

مدل توپوگرافی متوسط دینامیکی منطقه شمال اقیانوس هند با استفاده از داده‌های سنجش از دور

مهدی نجفی علمداری^۱

مسعود ترابی آزاد^۲

علی حکیمی^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۲/۰۶

چکیده

در این تحقیق مدل جدید توپوگرافی متوسط دینامیک با نام انتخابی MDT_IAU_TN_2014 ارائه می‌شود. همچنین بردارهای سرعت جریان‌های دائمی سطحی در شبکه‌ای با ابعاد ۲ دقیقه در منطقه خلیج فارس، دریای عمان و شمال اقیانوس هند محاسبه گردیده است. این مدل با استفاده از سطح متوسط دریاها به دست آمده از ۶ ماهواره ارتفاع سنجی (توپکس پوزیدن، جیسون ۱ و ۲، ای.ار.اس ۱ و ۲ و ادامه ماموریت ژئوست) و داده‌های ثقل سنجی ماهواره گوس به ترتیب در بازه‌های زمانی مشخص ۲۱ و ۴ سال محاسبه شده است. نتایج این مدل با مدل سطح متوسط دریاها MSS_CNES_CLS11 مقایسه شده که خطای جذر میانگین مربع‌ها (RMS) ۰/۱ متر دارد. برای یکسان سازی مدل ژئوئید گوس و سطح متوسط دریاها از نظر طیفی، از فیلتر کوتاه شده گوس با شعاع ۱/۳۸۶ درجه در راستای طول و عرض جغرافیایی استفاده شده است. نتایج مدل توپوگرافی متوسط دینامیک محاسباتی مذکور با مدل جهانی توپوگرافی متوسط دینامیکی که با استفاده از داده‌های ارتفاع سنجی و داده‌های دو ماهه گوس به دست آمده، ترمیم گردید. با مقایسه مدل توپوگرافی متوسط دینامیک محاسباتی با دو مدل جهانی، خطای جذر میانگین مربع‌ها به ترتیب ۰/۰۳۳ و ۰/۰۵۱ متر به دست آمد. بردارهای جریان ژئوستروفیک با بردارهای جریان اکمن حاصل از ۲۲ سال داده‌های بادهای سطحی جمع شده و جریان‌های دائمی سطحی محاسبه گردیدند. مقایسه جریان‌های کلی مدل ارائه شده در این تحقیق با جریان‌های سطحی به دست آمده از داده‌های OSCAR به عمل آمد، و خطای جذر میانگین مربع‌ها در مؤلفه‌های شمالی-جنوبی و شرقی-غربی جریان آب دریا به ترتیب ۰/۰۴۷ و ۰/۰۳۱ متر بر ثانیه محاسبه شد. بردار سرعت جریان‌های حاصل از مدل MDT_IAU_TN_2014، در منطقه شمال اقیانوس هند بین ۰ تا ۰/۶۱ متر بر ثانیه تغییر می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: توپوگرافی متوسط دینامیک، جریان‌های ژئوستروفیک، سطح متوسط دریا، ژئوئید، سنجش از دور، شمال اقیانوس هند

۱- دانشیار گروه هیدروگرافی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران mnajalm@yahoo.com

۲- دانشیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران (نویسنده مسئول) torabi_us@yahoo.com

۳- کارشناس ارشد هیدروگرافی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران hakimi.ali68@gmail.com

۱. مقدمه

جریان‌های ژئوستروفیک را به همراه دارد و از تفاضل سطح متوسط دریاهای MSS_CLS01^۳ از ۴/۵ سال داده‌های ماهواره گریس به دست آمده است (Hernandez, F. & Schaeffer, P., 2001). در این تحقیق، از مجموعه‌ای از ضرایب ژئوتانسیل ماهواره گوس به دست آمده از ۴ سال داده این ماهواره برای محاسبه ارتفاع ژئوئید مرجع در خلیج فارس، دریای عمان و بخشی از اقیانوس هند (منطقه مطالعاتی) استفاده شده است. همچنین مدل سطح متوسط دریاهای MSS_IAU_TN_2014^۴ توسط گروه هیدروگرافی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال محاسبه گردیده است.

این مدل شامل مجموعاً ۲۱ سال داده‌های ۶ ماهواره ارتفاع سنجی از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۳ میلادی می‌باشد، و در شبکه‌ای از نقاط با فاصله ۲ دقیقه کمانی است.

ماهواره‌های موجود در این مدل توپکس پوزیدن، جیسون ۲ا و ۱، ای.ار.اس ۲ا و ۱ و ادامه مأموریت ماهواره ژئوست می‌باشند. دیتوم مرجع MSS_IAU_TN_2014 و ارتفاع ژئوئید، بیضوی مرجع ماهواره توپکس پوزیدن قرار داده شده است و هر دو سطح در سیستم جزر و مد میانگین (Mean-Tide) می‌باشند (Hughes & Bingham, 2008).

با توجه به اینکه بیضوی مرجع یک سطح تراز نیست، سطح متوسط دریاهای نسبت به بیضوی مرجع برای محاسبه جریان‌های دائمی قابل استفاده نمی‌باشد. از این جهت، سطح متوسط دریاهای می‌بایست از بیضوی مرجع به سطح ژئوئید تغییر یابد تا به یک سطح دینامیک تبدیل شود. سطح متوسط دریاهای تغییر یافته به یک سطح دینامیک، در این تحقیق MSS_IAU_TN_2014 نام دارد.

براساس نتایج این تحقیق، متوسط پتانسیل ژئوئید در فاصله زمانی ژوئیه ۲۰۰۸ تا سپتامبر ۲۰۱۰ در حدود ۲/۲ مترمربع بر مجذور ثانیه است و بیشترین مقدار تغییرات زمانی ماهانه آن با دوره تناوب نیمه سالانه می‌باشد (عمادی ر.ا، نجفی علمداری م، سبزواری، م، ۱۳۹۰).

