

بررسی روند سیزده ساله تغییرات سطح آب دریای خزر از راه ارتفاعسنجی ماهواره‌ای

علیرضا آزموده اردلان^{۱*} و عباس جعفری^۲

^۱دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری و مقابله با سوانح طبیعی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران
^۲دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هیدروگرافی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری و مقابله با سوانح طبیعی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۴/۱۲/۲۲، پذیرش نهایی: ۸۵/۶/۲۸)

چکیده

هدف این مقاله بررسی روند تغییرات سطح آب دریای خزر در طی سیزده سال گذشته به کمک ارتفاعسنجی ماهواره‌ای است. داده‌های ارتفاعسنجی از طریق ماهواره‌های Jason-I و Topex/Poseidon تامین و از داده‌های تاییدگی‌های ساحلی بندر انزلی، بندر صدا و بندر نوشهر برای کنترل نتایج حاصل از ارتفاعسنجی ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. عمده دستاوردهای این مطالعه که در مقاله حاضر ارائه خواهد شد، به شرح ذیل‌اند:

- ۱- بررسی روند تغییرات سطح آب دریای خزر با استفاده از داده‌های تاییدگی‌های ساحلی در بنادر پیش گفته.
- ۲- بررسی روند تغییرات سطح آب دریای خزر با استفاده از داده‌های ارتفاعسنجی.
- ۳- استفاده از تبدیل فوریه و سرشکنی کمترین مربعات برای تعیین تغییرات تناوبی سطح آب دریای خزر از راه ارتفاعسنجی ماهواره‌ای و تاییدگی‌های ساحلی.
- ۴- کشف اختلاف ارتفاع ارتومتریک ۳/۵ متری از شمال به جنوب در دریای خزر.
- ۵- تعریف ارتفاع دینامیک برای دریای خزر و اثبات غیر جاذبی بودن اختلاف ارتفاع مشاهده شده در ارتفاع ارتومتریک سطح آب دریای خزر.

واژه‌های کلیدی: دریای خزر، ارتفاعسنجی ماهواره‌ای، Jason، Topex/Poseidon، آنالیز فوریه، تغییرات سطح آب دریا

۱ مقدمه

مشکلاتی همچون یکسان نبودن مبنای ارتفاعی، کار دشواری است. در مقابل ارتفاعسنجی ماهواره‌ای می‌تواند اطلاعات جامعی از تراز آب و تغییرات آن نسبت به یک سطح مبنا واحد به دست دهد که این، مزیت اصلی ارتفاعسنجی ماهواره‌ای بر مشاهدات تاییدگی‌های ساحلی به‌شمار می‌رود.

در حال حاضر، Jason-I، Topex/Poseidon (T/P) و ERS1/2 ماهواره‌های فعال ارتفاعسنجی‌اند (بنادا، ۱۹۹۷)، که حاصل مأموریت آنها اطلاعات ذی‌قیمتی از دینامیک سطح آب‌های جهان است. ارتفاعسنجی T/P در شرایط معمولی دارای دقت $\pm 2/4\text{cm}$ و صحت $\pm 14\text{cm}$ و ارتفاعسنجی Jason-I دارای صحت $\pm 4/2\text{cm}$ روی میانگین ۱ ثانیه‌ای (شامل ۲۰ مشاهده) در شرایط مختلف اقیانوسی، است (بنادا، ۱۹۹۷). منظور از دقت، قابلیت

یکی از مشکلات ملی در سال‌های اخیر، افزایش ارتفاع سطح آب دریای خزر، تأثیرات مخرب آن بر تأسیسات نیروی دریایی، بندری و شیلات، صنایع کشتیرانی، حمل و نقل، نیروگاه برق نکا، ناحیه‌های مسکونی و نیز صدمات جبران‌ناپذیر محیط زیست ساحلی است. بر این اساس و نیز با توجه به لزوم بررسی و پایش (monitoring) تغییرات سطح آب دریای خزر، در سال ۱۳۶۵ هجری شمسی، مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر تأسیس شد.

تعیین سطح تراز دریای خزر از سال ۱۳۰۵ هجری شمسی در بندر انزلی و در ایستگاه‌های آستارا، غازیان، نکا (بندر صدا،) امیرآباد (نکا) و بندر ترکمن (آشوراده) از سال ۱۳۷۸ آغاز شده است. هر چند این ایستگاه‌ها، اطلاعات موضعی دقیقی از تراز آب دریا به دست می‌دهند، اما ترکیب اطلاعات این تاییدگی‌ها به دلیل

اطلاعات لازم برای حذف خطاهای دستگاهی و تغییرات کالیبره کردن دستگاهی، شامل خطاهای زاویه سمت‌القدم، جابه‌جایی مرکز جرم و ترم‌های وابسته به شتاب‌های موجود در ارتفاع‌سنج نظیر انتقال دوپلری و دریافت اسیلاتور موجود است. علاوه بر پارامترها، مدل‌های تصحیح مربوطه در فایل GDR برای هر دو باند Ku و باند C موجود است. با اعمال این تصحیحات به طول اندازه‌گیری شده (برد ماهواره) طول تصحیح شده (برد تصحیح شده) به صورت زیر حاصل می‌شود:

برد اندازه‌گیری شده = برد تصحیح شده

تصحیح گشت‌سپهر (تروپوسفر) خشک +

تصحیح گشت‌سپهر تر +

تصحیح یون‌سپهر (یونسفر) +

تصحیح بایاس وضعیت دریا +

با در اختیار داشتن برد تصحیح شده می‌توان ارتفاع سطح دریا، ssh (sea surface height) نسبت به بیضوی رفرانس را از رابطه زیر به دست آورد:

