دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی- پژوهشی فضای جغرافیایی

سال دوازدهم، شماره‌ی ۳۹
پاییز ۱۳۹۱، صفحات ۱۵۵-۱۳۹

رامین کیامهر[۱]
مجید ابره‌دری[۲]

مدل توپوگرافی سطح دریا برای منطقه خلیج فارس و دریای عمان براساس تلفیق داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و مدل ژئوئید ماهواره GOCE

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۱۱/۰٤ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۰۵/۲۲

چکیده

سطح مبنای ارتفاعی به صورت سنتی در کشورهای مختلف بر اساس مشاهدات به دست آمده از تایدگیج‌ها بنا نهاده شده است. امروزه با پیشرفت در علوم و تکنولوژی و به دنبال آن افزایش دقت، مبنای ارتفاعی نیازمند بازنگری است چرا که با افزایش همکاری‌های مشترک بین دولت‌های مختلف، نیاز به مرتبط‌سازی شبکه‌های ارتفاعی کشورهای مجاور دارد. یکی از مشکلاتی که در استفاده از ارتفاعات مطلق وجود دارد، جدایی بین سطح متوسط آب‌های آزاد و ژئوئید می‌باشد. در حالت تئوریک سطح مبنای ارتفاعات مطلق، ژئوئید می‌باشد اما در عمل از سطح متوسط آب‌های آزاد به عنوان سطح مبنای ارتفاعات مطلق استفاده می‌شود، به جدایی بین این دو سطح، توپوگرافی سطح دریا (SST) گفته می‌شود.

در این مقاله با توجه به اهمیت توپوگرافی سطح آب در مطالعات اقیانوس‌شناسی، تعیین و یکسان‌سازی سطح مبنای ارتفاعی، ابتدا به مدل‌سازی سطح متوسط دریا از طریق مشاهدات ماهواره ارتفاع‌سنجی توپکس- پوزایدون به صورت نقطه‌ای در طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۳ در دریای عمان و خلیج فارس پرداخته شده است. مدل جدیدی

۱- دپارتمان کارتوگرافی، دانشگاه زنجان، Email:kiamehr@kth.se
۲- دانشجوی دکتری، بخش ژئودزی، کالج سلطنتی تکنولوژی سوئد (KTH)، Email: majid_abrehdary@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

برای توپوگرافی سطح دریا بر اساس تلفیق اطلاعات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و ژئوئید جدید و دقیق حاصل از اطلاعات ماهواره GOCE در منطقه خلیج فارس و دریای عمان ارائه می‌شود. بر این اساس اختلاف سطح متوسط آب‌های آزاد حاصل از مدل ارتفاع سنجی ماهواره‌ای و ژئوئید جهانی GOCE در بازه ۱.٤ ± متر و میانگین ۰/۳- متر ارزیابی گردید.

کلید واژه‌ها: توپکس-پوزایدون، توپوگرافی سطح آب، ژئوئید، ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، خلیج فارس و دریای عمان، GOCE.

مقدمه

تعیین ارتفاع مطلق نقاط یکی از پارامترهای مهم در ژئودزی و به خصوص پروژه‌های نقشه‌برداری می‌باشد. برای تعیین این پارامتر، تعریف دقیق مبنای اندازه‌گیری ارتفاع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از مهمترین سطوحی که به عنوان مبنای ارتفاعی مورد استفاده قرار می‌گیرد، سطح ژئوئید می‌باشد (Kiamehr, 2010). برای تعیین سطح ژئوئید به روش محلی نیاز به داده‌های گرانی (جاذبی) در خشکی و دریا می‌باشد. متأسفانه تعداد داده‌های گرانی مشاهده شده در مناطق دریایی جنوب ایران بسیار محدود بوده و تعداد آنها حداکثر ۲۰۰ داده می‌باشد. کمبود شدید داده‌های گرانی در این مناطق و توزیع ناهمگن این داده‌ها (Kiamehr, 2007a)، عملاً امکان حصول به ژئوئید محلی دقیق را در این مناطق غیر ممکن می‌نماید. خوشبختانه وجود داده‌های مشاهدات آلتیمتری ماهواره‌ای در این مناطق امکان تبدیل معکوس این داده‌ها را به داده‌های جاذبی فراهم می‌آورد. با وجود امکان استفاده از داده‌های جاذبی ماهواره‌ای در مدل‌های ژئوئید محلی، دقت این داده‌ها قابل مقایسه با داده‌های گرانی سنجی مستقیم نبوده و ژئوئید محلی دقت قابل قبولی در این مناطق نخواهد داشت. در این شرایط بهترین روش ممکن برای تعیین ژئوئید استفاده از داده‌های گروایمتری و گرادیومتری ماهواره‌ای که از طریق ماهواره‌های گوس و گریس در دسترس می‌باشند.

اندازه‌گیری ارتفاع هر نقطه نسبت به ژئوئید به وسیله ترازیابی دقیق، مستلزم معلوم بودن محل دقیق این سطح می‌باشد. اما به دلیل اینکه سطح ژئوئید کاملاً بر سطح متوسط آبهای آزاد در همه نقاط دریاهای آزاد منطبق نیست، این اندازه‌گیری دچار مشکل می‌باشد. جدایی بین سطح ژئوئید در هر نقطه با سطح متوسط آب‌های آزاد، به عنوان توپوگرافی سطح دریا (SST) تعریف می‌شود.

مبنای اندازه‌گیری ارتفاع مطلق نقاط در هر کشور در یک تایدگیج و یا مجموعه‌ای از تایدگیجها می‌باشد اما SST چون باعث جدایی بین ژئوئید و سطح متوسط دریا می‌گردد، مبنای اندازه‌گیری ارتفاعات در کشورهای مختلف متفاوت است در نتیجه برای اینکه تحقیقات ژئودزی و پروژه‌های نقشه‌برداری در

Archive of SID

www.SID.ir

کشورهای مختلف که به نحوی به ارتفاع مطلق نقاط مرتبط می‌باشند بتوانند بـا یکدیگـر مرتبط گردند باید اختلاف مبنای ارتفاعات در کشورهای گوناگون نسبت به یکدیگر تعیین گردد، بنابراین برای یافتن اختلاف ارتفاع سطوح مبنای ارتفاعات مطلـق کافـی اسـت کـه SST بیـن نقـاط مبنای ارتفاعی کشـورها را بدست آوریم. در این مقاله امکان تلفیق اطلاعات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و ژئوئید در دریای عمان و خلیج فارس بررسی گردیده است. مراحل اصلی روش ارائه شده به شرح ذیل می‌باشد:

۱- دستیابی به سطح متوسط دریا از طریق ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

۲- دستیابی به توپوگرافی سطح دریا از طریق تلفیق با ژئوئید حاصل از ماهواره GOCE

روش ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای برای استفاده متخصصان ژئودزی در تعیین سطح دریا و تعیین توپوگرافی سطح دریا، اقیانوس‌شناسان در مطالعه دینامیک اقیانوس‌ها و ژئوفیزیکدان‌ها در شناخت ساختارهای کف اقیانوس‌ها و فعالیت‌های تکتونیکی زیردریایی مورد توجه و علاقه است. کاربردهای این روش در بسیاری از رشته‌ها از جمله اقیانوس‌شناسی، اقلیم‌شناسی، هواشناسی، مدیریت منابع زمینی، ژئودزی، هیدروگرافی و ژئودینامیک مشهود است.

