



مجله

و

GIS ایران



سال سوم، شماره اول، بهار ۱۳۹۰  
Vol.3, No.1, Spring 2011

سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

۴۵-۵۴

## تعیین پتانسیل ژئوئید با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و GRACE

سیدروح‌الله عمادی<sup>۱</sup>، مهدی نجفی علمداری<sup>۲</sup>، مهرداد سبزواری<sup>۳\*</sup>

۱. مری گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
۲. دانشیار گروه هیدروگرافی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروگرافی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۸/۲۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۱۰/۱۹

### چکیده

هدف اصلی از این مقاله، تعیین پتانسیل ژئوئید با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ارتفاع‌سنجی، Jason-2 و ماهواره GRACE است. مراحل انجام تحقیق حاضر براساس الگوریتم زیر است: (۱) تهیه ۸۰ دوره، در حدود ۲۷ ماه، داده‌های خام ماهواره ارتفاع‌سنجی Jason-2؛ (۲) انجام تصحیحات لازم نظیر: جزر و مدی، اتمسفریک و دستگامی بر روی داده‌های خام به‌منظور تعیین ارتفاع سطح آب تصحیح‌شده؛ (۳) تعیین پتانسیل ثقل روی نقاط سطح متوسط دریا به صورت ماهانه، با استفاده از ضرایب ماهانه هارمونیک‌های کروی مدل‌های ژئوپتانسیل ماهواره GRACE؛ (۴) حذف داده‌های مربوط به دریاچه‌های بزرگ دنیا، به‌خصوص خزر یا کاسپین؛ و (۵) متوسط‌گیری از باقی‌مانده داده‌ها به‌منظور تعیین پتانسیل ژئوئید.

نتایج نشان می‌دهند که متوسط پتانسیل ژئوئید در فاصله زمانی - از ژوئیه ۲۰۰۸ تا سپتامبر ۲۰۱۰- در حدود  $W_0 = 62626854 / 0 \pm 0.5 \text{ m}^2 / \text{s}^2$  بوده که بیشترین مقدار تغییرات زمانی ماهانه آن با دوره تناوب نیمه‌سالانه در حدود ۲/۲ مترمربع بر مجذور ثانیه است.

**کلیدواژه‌ها:** ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی، ژئوئید، گریس، سطح متوسط دریا، پتانسیل ثقل.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، اتوبان افسریه، خیابان ده‌حقی، دانشگاه آزاد اسلامی، دانشکده فنی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، تلفن: ۳۳۷۲۲۸۳۴

## ۱- مقدمه

تعریف ژئوئید بر مبنای پیشنهاد گوس (۱۸۲۸) و لیستینگ (۱۸۷۳)، عبارت است از: سطح هم‌پتانسیلی که سطح متوسط آب‌های جهانی را به صورت کمترین مربعات تقریب می‌کند. با توجه به این تعریف داریم:

رابطه (۱)

$$\int_S (W_{MSL} - W_0)^2 dS = \min$$

در رابطه مذکور،  $W_{MSL}$  = پتانسیل ثقل روی سطح متوسط آب دریا،  $W_0$  = پتانسیل ژئوئید،  $S$  = سطح متوسط دریا، و  $dS$  = المان سطح. با استفاده از رابطه ذکر شده می‌توان برآوردی از پتانسیل ژئوئید  $W_0$  را با استفاده از این رابطه (۲) به دست آورد:

رابطه (۲)

$$W_0 = \frac{1}{S} \int_S W_{MSL} dS$$

جدایی ژئوئید از سطح متوسط آب دریای آزاد - که به دلایلی چون ویژگی‌های دینامیکی آب دریا، تغییرات دما و شکل خطوط ساحلی به وجود می‌آید - توپوگرافی سطح دریا نامیده می‌شود، که بیشترین مقدار قدر مطلق این کمیت در سرتاسر جهان حداکثر تا دو متر است (وینچک و کراکیوسکی، ۱۹۸۶). ژئوئید، همچنین به عنوان سطح مبنای ارتفاعی در ژئودزی و نقشه‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. فاصله بین ژئوئید از سطح ریاضی زمین که بیضوی دو محوری است، ارتفاع ژئوئید و یا نوسانات ژئوئید نامیده می‌شود. شکل ۱ نقشه سطح ژئوئید را در سطح زمین نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین میزان این اختلاف در جنوب شبه قاره هند است.