توپوگرافی متوسط دینامیک دریاهای از تفاضل دو سطح متوسط دریا و ارتفاع ژئوئید محاسبه می‌شود. ژئوئید همان سطح دریا با فرض حذف نیروهای اغتشاشی (جزر و مد، بادهای، جریان‌ها و ...) می‌باشد. ژئوئید به عنوان یک سطح هم پتانسیل بیانگر میدان ثقل زمین است و ارتفاع آن نسبت به بیضی مرجع در کل جهان تغییراتی حدود ۱۰۰ متر در طول هزاران کیلومتر فاصله دارد. سطح متوسط دریاهای بیانگر تراز آب نسبت به یک پدیده ثابت (ژئوئید) است. سطح متوسط دریاهای با استفاده از داده‌های ارتفاع سنجی به دست می‌آید. توپوگرافی متوسط دینامیک بخش دائمی و ثابت توپوگرافی سطح دریا می‌باشد. این بخش تماماً محصول ماهواره ارتفاع سنجی نیست و باید از تفاضل سطح متوسط دریاهای ژئوئید حاصل شود و سپس جهت دست یابی به تغییرات این مؤلفه با اطلاعات جریان سنج‌ها و داده‌های محلی تلفیق گردد. افزایش دانش بشر نسبت به این مؤلفه دینامیکی، پایه‌گذار محاسبه هرچه بهتر جریان‌های سطحی دائمی دریایی می‌باشد. از محاسبه شیب توپوگرافی متوسط دینامیک نسبت به ژئوئید، جهت جریان‌های ژئوستروفیک به دست می‌آید. از تعادل نیروهای گرادیان فشار در آب دریا و نیروی کوریولی جریان‌های افقی با عنوان ژئوستروفیک نتیجه می‌شود. در زمان انجام این تحقیق داده‌های دو مدل توپوگرافی متوسط دینامیک موجود بوده است، مدل دانشگاه فنی دانمارک با نام MDT_DTU_2010^۱ که بر شبکه‌ای از نقاط ۲ دقیقه‌ای در اختیار قرار داده شده است (Knudsen & Andersen, 2010 Knudsen et al, 2011;).

این مدل از تفاضل مدل سطح متوسط دریاهای و داده‌های اولیه دو ماهه ماهواره گوس تشکیل شده است. مدل دیگر با نام MDT_CNES_CLS09^۲ که بر شبکه‌ای از نقاط پانزده دقیقه در اختیار قرار داده شده است (Rio et al, 2011). مدل اخیر داده‌های مولفه‌های شرقی-غربی و شمالی-جنوبی

3- Mean Sea Surface Collecte Localication Satellites 2009.

4- Mean Sea Surface - Islamic Azad University - Tehran - North Branch 2014.

1- Mean Dynamic Topography Denmark Technical Univaersity 2010.

2- Mean Dynamic Topography Denmark Topography Center National dEtudes Spatiales

۲. روش تحقیق

توپکس پوزیدون (و نیز جیسون ۲) به دلیل بزرگترین بازه زمانی مشاهدات و مرتفع ترین و دقیق ترین مدار (جهت تصحیح داده‌ها و در نظر گرفتن تأثیر کشند و سایر تصحیحات فیزیکی مانند تروپوسفر خشک و تر، یونوسفر، جابجایی‌های سطح دریا و همچنین بیضوی مرجع اعمال شده است. توپکس پوزیدون (AVISO/ALTIMETRY, 1996). جیسون ۱ (AVISO and PODAAC USER HANDBOOK, 2012). جیسون ۲ (OSTM/Jason-2 Products Handbook, 2001). ای.ار.اس ۲ (RA/ATSR products - User Manual, 2001). ادامه مأموریت ژئوست (GEOSAT Follow-On GDR User's Handbook, 2002). ارتفاعات سطح دریا بر روی منطقه خلیج فارس، دریای عمان و بخشی از اقیانوس هند محاسبه و پس از اعمال تصحیحات ذکر شده، ارتفاعات میانگین بر روی گذرهای ماهواره‌ها محاسبه شده‌اند. بعد از استخراج ارتفاعات میانگین از نرم افزار، ارتفاعات میانگین ماهواره ای.ار.اس ۲ از بیضوی WGS84 به بیضوی توپکس منتقل شده است (Vanicek & Krakiwsky, 1986). از میان ماهواره‌های ارتفاع سنجی مورد استفاده در این تحقیق، ماهواره جیسون ۲ و ادامه مأموریت ژئوست، قابلیت ارتفاع سنجی در آب‌های کم عمق و سواحل را دارند. اطلاعات باقی ماهواره‌ها بعد از اعمال تصحیحات مربوط به کشند اقیانوسی و تصحیحات مربوط به بانده Ku در خلیج فارس فاقد اعتبار است که حذف می‌گردند، اما داده‌های آن‌ها در دریای عمان و اقیانوس هند قابل پردازش می‌باشد. بنابراین در محدوده خلیج فارس، داده‌های دو ماهواره جیسون ۲ و ادامه مأموریت ژئوست و در سایر نقاط، داده‌های هر شش ماهواره قابل پردازش و دست یابی به ارتفاعات میانگین است.

برای یکسان‌سازی نهایی داده‌های ارتفاع سنجی در منطقه مطالعاتی، اختلافات ارتفاعات میانگین تمامی ماهواره‌ها با داده‌های توپکس پوزیدون مقایسه و سپس با برازش منحنی گوس با سطح اطمینان ۹۵ درصد بررسی و اختلافات خارج از منحنی از مجموعه داده‌ها حذف گردید. بیشترین داده‌های حذف شده برای ماهواره ای.ار.اس ۱ می‌باشد که در حدود

داده‌های ارتفاع سنجی با پوشش مناسب از سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۳ میلادی (۲۱ سال) در منطقه مطالعاتی از ماهواره‌های توپکس پوزیدون (Topex Poseidon)، جیسون ۱ (Jason)، ادامه مأموریت ژئوست (Geosat Follow-On) با اطلاعات ثبت شده ژئوفیزیکی (Geophysical Data Record) و ماهواره‌های ای.ار.اس ۲ (ERS) با اطلاعات محصول اقیانوسی (Ocean Product Record) برای محاسبه مدل MSS_IAU_TN_2014 استفاده شده است. برای ماهواره ای.ار.اس ۱ فقط از دو فاز مأموریت ژئودتیک این ماهواره (E, F) که مأموریت آن تکرارناپذیر می‌باشد، استفاده شده است. مطالعات انجام شده در سال ۱۹۹۸ توسط سرست (CERSAT) تصحیحاتی را به مدار ماهواره‌های ای.ار.اس اعمال کرده است (Le Traon & Ogor, 1998) که موجب تقویت و بهبود دقت مدارهای این دو ماهواره شده است (RA/ATSR products - User Manual, 2001). اما عدم دسترسی به اطلاعات دقیق از موقعیت دقیق مکانی تقاطع مشاهدات ماهواره‌های ای.ار.اس-ای.ار.اس و ای.ار.اس-توپکس موجب گشت تا از بررسی این بهبود مداری صرف نظر گردد. جهت محاسبه سطح متوسط دریاها، ابتدا نیاز به محاسبه میانگین ارتفاعات سطح دریا در راستای گذر ماهواره می‌باشد که به آن ارتفاع میانگین می‌گویند. ارتفاع سطح دریا از رابطه (۱) به دست می‌آید:

