

بررسی روند تغییرات توپوگرافی دینامیکی تراز آب دریای خزر و اثر آن بر روی تغییرات خط ساحلی ایران با استفاده از داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای

حمید بیات بارونی^۲
مسعود ترابی آزاد^۴

مجتبی عظام^۱
عباسعلی علی اکبری بیدختی^۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۵/۰۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۰/۰۹

چکیده

دریای خزر بزرگترین دریاچه جهان است و ساحل دریای خزر ایران با طول حدود ۹۰۰ کیلومتر، در حاشیه جنوبی آن واقع شده است. در این تحقیق داده‌های آنومالی تراز سطح دریا، سطح ژئوئید و سطح متوسط دریا برای مدت ۲۰ سال طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۲، به منظور بررسی روند تغییرات خط ساحلی و سطح آب دریای خزر مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای بدست آوردن داده‌های آنومالی تراز سطح دریا از مجموعه داده‌های ارتفاع سنجی آویسو، به منظور یافتن ژئوئید از مدل ژئوپتانسیل گوس و برای دستیابی به سطح متوسط دریا از مجموعه داده‌های MSS_CNES.CLS15 با قدرت تفکیک ۰/۲۵ درجه استفاده شده است. پس از آن با محاسبه توپوگرافی دینامیکی متوسط، توپوگرافی دینامیکی مطلق و سری زمانی تراز دریا در طی سال‌های مورد نظر، نسبت به شناسایی تغییرات تراز دریای خزر در این سال‌ها و پیرو آن بررسی تغییرات خط ساحلی در همان زمان‌ها اقدام گردید. بررسی مقاطع تغییرات تراز دریا نشانگر تغییرات غیریکنواخت و نامنظم بوده و در دوره‌هایی روند کاهشی و در دوره‌هایی روند افزایشی را مشاهده می‌نماییم، اما روند تغییرات بصورت کلی منفی و میزان آن به‌طور متوسط ۳۲ میلی متر در سال می‌باشد. دامنه تغییرات مقدار بالاترین و پایین‌ترین تراز دریا در این ۲۰ سال، ۱/۲۸۷- متر می‌باشد. از پیامدهای ناشی از تغییرات منفی تراز دریا، می‌توان به فرایند پسروی خزر اشاره نمود که از سال ۱۹۹۵ میلادی آغاز شده و تاکنون ادامه دارد و ماحصل آن خشک شدن بیش از ۱۰۰۰۰ هکتار از سطح دریا در خلیج گرگان می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آنامولی تراز دریا، دریای خزر، سطح متوسط دریا، توپوگرافی دینامیکی، ژئوئید

۱- استادیار گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران (نویسنده مسئول) ezam@srbiau.ac.ir
۲- دانشجوی دکتری گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران hydro1390@gmail.com
۳- استاد گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران bidokhti@ut.ac.ir
۴- دانشیار دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران m_azad@iau_tnb.ac.ir

۱- مقدمه

تغییرات زیاد خط ساحلی در مناطق ساحلی حاشیه دریای خزر هستیم (دریاباری، ۱۳۸۸، ص. ۱۱۱).



نگاره ۱: موقعیت دریای خزر (مارکاندیا و دیگران، ۲۰۰۵)

تغییرات تراز آب دریای خزر در بازه‌های زمانی مختلف، بسیار زیاد بوده است. این تغییرات در دوره‌های کاهشی و در دوره‌هایی نیز افزایشی بوده و این امر منجر به پیش روی و پس روی خطوط ساحلی می‌گردد (عطایی و دیگران، ۱۳۹۵، ص. ۱۰۳). بنابراین بررسی و پیش‌بینی تغییرات خطوط ساحلی در دریای خزر بسیار با اهمیت است.

تاریخچه نوسانات سطح آب دریای خزر نشان از وسعت دامنه نوسانی تراز دارد (نگاره ۲). در طی ۵۰۰ سال گذشته دامنه نوسانات تراز آب هفت متر، در ۱۸۰ سال اخیر بالغ بر چهار متر و در ۴۰ سال اخیر حدود دو و نیم متر بوده است. تراز سطح این دریا در سال ۱۹۲۹ بطور ناگهانی کاهش یافته و طی ۴۰۰ سال اخیر به پایین‌ترین سطح خود یعنی ۲۹- متر رسیده است (ریچاکوف، ۱۹۹۷، ص. ۱۶۸). از سال

یافتن توپوگرافی دینامیکی^۱ در شناخت دریا حائز اهمیت می‌باشد. تغییرات تراز دریا در گذشته با استفاده از تحلیل داده‌های گیج‌های محدود در نزدیک ساحل مشخص می‌گردید که از جمله معایب آن می‌توان دستیابی به مختصر اطلاعاتی صرفاً در این مناطق خاص و عدم دستیابی به داده‌های منظم در مناطق دور از ساحل را نام برد. امروزه پیش‌تراز^۲ دریا، دمای سطحی آب، میزان باد، امواج و سایر پارامترهای اقلیمی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای صورت می‌پذیرد.

داده‌های ارتفاع سنجی^۳ بوسیله آژانس‌هایی نظیر آویسو^۴ و نوآ^۵ در اختیار متخصصان قرار می‌گیرند. در طول قرن بیستم، آب و هوای کره زمین دستخوش تغییراتی شده است که از آن به تغییر اقلیم تعبیر می‌شود. تغییر تراز آب دریاها و اقیانوس‌ها یکی از اثرات تغییر اقلیم می‌باشد (غلامی و عباسی، ۱۳۹۴). پیش‌دقیق تغییرات سطح متوسط اقیانوس‌ها و دریاها، بویژه با استفاده از ماهواره‌های ارتفاع سنجی، برای درک تغییرات اقلیمی و پیامدهای اجتماعی و اقتصادی نوسانات تراز دریا بسیار مهم و اساسی می‌باشد. محاسبه سطح متوسط دریاها بصورت دائمی از ژانویه ۱۹۹۳ آغاز شده است (نرم و دیگران، ۲۰۱۰، ص. ۴۴۶-۴۳۵).

دریای خزر، بزرگترین دریاچه جهان، بین اروپا و جنوب غربی آسیا و مابین طول‌های جغرافیایی ۴۵/۴۳ و ۵۴/۲۰ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶/۳۳ و ۴۷/۰۷ درجه شمالی واقع شده است (نگاره ۱). مساحت آن در حدود ۳۹۰۰۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد (مامائف و دیگران، ۲۰۰۲).

دریای خزر به واسطه نوسانات و تغییرات زیاد دوره‌ای سطح آب، محیطی منحصر به فرد با ویژگی‌های خاص به وجود آورده که نظیر آن در محیط‌های دریاچه‌ای بسته مشاهده نمی‌شود. به واسطه همین تغییر سطح آب، شاهد

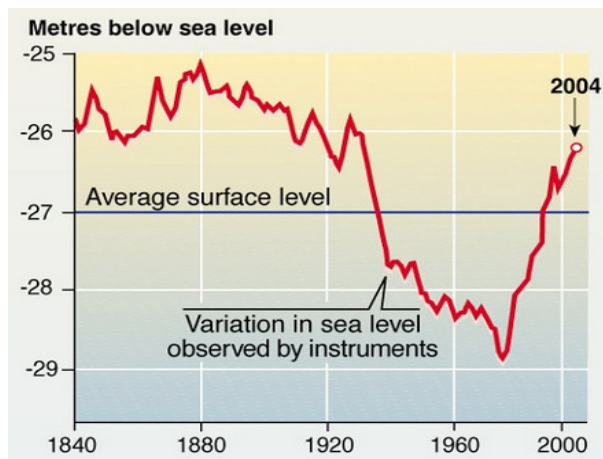
1- Dynamic Topography
2- Monitoring
3- Altimetry
4- Aviso
5- Noaa

دستیابی به روش‌های متعددی برای درک تغییرات خط ساحلی می‌باشد. قدیمی‌ترین روش مورد استفاده به منظور تعیین نحوه و میزان تغییرات خط ساحلی با اندازه‌گیری فاصله نقاط ساحلی نسبت به نقاط کنترلی ثابت مورد بررسی قرار گرفته است (تیلر و دیگران، ۲۰۰۵، ص. ۲۷۷). ارتفاع سنجی ماهواره‌ای با امکان پایش سطح آب‌های جهان، امکان تعیین سطح متوسط دریاها را با دقت بالا فراهم آورده است. ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی اطلاعات ارتفاعی نقاط مختلف سطح کره زمین را در امتداد مدارهای تعیین شده جمع‌آوری می‌کنند. مأموریت اصلی این ماهواره‌ها اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها در زمان‌ها و مکان‌های مختلف است (آنزنهاوفر و دیگران، ۱۹۹۹).