از آنجا که ژئوئید سطحی هم‌پتانسیل است، تعیین پتانسیل آن نیز از دیگر اهداف مهم در ژئودزی به‌شمار می‌آید، که از آن می‌توان در موارد متعددی چون تعیین ابعاد بیضوی متوسط زمین و تعیین اختلاف بین

سیستم‌های زمانی خورشیدی حقیقی<sup>۱</sup> و زمین‌مرکز<sup>۲</sup> استفاده کرد. پژوهشگران علوم زمین تحقیقات مختلفی را در زمینه تعیین پتانسیل ژئوئید و ابعاد بیضوی متوسط زمین انجام داده‌اند، که از آن جمله می‌توان به مقالات گرافارنت و اردلان (۱۹۹۷)، اردلان و همکاران (۲۰۰۲)، بورسا و همکاران (۱۹۹۹)، بورسا و همکاران (۲۰۰۲) و بورسا و همکاران (۲۰۰۶) اشاره کرد. در مقاله اردلان و همکاران (۲۰۰۲) روش کار بر مبنای دو مرحله است: ۱- تعیین پتانسیل ثقل واقعی با استفاده از ضرایب هارمونیک‌های بیضوی تا درجه و مرتبه ۳۶۰ از مدل ژئوپتانسیلی مانند EGM96 بر روی ایستگاه‌های جزر و مد سنجی که مشاهدات سیستم تعیین موقعیت جهانی<sup>۳</sup> بر روی آنها انجام شده است. ۲- تصحیح هوای آزاد در سیستم مختصات بیضوی تا درجه و مرتبه ۳۶۰ با فرض مشخص بودن ارتفاع ارتومتریک در ایستگاه‌های GPS. بیضوی مقایسه در این روش WGD2000 بوده است. برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر در این زمینه می‌توان به مقاله گرافارنت و اردلان (۱۹۹۹) مراجعه کرد. مقدار پتانسیل ثقل برآورد شده در این روش به همراه خطای استاندارد آن به ترتیب عبارت‌اند از  $W_0 = 62636855 / 75 \pm 0 / 21 m^2 / s^2$ . در مقابل، در روش بورسا از داده‌های ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی به همراه یک مدل ژئوپتانسیل برای تعیین پتانسیل ژئوئید استفاده می‌شود. در این روش (بورسا و همکاران، ۲۰۰۶)، ابتدا سطح متوسط دریاهای آزاد<sup>۴</sup> با استفاده از داده‌های ماهواره T/P در فاصله زمانی بین سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ به دست می‌آید؛ و سپس پتانسیل ثقل واقعی برای این نقاط به وسیله یک مدل ژئوپتانسیل نظیر EGM96 تعیین می‌شود، و در نهایت با میانگین از مقادیر مذکور برآوردی از پتانسیل ژئوئید به دست می‌آید.

1. Terrestrial Time
2. Geocentric Coordinate Time
3. Global Positioning System
4. Mean Sea Level

ماهپانه هارمونیک‌های کروی میدان ثقل ماهواره GRACE محاسبه گردیده و مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- برخلاف روش بورسا، در میانگین‌گیری پتانسیل‌های سطح متوسط دریا، دوره تناوب نیم‌سالانه برای تغییرات پتانسیل ژئوئید در نظر گرفته شده است، که در شکل ۵ می‌توان دید.

## ۲- ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

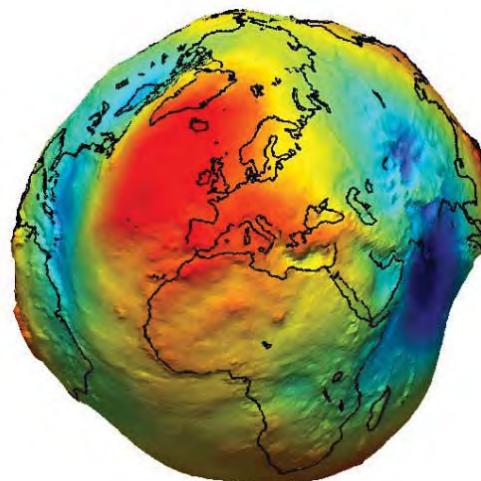
ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای از جمله روش‌های سنسجش از دور است، که هدف اصلی آن اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها در مناطق مختلف، در دوره‌های زمانی متفاوت است، مهم‌ترین مزیت این روش، جمع‌آوری داده‌ها با پوشش جهانی نسبتاً کامل در زمانی کوتاه و هزینه پایین است که این برتری، پژوهشگران علوم مختلف دریایی و زمینی را به استفاده از آن ترغیب می‌کند. مفهوم ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای را نخستین بار کوالا در سال ۱۹۶۹ (Kuala, 1969) ارائه کرد و نخستین مأموریت ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، به‌وسیله سری ماهواره‌های SKYLAB به‌کار گرفته شد. در جدول ۱ مشخصات و پارامترهای ماهواره‌های مختلف ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای آورده شده‌اند (روسوردوس و همکاران، ۲۰۰۹).