(۱)

مشاهده طولی ماهواره از سطح دریا + تصحیحات
ارتفاع سطح دریا = ارتفاع ماهواره از سطح بیضوی مرجع -

مقدار میانگین ارتفاع سطح دریا در طول زمان بر روی یک گذر را ارتفاع میانگین می‌نامند. جهت محاسبه ارتفاعات میانگین تمامی ماهواره‌ها از نرم افزار تخصصی جعبه ابزار پایه ارتفاع سنجی راداری BRAT (Basic Radar Altimetry Toolbox) نسخه ۳,۱,۰ استفاده شده است. جمله تصحیحات در رابطه ۱ با توجه به مدل‌های یاد شده در کتاب‌های راهنمای ماهواره‌ها با مرجع قرار دادن ماهواره

جعبه ابزار گوس با نام GOCE User Toolbox (GUT) نسخه ۲,۱ استفاده گردید. رابطه محاسبه ارتفاع ژئوئید به صورت کامل در مرجع ESA-GUT-AD-001 شرح داده شده است. ارتفاعات ژئوئیدی گوس با EGM08 (Pavlis et al, 2012) و EIGEN-6C (Forste et al, 2012) مقایسه گردید.

استفاده از یک فیلتر برای از میان بردن خطاهای کوچک مقیاس (درجه بالای) ژئوئید ضروری می باشد. برای این منظور از یک فیلتر کوتاه شده گوس (Truncated Gaussian filter) با شعاع ۱/۳۸۶ درجه در فضای مکانی استفاده شده است (Rio et al, 2011). برای مطالعات منطقه ای توپوگرافی متوسط دینامیک روش فیلترگذاری در فضای مکانی بیشتر تأثیرگذار خواهد بود (Knudsen & Andersen, 2010). اطلاعات بیشتر در مورد فیلتر گوس و کرنل آن در راهنمای الگوریتم های نرم افزار GUT در دسترس می باشد (GUT User Guide and Algorithm Descriptions, 2011).

برای محاسبه جریان های ژئوستروفیک در سطح دریا، شیب توپوگرافی متوسط دینامیک در راستای شرقی-غربی و شمالی-جنوبی $(\frac{\partial \zeta}{\partial x}, \frac{\partial \zeta}{\partial y})$ با استفاده از روابط ۲ (الف) و (ب) محاسبه می شود (Stewart R.H, 2008).

$$u = -\frac{g}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (۲-الف)$$

$$v = \frac{g}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (۲-ب)$$

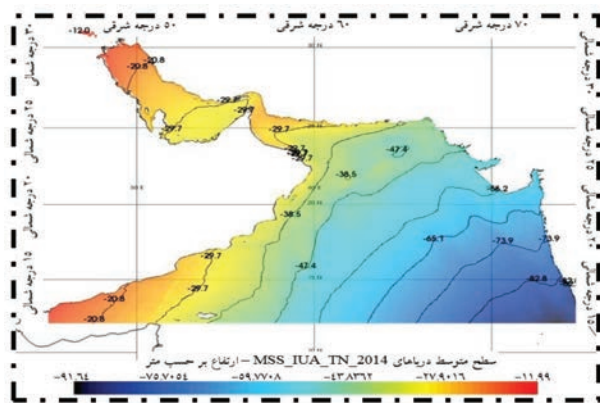
این روابط نتیجه تعادل میان گرادیان فشار سطحی و شتاب کوریولی در سطح دریا می باشد. که در رابطه اخیر u مؤلفه شرقی-غربی و v مؤلفه شمالی-جنوبی سرعت جریان ژئوستروفیک، g توپوگرافی متوسط دینامیک، g شتاب ثقل و f پارامتر کوریولی است که برابر $2\Omega \sin \phi$ است که در آن $|\Omega| = 10^{-5} \times 7.292 \text{radian/s}$ سرعت زاویه ای گردش زمین می باشد که حاصل تقسیم 2π بر یک روز نجومی است.

اکمن جریان آب ناشی از باد در سطح دریا را با در نظر گرفتن تعادل بین نیروهای کوریولی و اصطکاک به دست

۲۰۰ از ۵۸۳۱ نقطه است که البته به دلیل تفاوت در تفکیک مکانی دو ماهواره توپکس پوزیدن و ای.ار.اس ۱ می باشد (فاصله دو گذر متوالی در استوا برای ماهواره ای.ار.اس ۱، ۸ کیلومتر و برای ماهواره توپکس پوزیدن ۳۱۵ کیلومتر است). همچنین کمترین میزان داده های حذف شده مربوط به ماهواره جیسون ۱ در حدود ۵۰ از ۱۶۱۷۴ می باشد که به دلیل یکسان بودن مدار دو ماهواره است. پس از حذف مشاهدات خارج از منحنی گوس با سطح اطمینان ۹۵ درصد، متوسط تمامی داده ها بر روی نقاط مشترک محاسبه شده و در نهایت با روش درون یابی خطی بر روی شبکه ای از نقاط ۲ دقیقه در راستای طول و عرض جغرافیایی گسترانده شدند. نتیجه نهایی تحت عنوان MSS_IAU_TN_2014 نامگذاری گردید. ارزیابی از مدل های سطح متوسط دریا با استفاده از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره ای نیز ارائه شده است (جلیل نژاد و همکاران ۱۳۸۵). همچنین در خصوص محاسبه سطح متوسط دریاها در ناحیه دریای عمان تحقیقی انجام شده که در آن از سطح تراز متوسط دریاها استفاده شده است (لاری، ک.، ابره دری، م.، ۱۳۹۱).