یک ماهواره ارتفاع سنجی مجهز به دستگاه رادار در مدار خود به دور زمین، با پریودهای زمانی کوتاه، ارتفاع خود را از سطح آزاد دریا و اقیانوس اندازه‌گیری می‌کند. با احتساب موقعیت مداری دقیق ماهواره، اندازه‌گیری‌های ماهواره با دقت قابل قبول تبدیل به اندازه‌گیری‌های ارتفاع سطح آزاد آب دریاها نسبت به یک سطح مرجع مشخص بین‌المللی (مانند WGS84) می‌گردند. با توجه به عبورهای متوالی و مکرر ماهواره در مسیرهای مشخص و مقاطع از بالای دریاها می‌توان دریافت که ماهواره در یک شبکه منظم و با توزیع یکنواخت از نقاط روی دریا به صورت مکرر ارتفاع سطح آزاد دریا را اندازه‌گیری می‌کند. بعد از اعمال تصحیحات هندسی و فیزیکی، این اندازه‌گیری‌ها شبیه اندازه‌گیری‌های دستگاه تایدگیج^۱ می‌شوند با این مزیت که عاری از مشکلات موجود در مورد داده‌های تایدگیج (در نقاط دور از ساحل دقت کافی نخواهند داشت) هستند (لاری و ابره دری، ۱۳۹۱).

لبدوف و کاستیونای (۲۰۰۵) با استفاده از داده‌های ماهواره‌های تاپکس-پوزیدون^۲ و جیسون-۱^۳ در بازه زمانی ۱۳ ساله از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۴ با بررسی تغییرات آنامولی

۱۹۷۷ تا سال ۲۰۰۰ دوباره سطح تراز آن افزایش یافته و به ۲۶/۵- متری رسیده است.



نگاره ۲: تغییرات بلند مدت تراز دریا (کلاچ، ۲۰۰۵)

امروزه دانشمندان هواشناسی و فیزیک دریا در سطح جهان، دریای خزر را به‌عنوان یک مدل دینامیکی طبیعی در رابطه با فرایندهای نوسانی سطح تراز آب می‌شناسند و به علت سرعت بسیار بالای نرخ تغییرات سالانه سطح تراز آب آن که معمولاً بیش از ۱۰۰ برابر نوسانات سطح آب اقیانوس‌هاست و همچنین رفتار متفاوت هیدرولوژیکی آن در مقابل پدیده‌های آب و هواشناسی از این دریاچه پهناور به‌عنوان یک حوزه آبی درون قاره‌ای متمایز از اقیانوس‌ها یاد می‌کنند (مارکاندیا و دیگران، ۲۰۰۵، ص. ۱۷۷). بروز مخاطرات در مناطق ساحلی، از مشکلات اساسی این مناطق محسوب می‌شود. از جمله این مخاطرات بالا آمدن سطح آب دریاهاست که موجب غرقابی شدن بخش وسیعی از زمین‌های حاشیه دریا می‌شود. قسمت‌های وسیعی از زمین‌های کشاورزی، خانه‌های مسکونی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو به زیرآب می‌روند و صدها کیلومتر ساحل تخریب می‌گردد (کردوانی و دیگران، ۱۳۹۲، ص. ۱۲۳).

در زمینه تغییرات خط ساحلی، تحقیقات زیادی در سطح جهان درباره دینامیک و علل ایجاد این تغییرات صورت پذیرفته است که دلیل آن اهمیت موضوع و تأثیر این پدیده بر فعالیت‌های انسانی و اقتصادی می‌باشد و ماحصل آن‌ها

1- Tide gage

2- Topex-Poseidon

3- Jason-1

هدف از انجام این تحقیق بررسی روند تغییرات توپوگرافی دینامیکی تراز آب در دریای خزر و تعیین اثرات تغییر تراز بر روی خط ساحلی جنوبی این دریا می‌باشد. بدین منظور، به ترتیب پارامترهای سطح متوسط دریا^۱ (MSS)، ارتفاع ژئوئید^۲ (N)، توپوگرافی دینامیکی متوسط^۳ دریا (MDT)، آنامولی تراز دریا^۴ (SLA) و نهایتاً توپوگرافی دینامیکی مطلق^۵ دریا (ADT) در بازه زمانی بیست ساله (۲۰۱۲-۱۹۹۳) محاسبه می‌شوند و سپس اثرات این تغییرات بر روی خط ساحلی جنوبی خزر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- جمع آوری داده‌ها و روش تحقیق

روش‌های معمول برای محاسبه توپوگرافی سطح دریا عبارتند از: روش اقلیم شناسی متوسط بر اساس ادغام داده‌های هیدروگرافی، روش جریان‌های متوسط دریایی، روش اقلیم شناسی ترکیبی و روش ارتفاع سنجی و ثقل سنجی ماهواره‌ای که روش آخر به عنوان روش مستقیم شناخته می‌شود (صفری و دیگران، ۲۰۱۴). در روش مستقیم با محاسبه ژئوئید از طریق اطلاعات ماهواره‌های ثقل سنجی (نظیر CHAMP، GRACE و GOCE) و محاسبه سطح متوسط دریا از ماهواره‌های ارتفاع سنجی، توپوگرافی سطح دریا محاسبه می‌شود. در این تحقیق چندین مجموعه از داده‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۱- داده‌های ماهواره‌ای سطح متوسط دریا حاصل از ارتفاع سنجی ماهواره‌ای

برای یافتن میانگین بلند مدت سطح دریا از مجموعه داده‌های جهانی MSS_CNES.CLS15 استفاده شده است.^۶ این مجموعه داده‌ها یک دوره زمانی ۲۰ ساله (۱۹۹۳ تا

فصلی و سالانه سطح دریا، سرعت باد و ارتفاع موج را در نقاط مختلف دریای خزر و سطح رودخانه ولگا محاسبه کردند.

اقتصادی و زاهدی (۱۳۹۰) عوامل تأثیرگذار بر نوسانات تراز آب خزر جنوبی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. صفری و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی ارتفاع سطح آب دریای خزر با استفاده از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای به مدل‌سازی تغییرات سطح لحظه‌ای آب دریای خزر با استفاده از ۵ سال مشاهدات ماهواره جیسون-۲ پرداخته‌اند.

گوندوز (۲۰۰۸) یک توصیف کلی از جریان‌ات فصلی دریای خزر ارائه داد. رودیونوف (۲۰۱۲) اقلیم منطقه‌ای و جهانی دریای خزر و عوامل تأثیرگذار بر آن را به همراه ارائه برخی از راهکارهای پیش بینی تراز دریا مورد بررسی قرار داد. لبدوف (۲۰۱۶) نسبت به تخمین تراز دریای خزر و ورودی رودخانه ولگا با استفاده از داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای اقدام نمود. ایشان با استفاده از یک مدل ترمودینامیک و اندازه‌گیری آنامولی توپوگرافی سطح دریا، جریان‌ات دریایی و میزان سرعت جریان را در مناطق مختلف خزر شناسایی نمودند. در زمینه تغییرات خط ساحلی ایران پیش از این تحقیق، لرستانی (۱۳۹۳) تغییرات خط ساحلی دریای خزر در محدوده دلتای گرگان رود را مورد بررسی قرار داده است.

شربتی و قانقرمه (۱۳۹۴) تأثیر روند طولانی مدت کاهش سطح آب دریای خزر را بر حیات خلیج گرگان مورد مطالعه قرار داده‌اند. عطایی و همکاران (۱۳۹۵) آورد رسوبی ناشی از تغییرات تراز دریای خزر را با استفاده از قانون براون به منظور بررسی تغییرات خط ساحلی محاسبه نموده‌اند. همچنین کاکرودی (۲۰۱۷) تغییرات تراز دریای خزر در طی ۲۶۰۰ سال گذشته و اثرات آن را بر سواحل ایران مورد ارزیابی قرار داده است.

