

بررسی تغییرات زمانی و مکانی سطح دریای خزر بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۱ با استفاده از داده‌های سه ماهواره Jason1، T/P و Jason2

معصومه اکبری^{۱*}، مجید عباسی^۲، محمدعلی شریفی^۳

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه ژئودزی - دانشکده نقشه‌برداری - دانشگاه زنجان
masumeakbari.1365@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده نقشه‌برداری - دانشگاه زنجان - عضو پژوهشکده تغییر اقلیم و گرمایش
زمین - دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان
madjid.abbasi@iasbs.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
sharifi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۱، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۲)

چکیده

برای بررسی تغییرات سطح دریای خزر، داده‌های ارتفاع سطح دریا (Sea Surface Height) SSH) اندازه‌گیری شده توسط ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی Jason1، Topex/Poseidon و Jason2 بین سال‌های ۱۹۹۲ و ۲۰۱۱ مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها در بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۲ مربوط به T/P، سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ مربوط به Jason1 و سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ مربوط به Jason2 می‌باشند. در نهایت بر روی دریای خزر تعداد ۹ گذر (Pass) و در هر گذر به طور متوسط ۶۸۰ دور (Cycle) در طول تقریباً ۱۹ سال داده برداری صورت گرفته است. با توجه به این که مدار این ماهواره‌ها در زمان‌های مشخصی از مدار عبور می‌کند و هم‌چنین در نقاط تقاطع زمانی مربوط به این سال‌ها برای نقاط وجود دارد. این سری‌های زمانی در نقاط واقع بر امتداد گذر ماهواره‌ها و هم‌چنین در نقاط تقاطع (Crossover) گذرهای صعودی و نزولی تشکیل گردیدند و آنالیز طیفی کمترین مربعات این سری‌های زمانی انجام شد. برای مقایسه و بررسی بیشتر تغییرات سطح دریای خزر، سری‌های زمانی حاصل از ایستگاه‌های جزرومدسنجی نکا و بندرانزلی مورد استفاده قرار گرفت. ضریب همبستگی بین سری‌های زمانی حاصل از جزرومدسنجی‌ها (Tide gauge) و یک سری زمانی مربوط به نقطه‌ای در داخل دریا حاصل از ارتفاع‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۶۶۶۳ و ۰/۸۱۹۸ برای انزلی و نکا و ضریب همبستگی سری‌های زمانی نکا و بندرانزلی ۰/۷۹۱۹ به دست آمد. با انجام آنالیز طیفی روی این سری‌ها، پریود ۱ ساله در همه طیف‌ها مشاهده شد، اما بعضی پریودها مانند ۶/۷ سال در سری نکا و ارتفاع‌سنجی دیده شد که در سری بندرانزلی قابل رویت نیست، که دلیل فیزیکی قابل توجیهی برای آن‌ها وجود ندارد. بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۱ کاهش ۲/۵ سانتی‌متری در کل منطقه دیده می‌شود.

واژگان کلیدی: ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، ارتفاع سطح دریا، Jason1، Topex/Poseidon، Jason2، دریای خزر، توپوگرافی دینامیک، سری زمانی، آنالیز طیفی کمترین مربعات