برد تصحیح شده - ارتفاع بیضوی ماهواره = ssh

به این طریق مختص ارتفاعی نقاط تعریف کننده سطح آب دریا که مؤلفه‌های مسطحاتی آنها ϕ, λ ، به خاطر عمود بودن ارتفاع اندازه‌گیری شده بر سطح بیضوی، همان ϕ, λ آنتن ارتفاع‌سنج است، حاصل می‌شود. بخش قابل توجهی از این تحقیق به آماده‌سازی مختصات تصحیح شده سطح آب دریای خزر معطوف شد. چرا که این اطلاعات و نرم‌افزار مربوطه برای آب‌های آزاد موجود بود و برای دریاچه‌ها، که دریای خزر نیز جزء دریاچه‌ها محسوب می‌شود، چنین اطلاعاتی موجود نبود. بدین خاطر پس از جمع‌آوری و آماده‌سازی اطلاعات (حدود ۱۱۰ Giga Byte) به تولید نرم‌افزاری برای دستیابی به اطلاعات سطح آب دریای خزر اقدام شد. نتایجی که در ادامه این مقاله ارائه خواهد شد، حاصل محاسبات این نرم‌افزار است.

تکرار شونده‌گی مشاهدات و صحت، نزدیکی مشاهدات به واقعیت است که از راه مقایسه در نقاط کنترل زمینی قابل برآورد است.

با این مقدمه به بخش بعد و معرفی ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی T/P و Jason-1 و نحوه استخراج اطلاعات تراز سطح آب دریا از این ماهواره‌ها وارد می‌شویم، در ادامه به مقایسه نتایج حاصل از تاییدگی‌های ساحلی با ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای پرداخته و تطابق و هماهنگی آنها و امکان مطالعه گسترده دریای خزر با استفاده از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای را بررسی خواهیم کرد.

۲ ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی Topex/Poseidon و Jason

در این تحقیق همان‌گونه که پیشتر گفته شده به منظور بررسی روند تغییرات سطح آب دریای خزر از داده‌های ماهواره‌های T/P و Jason-1، که محصول مشترک NASA و CNES برای مطالعه آب‌های جهان‌اند، استفاده شده است. ماهواره T/P در ۱۰ اوت ۱۹۹۲ و ماهواره Jason-1 در ادامه ماموریت ماهواره T/P، در ۷ دسامبر ۲۰۰۱ به فضا پرتاب شد. در این ماموریت‌ها از فن ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای برای مشاهده دقیق و گسترده سطح دریای جهان استفاده شده است.

ارتفاع‌سنجی بخش اصلی این ماهواره‌ها است. ارتفاع‌سنجی با ارسال پالس‌های کوتاه از امواج الکترومغناطیس و اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت موج ارسالی، ارتفاع را اندازه‌گیری می‌کند. این مشاهده، برد (range) نامیده می‌شود، که فاصله بین آنتن فرستنده و سطح آب را به دست می‌دهد. برای مثال، ارتفاع‌سنجی دو بسامدی Jason-1 در دو باند Ku و C قادر به اندازه‌گیری فاصله و انکسار یون‌سپهری است. همه اندازه‌گیری‌ها در فایل داده‌های ماهواره (GDR) ذخیره می‌شود.

در فایل GDR ماهواره Jason-1 علاوه بر مشاهده برد

۳ تغییرات سطح آب دریای خزر

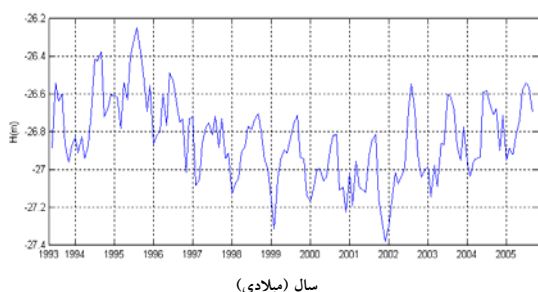
تایدگیج بندرانزلی، تغییرات سطح آب دریای خزر را از سال ۱۳۰۵ ثبت کرده است. شکل (۱) نمودار تغییرات سطح آب دریای خزر را از سال ۱۳۰۵ تا ۱۳۸۲ نشان می‌دهد. براساس اطلاعات این تایدگیج آب دریای خزر از زمان آغاز ثبت اطلاعات تا سال ۱۳۵۶ دارای روندی کاهنده تا پایین‌ترین میزان خود بوده است و از آن پس در یک سیر صعودی تا سال ۱۳۷۴ به ۲/۳ متر افزایش یافته است.

از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌های Jason-1 و T/P که از ۱۹۹۳ به بعد در اختیار است نیز می‌توان روند تغییرات سطح آب دریای خزر را بررسی کرد. شکل (۲) نمودار تغییرات سطح آب دریای خزر با استفاده از این ماهواره‌ها است. با توجه به این شکل در ۱۹۹۵ تراز آب به بالاترین سطح خود رسیده و از ۱۹۹۵ با سرعت میانگین ۹ سانتی‌متر در سال کاهش یافت و این روند تا سال ۲۰۰۱ ادامه داشت و از آن سال به بعد روندی افزایشی با سرعت میانگین ۱۰ سانتی‌متر در سال را تا اواخر سال ۲۰۰۵ در پیش گرفته است.