ماهواره گوس از سال ۲۰۰۹ آغاز به کار کرده که هدف آن کسب اطلاعات دقیق از میدان ثقل زمین و محاسبه ژئوئید با دقت زیاد و تفکیک مکانی فراتر نسبت به مأموریت سایر ماهواره ها بوده است. همچنین هدف دیگر این ماهواره کسب اطلاعات از جریان های دریایی است که نقش اساسی در انتقال انرژی در سطح کره زمین، تغییرات سطح تراز آب و اتفاقات درون زمینی دارد (ESA SP-1233, 1999). ارتفاعات ژئوئید نیز با استفاده از داده های مرتبه ۲ ماهواره گوس از روش راه حل مستقیم محاسبه شده است (Pail et al, 2011). نتیجه نهایی GOCE_DIR4th نامگذاری گردید. در زمان انجام تحقیق، آخرین نسخه داده های موجود این ماهواره، نسل چهارم آن از نوامبر سال ۲۰۰۹ تا اکتبر ماه ۲۰۱۲ با پوشش جهانی بوده است. این نسل از داده ها تا حداکثر ۲۶۰ درجه و مرتبه از ضرایب هارمونیک کروی، ژئوئید را محاسبه می کند. به منظور دست یابی به ارتفاع ژئوئید GOCE_DIR4th از

u مؤلفه شرقی-غربی (نگاره ۳-الف) و v مؤلفه شمالی-جنوبی (نگاره ۳-ب) مؤلفه‌های سرعت جریان ژئوستروفیک است. نتیجه جریان‌های ژئوستروفیک در نگاره ۳-ج و بردار سرعت جریان‌ها با استفاده از $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ در نگاره ۳-د نشان داده شده است. در نهایت بردارهای جریان ژئوستروفیک حاصل از MDT_IAU_TN_2014 با متوسط بردارهای جریان اکمن (نگاره ۴-الف) حاصل از ۲۲ سال داده‌های بادهای سطحی جمع شده و جریان‌های دائمی سطحی به دست آمدند (نگاره ۴-ب).



نگاره ۱: سطح متوسط دریا‌های MSS_IAU_TN_2014 نسبت به بیضوی مرجع ماهواره توپکس

برای اعتبارسنجی از داده‌ها در پوشش جهانی توسط OSCAR استفاده شده است (Bonjean and Lagerloef, 2002) که می‌توان آن‌ها را در ابعاد ۱ درجه در طول زمان متوسط گیری کرد. البته فقط در جنوب منطقه مطالعاتی این داده‌ها پوشش دارند. OSCAR محصول داده‌های ماهواره‌ها می‌باشد که جریان‌های سطحی دریایی را نشان می‌دهد (Agarvadekar et al, 2014). با توجه به پوشش زمانی سطح متوسط دریاها، داده‌های OSCAR از جولای سال ۱۹۹۳ تا جولای ۲۰۱۳ متوسط گیری شده است. نگاره ۵-الف و ب مؤلفه‌های شرقی-غربی و شمالی-جنوبی جریان‌های سطحی داده‌های OSCAR را نشان می‌دهد.

بر اساس تحلیل داده‌های ارتفاعسنجی ماهواره‌ای، اختلاف میان ارتفاع میانگین توپوکس پوزیدن و ای.ار. اس ۱ نسبت به سایر ماهواره‌ها بیشتر می‌باشد؛ و این به

آورد. رابطه ۳ نحوه محاسبه مؤلفه‌های سرعت جریان‌های اکمن را نشان می‌دهد (Stewart RH, 2008).

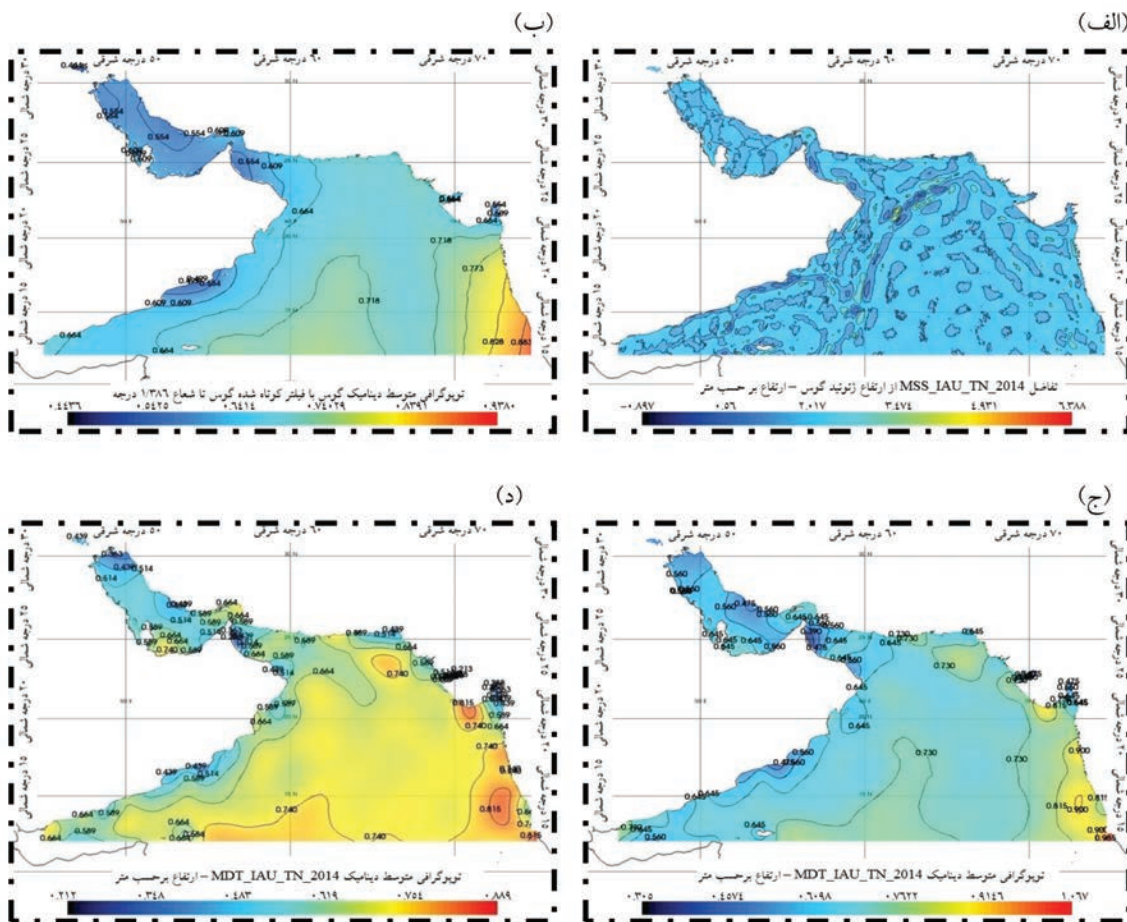
$$[u_E(z)^2 + v_E(z)^2]^{1/2} = V_0 e^{\alpha z} \quad (3)$$

در رابطه (۳) u_E مؤلفه شرقی-غربی جریان‌های اکمن، v_E مؤلفه شمالی-جنوبی جریان‌های اکمن، وقتی باد به سمت شمال می‌وزد، $T = T_{yz}$ (مؤلفه تنش باد) و مقادیر ثابت برابرند با $a = \sqrt{\frac{f}{2A_z}}$, $V_0 = \frac{T}{\sqrt{\rho_w f A_z}}$ در رابطه اخیر ρ_w چگالی سطحی آب دریا، A_z ضریب ویسکوزیته و پارامتر کوریولی است.