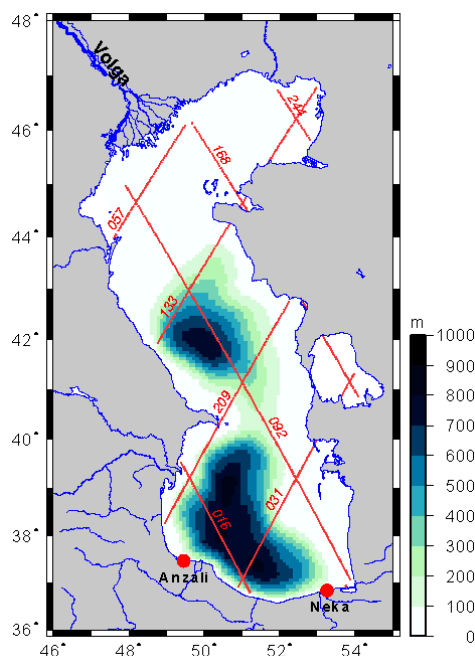
* نویسنده رابط

۱- مقدمه

دریای خزر بزرگ‌ترین دریاچه‌ی روی کره‌ی زمین است. این دریاچه در محل اتصال قسمت جنوب شرقی قاره اروپا به قاره آسیا، در یک منطقه نیمه خشک و در بین طول‌های جغرافیایی ۴۳/۴۵ درجه شرقی و ۲۰/۵۴ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۳/۳۶ درجه شمالی و ۰۷/۴۷ درجه شمالی قرار دارد. کشورهای روسیه، آذربایجان، ایران، ترکمنستان و قزاقستان دریای خزر را محصور کرده‌اند. سطح آب این دریاچه تقریباً ۲۷ متر زیر سطح متوسط دریاها^۱ (MSL) است [۹]. طول تقریبی دریای خزر ۱۰۳۰ کیلومتر است و عرض این دریاچه از ۴۳۵ کیلومتر تا ۱۹۶ کیلومتر تغییر می‌کند. مساحت دریای خزر در حدود ۳۹۲۶۰۰ کیلومترمربع بوده و حجم آب برآورد شده این دریا تقریباً ۷۸۲۸۹ کیلومترمکعب است [۱۰]. کشیدگی دریای خزر در راستای عرض جغرافیایی سه برابر بزرگ‌تر از کشیدگی آن در راستای طول جغرافیایی می‌باشد. این کشیدگی شمالی- جنوبی منجر به تغییرات آب و هوایی زیاد بر روی این دریا می‌شود.

دریای خزر با توجه به پارامترهای ریخت‌شناسی^۲ و رژیم‌های هیدرولوژیکی به سه بخش خزر شمالی، میانی و جنوبی تقسیم می‌شود. حوزه خزر شمالی شدیداً کم‌عمق بوده و در حدود ۱٪ از آب خزر را با میانگین عمق ۵ متر در خود جای داده است. حوزه خزر میانی نسبتاً عمیق بوده و یک سوم از حجم آب خزر با میانگین عمق ۱۹۰ متر را در خود جای داده است. حوزه جنوبی عمیق‌ترین قسمت خزر می‌باشد که دو سوم آب خزر با متوسط عمق ۳۲۵ متر را در خود جای داده است (شکل ۱) [۱۰].

خصوصیات دریای خزر مثل اندازه، عمق، خصوصیات شیمیایی و دوره‌های آبی، این دریاچه را در طبقه‌بندی دریاچه‌های عمیق قرار می‌دهند. دریاچه خزر با تغییرات سطحی سریعی به تغییرات اتمسفری و جغرافیایی پاسخ می‌دهد. دریای خزر در قرن اخیر شاهد نوسانات سطحی شدیدی بوده است. از سال ۱۹۳۳ سطح آب دریای خزر به صورت ناگهانی شروع به پایین آمدن کرد و در سال ۱۹۷۷ به پایین‌ترین سطح خود رسید. از سال ۱۹۷۷ تا سال ۱۹۹۵ شاهد افزایش غیرمنتظره‌ی سطح آب دریای خزر تا حدود ۲/۵ متر بودیم [۱۰]. دلیل عمده تغییرات سطح آب در دریای خزر تفاوت در میزان آب ورودی و آب خروجی از این دریا می‌باشد. رودهایی که از سواحل شمالی و غربی و جنوبی وارد این دریا می‌شوند، منابع عمده تأمین آب آن می‌باشند. خروج آب از دریای خزر ناشی از بخار آب در این دریا و حوضه‌اش می‌باشد. این امر به این معنی است که تغییرات سطح خزر به شدت وابسته به تغییرات آب و هوایی است [۷]. شکل ۲ تغییرات سطح دریای خزر با استفاده از داده‌های ایستگاه جزرومدسنج باکو از سال ۱۸۳۷ تا ۲۰۰۴ به نمایش درآمده است.



شکل ۱- توپوگرافی بستر دریای خزر و محل قرارگیری گذرهای مأموریت‌های T/P، J1 و J2 و ایستگاه‌های جزرومدسنجی نکا و بندرانزلی بر روی دریای خزر

^۲ Morphometric

^۱ Mean Sea Level

تغییرات سطح دریا به صورت سنتی توسط داده‌های جزرومدسنجی در نزدیکی سواحل واقع شده‌اند که این موضوع بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده اثر قابل توجهی می‌گذارد که به عنوان مثال می‌توان به جریان‌های نزدیک ساحل و نیز مشکلات احتمالی دستگاه اندازه‌گیری ناشی از آلودگی‌ها و موجودات دریایی اشاره کرد. همچنین به دلیل حرکات پوسته زمین، بعضی از ایستگاه‌های جزرومدسنجی جابه‌جایی قائم داشته‌اند [۱۲].