شایان و همکاران (۲۰۲۰) تغییرات خط ساحلی در محدوده قاعده دلتایی خزر را با استفاده از سامانه تحلیل رقومی خط ساحلی مورد بررسی قرار داده‌اند.

1- Mean Sea Surface

2- Geoid

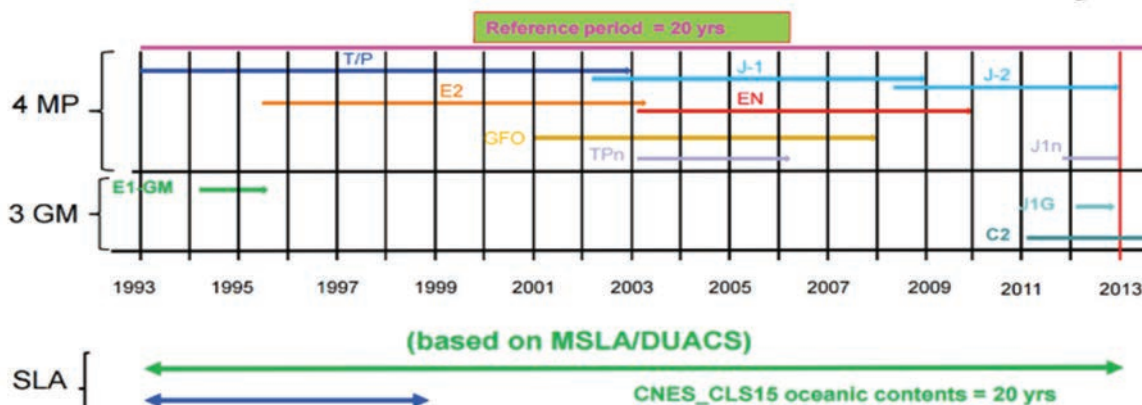
3- Mean Dynamic Topography

4- Sea Level Anomaly

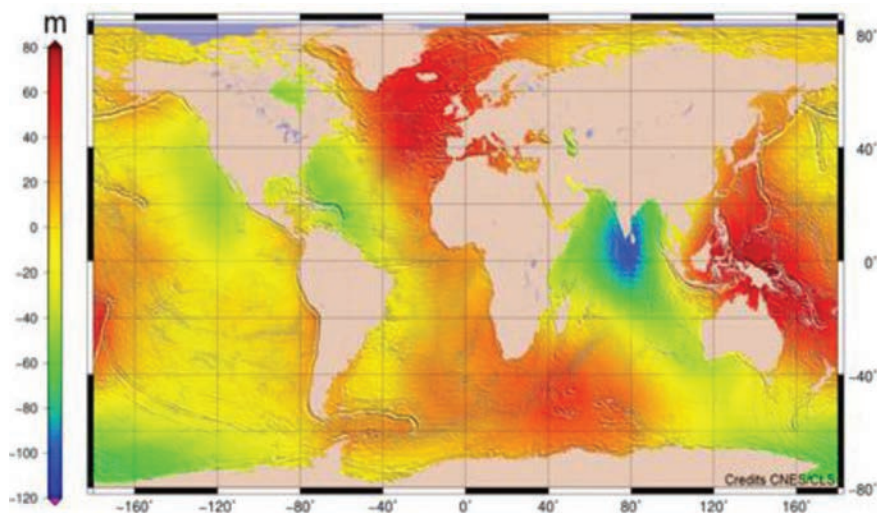
5- Absolute Dynamic Topography

6- <https://tds.avisio.altimetry.fr/thredds/auxiliary/dataset-mss-cnecsls15-global.html>

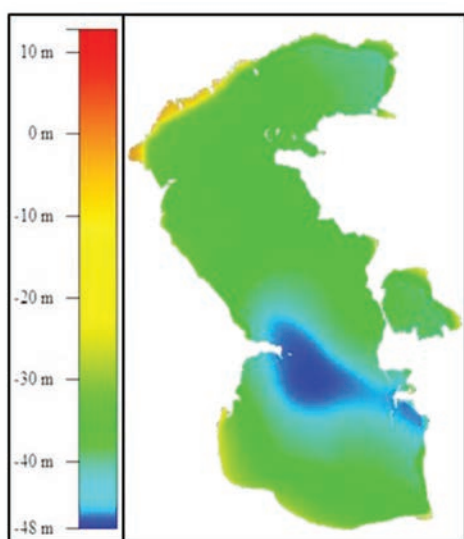
فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)
 بررسی روند تغییرات توپوگرافی دینامیکی ... / ۸۹



نگاره ۳: سهم ماهواره‌های مختلف در تعیین سطح متوسط دریا بر اساس مجموعه داده‌های MSS_CNES.CLS15



نگاره ۴: نقشه ارتفاع سطح متوسط اقیانوس‌ها و دریاهای جهان MSS_CNES.CLS15



نگاره ۵: تغییرات جهانی MSS در دریای خزر

(۲۰۱۲) را پوشش داده‌اند و بر مبنای اندازه‌گیری‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌های مختلف بدست آمده‌اند. نگاره ۳ بیانگر میزان سهم ماهواره‌های مختلف در محاسبه سطح متوسط دریا می‌باشد. در نگاره ۴ ارتفاع سطح متوسط اقیانوس‌ها و دریاهای جهان نمایش داده شده است. با استفاده از داده‌های فوق‌الذکر، در تمامی نقاط شبکه ایجاد شده با فواصل ۰/۲۵ درجه بر روی دریای خزر، سطح متوسط دریا محاسبه و در نگاره ۵ نمایش داده شده است.

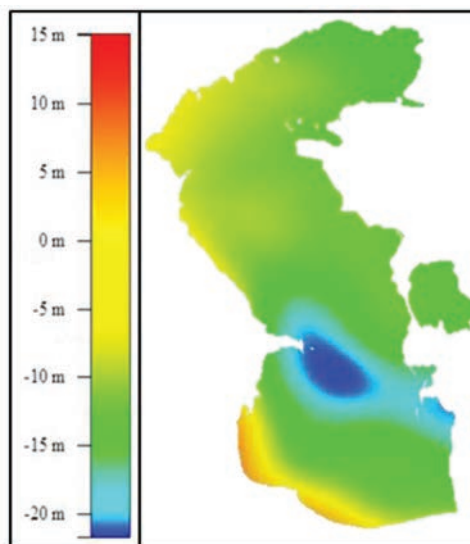
۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای به منظور یافتن ارتفاع ژئوئید ژئوئید یک سطح هم پتانسیل از میدان ثقل زمین است که به بهترین نحو سطح متوسط آب‌های آزاد را تقریب می‌کند.

انتخاب شود (اردلان و دیگران، ۲۰۰۶). برخی از محققین نسبت به اعتبارسنجی و مقایسه دقت مدل GOCE با سایر مدل‌های مختلف اهتمام ورزیده اند، از جمله در مجارستان نتایج، حاکی از دقت بالاتر این مدل بویژه در طول موج‌های متوسط در مقایسه با مدل‌های GRACE و EGM2008 می‌باشد (ژوکس، ۲۰۱۲، ص. ۱۱-۳).

در تحقیقی دیگر دقت بالاتر مدل فوق نسبت به EGM2008 خصوصاً در دامنه هارمونیک کروی ۱۲۰ تا ۲۰۰ درجه (و بالاتر) در غالب مناطق دنیا اعتبارسنجی شده است (رومل، ۲۰۱۲، ص. ۲۲-۱۴).