در سال‌های اخیر فعالیت‌های زیادی در استفاده از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای برای مدل‌سازی تغییرات سطح آب دریا در دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان انجام شده است از جمله رستمی (۱۳۸۱) و پورشریفی (۱۳۸۵) به مدل‌سازی توپوگرافی سطح دریا در خلیج فارس و دریای عمان از طریق ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای پرداختند. مسیب زاده نیز (۱۳۸۱) به تعیین توپوگرافی سطح آب در دریای عمان و خلیج فارس از طریق تلفیق اطلاعات GPS و مشاهدات تایدگیج‌ها پرداخته است؛ هاشمی فراهانی (۱۳۸۲) نقشه‌های هم‌دامنه و هم‌فاز جزر و مدی را در مقیاس جهانی از طریق ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای تعیین نمود؛ سهرابی (۱۳۸۳) مسئله تهیه چارت‌های دریایی با استفاده از مختصات ۳ بعدی GPS و مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای را مورد مطالعه قرار داد؛ عرب صاحبی (۱۳۸۳) به تعیین میدان ثقل زمین از طریق مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای پرداخت؛ صنایعی (۱۳۸٤) به بررسی اعتبار داده‌های ثقلی دریایی از طریق ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای پرداخت؛ جعفری (۱۳۸۵) اقدام به مدل‌سازی روند تغییرات سطح آب دریای خزر با استفاده از مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و تایدگیج‌های ساحلی پرداخت؛ جلیل نژاد (۱۳۸۵) مسئله ارزیابی مدل‌های مختلف بکار رفته در تعیین MSL با استفاده از مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای را حل نمود.

سطح متوسط دریا (MSL)

سطح متوسط دریا همانطور که از نامش پیداست متوسط سطوحی است که آب دریا اختیار می‌کند و تقریباً منطبق بر ژئوئید است. هر چند این تعریف خیلی ساده به نظر می‌رسد اما چون سطح واقعی دریا پیوسته در حال تغییر است بدست آوردن یک سطح متوسط و دقیق برای دریا کار آسانی نیست. تغییرات در سطح دریا ممکن است توسط هر عاملی از نوسانات خیلی کوتاه مدت مانند امواج مرده دریا تا تغییرات بلند مدت که ممکن است ده‌ها سال و یا حتی قرن‌ها طول بکشد تا احساس شوند ایجاد گردد.

Archive of SID

www.SID.ir

سطح متوسط دریا از متوسط‌گیری بلند مدت تغییرات سطح لحظه‌ای آب دریا بدست می‌آید. اقیانوس‌شناس‌ها تمایل دارند برخی عوامل را بر روی سطح دریا بررسی کرده و تنها تأثیرات جاذبی را بر روی سطح دریا بردارند، اما ژئودزینها می‌خواهند همه عوامل را حذف نموده و سپس متوسط‌گیری نمایند.

برای تعیین تغییرات سطح آب دریا در مناطق دور از ساحل روش‌های مختلفی وجود داشته که آنها را می‌توان به دو دسته (۱) روش‌های زمینی (۲) روش‌های ماهواره‌ای تقسیم بندی نمود. روش‌های زمینی همچون نصب تایدگیج‌های ساحلی و یا تایدگیج‌های زیر دریایی با توجه به وسعت دریاها هیچ‌گاه نمی‌توانند کل جهان را پوشش داده و تصویری جامع از کل سطح آب‌های جهان بدست دهند. در مقابل روش‌های ماهواره‌ای می‌توانند در زمانی بسیار کوتاه پوشش‌های جهانی از سطح زمین و آب‌ها را فراهم کنند، بدین لحاظ ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای امروز افق‌های جدیدی بر روی دانشمندان علوم دریایی برای مطالعات جهانی گشوده است. بنابراین به طور خلاصه عمده‌ترین مزیت روش ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای را می‌توان پوشش یکنواخت و جهانی سطح آب‌ها و نیز تکرار شوندگی آنها دانست. با توجه به امکان تعیین تغییرات لحظه‌ای سطح آب‌های جهان، مشاهدات ارتفاع‌سنجی از کاراترین منابع اطلاعاتی برای تعیین سطح متوسط دریا به شمار می‌رود.

از نقطه نظر کاربردی، سطح متوسط دریا (MSL) از دیر باز به عنوان نقطه صفر ارتفاعی و سطح تعادل دریا در ساحل تلقی و برای رسیدن به آن، فرکانس‌های جزر و مدی در بازه‌های زمانی محدودی حذف و سطح باقیمانده پس از حذف تغییرات تناوبی، سطح متوسط دریا در نظر گرفته شده است. این سطح از طریق اتصال به بنچ مارک‌های ساحلی موجبات انتقال صفر ارتفاعی به خشکی را به وجود می‌آورد. سطح متوسط دریا با تعریف یاد شده دارای مشکلات ذیل است:

۱- سطح متوسط دریا می‌بایست بر اساس مشاهدات درازمدتی صورت پذیرد تا امکان آشکارسازی کلیه فرکانس‌های جزر و مدی پدیدار گردد، حرکت نوتیشن (Nutation) زمین و با زمان تناوب ۱۸/٦ سال بزرگ‌ترین مؤلفه جزر و مدی را با توجه به توانایی‌های اندازه گیری موجود تشکیل می‌دهد.

۲- سطح متوسط دریا حتی در صورت تعریف دقیق و صحیح آن برای همان نقطه نصب تایدگیج صحیح بوده و نمی‌تواند نشان دهنده سطح متوسط دریا حتی در نقاط ساحلی نزدیک به نقطه نصب تایدگیج باشد.

۳- سطح متوسط دریا با توجه به تفاوت آن از نقطه‌ای به نقطه دیگر نمی‌تواند مبداء مناسبی برای ارتفاعات، که در ارتباط با اختلاف پتانسیل تعریف می‌گردند، باشد.

استفاده از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای می‌تواند دو مشکل اول را بر طرف و مشکل اخیر با به کارگیری یک سطح هم پتانسیل مبنا به جای سطح متوسط دریا قابل حل می‌باشد. در مورد تعیین سطح متوسط دریا از طریق مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای و یا تلفیق مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای با مشاهدات تایدگیج های ساحلی از سال ۱۹۷۰ تاکنون تحقیقات بسیاری صورت گرفته و مدل‌های گوناگونی توسط مراکز علمی مختلف در سطح جهان به جوامع ژئودزی و ژئوفیزیک و اقیانوس شناسی صورت گرفته است.

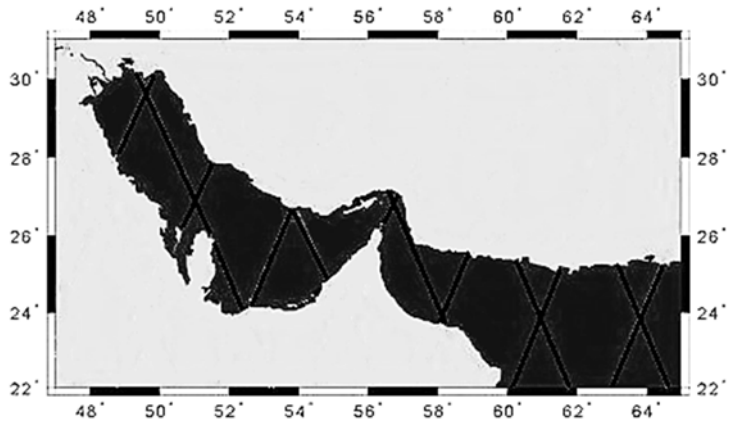
Archive of SID

www.SID.ir

تعیین سطح متوسط دریا

داده‌های ماهواره توپکس- پوزایدون

داده‌های ماهواره توپکس-پوزایدون که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است شامل داده‌های خام ۱۱ سال (۲۰۰۳-۱۹۹۲) از مشاهدات ماهواره‌ای واقع در بازه‌های ۰۱۱ تا ۳۷۰ (۳۶۰) می‌باشد. هر بازه شامل ۱۲۷ مدار و ۲۵٤ گذر است که به فرمت باینری MGDR-B در سایت سازمان فضایی آمریکا (NASA) قابل دسترسی می‌باشد. همانطور که در شکل مشهود است تعداد گذرهای واقع در محدوده خلیج فارس و دریای عمان ۱۳ عدد می‌باشد که پوشش نسبتاً خوبی را پدید آورده است. در ادامه طریقه ایجاد و شکل‌گیری اطلاعات تشریح خواهد شد (Beckley et al., 2007).