کمیت اصلی مشاهداتی در ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، ارتفاع لحظه‌ای مرکز جرم ماهواره تا سطح آب دریاست که برد ماهواره<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. با توجه به اینکه ارتفاع ماهواره،  $h_{Sat}$ ، نسبت به بیضوی مقایسه از روش‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای، مانند سیستم تعیین موقعیت جهانی GPS، در دسترس است، می‌توان ارتفاع سطح لحظه‌ای آب دریا را نسبت به بیضوی مقایسه در نقطه مشاهداتی از رابطه (۳) به‌دست آورد.

رابطه (۳)

$$SSH(\varphi, \lambda) = h_{Sat}(\varphi, \lambda) - Range(\varphi, \lambda)$$

1. Satellite Range



شکل ۱. نقشه سطح ژئوئید در جهان نسبت به بیضوی مقایسه WGS84 (سایت GFZ)

مقدار پتانسیل ثقل برآورد شده در این روش به همراه خطای استاندارد آن به ترتیب عبارت‌اند از  $W_0 = 62636856/0 \pm 0/5 m^2/s^2$ .

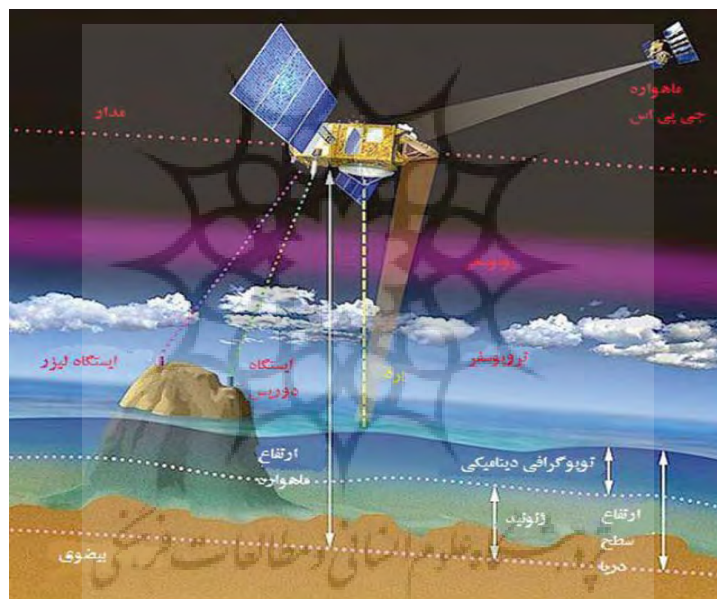
در این مقاله، با ایجاد تغییراتی در نوع ماهواره ارتفاع‌سنجی و مدل‌های ژئوپتانسیل مورد استفاده، تغییرات ماهپانه در پتانسیل میدان ثقل - و در نهایت مقدار برآوردشده پتانسیل ژئوئید - به‌دست آمده است. اگر چه تئوری روش محاسباتی مورد استفاده در این تحقیق مشابه روش بورسا است و لیکن از نظر عددی و داده‌های مورد استفاده این تحقیق در مقایسه با روش بورسا مزایایی بدین شرح دارد.

۱- در روش بورسا (۲۰۰۶) برای تعیین سطح متوسط آب دریاها تنها از داده‌های ماهواره T/P استفاده شده، در حالی که در این تحقیق داده‌های ماهواره Jason-2 مورد استفاده قرار گرفته است. این داده‌ها از نظر زمانی جدیدترند و با توجه به مدل‌های دقیق‌تری که در پردازش آنها استفاده شده، از نظر دقت و صحت بهتر است (برای بررسی بیشتر، ن.ک. جدول ۱).

۲- در روش بورسا تنها از مدل جهانی پتانسیل EGM96 استفاده شده، در صورتی که در این تحقیق با توجه به تغییرات زمانی میدان ثقل زمین، ضرایب

جدول ۱. مشخصات و پارامترهای ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی

ماهواره	تاریخ پرتاب	ارتفاع کیلومتر	زاویه میل (درجه)	وزن (کیلوگرم)	دوره تناوب (روز)	دقت (سانتی‌متر)	سازمان مسئول
Skylab	۱۹۷۳	۴۳۵	۵۵	---	---	>۱۰۰	NASA
Geos-3	۱۹۷۵/۴/۹	۸۴۰	۱۱۴/۹۸	۳۴۱	---	۲۵	NASA
Seasat	۱۹۷۸/۷/۲۸	۷۶۰	۱۰.۸	۲۳۰۰	۱۷	۵	NASA/JPL
Geosat	۱۹۸۵/۳/۱۳	۷۸۰	۱۰.۸/۱	۶۳۵	۱۷	۴	US NAVY
ERS1	۱۹۹۱/۷/۱۷	۷۸۵	۹۸/۵	۲۳۸۴	۳۵	۳	ESA
ERS2	۱۹۹۵/۴/۲۱	۷۸۵	۹۸/۶	۲۵۱۶	۱۰.۱	۳	ESA
T/P	۱۹۹۲/۸/۱۰	۱۳۵۴	۶۶	۲۴۰.۲	۱۰	۲	NASA/CNES
GFO	۱۹۹۸/۲/۱۰	۸۰۰	۱۰.۸/۱	۳۰۰	۱۷	۳/۵	US NAVY
JASON-1	۲۰۰۱	۱۳۵۴	۶۶	۵۰۰	۱۰	۱-۲	CNES/NASA
JASON-2	۲۰۰۸	۱۳۵۴	۶۶	۵۰۰	۱۰	۱-۲	CNES/NASA



شکل ۲. نمایش پارامترهای اصلی در ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

منبع: اویسو

که لایه‌های مختلف اتمسفر - و به‌خصوص تروپوسفر و یونوسفر - بر امواج الکترومغناطیس دارند، مشاهدات می‌بایست با توجه به این تأثیرات تصحیح شوند. همچنین عوامل دیگری از قبیل تأثیرات جزر و مدی، تأثیر فشار اتمسفریک، تأثیرات بایاس سطح دریا، خطاهای دستگاهی و جز اینها نیز می‌بایست برای تعیین ارتفاع سطح آب تصحیح‌شده در نظر گرفته شوند. برای مطالعه بیشتر در این خصوص می‌توان به

در رابطه (۳)،  $SSH = \text{ارتفاع سطح لحظه‌ای آب دریا نسبت به بیضوی مقایسه؛ Range} = \text{ارتفاع ماهواره تا سطح لحظه‌ای آب در نقطه مشاهداتی}$ . در شکل ۲ کمیت‌های ارتفاع ماهواره، سطح ژئوئید، مدار ماهواره، بیضوی مقایسه، توپوگرافی سطح آب و ارتفاع سطح آب از بیضوی مقایسه در یک سیستم ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای نمایش داده شده است. با توجه به عبور امواج از فضای اتمسفر و تأثیراتی

توابع لژاندر نرمالیزه را می‌توان با استفاده از روابط زیر به دست آورد:

رابطه (۷)

$$\bar{P}_{nm}(\cos \theta) = \frac{\sqrt{2n+1}}{\sqrt{2n}} \sin \theta \bar{P}_{n-1,n-1}(\cos \theta)$$

$$\bar{P}_{n,n-1}(\cos \theta) = \frac{\sqrt{2n+1}}{\sqrt{2(n-1)}} \sin \theta \bar{P}_{n-1,n-2}(\cos \theta)$$

$$\bar{P}_{nm}(\cos \theta) = \frac{\sqrt{4n^2-1}}{\sqrt{n^2-m^2}} \cos \theta \bar{P}_{n-1,m}(\cos \theta) -$$

$$\frac{\sqrt{(2n+1)(n+m-1)(n-m-1)}}{\sqrt{(n^2-m^2)(2n-3)}} \bar{P}_{n-2,m}(\cos \theta)$$

$$n \in [3, \infty) \text{ \& } m \in [0, n-2]$$

#### ۴- تعیین پتانسیل ژئوئید

در این قسمت با استفاده از روش بورسا در تعیین پتانسیل ژئوئید، در بازه زمانی ۲۷ ماهه، از ژوئیه ۲۰۰۸ تا سپتامبر ۲۰۱۰، پتانسیل ژئوئید با استفاده از ۸۰ سیکل داده‌های ماهواره Jason-2، که در زمان حاضر دقیق‌ترین ماهواره ارتفاع‌سنجی است، و نیز داده‌های ثقل‌سنجی ماهواره GRACE، برای هر ماه جداگانه محاسبه شده است. در این روش، ابتدا داده‌های خام ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در مناطق دریایی، پس از انجام تمامی تصحیحات اتمسفریک، ژئوفیزیکی، دستگاهی و دریایی مطابق رابطه ۴ به سطح آب دریای تصحیح‌شده در راستای مسیر حرکت ماهواره تبدیل می‌شود. به‌طور تقریبی هر سیکل شامل ۷۰۰,۰۰۰ نقطه است؛ و در مجموع حجم بسیار زیاد داده‌ها از مشکلات محاسباتی این روش است. در شکل ۳ نقشه مقادیر سطح متوسط آب دریا با استفاده از اطلاعات ۸۰ دوره ماهواره Jason-2 نشان داده شده است. این شکل مشخص می‌سازد که بیشترین مقدار قدر مطلق فاصله سطح متوسط دریا از بیضوی مقایسه جهانی WGS84 در منطقه جنوب شبه قاره هند و در حدود ۱۱۰ متر است.