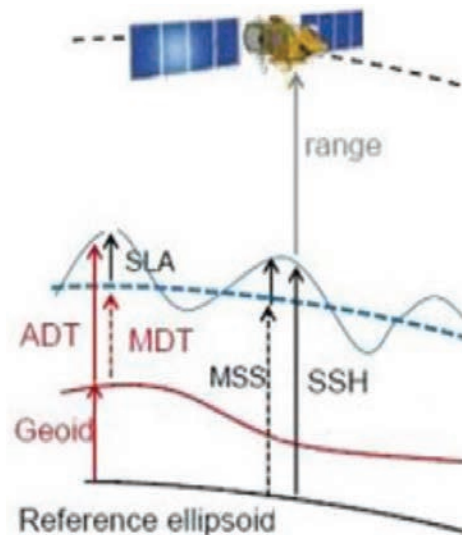
در ترکیه دقت بالاتر این مدل نسبت به مدل EGM2008 در دامنه هارمونیک‌های کروی ۱۰۰ تا ۱۵۰ تا ۱۵ درصد بهبود مورد تأیید قرار گرفته است (ارول و دیگران، ۲۰۲۰، ص. ۵۱۳). در نیمه جنوبی ایران دقت بالاتر مدل GOCE در برابر مدل‌های دیگری نظیر GRACE، EGM2008، EGM96 اعتبارسنجی شده است (بیات و حسینی، ۲۰۱۴).

در این تحقیق با استفاده از مدل GOCE، در تمامی نقاط شبکه ایجاد شده با فواصل ۱ دقیقه در دریای خزر ارتفاع ژئوئید محاسبه شده است که در نگاره ۷ نمایش داده شده است.



نگاره ۷: تغییرات جهانی ژئوئید در دریای خزر با سطح دریا، ژئوئید و بیضوی مرجع زمین استفاده از مدل ژئوپتانسیل GOCE

سطح متوسط دریا بر ژئوئید منطبق نبوده و اختلاف این دو سطح در هر نقطه، توپوگرافی دینامیکی مطلق نامیده می‌شود. ارتفاع ژئوئید و توپوگرافی دینامیکی دریا معمولاً نسبت به یک بیضوی فرانس بیان می‌گردند. تفاضل توپوگرافی سطح دریا از سطح متوسط دریا کمیت ارتفاع ژئوئید می‌باشد. با توجه به دقت حاصل و توپوگرافی سطح دریا دقت ارتفاع ژئوئید حاصل به چند سانتی متر می‌رسد (اردلان و عرب صاحبی، ۱۳۸۳). کمیت مشاهداتی در روش ارتفاع سنجی ماهواره‌ای، ارتفاع ماهواره از سطح لحظه‌ای دریا است. در نگاره ۶ ارتباط بین سطوح مختلف دریا نمایش داده شده است.



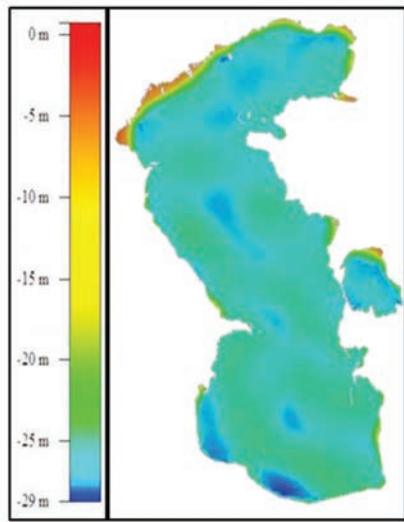
نگاره ۶: ارتباط بین سطح متوسط دریا، توپوگرافی

یکی از چالش‌های مهم ژئودزی ماهواره‌ای، تعیین ژئوئید جهانی با دقت مناسب می‌باشد. امروزه مشاهدات ماهواره‌های ثقل سنجی، امکان برآورد دقیق طول موج‌های بلند تا متوسط را میسر ساخته است (وینچک و کراکوسکی، ۲۰۱۵). برآورد فرکانس‌های متوسط و کوتاه مستلزم داشتن مشاهدات زمینی است (اردلان و دیگران، ۱۳۹۴).

با توجه به تنوع نسبتاً زیاد مدل‌های ژئوپتانسیل، لازم است که کیفیت آنها در مناطق مختلف در مقایسه با مشاهدات گرانی کنترل شود، تا از میان آنها بهترین مدل

۲-۳- داده‌های ماهواره‌ای به منظور دستیابی به آنامولی تراز دریا

برای بدست آوردن داده‌های آنومالی تراز دریا از مجموعه داده‌های ارتفاع سنجی آویسو استفاده شده است. در این تحقیق داده‌های SLA مربوط به دریای خزر برای مدت ۲۰ سال طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۲ از آرشیو مربوطه استخراج گردید. داده‌های روزانه SLA در مختصات جغرافیایی دریای خزر و با تفکیک ۰/۲۵ درجه، از ماهواره‌های ارتفاع سنجی آویسو و SLA- CNES.CLS15 استخراج شده و پس از درونیابی مکانی بر روی شبکه ایجاد شده با تفکیک ۱ دقیقه در دریای خزر محاسبه گردید. با اگماض از سایر اثرات جوی و اقیانوسی، در صورتی که میانگین ارتفاع‌های تراز دریا حاصل از ارتفاع سنجی در یک دوره زمانی محاسبه شود، متوسط سطح دریا تخمین زده می‌شود که ارتباط آن با توپوگرافی دینامیکی متوسط و ارتفاع ژئوئید با رابطه (۱) بیان می‌شود (MSS_CNES.CLS15).

$$MSS = N + MDT \quad (1)$$


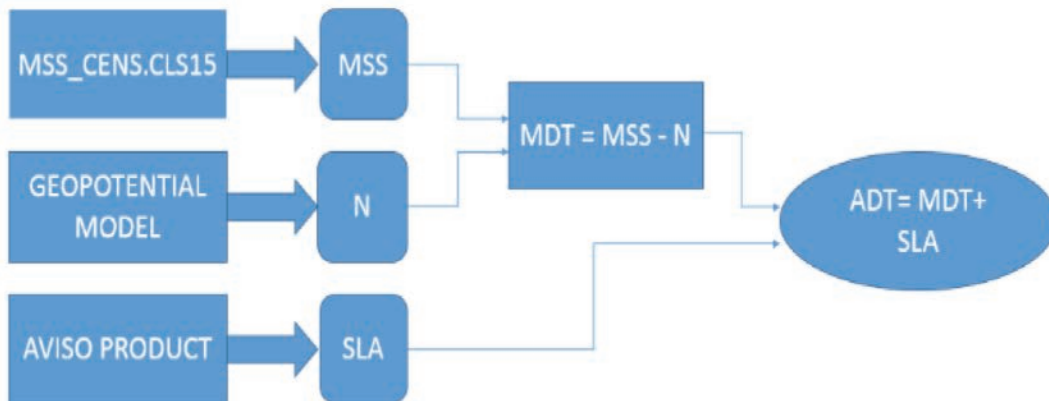
نگاره ۸: تغییرات جهانی MDT در دریای خزر

در مرحله بعد به منظور دستیابی به توپوگرافی دینامیکی مطلق، مقدار آنامولی تراز دریا به توپوگرافی دینامیکی متوسط دریا افزوده می‌شود:

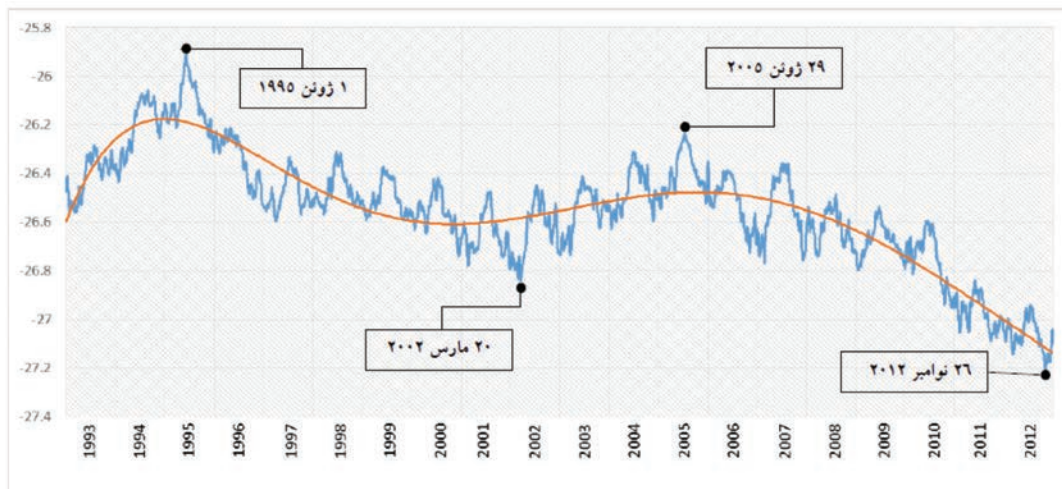
$$ADT = MDT + SLA \quad (2)$$

که در این رابطه ADT بیانگر توپوگرافی دینامیکی مطلق، MDT توپوگرافی دینامیکی متوسط و SLA آنامولی تراز دریا است. این محاسبات برای مدت ۲۰ سال (۷۳۰۵ روز) طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۲ با استفاده از برنامه تهیه شده به زبان MATLAB تکرار شده و در نهایت بانک اطلاعاتی کاملی شامل داده‌های توپوگرافی لحظه‌ای سطح دریای خزر برای این مدت بدست آمد. در نگاره ۹ فلوچارت دستیابی به توپوگرافی دینامیکی مطلق نمایش داده شده است.