شکل ۱- خطوط گذرهای زمینی ماهواره توپکس پوزایدون در محدوده خلیج فارس و دریای عمان

محاسبه ارتفاع سطح لحظه‌ای آب

ارتفاع لحظه‌ای سطح آب در نقطه مشاهداتی نسبت به بیضوی مرجع از تفاضل دو مشاهده مستقل از رابطه زیر بدست می‌آید (Marsh, J. G., et al., 1990) :

$$SSH(\lambda,\varphi,t) = H_{sat}(\lambda,\varphi,t) - Range(\lambda,\varphi,t) \quad (۱)$$

در رابطه فوق $SSH(\lambda,\varphi,t)$ ارتفاع سطح آب دریا در نقطه‌ای به مختصات (λ,φ) در لحظه t، $H_{sat}(\lambda,\varphi,t)$ ارتفاع ماهواره نسبت به بیضوی مرجع در لحظه t و $Range(\lambda,\varphi,t)$ فاصله ماهواره تا سطح آب در نقطه مشاهداتی در همان لحظه t است.

از آنجا که ارتفاع لحظه‌ای اندازه‌گیری شده از سطح آب وابسته به شرایط اتمسفریک بین ماهواره و سطح دریا و نحوه بازگشت سیگنال از سطح دریا می‌باشد؛ لذا به منظور تعیین ارتفاع سطح آب دریا در نقطه مشاهداتی نسبت به بیضوی مرجع ابتدا باید خطاهای سیستماتیک فاصله ماهواره از سطح دریا که توسط آلتیمتر اندازه‌گیری شده است را تصحیح نمود. تصحیحات لازم برای حذف این خطاها عبارتند از:

Archive of SID

www.SID.ir

تصحیح ترپوسفر تر (Δw)، تصحیح تروپوسفر خشک (Δd)، تصحیح یونسفر (ΔI)، تصحیح بایاس تأثیر معکوس فشار (ΔIB)، بایاس وضع دریا (تصحیح بایاس الکترومغناطیس) (ΔE)، تصحیح جزرومد آب دریا، تصحیح جزرومد قطبی (ΔpT) و تصحیح تغییرات مرکز ثقل آنتن ارتفاع‌سنج (Δc).
کلیه این تصحیحات در فایل‌های اطلاعاتی ماهواره وجود دارند. این تصحیحات برای هر نقطه به صورت مجزا ارائه شده است. با داشتن این تصحیحات می‌توان به صورت زیر مقدار فاصله تصحیح شده را بدست آورد:

$$Corrected\ Range = Range + \Delta w + \Delta d + \Delta I + \Delta IB + \Delta E + \Delta pT + \Delta c \qquad (۲)$$

یک نکته که در اینجا باید به آن توجه شود آن است که تصحیحات ناشی از جزرومد و سایر تأثیرات پریودیک را با تشکیل سری زمانی از ارتفاع لحظه‌ای سطح آب به صورت نقطه‌ای و تحلیل این سری‌ها بدست خواهیم آورد.
بعد از آن که فاصله بین ماهواره تا سطح لحظه‌ای آب تصحیح گردید، می‌توان با داشتن مقدار ارتفاع ماهواره از سطح بیضوی مرجع در همان نقطه، ارتفاع سطح آب در آن نقطه را نسبت به بیضوی مرجع در همان لحظه به صورت زیر بدست آورد:

$$SSH(\lambda,\varphi,t) = H_{sat}(\lambda,\varphi,t) - Corrected\ Range \qquad (۳)$$

در رابطه بالا SSH همان Sea Surface Height یا ارتفاع لحظه‌ای آب از بیضوی رفرنس، H_{sat} ارتفاع لحظه‌ای ماهواره در مدار مورد نظر و Corrected Range فاصله اندازه‌گیری شده و تصحیح شده بین ماهواره و سطح آب است.

استخراج اطلاعات لازم از فایل مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

جهت آماده سازی مشاهدات جهت مدل‌سازی، در این پروژه ابتدا ۲۰ داده اصلی: شماره روز، زمان با دقت میلی‌ثانیه، ارقام میکروثانیه زمان، عرض جغرافیایی نقطه نادیر، طول جغرافیایی نقطه‌ی نادیر، ارتفاع ماهواره از سطح بیضوی، فاصله ماهواره از سطح دریا، مقدار RMS فاصله ماهواره از سطح دریا، تصحیح تغییرات مرکز ثقل آنتن ارتفاع‌سنج، تصحیح تروپسفرخشک، تصحیح معکوس فشار، تصحیح تروپسفرتر، تصحیح یونسفر، تصحیح بایاس الکترومغناطیس، ارتفاع سطح متوسط دریا، ارتفاع ژئوئید، جزر و مد الاستیک دریا، جزرومد قطبی، عمق دریا و نشان‌گر نوع جنس زمین از نظر آب، خاک یا یخ را از فایل‌های باینری decode می‌نماییم. (۱۳۸٦، ترابی)
با اعمال رابطه (۱) بر اطلاعات decode شده فاصله تصحیح شده مربوط به هر نقطه محاسبه می‌شود. سپس مقادیر مورد نظر در رابطه (۲) قرار گرفته و ارتفاع لحظه‌ای هر نقطه از بیضوی رفرنس محاسبه می‌گردد.
تشکیل سری زمانی در نقاط پای ماهواره

Archive of SID

www.SID.ir

فاصله زمانی میان دو عبور متوالی ماهواره ارتفاع‌سنجی T/P از یک نقطه حدود ۹.۹۱۵ روز است. پس با تکیه بر اطلاعات حاصل از این ماهواره می‌توان در سطح دریا نقاط مشخصی را یافت که وضعیت ارتفاع سطح آب در آنها هر ۹.۹۱۵ روز یک‌بار اندازه‌گیری شده است.

جهت ایجاد سری زمانی در هر نقطه توجه به این نکته لازم بوده که عبورهای متوالی در ارتفاع‌سنجی ماهواره دقیقاً روی نقاط مشابه و یکسان قبلی صورت نمی‌گیرد و لذا بایستی محدوده‌ای را برای پذیرش نقاط در نظر گرفت و فرض نمود که وضعیت جزر و مدی این نقاط به دلیل نزدیکی یکسان است. با توجه به آن‌که حداقل فاصله میان دوبار ارتفاع‌سنجی متوالی در سطح دریا حدود ٦ کیلومتر است شعاع دایره جستجو برای پذیرش نقاط به عنوان نقاط با جزرومد یکسان ۳ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود.