منابعی چون (اویسو، ۱۹۹۶ و اویسو ۱۹۹۸) مراجعه کرد. پس از اعمال تصحیحات مورد نیاز در ارتفاع اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله ماهواره، می‌توان ارتفاع تصحیح‌شده سطح متوسط آب دریا را نیز نسبت به بیضوی مقایسه بدین صورت به دست آورده:

رابطه (۴)

$$\text{COSSH}(\varphi, \lambda) = h_{\text{Sat}}(\varphi, \lambda) - \text{Corrected.Range}(\varphi, \lambda)$$

سطح متوسط ماهیانه آب دریا MSL با استفاده از متوسط‌گیری ماهیانه از داده‌های تصحیح‌شده سطح آب دریا (COSSH) به دست می‌آید. پس از تعیین سطح متوسط آب دریا، در این مرحله می‌بایست پتانسیل ثقل واقعی با استفاده از ضرایب هارمونیک‌های کروی تعیین شود.

#### ۳- پتانسیل ثقل واقعی

پتانسیل ثقل واقعی زمین،  $W(\mathbf{r})$  مجموع پتانسیل‌های جاذبه،  $W_g(\mathbf{r})$  و گرینز از مرکز  $W_c(\mathbf{r})$  است، و در واقع می‌توان چنین نوشت:

رابطه (۵)

$$W(\mathbf{r}) = W_g(\mathbf{r}) + W_c(\mathbf{r})$$

تابع پتانسیل جاذبه خارج از سطح زمین و با صرف‌نظر کردن از جرم اتمسفر، تابعی است هارمونیک که می‌توان آن را بدین صورت نوشت (هایسکنن و موریتز، ۱۹۸۱):

رابطه (۶)

$$W_g(\mathbf{r}) = \frac{GM_e}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)) \bar{P}_{nm}(\cos \theta)$$

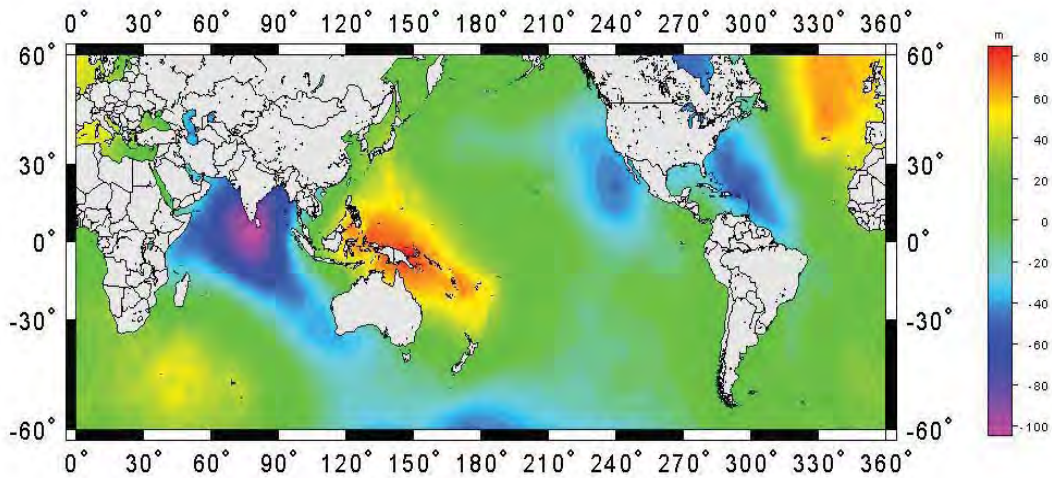
در رابطه ۶،  $\mathbf{r}$  = بردار وضعیت،  $q$  = متمم عرض جغرافیایی، و  $l$  = طول جغرافیایی نقطه مورد نظر. همچنین داریم:

مقیاس مدل ژئوپتانسیل:  $a$

ثابت گرانش در جرم زمین:  $GM_e$

ضرایب نرمالیزه تابع پتانسیل جاذبه:  $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$

تابع لژاندر نرمالیزه:  $\bar{P}_{nm}$



شکل ۳. نقشه مقادیر سطح متوسط آب دریا نسبت به بیضوی جهانی WGS84 با استفاده از اطلاعات ۸۰ دوره ماهواره Jason-2

در ادامه برای تعیین پتانسیل ثقل واقعی زمین در این نقاط، برخلاف روش بورسا، از داده‌های ماهانه ماهواره‌ای GRACE استفاده شده است. از آنجا که امروز ماهواره‌های GRACE توان این را دارند که ضرایب هارمونیک‌های کروی میدان ثقل زمین را به صورت ماهیانه تعیین کنند، بنابراین به منظور محاسبه پتانسیل ثقل برای سطح متوسط دریا و در نهایت برآورد پتانسیل ژئوئید در هر ماه از ضرایب مدل ژئوپتانسیل مربوط به همان ماه، استفاده شده است. برای اطلاعات بیشتر در خصوص مشخصات و نحوه پردازش داده‌های ماهواره GRACE، ن.ک. چن و همکاران، ۲۰۰۴؛ تاپلی و همکاران، ۲۰۰۳؛ و کیم، ۲۰۰۰.