به غیر از جزرومد سنج‌ها، از روش‌های اندازه‌گیری تغییرات سطح دریاها و دریاچه‌ها می‌توان از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای یاد کرد. از جمله بررسی‌های انجام شده با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی بر روی دریای خزر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

[۵] از ترکیب داده‌های SSH مربوط به ۱۳ سال ماهواره ارتفاع‌سنجی Topex/Poseidon و ۳/۵ سال ماهواره ارتفاع‌سنجی Jason1 برای بررسی تغییرات سطح دریای خزر استفاده کرده‌اند. تغییرات زمانی سطح دریای خزر با استفاده از داده‌های SSH در نقاط تقاطع گذرها و یک سری نقاط انتخابی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و سرعت تغییرات سطح دریا در نقاط مختلف بررسی و محاسبه شدند. تغییرات سالیانه و فصلی سرعت باد و همچنین ارتفاع امواج نیز با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی موجود، در این بررسی وارد شدند. در این تحقیق در ۱۳ سال اندازه‌گیری، تغییرات سطح خزر از ۹/۱- سانتی‌متر در سال بین ۱۹۹۸ و ۲۰۰۱ تا ۲۳/۱+ سانتی‌متر در سال بین ۱۹۹۵ و ۱۹۹۶ مشاهده شده است.

[۹] با استفاده از داده‌های SSH ماهواره ارتفاع‌سنجی Topex/Poseidon در سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ و با استفاده از روش آنالیز طیفی کمترین مربعات تغییرات سطح دریای خزر را مورد تحلیل قرار داده‌اند. در کنار این داده‌ها، داده‌های جزرومدسنجی ایستگاه بندرانزلی نیز برای بررسی بیشتر تغییرات سطح دریای خزر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، علاوه بر مؤلفه‌های سالیانه، نیم‌سالانه و فصلی که در تغییرات سطح دریای خزر به‌سادگی مشاهده شدند، یک مؤلفه با دوره‌ی تناوب ۱۲/۵ سال نیز به عنوان تغییرات طولانی مدت سطح دریای خزر به‌دست آمد.



شکل ۲- تغییرات سطح دریای خزر در ایستگاه جزرومدسنجی باکو [۶]

تقریباً ۱۳۰ رود بزرگ و کوچک به دریای خزر می‌ریزند که بیشتر این رودها از سواحل شمالی یا غربی به این دریا سرازیر می‌شوند. بالاتر از ۹۰٪ آب ورودی به خزر از پنج رود بزرگ ولگا، کورا^۱، ترک^۲، اورال^۳ و سولاک^۴ تأمین می‌شوند که بیش از ۸۰٪ آب خزر توسط آب شیرین رود ولگا^۵ در شمال خزر تأمین می‌شود [۱۱]. رودهای ایران و رودهای کوچک‌تر در سواحل غربی دریای خزر، باقی‌مانده آب این دریاچه را تأمین می‌کنند (شکل ۳) [۹].



شکل ۳- رودهای ورودی به دریای خزر و سهم هر کدام در تأمین آب خزر (پس از کسب اجازه از مرجع) [۴]

- ^۱ Kura
- ^۲ Terek
- ^۳ Ural
- ^۴ Sulak
- ^۵ Volga

[۱۱] از ۱۳ سال داده‌های ماهواره ارتفاعسنجی Topex/Poseidon مابین سال‌های ۱۹۹۲ و ۲۰۰۵ و همچنین داده‌های جزرومدسنجی در ایستگاه^۱ KBG در شمال غربی ترکمنستان برای بررسی تغییرات سطح دریای خزر استفاده کرده‌اند. در کنار این داده‌ها برای بررسی بیشتر، داده‌های دبی رود ولگا نیز مورد آنالیز قرار داده‌اند. سری‌های زمانی حاصل از ارتفاعسنجی تغییرات سالانه و فصلی آب دریای خزر را نشان دادند. تغییرات عمده و بزرگ سطح آب در داده‌های ارتفاعسنجی مشاهده شدند. این تغییرات به ۴ فاز عمده که دوره‌های بالا و پایین آمدن سطح آب را در بر داشت، تقسیم شدند که عبارتند از: (۱) بالا آمدن قابل توجه سطح آب بین ۱۹۹۳ و اواسط ۱۹۹۵، (۲) پایین رفتن ناگهانی سطح آب از اواسط ۱۹۹۵ تا تابستان ۱۹۹۷، (۳) کاهش ملایم سطح آب تا اواسط ۲۰۰۲، و (۴) افزایش سطح آب از تابستان ۲۰۰۲ به بعد.

در این مقاله علاوه بر مشاهده‌ی تغییرات سطح آب به بررسی دلایل آن در دوره‌های مختلف نیز پرداخته شده است.

تغییرات سطح دریا به صورت سنتی توسط داده‌های جزرومدسنجی‌ها مورد بررسی قرار می‌گرفتند. ایستگاه‌های جزرومدسنجی در نزدیکی سواحل واقع شده‌اند که برای بررسی مناطق عمیق آب، نمایندگان خوبی نمی‌باشند. همچنین به دلایل گوناگون از جمله حرکات پوسته زمین، بعضی از ایستگاه‌های جزرومدسنجی جابه‌جایی قائم داشته‌اند [۹]. این امر در تعیین تغییرات سطح دریا موجب ایجاد خطا می‌شود، ولی با استفاده از داده‌های ارتفاعسنجی با این خطا مواجه نمی‌شویم. ارتفاعسنج، SSH را نسبت به یک بیضوی مرجع ارائه می‌دهد که تغییرات قائم پوسته را از تغییرات سالیانه سطح دریا حذف می‌کند [۹].