در ادامه تصحیحات لازم را از رابطه (۱) به فاصله ماهواره تا نقطه نادیر، اعمال می‌نماییم و اطلاعات را به‌گونه‌ای ساختاربندی می‌کنیم که اطلاعات موجود در عبورهای مشابه مربوط به سایکل‌های مختلف در یک ماتریس ذخیره‌شوند. از این ماتریس‌ها استفاده نموده و سری زمانی مربوط به هر نقطه را تشکیل می‌دهیم و در انتها با قرار دادن یک فیلتر مناسب نقاط موجود در منطقه را جدا می‌سازیم. لازم به ذکر است که هر سری زمانی در نقطه‌ای به مختصات $\bar{\lambda}(i),\bar{\varphi}(i)$ تشکیل می‌شود و این نقطه در حقیقت مرکز هندسی نقاطی از عبورهای متوالی ماهواره است که در یک دایره جستجو به شعاع ۳ کیلومتر واقع شده‌اند. (۱۳۸٦، ترابی) در انتهای این پردازش‌ها دو سری داده در دست می‌باشد:

(۱) ماتریس‌های مربوط به همه مشاهدات مربوط به هر دوره

(۲) ماتریس‌های سری‌های زمانی نقطه‌ای

در اینجا توجه به دو نکته ضروری می‌نماید:

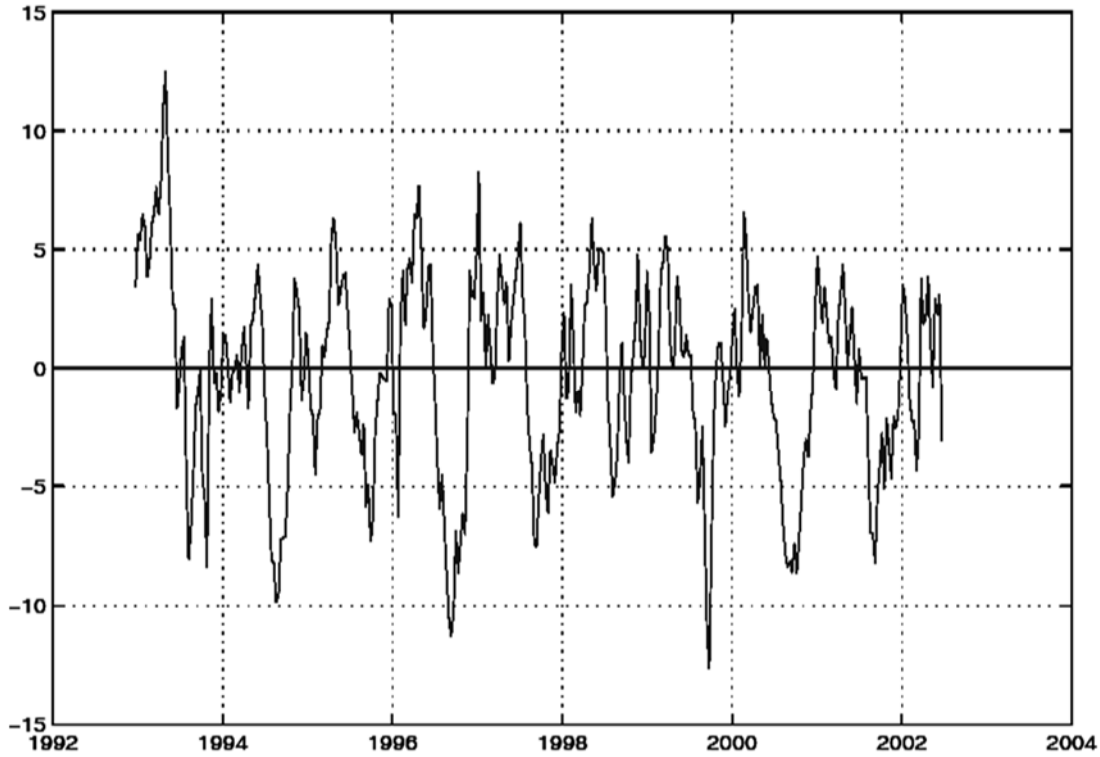
(۱) به علت مناسب نبودن پارامتر flag و یا مسائلی مانند مشکل در رادار ارتفاع‌سنج در این سری‌های زمانی گپی اطلاعات نیز وجود دارد لذا در بعضی از زمان‌ها مشاهده ارتفاع‌سنجی وجود نخواهد داشت.

(۲) مشاهدات سایکل‌های ۱ الی ۱۰ مربوط به مأموریت ماهواره توپکس-پوزایدون دارای دقت مناسب جهت استفاده نمی‌باشند، لذا در این تحقیق مشاهدات مربوط به سایکل ۱۱ در مأموریت توپکس-پوزایدون به عنوان مشاهدات رفرنس در تشکیل سری زمانی در نظر گرفته شد. بدین ترتیب مشاهدات سایر سایکل‌ها با استراتژی که در بالا تشریح شد به عنوان مشاهدات تکراری بکار گرفته و سری‌های زمانی تشکیل شدند.

در شکل ۲ یک سری زمانی شبیه سازی شده در نقطه‌ای به مختصات φ =۲٤/٦۲٤۰ و λ = ۵۲/۷۱۵۱ و با پریود ۹/۹۱۵ روز و به مدت ۱۱ سال مطابق با مشاهدات ماهواره توپکس- پوزایدون تولید می‌کنیم.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲- مشاهدات تغییرات سطح لحظه‌ای آب در فاصله زمانی ۹/۹۱۵ روز طی ۱۱ سال بر حسب متر
(محور افقی زمان و محور قائم تغییرات سطح آب را نشان می‌دهد)

استفاده از روش آنالیز طیفی فوریه برای یافتن فرکانس موجود در سری‌های زمانی و روش کمترین مربعات به منظور دستیابی به فرکانس‌های دقیق‌تر، دامنه و فاز موج

با فرض اینکه سری زمانی $h\{(t_i)\}\, i=1,2,\ldots,n$ مشاهدات ارتفاع سطح لحظه‌ای سطح آب در نقطه معینی باشد مدل مناسب برای مدل‌سازی جزرومد به صورت زیر است:

$$(٤)\quad h(\phi,\lambda,t)=a_0(\phi,\lambda)+b_0(\phi,\lambda)t+\sum_{i=1}^{n}a_i(\phi,\lambda)\cos(\omega_i t)+b_i(\phi,\lambda)\sin(\omega_i t)$$

در رابطه فوق a_0 بیانگر سطح متوسط دریا و a_i, b_i دامنه امواج جزر و مدی هستند که می‌بایست به عنوان ضرایب فوریه تعیین شوند و b_0 نرخ افزایش دائمی سطح آب دریاهاست که به لحاظ ذوب یخ‌های قطبی فرض می‌شود در تمامی سطح دریا ثابت است. در حقیقت تعیین ضرایب فوریه موجود در بسط فوق باعث تعیین مدل برای رفتار یک پدیده می‌شود که این ضرایب با استفاده از نمونه و تشکیل یک دستگاه معادلات پارامتریک به فرم زیر تعیین و در حل این دستگاه معادلات از روش کمترین مربعات استفاده می‌شود.

Archive

www.SID.ir

$$Ax = L \rightarrow \hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (۵)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & t_1 & \cos(\omega_1 t_1) & \sin(\omega_1 t_1) & \cdots & \cos(\omega_k t_1) & \sin(\omega_k t_1) \\ 1 & t_2 & \cos(\omega_1 t_2) & \sin(\omega_1 t_2) & \cdots & \cos(\omega_k t_2) & \sin(\omega_k t_2) \\ \vdots & & & & & & \\ 1 & t_n & \cos(\omega_1 t_n) & \sin(\omega_1 t_n) & \cdots & \cos(\omega_k t_n) & \sin(\omega_k t_n) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ a_1 \\ b_1 \\ \vdots \\ a_k \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(t_1) \\ h(t_2) \\ \vdots \\ h(t_{n-1}) \\ h(t_n) \end{bmatrix}$$

روش فوریه یک روش برای یافتن فرکانس از روی اطلاعات می‌باشد. اما برای اینکه بتوانیم اثر جزرومد را از روی سطح متوسط آب جدا کنیم، باید سایر عوامل هر موج را نیز شناسایی کنیم. برای اینکه یک موج سینوسی را بتوان استخراج نمود، باید سه المان هر موج یعنی فرکانس، دامنه و اختلاف فاز آن موج را بدست آورد. تا اینجا توانستیم یک سری فرکانس موجود در داده‌ها را بیابیم. اما اکنون می‌خواهیم مجهولات دامنه و اختلاف فاز را بیابیم. یک روش یافتن این فاز و دامنه، تقسیم منحنی کسینوسی به دو منحنی ساده است.

$$h(t_i) = a\cos\omega t + b\sin\omega t = A\cos(\omega t - \varphi) \quad (۶)$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (۷)$$

$$\varphi = \tan^{-1}(\frac{b}{a}) \quad (۸)$$

حذف نویزهای مشاهداتی و محاسباتی از روی پروفیل حاصل و ارائه مدل سطح متوسط آب دریا

پس از محاسبه ارتفاع سطح متوسط دریا در کلیه نقاط می‌بایست نویزهای موجود در مدل حذف گردند، برای حذف این نویزها از فیلترینگ استفاده می‌شود.