در ادامه برای تعیین پتانسیل ثقل واقعی زمین در این نقاط، برخلاف روش بورسا، از داده‌های ماهانه ماهواره‌ای GRACE استفاده شده است. از آنجا که امروز ماهواره‌های GRACE توان این را دارند که ضرایب هارمونیک‌های کروی میدان ثقل زمین را به صورت ماهیانه تعیین کنند، بنابراین به منظور محاسبه پتانسیل ثقل برای سطح متوسط دریا و در نهایت برآورد پتانسیل ژئوئید در هر ماه از ضرایب مدل ژئوپتانسیل مربوط به همان ماه، استفاده شده است. برای اطلاعات بیشتر در خصوص مشخصات و نحوه پردازش داده‌های ماهواره GRACE، ن.ک. چن و همکاران، ۲۰۰۴؛ تاپلی و همکاران، ۲۰۰۳؛ و کیم، ۲۰۰۰.

در ادامه برای تعیین پتانسیل ثقل واقعی زمین در این نقاط، برخلاف روش بورسا، از داده‌های ماهانه ماهواره‌ای GRACE استفاده شده است. از آنجا که امروز ماهواره‌های GRACE توان این را دارند که ضرایب هارمونیک‌های کروی میدان ثقل زمین را به صورت ماهیانه تعیین کنند، بنابراین به منظور محاسبه پتانسیل ثقل برای سطح متوسط دریا و در نهایت برآورد پتانسیل ژئوئید در هر ماه از ضرایب مدل ژئوپتانسیل مربوط به همان ماه، استفاده شده است. برای اطلاعات بیشتر در خصوص مشخصات و نحوه پردازش داده‌های ماهواره GRACE، ن.ک. چن و همکاران، ۲۰۰۴؛ تاپلی و همکاران، ۲۰۰۳؛ و کیم، ۲۰۰۰.

رابطه (۸)

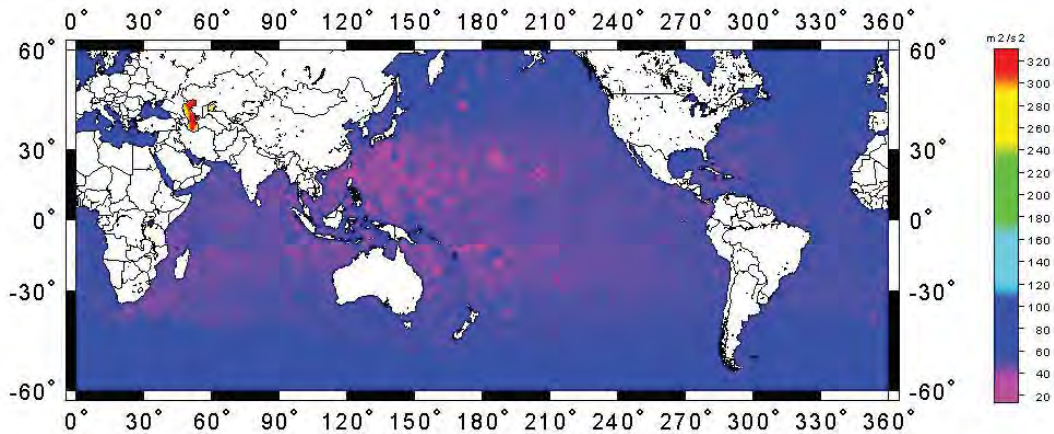
$$W_0 = \frac{\sum_{i=1}^n W_{MSL_i}}{n}$$