با توجه به موارد ذکر شده و نمودار تغییرات آب دریای خزر در شکل‌های (۱) و (۲) می‌توان نتیجه گرفت که:

- ۱- ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و تایدگیج‌های ساحلی نشان‌دهنده اطلاعات یکسانی‌اند.
- ۲- تغییرات کلی (دراز مدت) تراز آب دریا دارای دوره تناوب نیستند بلکه عمده تغییرات ناشی از اثرات دوره‌ای اقلیمی، آب هوایی و تغییر ورودی (دبی) آب رودخانه‌ها به این دریاچه است. مورد اخیر را در ادامه مقاله به اثبات خواهیم رساند.

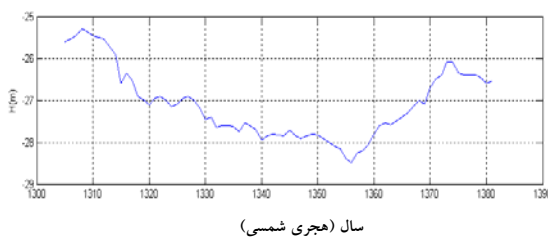
از آنجا که بارزترین دوره اقلیمی، دوره سالیانه است در شکل (۳) به بررسی تغییرات سالیانه آب دریای خزر خواهیم پرداخت. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود می‌توان یک تناوب سالیانه در تراز آب دریا، با حداقل مقدار در زمستان و روند افزایشی از زمستان تا تابستان و نهایتاً بالاترین حد در تابستان را مشاهده کرد که همه ساله تکرار می‌شود.



سال (میلادی)

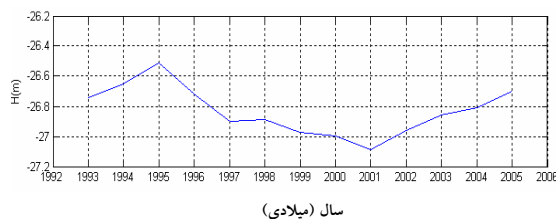
شکل ۳. نمودار تغییرات ارتفاع آب دریای خزر، به صورت ماهیانه، در نقطه‌ای به مختصات $N = 43^{\circ}15'32.66''$ و $E = 49^{\circ}22'56.49''$ براساس مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای.

به علاوه در شکل (۳) که مربوط به نقطه‌ای در دریای خزر با مختصات $N = 43^{\circ}15'32.66''$ و $E = 49^{\circ}22'56.49''$ برای مدت ۱۲ سال، از سال ۱۳۷۳ تا سال ۱۳۸۴ است، می‌توان مشاهده کرد که تراز آب هر سال نسبت به سال قبل تغییراتی در دامنه و حداکثر مقادیر تابستانی و حداقل مقادیر زمستانی دارد. برای مثال در سال



سال (هجری شمسی)

شکل ۱. نمودار تغییرات سطح آب دریای خزر در تایدگیج بندرانزلی بر اساس میانگین ماهیانه مشاهدات تایدگیج.



سال (میلادی)

شکل ۲. نمودار تغییرات سطح آب دریای خزر براساس میانگین سالیانه ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای.

به طور کلی میانگین حجم آب وارده از رودخانه‌ها مختلف به دریای خزر از سال ۱۹۵۰ تا ۱۹۹۳ معادل ۲۵۲/۸ کیلومتر مکعب در سال بوده است، در حالی که در طی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۷ که سطح آب دریای خزر روند نزولی داشته، این میانگین برابر ۲۴۱/۰۳ کیلومتر مکعب در سال و در مدت بالا آمدن سطح تراز آب از سال ۱۹۷۷ تا ۱۹۹۳ این میانگین به ۲۷۳/۴۴ کیلومتر مکعب رسیده است، که نشان می‌دهد عوامل اصلی تغییرات تراز آب دریای خزر، دبی آب رودخانه‌های مشروب کننده آن است. چرا که در زمان نزول سطح آب، میانگین ورودی آب ۱۱/۷۷ کیلومتر مکعب نسبت به میانگین کل کمتر و در زمان افزایش سطح آب ۲۰/۶۴ کیلومتر مکعب از میانگین کل بیشتر بوده است.

۵ آنالیز فوریه اطلاعات سطح آب دریای خزر

در اختیار بودن داده‌های تاییدگیج‌های بندر انزلی، نکا (بندر صدرا) و بندر نوشهر، در یک دوره دو ساله، با فاصله زمانی ماهیانه، ما را بر آن داشت که با استفاده از تبدیل فوریه، به آنالیز طیفی داده‌های این تاییدگیج‌ها پردازیم. نتایج حاصل از این آنالیز به شرح زیر است:

۱- برای هر سه تاییدگیج تناوب‌های اصلی ۳۶۵/۲۵ و ۱۸۲/۶۲۵ روزه بوده که نشان‌دهنده تناوب سالیانه و شش ماهه است.

۲- از آنجایی که بسامد نمونه برداری این داده‌ها ماهیانه است، امکان دست‌یابی به تناوب‌های کمتر از ۲ ماه میسر نبوده، و ارائه بسامدهای حاصل بر حسب روز صحیح نیست. بدین خاطر به بسامدهای حاصل، بسامدهای ۶ ماهه و ۱۲ ماهه اطلاق خواهد شد.

آنالیز مشابه فوق را می‌توان روی اطلاعات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای عملی کرد. تفاوت عمده در مورد ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در مقایسه با تاییدگیج‌های ساحلی در پوشش گسترده آنها و بنابراین، آزادی عمل

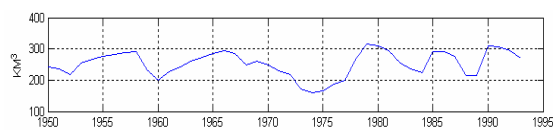
۱۳۷۶ بالاترین تراز آب در ۱ مرداد ماه اتفاق افتاده است. از ۱ مرداد ماه به بعد تراز آب نزول کرده است. در دی ماه همان سال به پایین‌ترین سطح خود رسیده و در سال ۱۳۷۸ بالاترین سطح آب در شهریور ماه رخ داده است. پایین‌ترین سطح آب در ماه بهمن و در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰ نیز بالاترین سطح آب در شهریور ماه و پایین‌ترین سطح آب در آذر ماه رخ داده است.