یک ارتفاعسنج با ارسال امواج میکروویو به سطح آب و اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت موج، به اندازه‌گیری فاصله ارتفاعسنج تا سطح آب می‌پردازد. با در دست داشتن فاصله ارتفاعسنج تا بیضوی مرجع، از داده‌های منتشره از ماهواره، SSH که فاصله سطح آب تا بیضوی مرجع است، قابل محاسبه خواهد بود.

اندازه‌گیری‌های ارتفاعسنجی تحت تأثیر خطاهای ابزاری و اتمسفری زیادی قرار دارند. از جمله این خطاها می‌توان از تصحیح یونسفر، تصحیح تروپوسفر خشک و تر، جزرومد زمین جامد، جزرومد اقیانوس و تصحیح بایاس حالت دریا یاد کرد. در این مقاله از داده‌های SSH تصحیح شده استفاده شد که تصحیحات مربوطه توسط مرکز^۲ AVISO اعمال گردیده‌اند. خطای^۳ RMS این داده‌ها برابر ۴/۲ سانتی‌متر می‌باشد [۳].

هدف از تحقیق حاضر بررسی تغییرات زمانی سطح خزر در دو دهه‌ی گذشته و شناخت دامنه‌ی تغییرات نقاط مختلف آن است. شناخت دوره‌های تناوب تغییرات سطح آب، مخصوصاً تغییرات بلندمدت آن در مطالعات مختلف مانند هواشناسی و فعالیت‌های اقتصادی حائز اهمیت است. لذا در این تحقیق به کمک داده‌های جزرومدسنجی‌های ایستگاه‌های نکا و بندرانزلی و نیز داده‌های ارتفاعسنجی ماهواره‌ای به تعیین این دوره‌های تناوب خواهیم پرداخت.

پس از این مقدمه، در بخش دوم مقاله به معرفی داده‌های مورد استفاده در تحقیق می‌پردازیم. سپس در بخش سوم، روش آماده‌سازی و پردازش سری‌های زمانی ارتفاع آب و سری‌های زمانی جزرومدسنجی‌ها را تشریح خواهیم کرد. نتایج پردازش‌ها و مقایسه‌ی آن‌ها نیز در بخش سوم صورت خواهد گرفت. بخش چهارم مقاله به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲- داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق از دو سری داده استفاده شد. داده‌های ارتفاعسنجی ماهواره‌های T/P، Jason1، Jason2 و داده‌های جزرومدسنجی ایستگاه‌های نکا و بندرانزلی.

۲-۱- داده‌های ارتفاعسنجی مأموریت‌های

Jason1 (J1)، Topex/Poseidon (T/P) و Jason2 (J2)

مأموریت T/P: مأموریت T/P در ۱۰ آگوست سال ۱۹۹۲ به منظور مشاهده جریان‌ات اقیانوسی شروع به فعالیت کرد.

^۱ Archiving, Validation and Interpretation of Satellites Oceanographic data

^۲ Root Mean Square

^۱ Kara-Bogaz-Gol

۲۰۱۱) مورد استفاده قرار گرفتند. در شکل ۱ چگونگی توزیع گذرهای این سه مأموریت بر روی دریای خزر به نمایش درآمده است.

۲-۲- داده‌های جزرومدسنجی

جزرومدسنجی‌ها از قبل از ظهور ارتفاعسنجی به مشاهده تغییرات سطح دریاها می‌پرداختند. قدمت برخی از این اندازه‌گیری‌ها به بیشتر از ۱۰۰ سال پیش بازمی‌گردد. از این جزرومدسنجی‌ها می‌توان به جزرومدسنج باکو اشاره کرد (شکل ۲).

ایستگاه نکا: جزرومدسنج نکا در جنوب شرقی ساحل دریای خزر در طول جغرافیایی ۵۳/۲۶۹۷ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶/۸۴۶۵ درجه شمالی قرار دارد. داده‌های جزرومدسنجی مورد بررسی این ایستگاه از ژوئن سال ۱۹۹۸ تا اکتبر ۲۰۱۱، جمعاً به مدت ۱۳ سال را شامل می‌شوند. داده‌ها با فاصله زمانی ۳۰ دقیقه می‌باشند.