1. <ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/data/validation/jpl/>

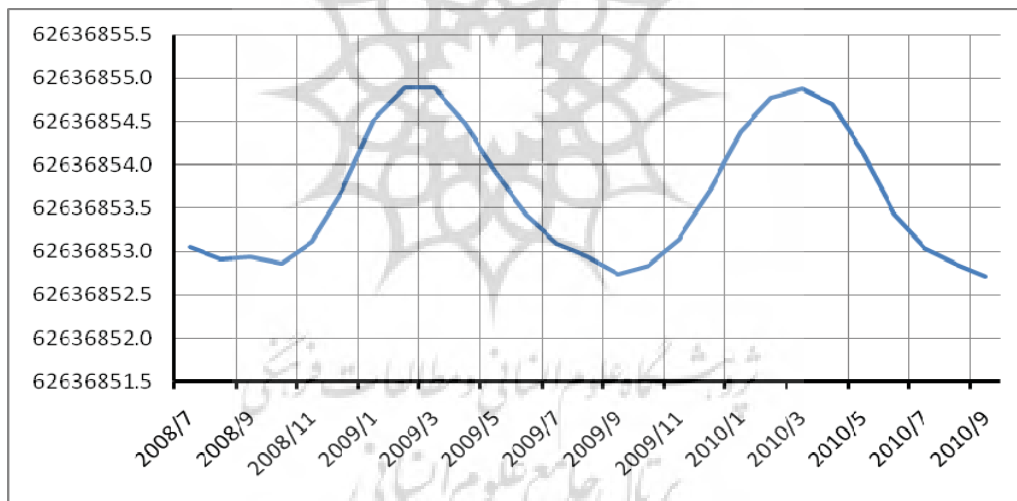
ضرایب نرمالیز شده هارمونیک کروی GRACE از ژوئیه ۲۰۰۸ تا سپتامبر ۲۰۱۰ از سایت اختصاصی<sup>۱</sup> این ماهواره تهیه شد. با توجه به اینکه این ضرایب تا اکتبر ۲۰۰۹ تا درجه و مرتبه ۱۲۰ و پس از آن تا سپتامبر ۲۰۱۰ تا درجه و مرتبه ۶۰ هستند و با استفاده از رابطه (۶) حداقل مرتبه مورد نیاز برای تعیین پتانسیل ثقل ۱۵۰ است (بورسا و همکاران، ۲۰۰۶)، دیگر ضرایب تا درجه و مرتبه ۳۶۰ از مدل جهانی EGM08 (پاولیس،

سنجش از دور و GIS ایران  
سال سوم = شماره اول = بهار ۱۳۹۰

تعیین پتانسیل ژئوئید با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و GRACE



شکل ۴. نقشه مقادیر پتانسیل ثقل سطح متوسط دریا با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE (مقادیر با حذف مقدار ثابت ۶۲۶۳۶۸ ترسیم شده‌اند)



شکل ۵. تغییرات زمانی پتانسیل ژئوئید در فاصله زمانی بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ (محور افقی زمان و محور عمودی پتانسیل است)

ترسیم گردیده است. در شکل ۵ نمودار تغییرات پتانسیل ژئوئید نشان داده شده است. بر اساس این شکل بیشترین تغییرات زمانی پتانسیل ژئوئیدی برای دوره زمانی شش ماهه، و در حدود ۲/۲ مترمربع بر مجذور ثانیه است.

با توجه به این رابطه، بهترین برآورد برای پتانسیل ژئوئید، متوسط ریاضی پتانسیل ثقل نقاط روی سطح متوسط دریاست. بر اساس این تعریف، پتانسیل ژئوئید برای ۲۷ ماه، از ژوئیه ۲۰۰۸ تا سپتامبر ۲۰۱۰، محاسبه شده و تغییرات زمانی آن در این بازه زمانی

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پتانسیل ثقل ژئوئید به همراه تغییرات ماهیانه آن، با استفاده از داده‌های ماهواره ارتفاع‌سنجی Jason-2 و ماهواره ثقل‌سنجی GRACE محاسبه شد. در مرحله نخست با استفاده از ۸۰ دوره داده‌های ماهواره Jason-2 و پس از اعمال تصحیحات لازم، سطح متوسط آب دریا در مدت ۲۷ ماه، از ژوئیه سال ۲۰۰۸ تا سپتامبر ۲۰۱۰ به‌دست آمده است. در ادامه، پتانسیل ثقل برای نقاط سطح متوسط آب دریا با استفاده از ضرایب ماهیانه هارمونیک‌های کروی میدان ثقل ماهواره GRACE محاسبه شده است. نقشه تغییرات پتانسیل میدان ثقل زمین در مناطق دریایی نشان می‌دهد که اگرچه بیشترین مقدار فاصله سطح متوسط دریا از ژئوئید در حدود ۱۱۰- متر، در جنوب شبه‌قاره هند قرار دارد، و لیکن بزرگ‌ترین مقادیر پتانسیل ثقل در منطقه دریای خزر است. این موضوع باعث می‌شود تا این منطقه بیشترین ارتفاع را (در حدود ۲۷- متر) از سطح ژئوئید داشته باشد. پتانسیل ژئوئید برای هر ماه با استفاده از متوسط مقادیر ماهیانه پتانسیل ثقل سطح متوسط دریا محاسبه گردید و نمودار تغییرات آن ترسیم شد. این نمودار نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات پتانسیل ژئوئیدی دوره تناوب نیمه‌سالانه در حدود ۲/۲ متر مربع بر مجذور ثانیه دارد و می‌بایست در متوسط‌گیری در نظر گرفته شود. در نهایت مقدار پتانسیل ثقل ژئوئیدی در بازه زمانی ۲۷ ماهه از متوسط تمامی مقادیر ماهیانه در حدود ۶۲۶۳۶۸۵۴ مترمربع بر مجذور ثانیه برآورد شده است. با ارزیابی مقدار به‌دست‌آمده با روش بورس اختلافی در حدود ۲ متر مربع بر مجذور ثانیه، مشاهده می‌شود که تأثیری در حدود ۲۰ سانتی‌متر روی ارتفاع ژئوئید دارد، این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت داده‌ها از نظر زمانی و روش محاسباتی باشد.