۴ تراز آب دریای خزر در سال‌های ۱۹۷۸ تا ۱۹۹۳

در یک صد سال گذشته، سطح آب دریای خزر دارای روند متمایز نزولی بوده است. تا اواسط دهه ۱۹۷۰، سطح آب دریای خزر تقریباً ۳ متر کمتر از میزان آن در آغاز قرن حاضر بوده که این نشان‌دهنده نرخ میانگین کاهش ۳/۸ سانتی‌متر در سال است. پس از پایین‌ترین سطح تراز آب ثبت شده در سال ۱۹۷۷، سطح آب شروع به بالا آمدن کرده و تقریباً به ۲/۸۳ متر بیشتر از کمترین مقدار خود افزایش داشته است (جعفری، ۱۳۸۴).

از آنجا که بیشتر از ۸۰٪ آب ورودی به دریای خزر بارود ولگا تأمین می‌شود. در این قسمت ورودی آب این رودخانه و تغییرات و تراز آب دریای خزر را در مجاورت یکدیگر بررسی خواهیم کرد.

میانگین حجم آبی که رودخانه ولگا در سال‌های ۱۹۷۸ تا ۱۹۹۳ به دریاچه ریخته، معادل ۳۰۷ کیلومتر مکعب در سال بوده است که ۱۸ کیلومتر مکعب در سال، بیشتر از میانگین بلند مدت ورودی آب این رودخانه به دریای خزر است. شکل (۴) نمودار تغییرات ورودی آب همه رودخانه‌ها منتهی به دریای خزر را نشان می‌دهد (مدد، ۱۳۷۵).



شکل ۴. نمودار تغییرات ورودی آب رودخانه‌ای به دریای خزر (مدد، ۱۳۷۵).

آن داشت تا با استفاده از ژئوئید حاصل از بسط هارمونیک‌های بیضوی تا درجه و مرتبه ۳۶۰، ssh را به ارتفاع ارتومتریک تبدیل کنیم. تعیین ژئوئید با استفاده از ضرایب ژئوپتانسیلی مستلزم تعیین پتانسیل گرانی روی بیضوی رفرانس و سپس استفاده از فرمول برونز برای تعیین ارتفاع ژئوئید است. توضیحات بیشتر در خصوص این نحوه را می‌توان در اردلان (۱۹۹۹) یافت. در ارتفاع ارتومتریک به دست آمده برای همه ماه‌های سال شاهد یک اختلاف ارتفاع ۳/۵ متری از شمال (ارتفاع بیشتر) به جنوب (ارتفاع کمتر) بودیم، که نشان‌دهنده شیئی معادل $10^{-4} \times 3/2$ است. دیدن چنین اختلاف ارتفاعی ما را بر آن داشت که به دنبال علت آن باشیم (شکل ۵ و ۶). در اولین قدم، به بررسی این اختلاف ارتفاع در فضای پتانسیل اقدام شد. پیش‌نیاز این عمل آشنایی با نظریه ارتفاعات از دیدگاه پتانسیل است که در زیر به آن می‌پردازیم.

۷ نظریه ارتفاعات

ارتفاع از دیدگاه عمومی به معنای فاصله هر نقطه در امتداد خط شاغولی از سطح دریا است، که از دیدگاه ژئودزی این تنها یک نوع از انواع ارتفاع است و به آن ارتفاع ارتومتریک اطلاق می‌شود. برای به دست آوردن ارتفاع یک نقطه از سطح دریا، از ترازیبی استفاده می‌شود. مسیرهای متفاوت در ترازیبی، ارتفاع‌های متفاوتی را به دست می‌دهند. مثلاً اگر از دو مسیر متفاوت از خلیج فارس به شمال کشور حرکت کنیم، اعداد حاصل برای ارتفاع، صرف‌نظر از خطاهای ترازیبی، با هم مساوی نخواهند بود. علت این امر، موازی نبودن سطوح هم پتانسیل است (ونچک و کراکوسکی، ۱۹۸۶ و هایسکانن و موریتس، ۱۹۶۷). شکل (۷) نشان‌دهنده موازی نبودن سطوح هم پتانسیل و تأثیر آن بر نتایج ترازیبی از مسیرهای متفاوت است.

بیشتر در انتخاب محل آنالیز فوریه است. در اینجا برای نمونه دو نقطه به مختصات $\varphi_1=43^{\circ}15'32/66''$ N و $\lambda_1=49^{\circ}22'56/49''$ E و $\varphi_2=43^{\circ}18'17/54''$ N و $\lambda_2=49^{\circ}18'16/05''$ E از آنالیز فوریه این اطلاعات در هر دو نقطه تناوب‌های ۳۷۵/۳۹۵۸ و ۱۷۳/۲۵۹۶ روزه حاصل شده که نشان‌دهنده تناوب سالیانه و ۶ ماهه حاصل از آنالیز طیفی مشاهدات تایدگیج‌ها است. از آنجا که آنالیز فوریه امکان سرشکنی اطلاعات را فراهم نمی‌آورد، پس از تعیین تناوب‌های یاد شده با تعریف مدلی به صورت زیر که همان بسط فوریه با در نظر گرفتن دو بسامد اصلی حاصل از آنالیز فوریه است به برآورد دامنه، و تناوب دقیق‌تر این بسامدها پرداختیم.