۳- بحث

نگاره (۱) سطح متوسط منطقه شمال اقیانوس هند رانسبت به بیضوی مرجع ماهواره توپکس بر اساس نتایج مدل MSS_IAU_TN_2014 نشان می‌دهد. به منظور دستیابی به توپوگرافی متوسط دینامیک، تفاضل سطح MSS_IAU_TN_2014 از ارتفاع ژئوئید GOCE_DIR4th محاسبه گردید (نگاره ۲-الف).

فیلتر کوتاه شده گوس با شعاع ۱/۳۸۶ درجه استفاده گردیده است تا بخش‌های بالاتر را فیلتر کند (نگاره ۲-ب). سطح متوسط دریاها در این مرحله دیگر اطلاعات بالاتر حاصل از تفاضل دوسطح را به همراه ندارد. از این رو برای بازگرداندن این اطلاعات از مدل MDT_DTU_2010 (نگاره ۲-ج) استفاده گردید. بنابراین باردیگر فیلتر کوتاه شده گوس استفاده شده و بر مدل MDT_DTU_2010 اعمال شد. برای به دست آوردن اطلاعات درجه بالای مورد نظر، حاصل فیلتر شده از MDT_DTU_2010 کسر گردید. در نهایت مقدار به دست آمده به تفاضل MSS_IAU_TN_2014 از GOCE_DIR4th اضافه شده تا مدل MDT_IAU_TN_2014 تکمیل گردد (نگاره ۲-د). جدول (۱) اطلاعات آماری مدل MDT_IAU_TN_2014 را در مقایسه با MDT_DTU_2010 و MDT_CNES_CLS09 نشان می‌دهد.



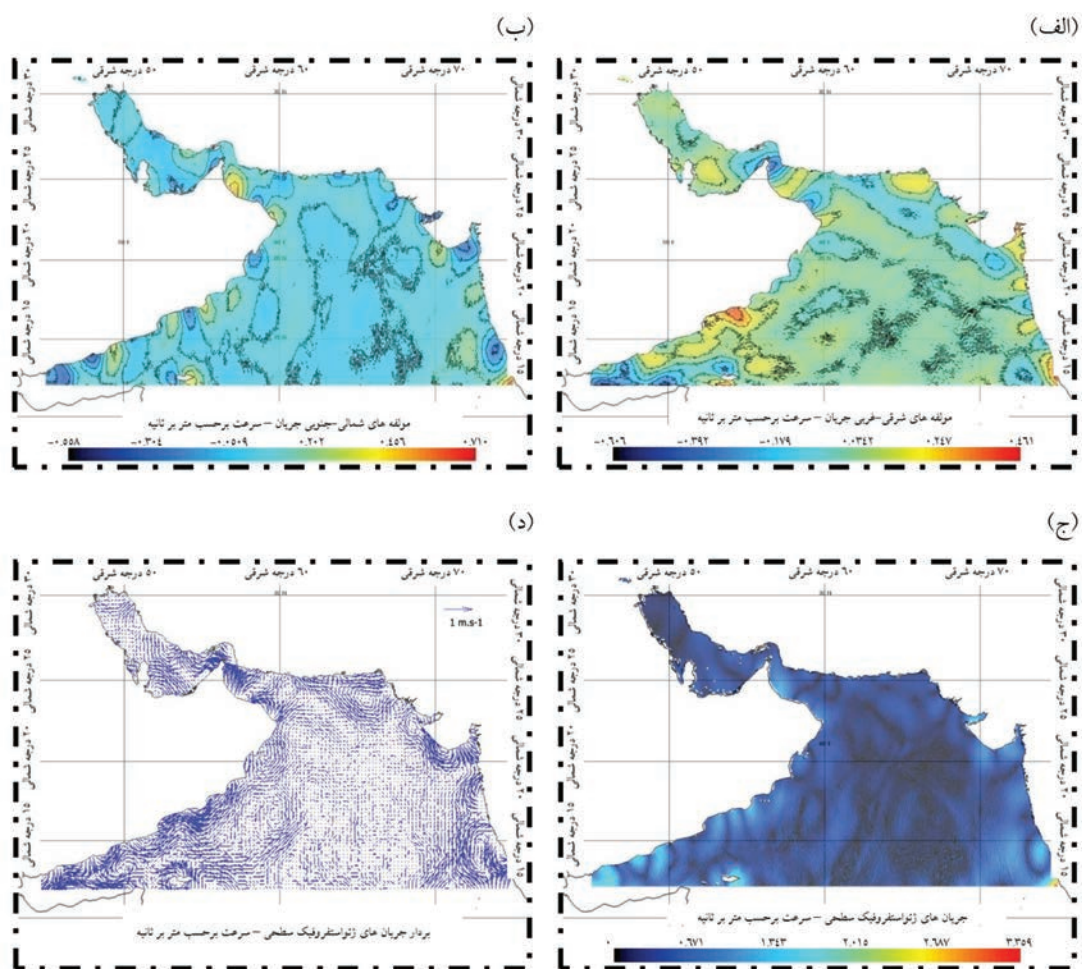
نگاره ۲: (الف) تفاضل، MSS_IAU_TN_2014 از ژئوئید گوس
 (ب) توپوگرافی متوسط دینامیک گوس با فیلتر کوتاه شده گوس تا شعاع ۱/۳۸۶ درجه،
 MDT_IAU_TN_2014 (ج)
 MDT_DTU_2010 (د)