که در این رابطه؛ MSS : متوسط سطح دریا، N : ارتفاع ژئوئید و MDT : توپوگرافی دینامیکی متوسط است. در این تحقیق به منظور دستیابی به توپوگرافی دینامیکی متوسط دریا، در تمامی نقاط شبکه ایجاد شده با تفکیک ۱ دقیقه روی دریای خزر مقادیر MDT محاسبه شده و در نگاره ۸ نشان داده شده است.



نگاره ۹: فلوچارت دستیابی به توپوگرافی دینامیکی مطلق



نگاره ۱۰: تغییرات تراز خزر ۱۹۹۳-۲۰۱۳

آب دریای خزر مثبت بوده است، اما روند کلی تغییرات تراز آب در دوره ۲۰ سال مورد بررسی منفی می‌باشد. همچنین با بررسی تغییرات تراز دریا مشخص گردید در بازه زمانی ۲۰ ساله، روز ۱ ژوئن ۱۹۹۵ بالاترین تراز ارتفاعی با مقدار ۲۰/۹۱۴- و روز ۲۶ نوامبر ۲۰۱۲ پایین ترین تراز ارتفاعی با مقدار ۲۷/۲۰۱- مشاهده شده است. به علاوه دو روز ۲۰ مارس ۲۰۰۲ و ۲۹ ژوئن ۲۰۰۵ هم دارای دو تغییر ناگهانی در سری زمانی با مقادیر ۲۶/۸۴۳- و ۲۶/۲۳۶- می‌باشند.

در این سری زمانی، تا تاریخ ۱ ژوئن ۱۹۹۵ روند افزایشی، از این تاریخ تا ۲۰ مارس ۲۰۰۲ طی یک دوره زمانی تقریباً ۷ ساله روند کاهشی با دامنه تغییرات ۹۳ سانتی‌متری، سپس تا تاریخ ۲۹ ژوئن ۲۰۰۵ در دوره زمانی حدود ۳ سال روندی افزایشی با دامنه تغییرات ۶۱ سانتی‌متری و پس از آن در بازه زمانی ۷ ساله تا اواخر ۲۰۱۲ شاهد روند کاهشی با دامنه تغییرات ۹۷ سانتی‌متری هستیم. در نگاره ۱۱ روند و میزان تغییرات تراز دریای خزر طی این دوره ۲۰ ساله نمایش داده شده است. در این نگاره خط چین قرمز نمایانگر تغییرات کلی تراز دریاست که روند کاهشی متوسط به میزان ۳۲ میلی‌متر در سال را نشان می‌دهد ولی خطوط زرد رنگ نمایانگر دوره‌های افزایشی و کاهشی در این مدت ۲۰ سال می‌باشد. پلان توپوگرافی دینامیکی لحظه‌ای این روزها (بالاترین و پایین ترین تراز دریا) در نگاره ۱۲ نمایش داده شده‌اند.

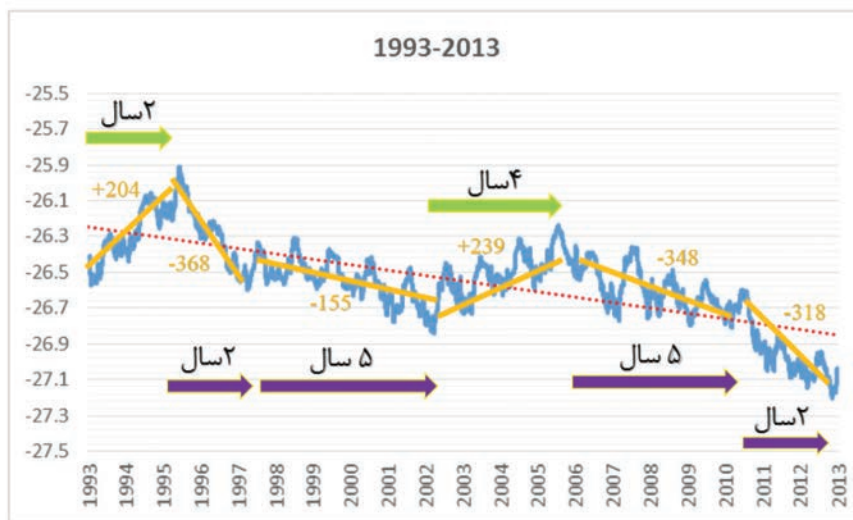
۲-۴- داده‌های تصاویر ماهواره‌ای اپتیکی دریای خزر

به منظور بررسی تغییرات خط ساحلی ناشی از تغییرات تراز آب خزر، در گام نخست، با استفاده از سایت <https://earthexplorer.usgs.gov> تصاویر ماهواره‌ای خط ساحلی جنوبی دریای خزر در تاریخ‌های مورد نیاز در دوره ۲۰ ساله مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفت. استخراج تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از: (Landsat 4-5TM C1(path/row 163-166/33-35) و Landsat 7 ETM+ C1(path/row 164-166/33-35) صورت پذیرفت. شایان ذکر است که با توجه به اینکه داندلود تصاویر در تاریخ دقیق روزهای مورد نظر امکان پذیر نبوده است، تصویری که کمترین فاصله زمانی را با این تاریخ‌ها داشت، مورد استفاده قرار گرفت.

۳- آنالیز نتایج

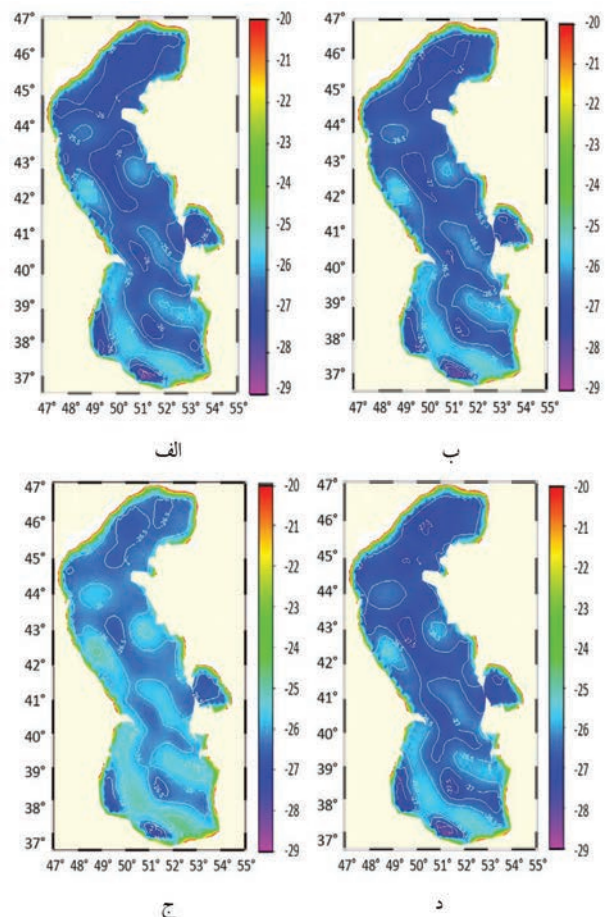
با توجه به اینکه شبکه‌ای از داده‌های ADT با فواصل مکانی ۱ دقیقه بر روی کل دریای خزر ایجاد شده است، پس از محاسبه میانگین روزانه تمامی این داده‌ها در بازه زمانی ۱۹۹۳-۲۰۱۲، مقادیر متوسط ADT برای ۷۳۰۵ روز (معادل ۲۰ سال) استخراج و سری زمانی تغییرات تراز لحظه‌ای در نگاره ۱۰ نمایش داده شده است.