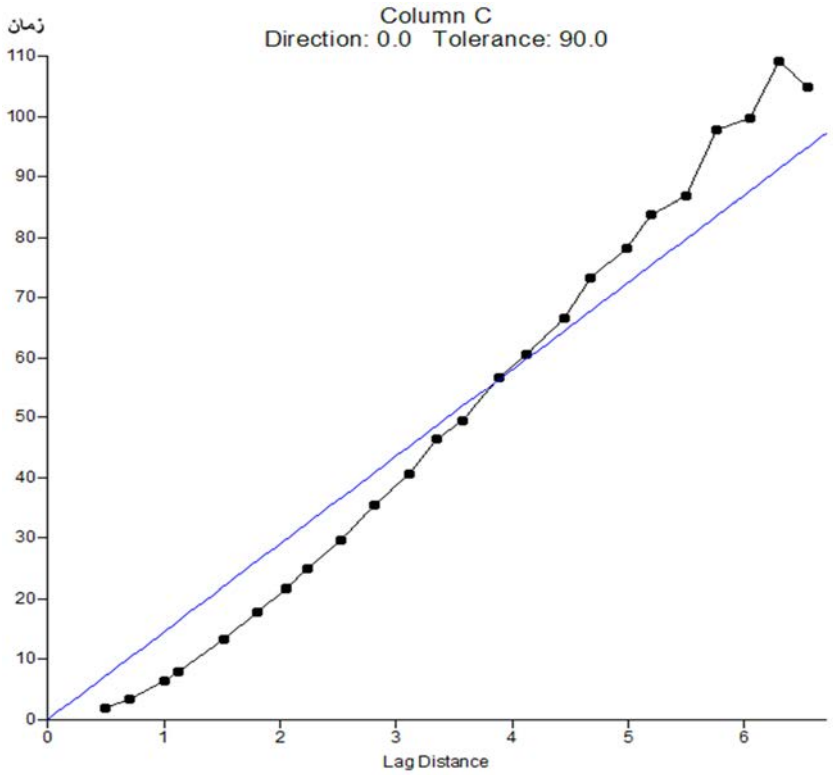
مفهوم فیلترینگ را می‌توان به صورت یک ضرب پیچشی سیگنال و یک کرنل مناسب تعبیر نمود.

$$\begin{aligned} & f_1(x) \rightarrow h(x-a) \rightarrow f_2(x) \\ & \Rightarrow f_2(x) = f_1(x).h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(a)h(x-a)da \end{aligned} \quad (۹)$$

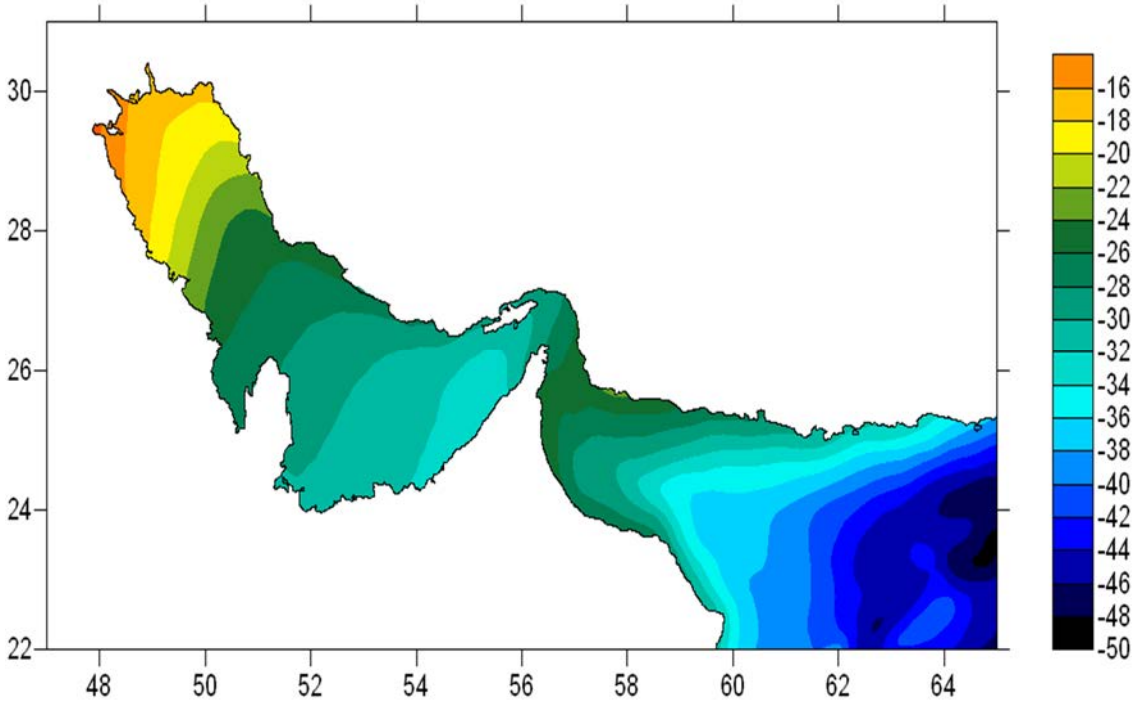
در اینجا برای حذف فرکانس‌های بالا که نویز تلقی می‌شوند از فیلتر پایین گذر استفاده می‌شود. شکل ۳ وریوگرام مربوط به سری زمانی شبیه سازی شده با پریود ۹/۹۱۵ روز در دوره زمانی ۱۱ ساله را برای مشاهدات ماهواره توپکس-پوزایدون نشان می‌دهد. شکل ٤ منحنی تراز سطح متوسط دریا نسبت به بیضوی WGS84 نشان می‌دهد. بر این اساس تغییرات سطح متوسط دریا در منطقه خلیج فارس و دریای عمان در بازه ٤٨- تا ١٤- متر می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۳- وریوگرام مربوط به سری زمانی شبیه سازی شده با پریود ۹/۹۱۵ روز و به مدت ۱۱ سال مطابق با مشاهدات ماهواره توپکس- پوزایدون



شکل ٤ - سطح متوسط دریا نسبت به بیضوی WGS84 در واحد متر

www.SID.ir

مقایسه سطح متوسط به دست آمده با مدل جهانی (Rapp,1994)