جدول ۱: اطلاعات آماری مدل‌های توپوگرافی متوسط دینامیک

MDT_CNES_CLS09	MDT_DTU_2010	MDT_IAU_TN_2014	
۱۵' * ۱۵'	۲' * ۲'	۲' * ۲'	تفکیک مکانی
۰/۴۳۶	۰/۲۱۲	۰/۳۰۵	کمینه (متر)
۰/۸۰۰	۰/۸۹۰	۰/۹۱۰	بیشینه (متر)
IAU_TN_2014 به مدل ۰/۰۵۱ / نسبت	CNES_CLS09 به مدل ۰/۰۵۴ / نسبت	DTU-2010 به مدل ۰/۰۳۳ / نسبت	RMS (متر)

۰/۴ TN_2014 را نسبت به MSS_CNES_CLS_2011 از ۰/۴ متر (بدون حضور داده‌های ای.ار.اس ۱ در مجموعه داده ها) به ۰/۱ متر (با حضور داده‌های ای.ار.اس ۱) کاهش می‌دهد. این افزایش دقت احتمالاً به دلیل تفکیک مکانی

دلیل اختلاف میان گذر ماهواره‌ها و ارتفاع مدارهای این دو ماهواره می‌باشد (توپکس پوزیدن ۱۳۳۶ کیلومتر و ای.ار.اس ۱ ۷۸۵ کیلومتر). اضافه کردن داده‌های ای.ار.اس ۱ به مجموعه داده ها، در کل RMS اختلافات MSS_IAU_



نگاره ۳: (الف) مؤلفه های شرقی-غربی سرعت جریان MDT_IAU_TN_2014

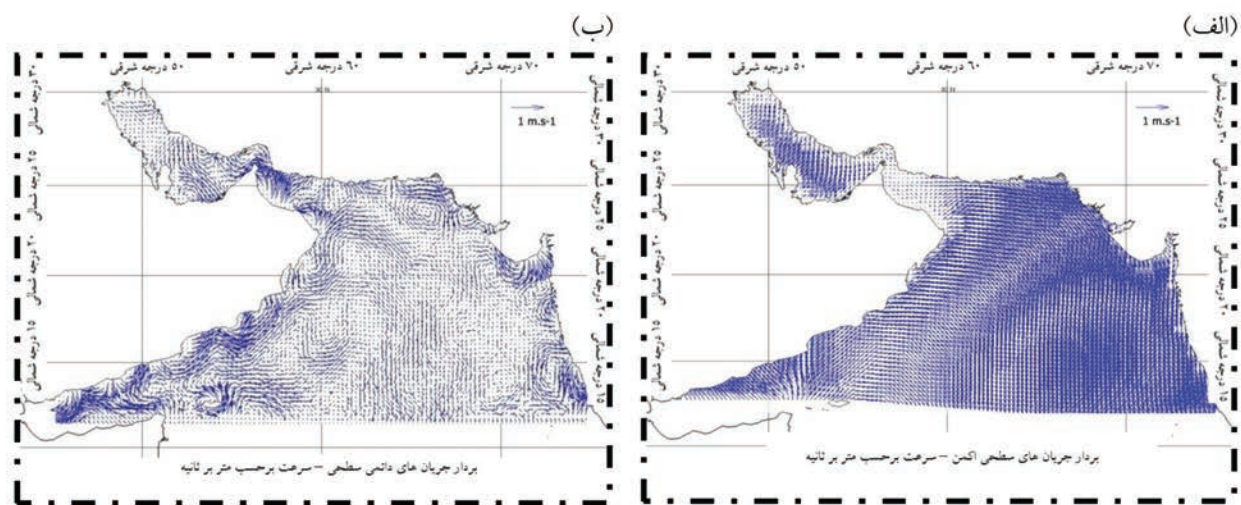
(ب) مؤلفه های شمالی-جنوبی سرعت جریان MDT_IAU_TN_2014، (ج) مقادیر سرعت جریان های ژئوستروفیک، (د) بردار جریان های ژئوستروفیک

درجه RMS اختلافات مدل MDT_IAU_TN_2014 را نسبت به مدل های MDT_DTU_2010 و MDT_CNES_CLS09 از ۰/۰۳۳ متر و ۰/۰۵۱ متر به مقادیر بالاتر تغییر می دهد. در شعاع ۱/۳۸۶ درجه میزان اختلافات، کمترین مقدار است. برای شعاع فیلتر بیش از ۱/۳۸۶ درجه توپوگرافی متوسط دینامیک هموار می گردد و RMS اختلافات نیز افزایش می یابد. بردارهای جریان ژئوستروفیک با بردارهای جریان اکمن حاصل از ۲۲ سال داده های بادهای سطحی جمع شده و جریان های دائمی سطحی محاسبه گردیدند. در نقشه های برداری سرعت جریان های حاصل از MDT_IAU_TN_2014،

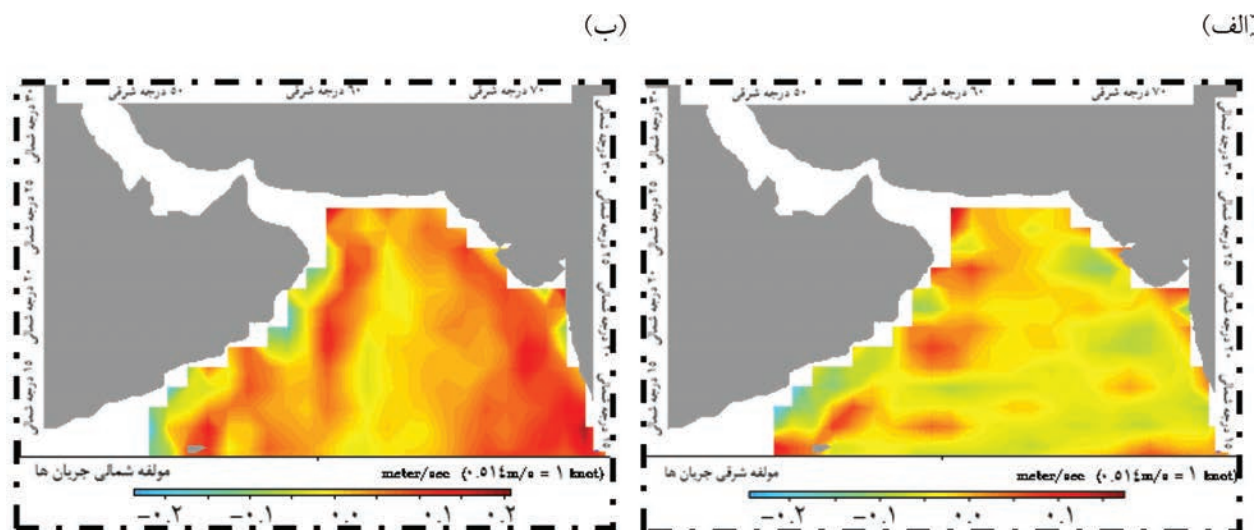
بالای داده های ای.ار.اس ۱ می باشد. در مقایسه ژئوئید، RMS اختلافات ارتفاعات ژئوئیدی حاصل از ماهواره گوس با نقشه های نهایی EGM08 با ضرایب هارمونیک کروی تا درجه و مرتبه ۲۱۹۰ و EIGEN-6c تا درجه و مرتبه ۱۴۲۰، به ترتیب ۰/۳۲۵ و ۰/۳۲۱ متر می باشد. دلیل RMS اختلافات کمتر نسبت به مدل EIGEN-6c می تواند حضور درجه های از ضرایب هارمونیک کروی گوس در این مدل باشد. همچنین مدل های ژئوئیدی در تحقیقات پیشین ارتفاعات ژئوئیدی ماهواره گوس را تأیید می نمایند. تغییر شعاع فیلتر از ۱/۳۸۶ درجه به سمت پایین تا ۱