ایستگاه بندرانزلی: جزرومدسنج بندرانزلی در جنوب شرقی ساحل دریای خزر در طول جغرافیایی ۳۷/۴۷۰۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۴۹/۴۶۰۰ درجه شمالی قرار دارد. داده‌های جزرومدسنجی مورد بررسی این ایستگاه از مارس سال ۱۹۸۲ تا سپتامبر ۲۰۰۷، جمعاً به مدت ۲۵ سال را شامل می‌شوند. این داده‌ها با فاصله زمانی ۱ روز می‌باشند.

موقعیت ایستگاه‌های جزرومدسنجی نکا و بندرانزلی در شکل ۱ دیده می‌شود.

۳- پردازش داده‌ها

۳-۱- سری‌های زمانی ارتفاع آب

نرم‌افزار BRAT^۷ جهت آماده‌سازی سری‌های زمانی مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۴ چگونگی توزیع داده‌های ارتفاعسنجی روی قسمتی از گذر ۰۹۲ داده‌ها دیده می‌شود.

این مأموریت، یک مأموریت ارتفاعسنجی راداری ماهواره‌ای مشترک بین NASA^۱ (ایالات متحده) و CNES^۲ (فرانسه) بود. مدار T/P در فاصله ۱۳۳۶ کیلومتر از بیضوی مرجع قرار داشت. دوره تکرار این مأموریت ۹/۹۱۵۶ روز و میل آن ۶۶ درجه بود. این مأموریت بعد از ۱۳ سال (طولانی‌ترین تاریخ ارتفاعسنجی ماهواره‌ای) در اکتبر ۲۰۰۵ (با ۴۷۸ دوره) به اتمام رسید [۲].

مأموریت J1: این ماهواره در ادامه مأموریت T/P، در مدار T/P قرار گرفت. از سپتامبر ۲۰۰۲، ماهواره T/P (با ۳۶۸ دوره) به یک مدار جدید انتقال یافت. مأموریت J1 دارای همان خصوصیات مداری ماهواره T/P بود [۲].

مأموریت J2: این ماهواره در تاریخ ۴ جولای سال ۲۰۰۸ در ادامه مأموریت ماهواره‌های T/P و J1 در چارچوب همکاری بین Eumetsat، NASA، CNES و NOAA^۴ شروع به کار کرد. در فوریه ۲۰۰۹ ماهواره J2 وارد مدار دیگری شد. مدار ماهواره J2 هم مشابه دو ماهواره قبلی بود [۲].

مرکز AVISO در فرانسه داده‌های مأموریت‌های ارتفاعسنجی ذکر شده را با اعمال تصحیحات بر روی SSH در اختیار کاربران قرار می‌دهد^۵. داده‌های تصحیح شده، تحت عنوان CorrSSH و به ترتیب دور برای هر مأموریت موجود می‌باشد. داده‌های ماهواره‌های T/P، J1 و J2 در زمانی که این ماهواره‌ها بر روی مداری مشابه قرار داشتند، دارای پوشش یکسانی می‌باشند و می‌توان با اعمال شیفت بین مدارات^۶ به داده‌های ماهواره‌های J1 و J2 (موجود در فایل‌های داده‌ی مربوط به این ماهواره‌ها)، آن‌ها را با داده‌های ماهواره T/P ترکیب نموده و امروزه به حدود ۱۹ سال داده بر روی گذرهای مشابه رسید. در این مقاله، داده‌های دوره‌های ۱ تا ۳۴۳ مأموریت T/P (از ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۲)، دوره‌های ۱ تا ۲۳۹ مأموریت J1 (از ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸) و دوره‌های ۱ تا ۱۰۷ مأموریت J2 (از ۲۰۰۸ تا

^۱ National Aeronautics and Space Administration

^۲ Centre National d'Etudes Spatiales

^۳ European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites

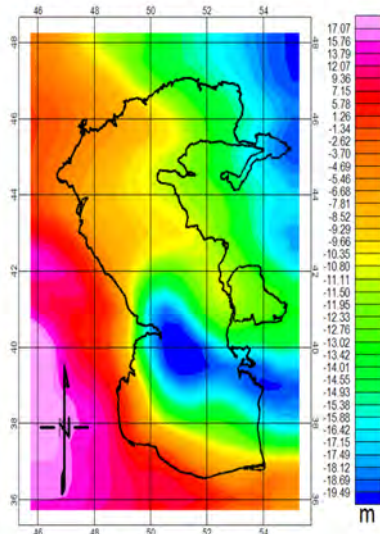
^۴ National Oceanic and Atmospheric Administration