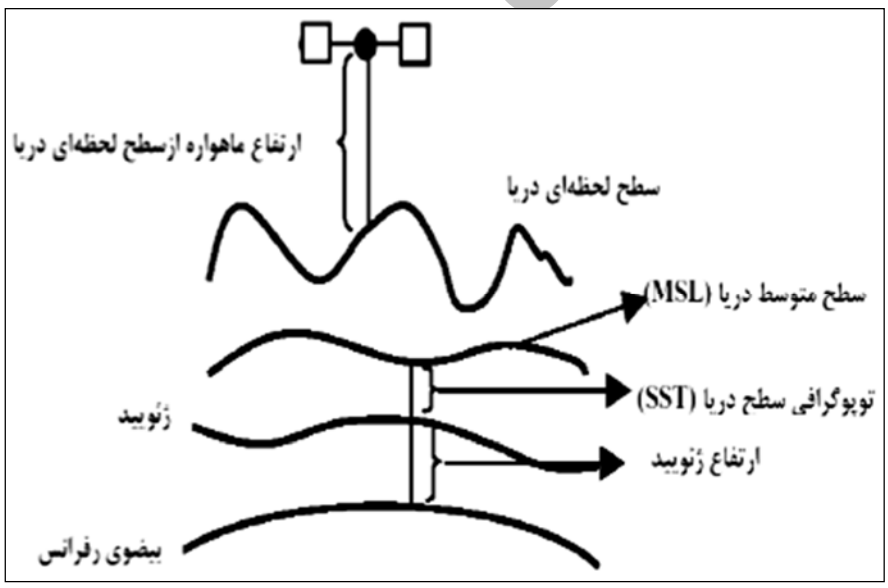
به منظور ارزیابی مدل محلی سطح متوسط دریا حاصل از روش فوق، این سطح با مدل جهانی سطح متوسط دریا Rapp مقایسه گردید و اختلاف متوسطی در سطح ۲۳ سانتیمتر برآورد شد. جدول شماره ۱ نتایج آماری این مقایسه را نشا بدست آمده را در جدول ذیل مشاهده نمود.

جدول ۱- نتایج آماری بدست آمده از اختلاف دو سطح متوسط بر حسب متر

میانگین اختلاف‌ها	انحراف معیار	کوچکترین اختلاف	بزرگ‌ترین اختلاف
-۰/۲۳٤	۰/۵۰٤	-۲/٤۳۲	۲/۵٦۳

تعیین توپوگرافی سطح دریا

ژئوئید بر MSL منطبق نیست و تحت تأثیر پدیده‌های متفاوتی از جمله فشار جو، درجه حرارت، شوری آب دریا، تخلیه رودخانه به دریا، جریان‌های دریایی و غیره، اختلافی بین MSL و ژئوئید پدید می‌آید که به آن توپوگرافی سطح دریا[3] یا به اختصار SST گفته می‌شود. شکل ۵ ارتباط بین پارامترهای سطح متوسط، ژئوئید و توپوگرافی سطح دریا را نشان می‌دهد.



شکل ۵- سطح متوسط دریا، ژئوئید و توپوگرافی سطح دریا

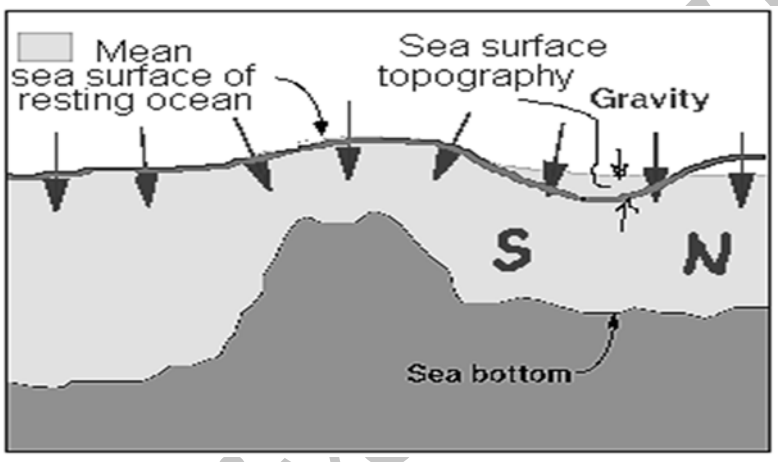
منطبق در نظرگرفتن MSL و ژئوئید در عمل موجب بروز تفاوت در صفر ارتفاعی کشورهای گوناگون شده است که راهکار مناسب برا ی حل این مشکل، مدل‌سازی توپوگرافی سطح دریا در هر ایستگاه جزر و مدی مبنا و اعمال آن به صفر ارتفاعی است.

3 Sea Surface Topography

www.SID.ir

توپوگرافی سطح دریا در مقابل توپوگرافی بستر دریا مطرح بوده و همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است تا حدودی نوعی ارتباط بین این دو سطح از نظر جاذبی وجود دارد، در واقع آرایش سطح دریا متناسب با شکل توپوگرافی بستر دریاست.

در شکل ٦ سطح عمود بر بردارهای شتاب ثقل در هر نقطه، سطح دریا را نشان می‌دهد. چگالی آب نیز یک عامل واسطه بین عوامل دینامیکی و جاذبی محسوب می‌شود، زیرا تغییر چگالی آب ناشی از عوامل دینامیکی مثل تغییر دما و فشار سطح دریا و تغییر شوری آب دریا بوده و از طرف دیگر تغییر چگالی آب باعث تغییر سطح دریا ناشی از تغییرات جاذبه می‌شود.



شکل ٦- ارتباط توپوگرافی سطح دریا و توپوگرافی بستر دریا

تعیین توپوگرافی دقیق سطح دریا به دو عامل بستگی دارد:

۱- سطح متوسط دقیق دریا: در تعیین سطح متوسط دریا به روش ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای می‌توان به یک سطح متوسط نسبتاً دقیق از سطح دریا رسید. پس سطح متوسط مطلوب سطحی است که از مشاهدات بلند مدت بدست می‌آید که هر چه طول این مدت بلندتر باشد خطای ناشی از آن روی سطح متوسط دریا نیز کمتر می‌شود.

۲- عامل دوم یعنی تعیین ژئوئید که خود بستگی به عوامل بسیاری از جمله نوع و میزان داده‌ها، روش به کارگیری و غیره دارد.

ژئوئید

بنابر تعریف گوس لیستینگ ژئوئید سطحی است هم‌پتانسیل در میدان ثقل زمین که به بهترین وجه بر سطح متوسط دریاها منطبق می‌گردد. جدایی این سطح نسبت به بیضوی جهانی بین ۸۳ و ۱۰٦- متر می‌باشد.

تعیین ژئوئید به عنوان شکل ریاضی زمین به تعبیر گوس در خشکی و دریا یکی از اهداف ژئودزی است. با توجه به تنوع اطلاعات زمینی و فضایی، روش‌های تعیین ژئوئید نیز متفاوت است. امروزه با استفاده از روش ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و روش‌های محاسباتی دیگر همچون آنالیز Cross Over و روش Adjoint می‌توان ژئوئید را با دقت سانتیمتر فقط در سطح دریاها تعیین نمود.

Archive of SID

www.SID.ir

تعیین ژئوئید در دریاها بسیار ساده‌تر از تعیین ژئوئید در خشکی‌هاست. روشی که معمولاً بسیار رایج می‌باشد روش تعیین ارتفاع ژئوئید از مدل ژئوپتانسیل می‌باشد. تعیین این نوع ژئوئید تقریبی بوده و به علت وجود جرم‌های توپوگرافی زمین در نقاط مختلف همراه با خطایی در حد دسی‌متر می‌باشد.

ژئوئید حاصل از ماهواره GOCE

سازمان فضایی اروپا، ماهواره ثقل‌سنجی خود را ۲۷ اسفند ماه سال ۸۷ راهی فضا کرد. این ماهواره با قرارگیری در ارتفاع ۲۶۰ کیلومتری سطح زمین، توزیع ثقل را در سراسر زمین سنجیده و به کمک آن امکان مدل‌سازی حرکت جریان‌های اقیانوسی را فراهم می‌نماید. علت نزدیکی مدار حرکت ماهواره GOCE به سطح زمین، نیاز این ماهواره به قرارگیری در نزدیکی سطح زمین برای سنجش دقیق گرانش است.

GOCE همچنین می‌تواند با داده‌های ارسالی خود به تعیین نحوه حرکت جریان‌های اقیانوسی که نقشی عمده در تغییر وضعیت آب و هوا دارند، کمک کند و می‌توان امیدوار بود در آینده، دانشمندان با کمک همین داده‌ها بتوانند پیش‌بینی دقیق‌تر و طولانی‌تری از وضعیت آب و هوا و تغییرات اقلیمی داشته باشند.