$$ssh = a_0 + \sum_{i=1}^2 a_i \cos(w_i t) + b_i \sin(w_i t) \quad (1)$$

در فرمول (۱) پارامتر a_0 نشان‌دهنده سطح متوسط تراز دریا که با زمان تغییر نمی‌کند و $\{a_i, b_i\}$ دامنه‌های بسامد w_i و ssh کمیت مشاهداتی ارتفاع سنجی ماهواره‌ای (ارتفاع لحظه‌ای سطح آب دریا نسبت به یک بیضوی رفرانس در امتداد حرکت ماهواره) است. رابطه (۱) مدلی غیرخطی است و برای برآورد ضرایب $\{a_0, a_i, b_i\}$ و بسامد w_i بر اساس مشاهدات سطح لحظه‌ای آب دریا ssh ، نیاز به خطی‌سازی و مقادیر اولیه دارد که می‌تواند از اطلاعات حاصل از آنالیز فوریه تامین شود. با استفاده از روش کمترین مربعات در مثال بالا، جواب‌های مندرج در جداول (۱) و (۲) به دست آمد.

۶ بررسی سطح آب دریای خزر در سیستم ارتفاعی ارتومتریک

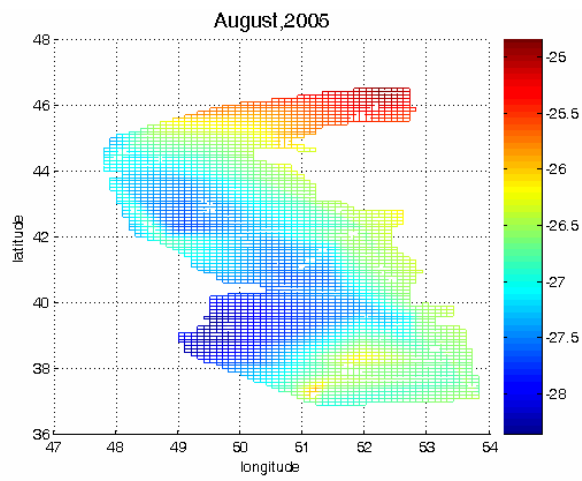
در اختیار داشتن ارتفاع بیضوی سطح آب دریای خزر (ssh) از ارتفاع سنجی ماهواره‌ای T/P و Jason-1 ما را بر

جدول ۱. دامنه و تناوب‌های اصلی تایدگیج‌های بندر انزلی، بندر نوشهر و بندر صدر.

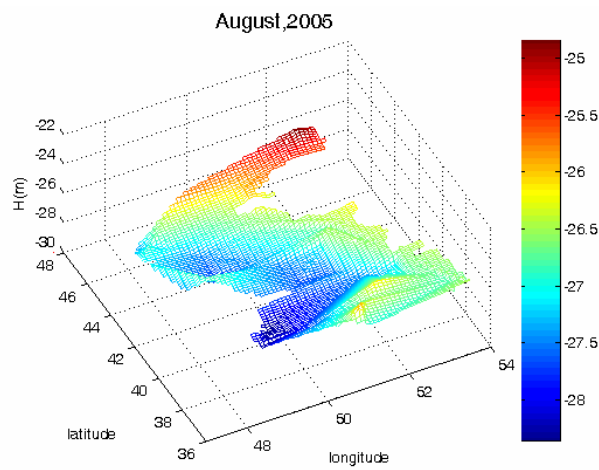
	دامنه (m)	تناوب (ماه)	دامنه (m)	تناوب (ماه)	دامنه (m)
بندر انزلی	-۳۶/۵۳	۱۲	۰/۱۶۷۳	۶	۰/۰۶۸۵
بندر نوشهر	-۲۶/۱۶	۱۲	۰/۲۰۷۷	۶	۰/۰۴۸۵
بندر صدر	-۳۶/۱۸	۱۲	۰/۱۶۲۴	۶	۰/۰۴۱۴
میانگین	-۲۶/۲۹	۱۲	۰/۱۷۹۲	۶	۰/۰۵۲۸

جدول ۲. دامنه و تناوب‌های اصلی در نقاط ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای.