بررسی این سری زمانی نشان می‌دهد با وجود اینکه در دو دوره ۱۹۹۳-۱۹۹۵ و ۲۰۰۵-۲۰۰۰ شیب تغییرات تراز

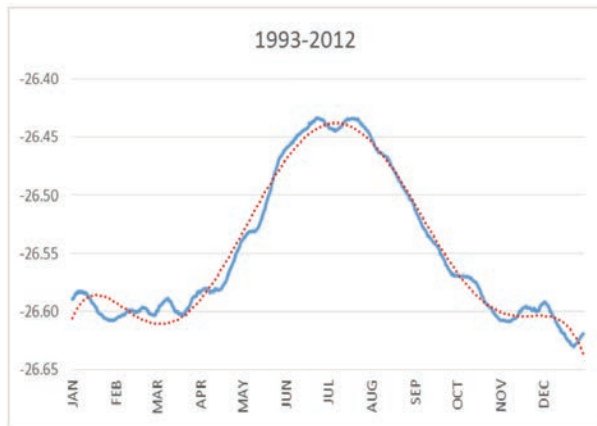


نگاره ۱۱: روند و میزان تغییرات
 تراز دریای خزر طی سالهای
 ۱۹۹۳-۲۰۱۳

در ادامه، به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده از روش فوق که حاصل پردازش داده‌های ماهواره‌ای می‌باشد از داده‌های ارتفاعسنجی ۳ ایستگاه مستقر در خزر استفاده می‌شود. (مرکز تحقیقات هیدرومتئوریکولوژیک فدراسیون روسیه)^۱ موقعیت مکانی این ایستگاه‌ها در نگاره ۱۳ و مقاطع تغییرات تراز این ایستگاه‌ها در نگاره ۱۴ نمایش داده شده است. بررسی این مقادیر و مقایسه آنها با مقادیر بدست آمده از روش بکاررفته، تأییدی بر روند ارائه شده می‌باشد. تغییرات تراز دریای خزر در ماه‌های مختلف سال متفاوت می‌باشد. سری زمانی داده‌های ترازسنجی سطح آب دریای خزر محاسبه شده در مدل بیانگر میانگین مطلق تراز در کل خزر می‌باشد که روند افزایشی را در نیمه نخست سال تقریباً از ماه مارس تا ماه جولای نشان می‌دهد و پس از آن در نیمه دوم سال یعنی از ماه جولای تا دسامبر تغییرات تراز سطح آب روند کاهشی را طی می‌کند (نگاره ۱۵). این افزایش به آن سبب است که در این ماه‌ها، هوا در منطقه سرچشمه رود ولگا نسبتاً گرم‌تر است و در نتیجه ذوب برف‌ها و جاری شدن سیلاب باعث تغییر در رژیم رودخانه ولگا شده و ورود مقدار قابل توجهی آب به دریای خزر را موجب می‌شود. غالب تغییرات فصلی این دریا نیز مانند تغییرات تمام دریاچه‌های کره زمین در اثر طغیان و یا کاهش

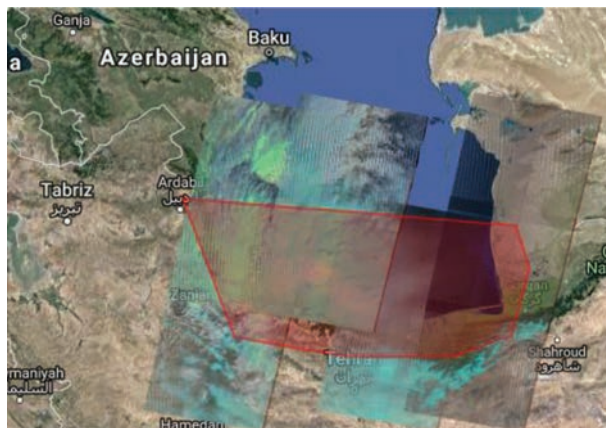


نگاره ۱۲: توپوگرافی دینامیکی لحظه‌ای دریای خزر
 الف- ۱ ژوئن ۱۹۹۵، ب- ۲۰ مارس ۲۰۰۲، ج- ۲۹ ژوئن
 ۲۰۰۵، د- ۲۶ نوامبر ۲۰۱۲



نگاره ۱۵: تغییرات میانگین ماهیانه تراز خزر

در این مرحله به منظور بررسی تغییرات خط ساحلی ناشی از تغییرات تراز آب خزر، به ترسیم خط ساحلی جنوبی خزر براساس روندهای بدست آمده در بخش قبل پرداخته می شود.



نگاره ۱۶: تصاویر ماهواره ای خط ساحلی خزر جنوبی

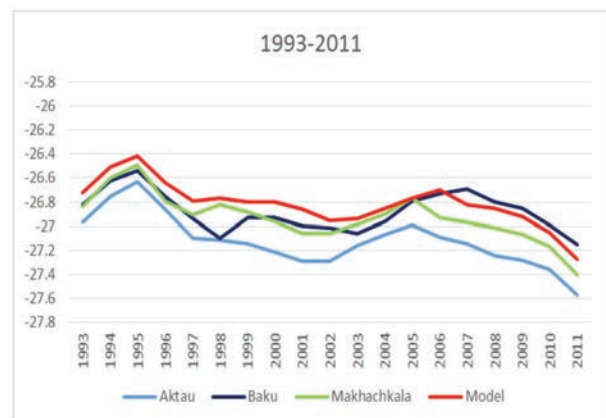
پس از اینکه تصاویر ماهواره ای خطوط ساحلی مذکور در روزهایی که بالاترین و پایین ترین تراز دریای خزر در دوره ۲۰ ساله مطالعاتی (۱ ژوئن ۱۹۹۵ و ۲۶ نوامبر ۲۰۱۲) رخ داده است، استخراج گردید (نگاره ۱۶) و با انطباق این تصاویر بر روی هم و ترسیم خط ساحلی بر روی آنها، همانگونه که در نگاره ۱۷ مشاهده می گردد، در تمامی خطوط ساحلی جنوب خزر تغییرات قابل رؤیت بوده ولی در جنوب شرقی یعنی خلیج گرگان (میانکاله) بسیار محسوس می باشد که علت آن شیب کمتر سواحل جنوب شرقی خزر نسبت به

آب رودخانه هایی که به آن می ریزد به وجود می آید. به طور معمول حجم زیاد آب در طغیان بهاری باعث می شود که تراز دریا بالا برود و بعد به شرایط قبلی بازگردد. عوامل مختلفی بر این تغییرات اثرگذارند که بارش، تبخیر، آب های زیرزمینی، رودخانه ها و آبراهه ها و تبادل آبی با دریای خزر از جمله این عوامل می باشند.