^۵ ftp://ftp.aviso.oceanobs.com/pub/oceano/AVISO/SSH/monomission/dt/corssh/ref

^۶ intermission bias

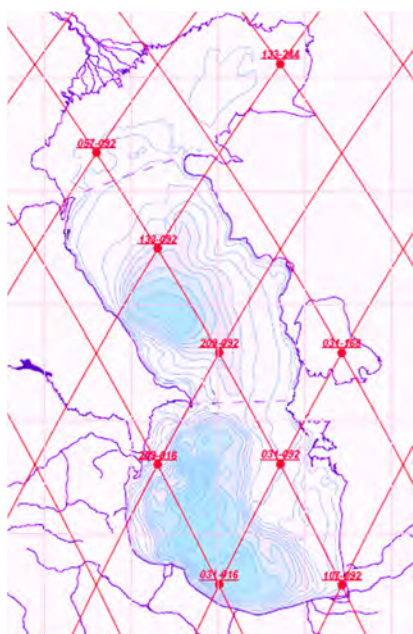
^۷ Basic Radar Altimetry Toolbox

می‌شود که با استفاده از سرویس ICGEM^۲ محاسبه شده است.

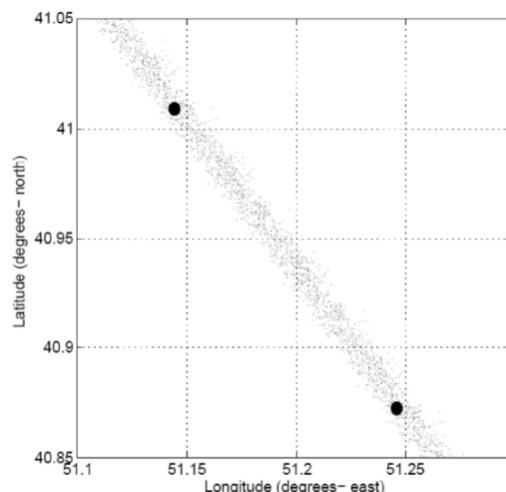


شکل ۵- ژئوئید دریای خزر بر اساس مدل EGM08

جهت بررسی بیشتر داده‌های موجود، نقاط تقاطع گذرهای صعودی و نزولی داده‌های در دست بررسی، در نظر گرفته شدند. در شکل ۶ محل قرارگیری این نقاط بر روی دریای خزر دیده می‌شوند.



شکل ۶- نقاط تقاطع گذرهای داده‌های سه مأموریت T/P، J1 و J2. اعداد روی هر تقاطع به ترتیب نشان دهنده شماره گذر صعودی و نزولی مربوطه است. خطوط نمایش دهنده محل قرارگیری گذرهای واقع بر روی دریای خزر می‌باشند. [۵]



شکل ۴- چگونگی توزیع داده‌های ارتفاع‌سنجی روی قسمتی از گذر ۰۹۲. سری‌های زمانی برای نقاط با علامت • محاسبه شدند.

این شکل توزیع داده، حاصل از دوره‌های مختلف داده‌های ارتفاع‌سنجی در گذر زمان می‌باشد. با توجه به اینکه ردپای ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی محدوده‌ای با قطر ۶ کیلومتر را شامل می‌شود، ارتفاع‌سنج در دوره‌های مختلف در یک منطقه دقیقاً یک نقطه را اندازه‌گیری نمی‌کند.

برای داشتن سری زمانی داده‌های ارتفاع‌سنجی در یک نقطه، از درون‌یابی خطی استفاده شد. به این ترتیب که با در دست داشتن داده‌های موجود در یک گذر و با در نظر گرفتن نقاطی با فاصله ۲۰ کیلومتر از یکدیگر بر روی یک گذر (شکل ۴)، با در نظر گرفتن تمام نقاط موجود در یک ردپا به عنوان یک نقطه و با درون‌یابی خطی از این نقاط به محاسبه سری زمانی SSH آن نقطه پرداختیم. برای محاسبه توپوگرافی دینامیک (D)، به ارتفاع ژئوئید (N) نیاز داریم:

$$D = SSH - N \quad (1)$$

در منطقه دریای خزر، ژئوئیدی که بر اساس اندازه‌گیری‌های مستقیم گرانی‌سنجی (زمینی، دریایی یا هوایی) محاسبه شده باشد در دسترس نیست. لذا در این تحقیق از ژئوئید محاسبه شده از مدل ژئوپتانسیل EGM08^۲ استفاده گردید. این ژئوئید در شکل ۵ دیده

^۱ Footprint

^۲ Earth Gravitational Model

^۳ <http://icgem.gfz-postam.de/ICGEM/>

۲-۳- مقایسه‌ی دوره‌های تناوب حاصل از سری‌های زمانی ارتفاع‌سنجی و سری‌های زمانی جزرومدسنج‌ها

با آنالیز طیفی کمترین مربعات سری‌های زمانی حاصل از داده‌های جزرومدسنجی در کنار داده‌های ارتفاع‌سنجی، می‌توان به ارزیابی نتایج حاصل از آنالیز طیفی کمترین مربعات سری‌های زمانی مربوط به ارتفاع‌سنجی پرداخت.