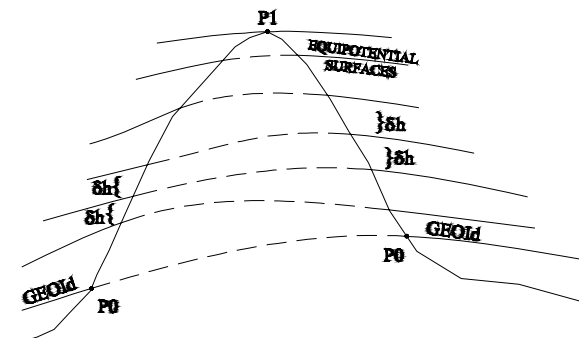
	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	دامنه (m)	تناوب (ماه)	دامنه (m)	تناوب (ماه)	دامنه (m)
۱	۴۳/۳۰۵	۴۹/۳۴۵	-۳۵/۶۱۰	۱۲	۰/۱۵۴۸۹	۶	۰/۰۷۶۰۵
۲	۴۳/۲۵۹	۴۹/۳۸۲	-۳۵/۶۲۹	۱۲	۰/۱۵۸۱۵	۶	۰/۰۷۲۵۴
۳	۴۲/۹۴۳	۴۹/۶۴۰	-۳۵/۷۸۰	۱۲	۰/۱۸۹۵۲	۶	۰/۰۷۸۳۴
۴	۴۲/۶۷۱	۴۹/۸۶۰	-۳۶/۲۳۴	۱۲	۰/۲۱۲۳۸	۶	۰/۰۶۵۸۷
۵	۴۲/۴۸۹	۵۰/۰۰۵	-۳۶/۸۰۹	۱۲	۰/۲۱۳۸۱	۶	۰/۰۶۱۵۱
۶	۴۲/۴۴۳	۵۰/۰۴۱	-۳۷/۰۰۲	۱۲	۰/۱۹۵۷۷	۶	۰/۰۶۷۰۷
۷	۴۲/۳۹۸	۵۰/۰۷۷	-۳۷/۱۸۰	۱۲	۰/۲۰۳۰۷	۶	۰/۰۷۰۶۷
۸	۴۲/۳۵۲	۵۰/۱۱۴	-۳۷/۳۶۱	۱۲	۰/۲۰۹۳۵	۶	۰/۰۶۶۰۹
۹	۴۲/۲۶۱	۵۰/۱۸۵	-۳۷/۷۷۴	۱۲	۰/۲۱۰۰۳	۶	۰/۰۷۷۷۸
۱۰	۴۲/۲۱۶	۵۰/۲۲۱	-۳۷/۹۷۸	۱۲	۰/۱۹۹۴۰	۶	۰/۰۷۳۱۷
۱۱	۴۲/۱۷۰	۵۰/۲۵۷	-۳۸/۱۹۹	۱۲	۰/۲۰۴۶۸	۶	۰/۰۷۱۳۴
۱۲	۴۲/۱۲۵	۵۰/۲۹۲	-۳۸/۴۳۲	۱۲	۰/۲۰۴۵۳	۶	۰/۰۷۸۶۹
۱۳	۴۲/۰۳۳	۵۰/۳۶۴	-۳۸/۹۷۱	۱۲	۰/۲۲۳۴۲	۶	۰/۰۵۹۳۳
۱۴	۴۰/۹۹۹	۵۰/۸۹۶	-۴۴/۰۴۲	۱۲	۰/۱۸۲۲۸	۶	۰/۰۵۲۳۶
۱۵	۴۱/۰۹۱	۵۰/۹۶۵	-۴۳/۰۵۵	۱۲	۰/۱۶۹۶۶	۶	۰/۰۶۱۱۹
۱۶	۴۱/۲۲۸	۵۱/۰۶۸	-۴۱/۷۱۱	۱۲	۰/۱۸۵۱۳	۶	۰/۰۴۳۳۰
۱۷	۴۱/۲۷۴	۵۱/۱۰۳	-۴۱/۳۰۵	۱۲	۰/۱۸۴۲۲	۶	۰/۰۵۰۳۷
۱۸	۴۱/۳۲۰	۵۱/۱۳۸	-۴۰/۹۲۱	۱۲	۰/۲۰۷۲۹	۶	۰/۰۶۸۱۷
۱۹	۴۱/۳۶۷	۵۱/۱۷۳	-۴۰/۵۹۰	۱۲	۰/۱۹۵۷۹	۶	۰/۰۷۶۷۷
۲۰	۴۱/۴۱۳	۵۱/۲۰۸	۴۰/۲۸۷	۱۲	۰/۱۸۴۱۲	۶	۰/۰۷۴۳۲
۲۱	۴۱/۴۵۹	۵۱/۲۴۴	-۴۰/۰۰۳	۱۲	۰/۱۸۰۴۹	۶	۰/۰۷۳۶۹
۲۲	۴۱/۵۵۱	۵۱/۳۱۳	-۳۹/۵۲۵	۱۲	۰/۱۶۷۰۶	۶	۰/۰۷۶۷۳
میانگین			-۳۸/۸۳۶	۱۲	۰/۱۹۲۵۰	۶	۰/۰۶۸۰۵



شکل ۵. ارتفاع ارتومتریک دریای خزر به صورت دوبعدی در اوت ۲۰۰۵.



شکل ۶. ارتفاع ارتومتریک دریای خزر به صورت سه‌بعدی در اوت ۲۰۰۵.



شکل ۷. سطوح هم پتانسیل، موازی نبودن آنها و تأثیر این موازی نبودن بر نتیجه ترازبایی از مسیرهای متفاوت.

آب) نباشد، در مورد ارتفاع دینامیک همواره جهت جریان آب از اختلاف ارتفاع دینامیک تبعیت می‌کند. برای توضیح بیشتر درخصوص دستگاه های ارتفاعی می‌تواند به هایسکانن و موریتس ۱۹۶۷ مراجعه کنید.