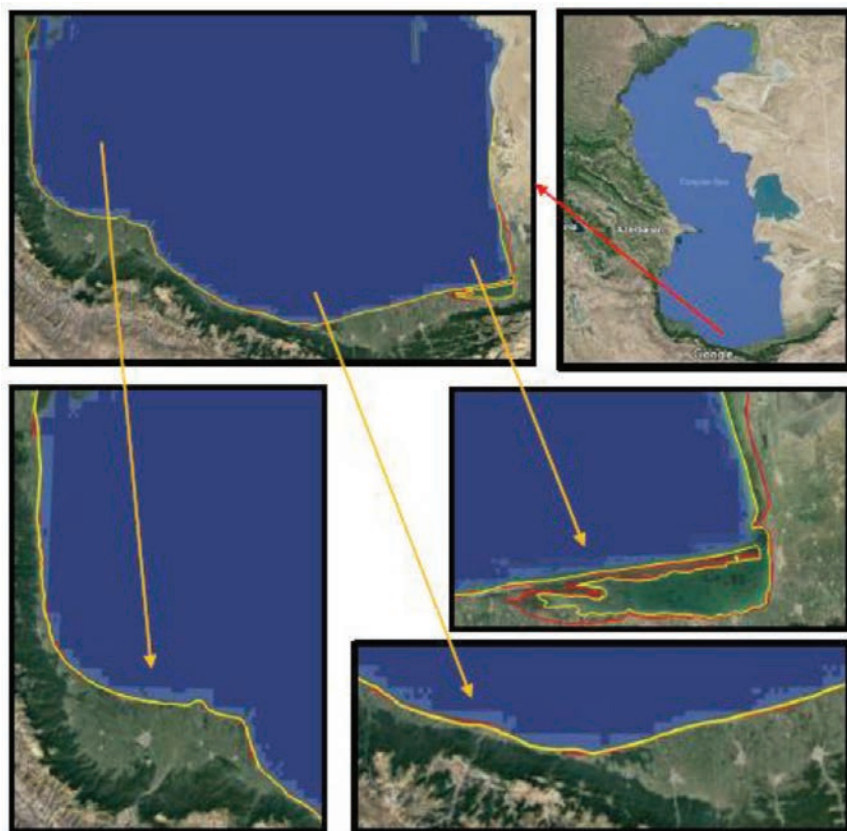
دریای خزر تقریباً در عرض های پایین قرار دارد. از اینرو مقدار قابل توجهی از پرتوهای خورشیدی را دریافت می کند و به دلیل تبخیرشدید سطحی خزر در اثر گرم شدن سطح کره زمین به صورت مداوم سطح آب آن کاهش می یابد



نگاره ۱۳: موقعیت ایستگاه های ارتفاع سنجی



نگاره ۱۴: مقایسه سری های زمانی تغییرات تراز خزر در مدل و سه ایستگاه مستقر در آن



نگاره ۱۷: تغییرات خط ساحلی خزر جنوبی از سال ۱۹۹۵ (رنگ قرمز) تا سال ۲۰۱۲ (رنگ زرد)

از مدل‌های ژئوپتانسیل، سطح متوسط تراز دریا، متوسط توپوگرافی دینامیکی دریا، آنامولی تراز دریا و نهایتاً توپوگرافی دینامیکی مطلق تراز دریا بدست آمد. بررسی مقاطع تغییرات تراز دریا نشان از منفی بودن روند تغییرات دارد به صورتی که مقدار اختلاف بالاترین و پایین‌ترین تراز در بازه زمانی این تحقیق، $1/287$ - متر می‌باشد.

در بین سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۲ تغییرات تراز دریا در شش دوره زمانی رخ داده است: افزایش شدید با نرخ تغییرات بیش از ۱۰ سانتی متر در سال (۱۹۹۳-۱۹۹۵)، کاهش شدید با نرخ تغییرات بیش از ۹ سانتی متر در سال (۱۹۹۵-۱۹۹۷)، کاهش ملایم با نرخ تغییرات حدود ۳ سانتی متر در سال (۱۹۹۷-۲۰۰۲)، افزایش ملایم با نرخ تغییرات ۶ سانتی متر در سال (۲۰۰۲-۲۰۰۵)، کاهش ملایم با نرخ تغییرات ۷ سانتی متر در سال (۲۰۰۵-۲۰۱۰) و کاهش شدید با نرخ تغییرات حدود ۱۶ سانتی متر در

سایر نقاط آن می‌باشد (کاکرودی و همکاران، ۲۰۱۲). با بررسی تغییرات خط ساحلی در این ناحیه و محاسبه مساحت تغییر یافته ناشی از خشک شدن دریا در پیامد پایین رفتن تراز آب، پسروی خط ساحلی به وضوح مشاهده می‌شود.

در نگاره‌های ۱۶ و ۱۷ تغییرات خط ساحلی در مساحتی بالغ بر ۱۰۰۰۰ هکتار در طی سال‌هایی که ارتفاع تراز آب خزر مقادیر بیشینه (سال ۱۹۹۵) و مقادیر کمینه (سال ۲۰۱۲) دارند، نمایش داده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور بررسی تغییرات تراز دریای خزر و اثرات ناشی از آن بر روی خط ساحلی جنوبی این دریا، در یک بازه زمانی ۲۰ ساله از داده‌های ماهواره‌ای ارتفاع‌سنجی استفاده شد. با استفاده از این داده‌های ماهواره‌ای، ژئوئید حاصل

وارد خواهد شد. ماهیگیری با اختلال روبه‌رو شده و اقتصاد مردم تحت تأثیر قرار گرفته و نیز بخش‌های ساحلی که دچار پسروی شده‌اند به کانون‌های گردوغبار تبدیل خواهند شد. در صورت نبود تمهیدات لازم متأسفانه بایستی شاهد بحران‌های زیست محیطی جدی در سواحل جنوبی خزر باشیم.

منابع و مأخذ

۱. آزموده اردلان، ع.، و عرب صاحبی، ر. (۱۳۹۵). تعیین میدان پتانسیل ثقل محلی در دریا با استفاده از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای مطالعه خاص: تعیین میدان ثقل در جزیره قشم، نشریه علمی پژوهشی دانشکده فنی دانشگاه تهران، دوره سی و نهم، شماره ۵، ۶۳۳-۶۴۴.
۲. دریاباری، سیدجمال الدین. (۱۳۸۸). مدیریت سواحل دریای مازندران با تأکید بر نوسانات آب دریا، نشریه علمی پژوهشی نگرش‌های نو در جغرافیای انسانی، دوره دوم، شماره ۱، ۱۱۱-۱۲۴.
۳. صفری، ع.، شریفی، م.، و زارعی، ص. (۱۳۹۳). ارزیابی روش‌های محاسبه آنومالی جاذبی در دریا با استفاده از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای در دریای عمان، نشریه علمی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دوره پنجم، شماره ۲، ۱۹-۲۶.
۴. عطایی، س.، عجمی، م.، لشته نشایی، ا.، و یعصوی، ح. (۱۳۹۵). تأثیر نوسانات تراز آب دریا بر تغییرات خطوط ساحلی دریای خزر، نشریه علمی پژوهشی مهندسی دریا، سال دوازدهم، شماره ۲۴، ۱۰۳-۱۱۳.
۵. غلامی، م.، و عباسی، م. (۱۳۹۴). تغییر اقلیم دریای خزر، پنجمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران، سازمان هواشناسی، https://www.civilica.com/Paper-RCCC05-RCCC05_125.html
۶. کردوانی، پ.، یوسفی روشن، م.، و مهدوی، م. (۱۳۹۲). مخاطرات ژئومورفولوژیک ناشی از نوسان آب دریای خزر (مطالعه موردی: بابلسر تا چالوس)، نشریه علمی

سال (۲۰۱۲-۲۰۱۰). بررسی مشاهدات نشان می‌دهد برای تمامی سال‌ها شیب تغییرات منفی نمی‌باشد. با توجه به روند تغییرات غیر یکنواخت، تراز دریا گاهی به کاهش سطح تراز آب به بیش از ۱۵ سانتی متر در سال رسیده و گاهی شتاب فزاینده افزایش تراز آن به مقادیر بیش از ۱۰ سانتی متر در سال نزدیک شده است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد دریای خزر به لحاظ دینامیک نوسانات سطح تراز آب بسیار متفاوت عمل می‌کند و پیش‌بینی آتی تراز آب خزر در بازه بلند مدت با خطا همراه است. می‌توان گفت تعمیم روند تغییرات زمانی تراز آب خزر، به منظور پیش‌بینی آتی آن حکایت از روند کاهنده تراز آب دریا دارد.

از پیامدهای ناشی از تغییرات منفی تراز دریا، می‌توان به فرآیند پسروی خزر اشاره نمود که از سال ۱۹۹۵ میلادی آغاز شده و تاکنون ادامه دارد و در غالب نقاط ساحل جنوبی خزر رؤیت می‌شود. ولی پسروی در خلیج گرگان بسیار محسوس بوده و ماحصل آن خشک شدن بیش از ۱۰۰۰۰ هکتار از سطح دریا در این منطقه می‌باشد. علت تغییرات بیشتر خط ساحلی در قسمت شرقی را می‌توان در شیب ملایم‌تر دریا در این ناحیه نسبت به سایر قسمت‌های ساحل جنوبی خزر دانست.