اما فواید این ماهواره اروپایی به همین جا ختم نمی‌شود. داده‌های ماهواره GOCE به شناخت نحوه تغییر و تحول آتشفشان‌ها و حرکت پوسته زمین با توجه به گسل‌ها (که به آن حرکت تکتونیک گفته می‌شود) نیز کمک می‌کند. دانشمندان امیدوارند داده‌های ماهواره GOCE، گامی جدید برای پیش‌بینی زلزله باشد.

اما مهم‌ترین دستاورد ماهواره GOCE، انتشار نقشه تمام‌نمای میدان ثقل در کل زمین یا به عبارتی دیگر، نقشه دقیق ژئوئید جاذبی است که به تشکیل سامانه گرانش استانداردی خواهد انجامید. دانشمندان قصد دارند از این مدل ژئوئید برای اندازه‌گیری فعالیت‌های اقیانوسی استفاده کنند و این، خود می‌تواند در تشخیص دقیق جریان‌های گردشی اقیانوسی و تغییر ارتفاع سطح آب‌های اقیانوس مؤثر واقع شود.

اصلی‌ترین ابزار GOCE، گرادیومتر است که شامل سه جفت شتاب‌سنج یکسان برای آشکارسازی تغییرات بسیار جزئی گرانش به کوچکی یک در ده هزار میلیارد می‌شود. شتاب‌سنج‌ها با سه بازوی خود در سه جهتِ گذر ماهواره GOCE، عمود بر مسیر پرواز و به سوی مرکز زمین قرار گرفته‌اند تا کوچکترین تغییرات گرانشی را به دقت ثبت کنند.

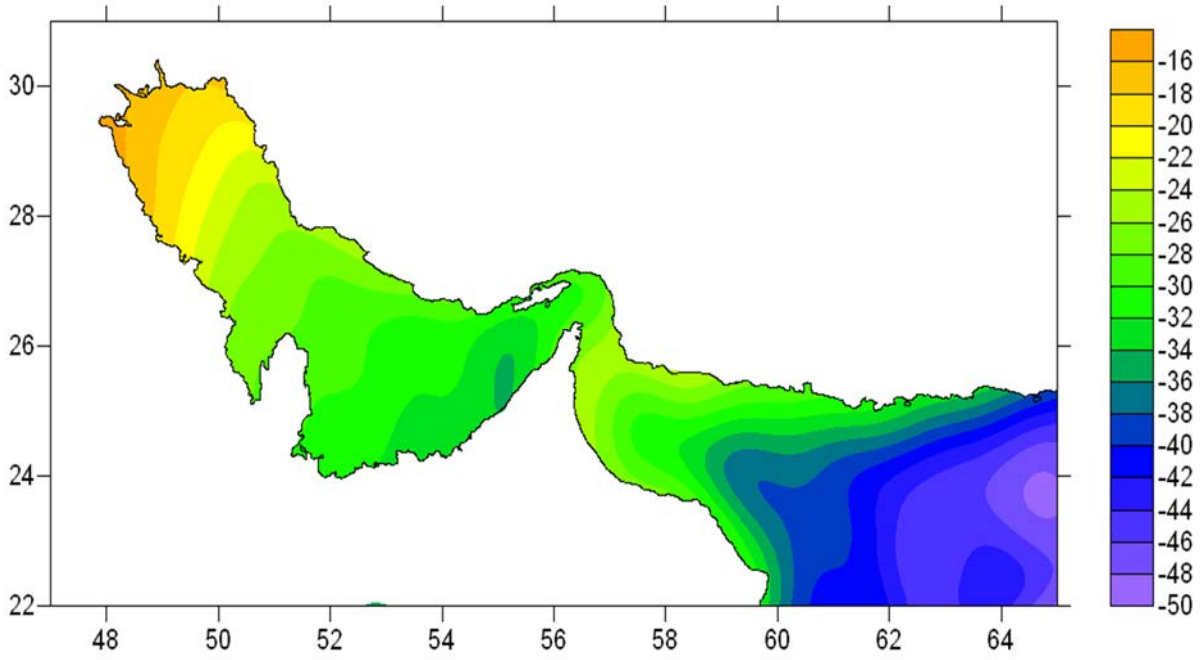
با گذر ماهواره GOCE با سرعت ۸ کیلومتر بر ثانیه از فراز زمین، میزان کشش هر کدام از شتاب‌سنج‌ها ثبت می‌شود. بدین ترتیب با یکپارچگی ۶ بار خواندن و سنجش این شتاب‌سنج‌ها، مدل ژئوئیدی با دقت در حد ۲ و نیم سانتیمتر، قابل تعیین می‌باشد. هر کدام از شیب‌پیماها دارای جسمی هستند که آزادانه در گرانش زمین حرکت می‌کند. با رصد این داده‌ها که هر ثانیه گرفته می‌شود، هر ۲۰ دقیقه نقشه کاملی از میدان ثقل کل سطح زمین بدست می‌آید. شتاب سنج‌های ماهواره GOCE، ۱۰۰ بار حساس‌تر از حسگرهای مأموریت آمریکایی-آلمانی GRACE است و اطلاعات گردآوری شده آن هزار بار دقیق‌تر از ماهواره آلمانی CHAMP خواهد بود.

Archive of SID

www.SID.ir

اولین سری مدل‌های جهانی ژئوئید این ماهواره از ماه آگوست ۲۰۱۰ با قدرت تفکیک ۱۰۰ کیلومتر (۳ برابر بهتر از قدرت تفکیک داده‌های ماهواره GRACE ناسا که در سال ۲۰۰۲ پرتاب شده است) از سوی آژانس فضایی اروپا در اختیار جامعه علمی دنیا قرار گرفته است. در این مقاله از آخرین مدل قابل دسترس این ماهواره در سال ۲۰۱۰ به نام GO_CONS_GCF_2_DIR (Bruinsma et al., 2010) که ضرایب هارمونیک‌های کروی آن تا درجه و مرتبه ۲٤۰ و بدون ترکیب داده‌های زمینی است، استفاده گردیده است.

شکل ۷ نقشه ژئوئید حاصل از این مدل را در منطقه تحت مطالعه نشان می‌دهد.



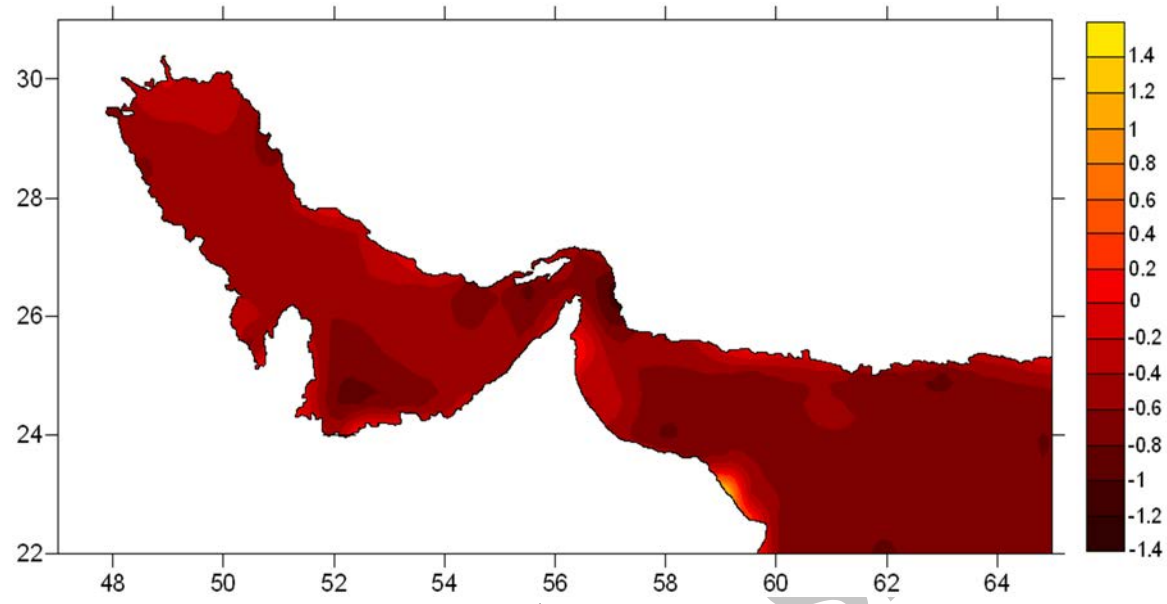
شکل ۷- ژئوئید حاصل از ماهواره GOCE در واحد متر