۸ بررسی سطح آب دریای خزر در سامانه ارتفاع دینامیک

حال بر پایه نظریه ارائه شده به تعیین ارتفاع دینامیک سطح آب دریای خزر خواهیم پرداخت. ارتفاع سنجی ماهواره‌ای، ارائه دهنده مختصات نقاط واقع بر سطح آب دریای خزر است. بنابراین با در اختیار داشتن بسط هارمونیک بیضوی می‌توان برای هر نقطه پتانسیل گرانی محاسبه کرد. این محاسبه در مورد دریای خزر برای همه اطلاعات موجود، از مختصات سطح آب با استفاده از بسط هارمونیک‌های بیضوی تا درجه و مرتبه ۳۶۰ صورت گرفت. برای توضیحات بیشتر در خصوص بسط پتانسیل به هارمونیک‌های بیضوی می‌توان به اردلان (۱۹۹۹) مراجعه کرد. از میانگین همه پتانسیل‌های محاسبه شده به عدد $W_{\text{mean}} = 62637127/532m^2s^{-2}$ برای دریای خزر رسیدیم که مقایسه آن با $W_0 = 62636855/82m^2s^{-2}$ (گرافارند و اردلان، ۱۹۹۹) موید اختلاف ارتفاع ۲۷ متر در دریای خزر نسبت به سطح آب های آزاد است (دریای خزر تقریباً ۲۷ متر پائین‌تر از سطح آب‌های آزاد جهان است). با در اختیار داشتن پتانسیل میانگین ماهانه سطح آب دریا در نقاط واقع بر مسیر ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و پتانسیل ژئوئید W_0 عدد ژئوپتانسیل برای کلیه این نقاط محاسبه شد. همچنین برای محاسبه متوسط شتاب گرانی در دریای خزر، از بسط گرادیان پتانسیل جاذبه به هارمونیک‌های بیضوی و محاسبه این گرادیان برحسب هارمونیک‌های بیضوی تا درجه و مرتبه ۳۶۰ برای همه نقاط ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای Jason-1 و T/P در دریای خزر مقدار g محاسبه و از

اختلاف پتانسیل گرانی هر نقطه را از پتانسیل رفرانس (پتانسیل ژئوئید) عدد ژئوپتانسیل نام می‌گیرد و با حرف C نشان داده می‌شود.

$$C_A = W_0 - W_A \quad (2)$$

W_0 : پتانسیل گرانی ژئوئید

W_A : پتانسیل گرانی نقطه A

عدد ژئوپتانسیل از آنجا که نمایانگر اختلاف پتانسیل است دارای خصوصیات زیر است:
۱- برای هر نقطه منحصر به فرد است.

۲- هر چه مقدار ارتفاع زیاد شود، عدد ژئوپتانسیل هم بیشتر می‌شود. عدد ژئوپتانسیل برای نقاط بالای ژئوئید مثبت و در سطح ژئوئید صفر و برای نقاط زیر سطح ژئوئید منفی است.

۳- عدد ژئوپتانسیل تابعی پیوسته و هولونومیک (holonomic) است. تابع هولونومیک تابعی است که برای آن $\oint dc = 0$ یعنی انتگرال دیفرانسیل‌های آن تابع در مسیرهای بسته مساوی صفر است.

ارتفاع دینامیک یکی دیگر از عناوین دستگاه های ارتفاعی است که به کمک آن می‌توان اطلاعات مربوط به اختلاف پتانسیل را به فضای هندسی تبدیل کرد. این دستگاه بر اساس عدد ژئوپتانسیل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H_A^D = \frac{C_A}{g} \quad (3)$$

H_A^D : ارتفاع دینامیک نقطه A

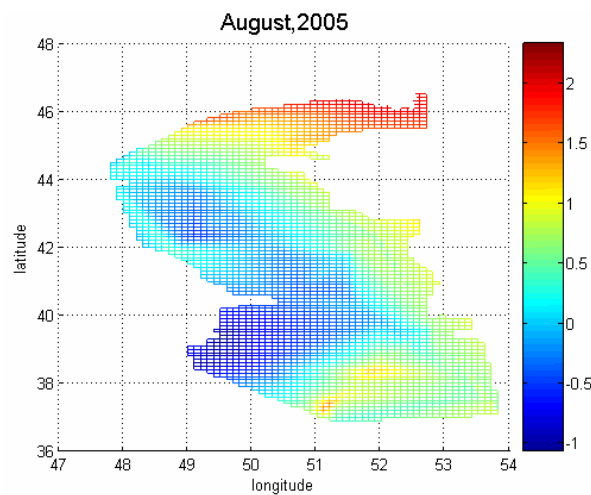
C_A : عدد ژئوپتانسیل نقطه A

\bar{g} : یک عدد ثابت (متوسط شتاب گرانی در منطقه، عددی نزدیک به شتاب گرانی در نقطه A)

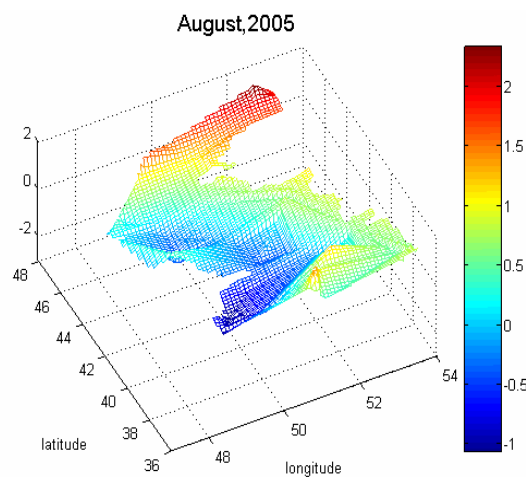
بر خلاف ارتفاع ارتومتریک که در آن ممکن است حالتی پیش آید که شیب مشاهده شده در اختلاف ارتفاع ارتومتریک، شیب دینامیکی (شیب مرتبط با جهت جریان

میانگین آنها عدد $9/801282077 \text{ms}^{-2}$ حاصل شد. بدین ترتیب با در اختیار داشتن \bar{g} و عدد ژئوپتانسیل در دریای خزر امکان محاسبه ارتفاع دینامیکی برای این دریاچه فراهم آمد. شکل های ۸ و ۹ نشان دهنده تغییرات ۲ و ۳ بعدی ارتفاع دینامیکی محاسبه شده در دریای خزر است. همان گونه که در شکل های ۸ و ۹ ملاحظه می شود، مقدار حداکثر ارتفاع دینامیک $25/3005 \text{m}$ - و مقدار حداقل $28/8238 \text{m}$ - و نشان دهنده اختلاف ارتفاع دینامیکی $3/5233 \text{m}$ متر در سطح دریای خزر در تاریخ اوت ۲۰۰۵ است. از طرفی مقدار حداکثر ارتفاع ارتومتریک $24/7615 \text{m}$ - و مقدار حداقل آن $28/4021 \text{m}$ - و بیانگر اختلاف ارتفاع ارتومتریک $3/641 \text{m}$ است.