## ۶- منابع

- Ardalan A.A., Grafarend E.W. and Kakkuri J., 2002, **National Height Datum, the Gauss-Listing Geoid Level Value and its Time Variation**, Journal of Geodesy, 76: 1-28.
- AVISO, 1998, **User Handbook-Corrected Sea Surface Heights (CORSSHs)**, AVI-NT-011-311-CN, Edition 3.1.
- AVISO, 1996, **User Handbook**, Merged TOPEX/POSEIDON products, (GDR-Ms) AVI-NT02-101-CN, Edition 3.0.
- Bursa M, Kouba J, Radej K, Scott AT, 1999, **Determination of the Geopotential at the Tide Gauge Defining the North American Vertical Datum 1988 (NAVD88)**, Geomatica 53(3): 291-296.
- Bursa M., Groten E., Kenyon S., Kouba J., Radej K., Vatr V., Vojtiskova M., 2002, **Earth's Dimension Specified by Geoidal Geopotential**, Stud Geophys Geod 46: 1-8.
- Bursa M., Kenyon S., Kouba J, Sima Z., Vatr V., Vitek V, Vojtiskova M., 2006, **The Geopotential Value  $W_0$  for Specifying the Relativistic Atomic Time Scale and a Global Vertical Reference System Geodesy (2007)**, Journal of Geodesy 81: 103-110.
- Chen, J.L, C.R. Wilson, B.D. Tapley, J. Ries, 2004, **Low Degree Gravitation Changes from GRACE: Validation and Interpretation**, Geophys. Res. Lett., Vol. 31, No. 22, L22607 10.1029/2004GL021670.



- Gauss, C.F., 1828, **Bestimmung des Breitenunterschiedes Zwischen den Sternwarten von Göttingen und Altona**, Vadenhoek und Ruprecht, Göttingen.
- Grafarend E.W. and Ardalan A.A., 1999, **World Geodetic Datum 2000**, Journal of Geodesy, 73: 611-623.
- Grafarend E.W., Ardalan A.A. 1996, **w<sub>0</sub>: an Estimate in the Finnish Height Datum N60, epoch 1993.4, from twenty-five GPS points of the Baltic Sea Level Project**, Journal of Geodesy, 71: 673-679.
- Heiskanen, W.A. and H. Moritz, 1981, **Physical Geodesy**, Reprinted in the Institute of Physical Geodesy, Technical University Graz, Austria.
- Kaula, W.M., 1969, **The Terrestrial Environment: Solid Earth and Ocean Physics**, NASA report study at Williamstown, Mass. Technical Report NASA CR-1579, Aug.
- Kim, J., 2000, **Simulation Study of a Low-low Satellite-to-satellite Tracking Mission**, Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin.
- Listing, J.B., 1873, **Über Unsere Jetzige Kenntnis der Gestalt und Größe der Erde**, Dietrichsche Verlagsbuchhandlung, Göttingen.
- Pavlis, N, 2008, **An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM08**, presentation given at the 2008 European Geosciences Union General Assembly held in Vienna, Austria, April 13-18.
- Rosmorduc, V., J. Benveniste, O., Lauret, C., Maheu, M. Milagro, N. Picot, 2009, **Radar Altimetry Tutorial**, J. Benveniste and N. Picot Ed., <http://www.altimetry.info>.
- Tapley, B.D., Chambers, D.P., Bettadpur S. and Rise, J.C., 2003, **Large-scale Ocean Circulation from the GRACE GGM01 Geoid**, Geophysical research letters, Vol. 30, 2163, 4 PP.
- Vaníček P., Krakiwsky E.J. 1986, **Geodesy: The Concepts**, 2nd corrected edn, North Holland, Amsterdam.