بنابراین در این مرحله پس از محاسبه ژئوئید حاصل از ماهواره GOCE و همچنین محاسبه MSL با استفاده از روش ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای باید کمیت SST را محاسبه کنیم که همانطور که می‌دانیم برابر اختلاف بین ژئوئید و سطح متوسط دریا می‌باشد.

$$SST\big|_{(\varphi,\lambda)} = MSL\big|_{(\varphi,\lambda)} - N_{geoid}\big|_{(\varphi,\lambda)} \qquad (۱۰)$$

نتیجه حاصل از محاسبه مقدار SST در شکل ۸ نشان داده شده است.

www.SID.ir



شکل ۸ - توپوگرافی سطح آب در واحد متر

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

به منظور تهیه نقشه جدید توپوگرافی سطح دریا در محدوده دریای عمان و خلیج فارس، از تلفیق اطلاعات داده‌های ماهواره‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای توپکس- پوزایدون به صورت نقطه‌ای در طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۳ و مدل ژئوئید دقیق جهانی ماهواره GOCE استفاده گردید. مدل ژئوئید ماهواره GOCE مبتنی بر داده‌های گرادیومتری هست که نسبت به ماهواره‌های GARCE حساسیتی معادل ۱۰۰ برابر را دارا می‌باشد.

اختلاف سطح متوسط آب‌های آزاد حاصل از مدل ارتفاع سنجی ماهواره‌ای و ژئوئید جهانی GOCE در بازه ۱.٤ ± متر و میانگین ۰/۳- متر تعیین گردید. این مدل می‌تواند در تصحیح مبنای ارتفاعی ایران که بر اساس اندازه گیری سطح متوسط آب‌های آزاد با تایدگیج می‌باشد، مورد استفاده قرار گیرد. مدل توپوگرافی سطح دریا همچنین برای مدل‌سازی جریان‌های دریایی در اقیانوس شناسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

برای ارزیابی بهتر توصیه می‌شود در صورت فراهم بودن داده‌های گرانی متراکم و با توزیع مناسب از منطقه، به جای استفاده از مدل‌های جهانی ژئوئید، از مدل‌های محلی استفاده گردد (Kiamehr, 2006). با توجه به تعداد بسیار محدود داده‌های گرانی، استفاده از مدل‌های جهانی ژئوئید توصیه می‌گردد (Kiamehr, 2007a).

Archive of SID

www.SID.ir

منابع

۱- پورشریفی، ع (۱۳۸۵)، «تعیین توپوگرافی سطح دریا در خلیج فارس و دریای عمان با تلفیق داده‌های آلتیمتری T/P و ERS1 و با استفاده از مدل جزر و مدی به دست آمده از آلتیمتری»، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری ژئودزی، دانشکده نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- جعفری، ع (۱۳۸۵)، «بررسی روند تغییرات سطح آب دریای خزر با استفاده از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای و تایدگیج‌های ساحلی»، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری ژئودزی، دانشکده فنی دانشگاه تهران

۳- جلیل نژاد، م (۱۳۸۵)، «ارزیابی مدل‌های سطح متوسط دریا بر اساس داده‌های ماهواره‌های ارتفاع سنجی»، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری ژئودزی، دانشکده فنی دانشگاه تهران

٤- ترابی، م (۱۳۸۵)، «آنالیز طیفی نقطه‌ای مشاهدات ماهواره ارتفاع سنجیT/P به منظور مدل‌سازی سطح متوسط دریا»، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری هیدروگرافی، دانشکده فنی دانشگاه تهران

۵- صنایعی، ر (۱۳۸٤)، «بررسی اعتبار داده‌های ثقلی دریایی از طریق ارتفاع سنجی ماهواره‌ای»، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری ژئودزی، دانشکده فنی دانشگاه تهران

٦- سهرابی اطهر، م (۱۳۸۲)، «تهیه چارت‌های دریایی با استفاده از مختصات ۳ بعدی GPS و مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای»، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری ژئودزی، دانشکده فنی دانشگاه تهران

۷- مسیب زاده، م (۱۳۸۱)، «تعیین توپوگرافی سطح آب در خلیج فارس و دریای عمان از طریق تلفیق GPS و مشاهدات تایدگیج‌ها»، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری ژئودزی، دانشکده فنی دانشگاه تهران

۸- رستمی، ق (۱۳۸۱)، «تعیین توپوگرافی سطح آب دریای عمان و خلیج فارس از طریق مشاهدات ماهواره‌ای»، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری ژئودزی، دانشکده فنی دانشگاه تهران

۹- عرب صاحبی، ا (۱۳۸۳)، «تعیین میدان ثقل زمین از طریق مشاهدات ارتفاع سنجی»، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری ژئودزی، دانشکده فنی دانشگاه تهران

10- Beckley BD, Lemoine FG, Luthcke SB, Ray RD and Zelensky NP, (2007), "A reassessment of global and regional mean sea level trends from TOPEX and Jason-1 altimetry based on revised reference frame and orbits", ***Geophys. Res. Lett***., 34, L14608

11- Bruinsma S.L., Marty J.C., Balmino G., Biancale R., Foerste C., Abrikosov O. and Neumayer H, (2010), "GOCE Gravity Field Recovery by Means of the Direct Numerical Method", presented at the ESA Living Planet Symposium, 27th June - 2nd July, Bergen, Norway; See also: earth.esa.int/GOCE

Archive of SID

www.SID.ir

12- Hashemi, H and Ardalan A (2004), "A new model for global ocean tide based on ortho-normalized base functions and 11 years of Topex/Poseidon satellite altimetry data", ***Geophysical Research Abstracts*** 6: 00649, European Geosciences Union 2004.

13- Kiamehr, R., (2010), "The New Quasi-Geoid Model IRQG09 for Iran", ***J Applied Geophysics***, 73(1): 65-73

14- Kiamehr, R., (2007a), "Qualification and refinement of the gravity database based on cross-validation approach — a case study of Iran", ***Geod. Geoph. Hung***. 42(3):285-295

15- Kiamehr, R., (2007b), "A new height datum for Iran based on the combination of gravimetric and geometric models, Acta", ***Geod. Geoph. Hung***. 42(1):69–81

16- Kiamehr, R., (2006), "A strategy for determining the regional geoid in developing countries by combining limited ground data with satellite-based global geopotential and topographical models: A case study of Iran", ***J Geod***, 79,10,11), 602–612

17- Marsh, J. G., et al. (1990), "Dynamic sea surface topography, gravity, and improved orbit accuracies from the direct evaluation of seasat altimeter data", ***J. Geophys***. *Res.,* 95, 13129-13150.

18- Rapp, R. H., and Smith, D. A. (1994), "Preliminary estimates of Gulf Stream characteristics from TOPEX data and a precise gravimetric geoid", ***J. Geophys***. *Res.* 99, 24,707-24,723.

Archive of SID

www.SID.ir