مقدار حداکثر ارتفاع دینامیک $25/3005 \text{m}$ - و مقدار حداقل $28/8238 \text{m}$ - و نشان دهنده اختلاف ارتفاع دینامیکی $3/5233 \text{m}$ متر در سطح دریای خزر در تاریخ اوت ۲۰۰۵ است. از طرفی مقدار حداکثر ارتفاع ارتومتریک $24/7615 \text{m}$ - و مقدار حداقل آن $28/4021 \text{m}$ - و بیانگر اختلاف ارتفاع ارتومتریک $3/641 \text{m}$ است.



شکل ۸. ارتفاع دینامیکی دریای خزر به صورت دوبعدی در اوت ۲۰۰۵.



شکل ۹. ارتفاع دینامیکی دریای خزر به صورت سه بعدی در اوت ۲۰۰۵.

اختلاف ارتفاع ارتومتریك، ۳/۵ متری در دریای خزر از شمال به جنوب با شیب $10^{-4} \times 3/2$ و همچنین اختلاف ارتفاع ارتومتریك، ۱ متری در دریای خزر از شرق به غرب به دست آمد.

۶- با به دست آوردن پتانسیل سطح آب دریای خزر و سپس محاسبه ارتفاع دینامیکی و بررسی اختلاف ارتفاع دینامیکی دریای خزر، مشخص شد، که اختلاف این ارتفاع منشأ غیر جاذبی دارد.

تشکر و قدردانی

از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران به سبب حمایت مالی از این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۸۱۵۱۰۰۷/۱/۰۳ تشکر و قدردانی می شود.

منابع

جعفری، ع.، ۱۳۸۴، بررسی روند تغییرات سطح آب دریای خزر با استفاده از مشاهدات ارتفاعسنجی ماهواره‌ای و تاییدگیج‌های ساحلی: پایان‌نامه کارشناسی ارشد هیدروگرافی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری پردیس فنی دانشگاه تهران.

مدد، م.، ۱۳۷۵، بررسی جامع علل بالا آمدن سطح آب دریای خزر: انتشارات سازمان بنادر کشتیرانی.

Ardalan, A. A., 1999, High resolution regional geoid computation in the world geodetic Datum 2000 based upon collocation of linearized observational functionals of the type GPS, gravity potential and gravity intensity, Ph.D. thesis, Stuttgart University.

Benada, J. R., 1997, PO.DAAC Merged GDR (TOPEX/POSEIDON) Generation B Users Handbook: Version 2.0, JPL D-11007.

Grafarend, E. W., and Ardalan A. A., 1999, World Geodetic Datum 2000: J. Geodesy., **73**, 611-623.

Heiskanen, W. A., and Moritz, H., 1967, Physical Geodesy: Freeman.

Vanicek, P., and Krakiwsky, E., 1986, Geodesy; the concepts: Elsevier.

با در نظر گرفتن این موضوع که مایعات (یا به‌طور کلی سیالات) تمایل به جابه‌جا شدن در جهت حذف این اختلاف پتانسیل دارند تا در نهایت به سطح هم پتانسیل تبدیل شوند، اختلاف ارتفاع دینامیک به دست آمده برای دریای خزر می‌بایست تحت تأثیر نیروهای غیر جاذبه‌ای صورت گرفته باشد. دلیل ایجاد این اختلاف ارتفاع ممکن است، برای مثال تغییرات شوری، اختلاف دما و یا اثر نیروی باد باشد. از آنجا که مطالعه اثرات این عوامل در حیطه ژئودزی و هیدروگرافی نمی‌گنجد، کشف منشأ این اختلاف ارتفاع دینامیک با منشأ غیر جاذبی را به متخصصین مربوطه واگذار می‌کنیم.

۹ نتیجه‌گیری

از آنچه که ارائه شد می‌توان به نتایج زیر رسید:

۱- تغییرات بلند مدت تراز آب دریای خزر دارای دوره تناوب و ترند خطی نبوده، بلکه عمدتاً تابع تغییرات اقلیمی، آب هوایی و ورودی آب رودخانه‌های منتهی به این دریاچه است.

۲- با بررسی مشاهدات ارتفاعسنجی برای یک نقطه در دریای خزر به مدت سیزده سال، از سال ۱۳۷۲ تا پایان سال ۱۳۸۴ مشاهده می‌شود، که تراز آب این دریاچه در هر سال نسبت به سال قبل تغییراتی، هم در دامنه نوسانات و هم در حداکثر تابستانی و حداقل زمستانی دارد.

۳- با در اختیار بودن داده‌های تاییدگیج و ارتفاعسنجی تناوب‌های ۶ ماهه و ۱۲ ماهه برای تاییدگیج و داده‌های ارتفاعسنجی به دست آمده است.

۴- از آنجا که بیشتر از ۸۰٪ مجموع آب وارده به دریای خزر از رود ولگا صورت می‌گیرد. یکی از عوامل اصلی تغییرات تراز آب دریای خزر دبی رودخانه ولگا است.

۵- با بررسی سطح آب دریای خزر به صورت یکپارچه،