سری زمانی مربوط به تغییرات ارتفاعی جزرومدسنج نکا، در شکل ۸ دیده می‌شود. در محور عمودی اختلاف ارتفاع تمامی اندازه‌گیری‌ها نسبت به اندازه‌گیری اول دیده می‌شود. اندازه‌گیری مربوط به این نقطه در تاریخ ۲ ژوئن ۱۹۹۸ در ساعت ۸:۳۰ صبح صورت گرفته است و برابر با ۹۵ سانتی‌متر نسبت به نقطه صفر جزرومدسنج می‌باشد.

سری زمانی مربوط به تغییرات ارتفاعی جزرومدسنج بندرانزلی، در شکل ۹ دیده می‌شود. در محور عمودی اختلاف ارتفاع تمامی نقاط نسبت به ارتفاع نقطه اول به نمایش درآمده است. اندازه‌گیری مربوط به این نقطه در تاریخ ۲۱ مارچ ۱۹۸۲ صورت گرفته است و برابر با ۱۱۵/۷- سانتی‌متر نسبت به نقطه صفر جزرومدسنج می‌باشد.

برای مقایسه و بررسی، یک نقطه ارتفاع‌سنجی با طول جغرافیایی ۵۱/۰۲۶۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷/۱۰۶۰ درجه شمالی در بین دو ایستگاه جزرومدسنجی نکا و بندرانزلی در نظر گرفته شد. این نقطه نزدیک‌ترین نقطه تقاطع مربوط به داده‌های ارتفاع‌سنجی در نزدیکی ایستگاه‌های جزرومدسنجی نکا و بندرانزلی است. موقعیت این نقطه در شکل ۶ به نمایش درآمده است و محل تقاطع دو گذر ۰۳۱ و ۰۱۶ می‌باشد.

برای مقایسه داده‌های ایستگاه‌های جزرومدسنجی نکا و بندرانزلی با نقطه ارتفاع‌سنجی داده‌ها به بازه زمانی مشترک محدود شدند. بازه مشترک از اواسط سال ۱۹۹۸ تا اواخر سال ۲۰۰۷ را شامل می‌شود. ضریب همبستگی داده‌های سری زمانی جزرومدسنج نکا با داده‌های سری زمانی ارتفاع‌سنجی برابر ۰/۸۱۹۸، ضریب همبستگی داده‌های سری زمانی جزرومدسنج بندرانزلی با داده‌های سری زمانی ارتفاع‌سنجی برابر ۰/۶۶۶۳ و ضریب همبستگی داده‌های سری زمانی جزرومدسنج نکا با داده‌های سری زمانی جزرومدسنج بندرانزلی برابر

سری‌های زمانی توپوگرافی دینامیک در این نقاط تهیه شدند. برای نمونه سری زمانی مربوط به نقطه تقاطع گذرهای ۰۹۲ و ۲۰۹ در شکل ۷ به نمایش درآمده است.

با یک نگاه کلی بر روی این سری زمانی و سایر سری‌های زمانی حاصل از داده‌های ارتفاع‌سنجی در نقاط تقاطع گذرهای صعودی و نزولی، متوجه کاهش آب دریای خزر در طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۱ می‌شویم. این کاهش به‌طور متوسط با سرعتی برابر با ۲/۵ سانتی‌متر در سال رخ داده است.

پس از تهیه سری زمانی مربوط به هر نقطه تقاطع، آنالیز طیفی بر روی سری‌های زمانی موجود صورت گرفت. با اعمال روش آنالیز طیفی کمترین مربعات، در جدول ۱ نتایج مهم حاصل از این آنالیز دیده می‌شود. برای اطلاعات بیشتر در مورد آنالیز طیفی کمترین مربعات به [۱] و [۸] مراجعه شود.

جدول ۱- پریودهای بارز مشاهده شده در سری‌های زمانی نقاط تقاطع در دریای خزر

پریود	فرکانس ($\frac{1}{\text{سال}}$)
سال ۹/۶۵۲۵	۰/۱۰۳۶
سال ۶/۱۱۲۵	۰/۱۶۳۶
سال ۴/۸۰۷۷	۰/۲۰۸۶
سال ۴/۴۷۲۳	۰/۲۲۳۶
سال ۳/۵۲۷۳	۰/۲۸۳۵
سال ۲/۸۲۸۱	۰/۳۵۳۶
سال ۲/۴۱۷۷	۰/۴۱۳۶
سال ۱/۰۰۱۲	۰/۹۹۸۸
ماه ۶/۰۷۵۳	۲/۰۰۴
ماه ۴/۱۲۷۱	۲/۹۵
ماه ۳/۴۲۹۶	۳/۵۵
ماه ۲/۳۵۱۳	۵/۲
ماه ۱/۰۴۹۵	۱۱/۶

همچنین با در نظر گرفتن نقاطی به فواصل ۲۰ کیلومتر بر روی همه گذرها و آنالیز طیفی سری‌های زمانی این نقاط، نتایجی کم و بیش مشابه با نقاط تقاطع حاصل گشت. جمعاً تعداد نقاط بررسی شده بر روی خزر برابر ۸۶۰ نقطه است.