حدود جریان‌ها در اکثر نقاط میان ۰ تا ۰/۶۱ متر بر ثانیه تخمین زده شده است. جریان‌های محاسبه شده از مدل MDT_DTU_2010 از روابط ۳ و ۴، سرعت جریان‌ها را در اکثر نقاط حدود ۰ تا ۰/۷ متر بر ثانیه نشان می‌دهد (نگاره ۴-الف) این در حالی است که داده‌های بردارهای جریان همراه با مدل MDT_CNES_CLS09 در اکثر نقاط در حدود ۰/۰۰۱ تا ۰/۶۲۶ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. همچنین مدل MDT_CNES_CLS09 جریان‌های داخل خلیج فارس

دریا را در این مدل مشاهده می‌شود، که دو مدل دیگر آن را تصدیق می‌کنند. MDT_IAU_TN_2014 جریان‌های ساحلی را در نزدیکی کشور عمان نشان می‌دهد که متوسط سرعت جریان‌ها در این منطقه حدود ۰/۷ متر بر ثانیه است. این جریان‌ها در موازات ساحل حرکت می‌کنند. همچنین چرخنده‌هایی در دریای عمان در این مدل مشاهده می‌شود، که دو مدل دیگر آن را تصدیق می‌کنند.



نگاره ۴: (الف) جریان‌های اکمن محاسبه شده از ۲۲ سال داده‌های استرس باد در سطح دریا (ب) جریان‌های دائمی سطحی به دست آمده از تجمیع جریان‌های ژئوستروفیک MDT_IAU_TN_2014 و جریان اکمن



نگاره ۵: جریان‌های سطحی به دست آمده از داده‌های OSCAR (الف) مؤلفه‌های شرقی-غربی جریان، (ب) مؤلفه‌های شمالی-جنوبی جریان

آمده از GOCE_DIR4th و EGM08 و EIGEN-6c محاسبه و مقایسه گردیدند. برای رسیدن به توپوگرافی دینامیک متوسط به دلیل محاسبه ژئوئید گوس تا ضرایب هارمونیک کروی ۲۶۰ و از میان بردن بخش مدل نشده ژئوئید از فیلتر گذاری استفاده شد.

عدم دسترسی به داده‌های زمینی موجب شد تا بخش طول موج‌های کوتاه توپوگرافی دینامیک متوسط با مدلی مشابه که از تلفیق داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های بویه‌های شناور، جریان سنج‌ها و ... محاسبه شده، تلفیق گردد.

بخش فیلتر کردن توپوگرافی دینامیک متوسط بخش بسیار حساسی می‌باشد، چراکه ممکن است اطلاعات توپوگرافی دینامیک متوسط همراه با بخش مدل نشده ژئوئید به همراه فیلتر از میان برداشته شود. در نهایت جریان‌های دریایی سطحی (جریان‌های ژئوستروفیک) از توپوگرافی‌های دینامیک متوسط محاسبه شدند.

هرچه ضرایب هارمونیک کروی مدل ژئوئیدی بیشتر باشد و بخش بیشتر از ژئوئید را مدل کند، کیفیت توپوگرافی حاصل از تفاضل سطح متوسط دریاها و ارتفاع ژئوئید بیشتر بوده و نیاز به فیلتر گذاری کمتری دارد.

با این حال مدل‌های توپوگرافی دینامیک متوسط به دست آمده از ژئوئید گوس بعد از تلفیق، جریان‌های نزدیک ساحل را به خوبی نشان می‌دهند. همچنین چرخندهای موجود در دریای عمان را به تصویر کشیده اند، اما مدل‌های توپوگرافی دینامیک متوسط به دست آمده از ژئوئیدهای جهانی با اینکه به فیلتر کمتری نیاز دارند در نمایش جریان‌های نزدیک ساحل ضعیف هستند.

در ادامه پیشنهاد می‌گردد، اطلاعات منظم و دقیق داده‌های دریایی از جمله جریان سنج‌ها و افزودن آن‌ها به توپوگرافی دینامیک متوسط محاسبه شده در این تحقیق انجام شود. همچنین پیشنهاد می‌گردد جهت نمایش جریان‌های سطحی مطلق و توپوگرافی دینامیک مطلق و اضافه کردن اطلاعات تغییرات سطح تراز دریاها ایران به نتایج این تحقیق، سامانه یکپارچه و اینترنتی راه اندازی شود.

را نشان نمی‌دهد اما MDT_IAU_TN_2014 جریان‌های بسیار کندی را در این منطقه نشان می‌دهد که بیانگر دقت محلی بهبود یافته در خلیج فارس می‌باشد. علت این افزایش دقت و نمایش جریان‌ها در ابعاد محلی برای مدل MDT_IAU_TN_2014 می‌تواند حضور اطلاعات ماهواره جیسون ۲ و ادامه ماموریت ژئوست در داخل خلیج فارس باشد.

در مقایسه داده‌های OSCAR با جریان‌های کلی MDT_IAU_TN_2014 در ۱۱۶ نقطه مشترک در ابعاد ۱ درجه، در راستای شرقی-غربی RMS اختلافات ۰/۰۳۱ متر بر ثانیه و در راستای شمالی-جنوبی RMS اختلافات ۰/۰۴۷ متر بر ثانیه می‌باشد.