به منظور پیش‌بینی تراز دریای خزر و نیز تغییرات خط ساحلی در ۲۰ تا ۳۰ سال آینده لازم است یک مدل هیدرولوژیک با محاسبه بودجه آبی خزر مورد استفاده قرار گیرد که مستلزم ارائه مدلی است که عوامل تأثیرگذار مانند بارش، تبخیر، آب‌های زیرزمینی، رودخانه‌ها و آبراهه‌ها و تبادل آبی با دریای خزر در آن به درستی تعیین گردند. تأثیر تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین بر روی بزرگ‌ترین دریاچه دنیا، اثرات خود را به صورت کاهش سریع سطح تراز آب نمایش می‌دهد که تبعات ناشی از آن می‌تواند به لحاظ اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی بسیار سنگین باشد. خشک شدن تالاب‌ها، کارکرد آنها را کاهش داده و با کم آب شدن آنها تأثیرات منفی بر اکوسیستم منطقه

"Modern problems of remote sensing of the Earth from space, PP. 254-254.

16. Gunduz, M., & Özsoy, E. (2014). Modelling seasonal circulation and thermohaline structure of the Caspian Sea. *Ocean Science*, 10(3), 459-471.

17. Ibrayev, R. A., Özsoy, E., Schrum, C., & Sur, H. I. (2010). Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction. *Ocean Science*, 6(1).

18. Janusz-Pawletta, B. (2015). Protection of the Marine Environment of the Caspian Sea. In *The Legal Status of the Caspian Sea* (pp. 117-163). Springer, Berlin, Heidelberg.

19. Kakroodi, A. A., Kroonenberg, S. B., Hoogendoorn, R. M., Khani, H. M., Yamani, M., Ghassemi, M. R., & Lahijani, H. A. K. (2012). Rapid Holocene sea-level changes along the Iranian Caspian coast. *Quaternary International*, 263, 93-103.

20. Klige, R. K., & Myagkov, M. S. (1992). Changes in the water regime of the Caspian Sea. *Geojournal*, 27(3), 299-307.

21. Kosarev, A. N. (2005). Physico-geographical conditions of the Caspian Sea. In *The Caspian Sea Environment* (pp. 5-31). Springer, Berlin, Heidelberg.

22. Lebedev, S. A. (2016, May). Investigation seasonal and interannual variability of the Caspian Sea dynamics based on satellite altimetry data. In *Proceedings of Living Planet Symposium*, Prague, Czech Republic from (pp. 9-13).

23. Lebedev, S. A., & Kostianoy, A. G. (2005). Satellite altimetry of the Caspian Sea. *Sea*, Moscow, 366.

24. Mamaev, V., Gugele, B., Strobel, B., Taylor, P., Ritter, M., & Jaoshvili, S. (2002). *The Caspian Sea*. European Environment Agency. Available at: http://www.eea.europa.eu/publications/report_2002_0524_154909/regional-seas-aroundeurope/CaspianSea.pdf.

25. Markandya, A. (2004). Gains of regional cooperation: Environmental problems and solutions (No. 80). ZEF Discussion Papers on Development Policy.

پژوهشی اکوسیستم‌های ایران، دوره چهارم، شماره ۱، ۱۱۵-۱۳۰.

۷. لاری، ک.، و ابره دری، م. (۱۳۹۱). تلفیق T/P و Jason-1 برای تعیین توپوگرافی سطح دریا در خلیج فارس و دریای عمان، نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون دریایی، دوره یازدهم، شماره ۳، ۳۴-۴۴.

۸. لرستانی، ق. (۱۳۹۴). پیش بینی مقدار تغییرات سالانه خط ساحلی دریای خزر (محدوده دلتای رودخانه‌ای گرگان رود)، نشریه علمی پژوهشی پژوهش‌های جغرافیایی، دوره چهل و هفتم، شماره ۲، ۲۴۱-۲۵۴.

9. Anzenhofer, M., Shum, C. K., & Rentsh, M. (1999). Coastal altimetry and applications. Ohio State University. Division of Geodetic Science. Report No.464.

10. Arpe, K., Leroy, S. A. G., Wetterhall, F., Khan, V., Hagemann, S., & Lahijani, H. (2014). Prediction of the Caspian Sea level using ECMWF seasonal forecasts and reanalysis. *Theoretical and applied climatology*, 117(1-2), 41-60.

11. Arpe, K., & Leroy, S. A. (2007). The Caspian Sea Level forced by the atmospheric circulation, as observed and modelled. *Quaternary international*, 173, 144-152.

12. Barbosa, S. (2006). Sea level change in the North Atlantic from tide gauges and satellite altimetry (Doctoral dissertation, PhD Thesis (submitted), University of Porto).

13. Chen, J. L., Pekker, T., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Kostianoy, A. G., Cretaux, J. F., & Safarov, E. S. (2017). Longterm Caspian Sea level change. *Geophysical Research Letters*, 44(13), 6993-7001.

14. Erol, B., Işık, M. S., & Erol, S. (2020). An Assessment of the GOCE High-Level Processing Facility (HPF) Released Global Geopotential Models with Regional Test Results in Turkey. *Remote Sensing*, 12(3), 586.

15. Ginzburg, A.I., & Kostyanoy, A.G. (2018). Trends in the hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990s – 2017). In *The collection of abstracts of the sixteenth All-Russian open conference*

- Gammisch, R., 1995. Geology of the Wrightsville Beach, North Carolina shoreface: Implications for the concept of shoreface profile of equilibrium. *Marine Geology*, 126(1-4), 271-287.
36. Turuncoglu, U. U., Elguindi, N., Giorgi, F., Fournier, N., & Giuliani, G. (2013). Development and validation of a regional coupled atmosphere lake model for the Caspian Sea Basin. *Climate dynamics*, 41(7-8), 1731-1748.
37. Vanicek, P., & Krakiwsky, E. J. (2015). *Geodesy: the concepts*. Elsevier.
38. Yi, W., & Rummel, R. (2014). A comparison of GOCE gravitational models with EGM2008. *Journal of Geodynamics*, 73, 14-22.
26. Markandya, A., & Auty, R. M. (2005). 10 Environmental problems and solutions in the Caspian and Aral Basins. *Energy, Wealth and Governance in the Caucasus and Central Asia: Lessons not learned*, 177.
27. Nerem, R. S., Chambers, D. P., Choe, C., & Mitchum, G. T. (2010). Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions. *Marine Geodesy*, 33(S1), 435-446.
28. Rechakov, G.L. (1997). Holocene Oscillation of the Caspian Sea, and Forecast Based on the Caspian, Sea and Forecast Based on Paleogeographical Reconstructions. *Quaternary International*, Vol. 41-42, PP. 167-172.
29. Renssen, H., Lougheed, B. C., Aerts, J. C. J. H., De Moel, H., Ward, P. J., & Kwadijk, J. C. J. (2007). Simulating long-term Caspian Sea level changes: the impact of Holocene and future climate conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(3-4), 685-693.
30. Rio, M. H., & Hernandez, F. (2004). A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C12).
31. Rodionov, S. (2012). *Global and regional climate interaction: the Caspian Sea experience* (Vol. 11). Springer Science & Business Media.
32. Rucevska, I., & Rekeciewicz, P. (2006). *Vital Caspian Graphics: Challenges beyond Caviar*. UNEP/Earthprint.
33. Safari, A. A., Kalantarioun, S., & Amini, H. (2015). An approach to the spectral analysis of the Jason-2 satellite altimetry observations based on stationary time series Case study: spectral analysis of instantaneous sea level of the Caspian Sea. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 5(1), 271-285.
34. Szűcs, E. (2012). Validation of GOCE time-wise gravity field models using GPS-levelling, gravity, vertical deflections and gravity gradient measurements in Hungary. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 56(1), 3-11.
35. Thieler, E.R., Brill, A.L., Cleary, W.J., Hobbs, C.H.,