, R. J., Matheson, D. W., Denys, P., Denham, M., Herring, T., Hager, B., and Molnar, P., 2004, A vertical deformation profile across the Southern Alps, New Zealand, from 3.5 years of continuous GPS data, in: van Dam T, Francis O (eds) *proceedings of the Cahiers du Centre Européen de géodynamique et de séismologie workshop: The state of GPS vertical positioning precision: separation of earth processes by space geodesy*: Luxembourg, **23**, 111–123.
- Begg, J. G., and McSaveney, M. J., 2005, Wairarapa fault rupture; vertical deformation in 1855 and a history of similar events from Turakirae head, in: Langridge R, Townend J, Jones A (eds) *the 1855 Wairarapa earthquake symposium proceedings*, greater Wellington regional council, Wellington, New Zealand, 21–30.
- Burša, M., Kenyon, S., Kouba, J., Šíma, Z., Vátrt, V., Vitek, V., and Vojtíšková, M., 2007, The geopotential value W_0 for specifying the relativistic atomic time scale and a global vertical reference system: *Journal of Geodesy*, **81**(2), 103–110.
- Burša, M., Kenyon, S., Kouba, J., Šíma, Z., Vátrt, V., and Vojtíšková, M., 2004, A global vertical reference frame based on four regional vertical datums: *Studia Geophysica et Geodaetica*, **48**(3), 493–502.
- Colombo, O.L., 1980, A world vertical network: report 296, department of geodetic science and surveying, Ohio State University, Columbus, USA.
- Featherstone, W.E., 1998, Do we need a gravimetric geoid or a model of the base of the Australian height datum to transform GPS heights?: *The Australian Surveyor*, **43**(4), 273–280.
- Featherstone, W. E., 2000, Towards unification of the Australian height datum between the Australian mainland and Tasmania using GPS

- Gravity, Geoid and Geodynamics. International Association of Geodesy Symposia, vol 123. Springer-Verlag, Berlin, 15–20.
- Rummel, R., and Ilk, KH., 1995, Height datum connection—the ocean part: *Allgemeine Vermessungs Nachrichten*, **102**, 321–330.
- Rummel, R., and Teunissen, P.J.G., 1988, Height datum definition, height datum correction and the role of the geodetic boundary value problem: *Bulletin Géodésique*, **62**(4), 477–498.
- Sanso, F., and Usai, S., 1995, Height datum and local geodetic datums in the theory of geodetic boundary value problems: *Allgemeine Vermessungs Nachrichten*, **102**, 343–355.
- Vaniček, P., Huang, J., Novák, P., Pagiatakis, M., Véronneau, M., Martinec, Z., and Featherstone, W. E., 1999, Determination of the boundary values for the Stokes-Helmert problem: *Journal of Geodesy*, **73**(4), 180–192.
- Vaniček, P., Sun, W., Ong, P., Martinec, Z., Najafí, M., Vajda, P., and Horst, B., 1996, Downward continuation of Helmert's gravity: *Journal of Geodesy*, **71**, 21–34.
- Walcott, R. I., 1984, The kinematics of the Plate Boundary Zone through New Zealand: A comparison of short and long-term deformations: *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **79**(2), 613–633.
- Wellman, H. W., 1979, An uplift map for the South Island of New Zealand, and a model for uplift of the Southern Alps, in Walcott R.I. and Cresswell, M. M. (eds.), *The Origin of the Southern Alps*: Royal Society of New Zealand, **18**, 13–20.
- Xu, P., and Rummel, R., 1991, A quality investigation of global vertical datum connection, Netherlands geodetic commission: *Publications on Geodesy*, 34.
- Ziqing, W., and Wenhai, J., 2003, Determination of geopotential of local vertical datum surface: *Geo-spatial Information Science*, **6**(1), 1–4.
- height datum 1985 with respect to the geoidal surface: *Acta Geod Cartogr*, **31**(3), 196–200.
- Laskowski, P., 1983, The effect of vertical datum inconsistencies on the determination of gravity related quantities: report 349, Department of Geodetic Science and Surveying, Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Lensen, G. J. and Otway, P. M., 1971, Earthshift and post earthshift deformation associated with the May 1968 Inangahua earthquake, New Zealand: *Royal Society of New Zealand*, **9**(1), 107–167.
- Martinec, Z., Matyska, C., Grafarend, E. W., and Vaniček, P., 1993, On Helmert's second condensation reduction: *Manuscripta Geodaetica*, **18**(6), 417–421.
- Nahavandchi, H., and Sjoberg, LE., 1998, Unification of vertical datums by GPS and gravimetric geoid models using modified Stokes formula: *Marine Geodesy*, **21**, 261–273.
- Otway, P. M., Blick, G. H. and Scott, B. J., 2002, Vertical deformation at Lake Taupo, New Zealand, from lake levelling surveys: *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, **45**(1), 121–132.
- Pan, M., and Sjoberg, LE., 1998, Unification of vertical datums by GPS and gravimetric geoid models with application to Fennoscandia: *Journal of Geodesy*, **73**, 369–380.
- Poutanen, M., 1999, Use of GPS in unification of vertical datums and detection of levelling network errors. In: Lilje M (eds) *geodesy and surveying in the future—the importance of heights*. Proceedings of the Seminar, 15–17 March 1999. Reports in Geodesy and Geographical Information Systems, 1999:3, National Land Surveying, Gävle, Sweden, 301–312.
- Rapp, RH., 1995, A world vertical datum proposal: *Allgemeine Vermessungs Nachrichten*, **102**, 297–304.
- Rummel, R., 2000, Global unification of height systems and GOCE. In: sideris MG (ed)