جریان‌های ناشی از مدل MDT_IAU_TN_2014 اطلاعات بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها در منطقه مطالعات بخصوص در خلیج فارس نشان می‌دهد. در این مکان تا کنون تحقیقی در زمینه‌ی فوق انجام نگرفته بود. با افزودن داده‌های تغییرات سطح دریا (Sea Level Anomaly) و داده‌های محلی (در صورت در دسترس بودن) می‌توان مدل MDT_IAU_TN_2014 را بومی‌سازی نمود. همچنین با استفاده از سایر مدل‌های گراویمتری با درجات بالاتر از ضرایب هارمونیک کروی نیز می‌توان این مدل را بهبود بخشید.

۴- نتیجه گیری

فقدان اطلاعات دقیق از جریان‌های دریایی سطحی در منطقه خلیج فارس، دریای عمان و دست یابی به داده‌های ۴ سال از ماهواره گوس و ۲۱ سال داده‌های ارتفاع سنجی، سبب شد تا این تحقیق در خصوص تخمین توپوگرافی دینامیک متوسط و جریان‌های دائمی در منطقه مذکور و همچنین بخشی از اقیانوس هند ارائه شود. قبل از محاسبه توپوگرافی دینامیک متوسط، سطح متوسط دریا MSS_IAU_YN_2014 با استفاده از ۲۱ سال داده ارتفاع سنجی محاسبه شد و با مدل جهانی MSS_CNES_CLS_2011 که متشکل از تنها ۱۶ سال داده ارتفاع سنجی است مقایسه گردید. سپس ۶ مدل توپوگرافی دینامیک متوسط با استفاده از دو سطح متوسط دریاها و سه مدل ارتفاع ژئوئید به دست

including LAGEOS, GRACE and GOCE data from the collaboration of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse, (Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, Abstract No. EGU2012-2821, 2012), General Assembly European Geosciences Union (Vienna, Austria).

11-GEOSAT Follow-On GDR User's Handbook, 2002.

12-GUT User Guide and Algorithm Descriptions, 2011, ESA-GUT-AD-001.

13-Hernandez, F. & Schaeffer, P., 2001, The CLS01 Mean Sea Surface: A validation with the GSFC00.1 surface.

14-Knudsen, P. & Andersen, OB., 2010, A glonal mean ocean circulation estimation using GOCE gravity models - The Dtui2mdt mean dynamic topography model. Technical University of Denmark. DTU Space, 2800 Kgs, Lyngby, Denmark.

15-Knudsen P, Bingham R, Andersen O, Rio M., 2011, A global mean dynamic topography and ocean circulation estimation using a preliminary GOCE gravity model. J Geod. 85(11),861-879.

16-Le Traon P, Ogor F. ERS-1/2, 1998, orbit improvement using TOPEX/POSEIDON: The 2 cm challenge. J Geophys Res.;103(C4),8045.

17-OSTM,2001,Jason-2 Products Handbook.

18-Pail, R. & Bruinsma, S. & Migliaccio, F. & Foerste, C. & Goiginger, H. & Schuh, W.-D. & Hoeck, E. & Reguzzoni, M. & Brockmann, J.M. & Abrikosov, O. & Veicherts, M. & Fecher, T. & Mayrhofer, R. & Krasbutter, I. & Sanso, F. & Tscherning C.C., 2011, First GOCE gravity field models derived by three different approaches. J Geod. ,85(11),819-843.

19-Pavlis N, Holmes S, Kenyon S, Factor J., 2012, The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). J Geophys Res.;117(B4).

20-RA/ATSR products - User Manual, 2001, Réf.: C2-MUT-A-01-IFT, V2.3.

21-Rio, M-H. & Guinehut, S. & Larnicol, G., 2011, New CNES CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements, J. Geophys. Res., Vol 116, C07018.

22-Stewart R.H., 2008, Introduction to Physical Oceanography. [College Station, Tex.: Texas A & M University], pp 103-182.

23-Vaniček, P. and Krakiwsky, E.J., 1986. Geodesy: The Concepts. 2nd rev. ed., North-Holland, Amsterdam, 697 pages. Translated into Chinese and Spanish. Reprinted in China and in Iran. pp.333,334

۵- منابع و مآخذ

۱- جلیل نژاد، م.، آزموده اردلان، ع.، صفری، ع.، ۱۳۸۵، ارزیابی مدل‌های سطح متوسط دریا با استفاده از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ی، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نقشه برداری، دانشگاه تهران.

۲- عمادی ر.ا.، نجفی علمداری م.، سبزواری، م.، ۱۳۹۰، تعیین پتانسیل ژئوئید با استفاده از داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ی و GRACE، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال سوم، شماره ۱.

۳- لاری، ک.، ابره دری، م.، ۱۳۹۱، تلفیق اطلاعات ارتفاع سنجی ماهواره‌های T/P, Jason-1 برای تعیین توپوگرافی سطح دریا در خلیج فارس و دریای عمان، مجله علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، دوره ۱۱، شماره ۳.

4-Agarvadekar Y., & Amol, P., & Aparna, S G., & Fernandes, R., & Fernando, V., & Gaonkar, M G., & Kankonkar, A., & Khalap, S T., & Michael, G S., & Mukherjee, A., & Satelkar, N P., & Shankar, D., & Tari, A P., & Vernekar, S P., 2014, Observed intraseasonal and seasonal variability of the West India Coastal Current on the continental slope. Journal of Earth System Science. ,123(5),1045-1074.

5-Aviso and Podaac User Handbook, 2012, IGDR and GDR Jason Products, Edition 4.2.

6-AVISO/Altimetry, 1996, "AVISO/Altimetry for Merged TOPEX/POSEIDON products", AVI-NT-02-101, Edition 3.0.

7-Bingham R, Haines K, Hughes C., 2008, Calculating the Ocean's Mean Dynamic Topography from a Mean Sea Surface and a Geoid. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology ,25(10),1808-1822.

8-Bonjean F, Lagerloef G., 2002, Diagnostic Model and Analysis of the Surface Currents in the Tropical Pacific Ocean. Journal of Physical Oceanography. 02,32(10),2938-2954.

9-ESA SP-1233, 1999, Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission, The four candidate earth explorer core missions.

10-Förste, C., Shako, R., Flechtner, F., Dahle, C., Abrikosov, O., Neumayer, K.-H., Barthelmes, F., König, R., Bruinsma, S.-L., Marty, J.-C., Lemoine, J.-M., Balmino, G., Biancale, R., 2012, A new release for EIGEN-6 - the latest combined global gravity field model