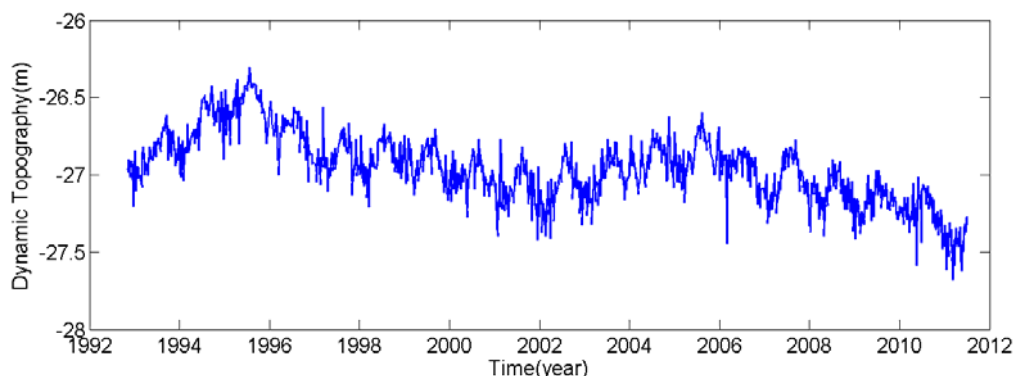
۰/۷۹۱۹ می‌باشد. نمودار تغییرات ارتفاعی این سه سری زمانی در شکل ۱۰ ارائه شده است. با آنالیز طیفی کمترین مربعات به نتایج جدول ۲ رسیدیم.

جدول ۲- پریودهای بارز مشاهده شده در سری‌های زمانی ایستگاه‌های جزرومدسنجی نکا و بندرانزلی و نقطه ارتفاعسنجی

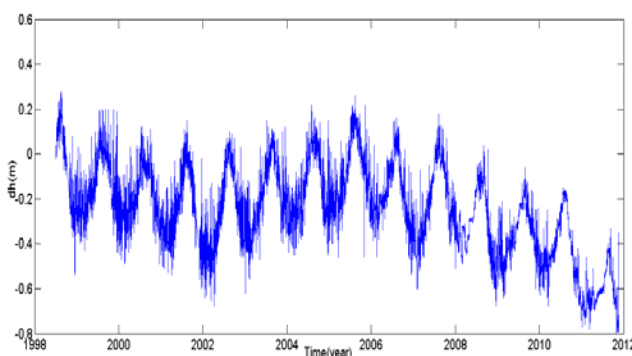
نقطه ارتفاعسنجی	نکا	بندرانزلی
-	-	سال ۲۵/۴۹۷۱
-	-	سال ۲۰/۳۱۶۹
سال ۱۶/۶۶۶۶	-	-
-	سال ۱۳/۳۷۶۱	-
۱۱/۱۱۱۱	-	سال ۱۱/۲۰۸۲
سال	-	-
۱۰ سال	-	سال ۸/۵۱۰۶
-	-	-
سال ۶/۷۷۰۴	سال ۶/۷۷۹۶	-
-	-	سال ۴/۰۴۰۴
-	سال ۲/۴۵۳۹	سال ۲/۵۱۵۷
سال ۰/۹۹۲۰	سال ۱/۰۰۲۵	سال ۰/۹۹۳۰
ماه ۱۰/۲۴۸۳	ماه ۱۰/۱۴۵۹	ماه ۱۰/۲۵۷۰
-	ماه ۹/۸۴۲۴	ماه ۹/۶۶۶۰

نقطه ارتفاعسنجی	نکا	بندرانزلی
ماه ۶/۰۷۵۳	ماه ۶	ماه ۶/۰۵۷۲
ماه ۴/۱۲۷۱	ماه ۴/۰۷۱۸	ماه ۴/۰۵۸۴
ماه ۳/۴۲۹۶	ماه ۳/۲۹۹۴	ماه ۳/۲۳۸۰
ماه ۲/۳۵۱۳	ماه ۲/۳۹۱۹	ماه ۲/۸۵۱۳
ماه ۱/۰۴۹۵	ماه ۱/۰۴۱۴	ماه ۱/۰۱۴۵
-	روز ۱/۰۱۱	روز ۱/۰۴۹۵
-	روز ۰/۵۰۷۷	روز ۰/۵۰۷۲

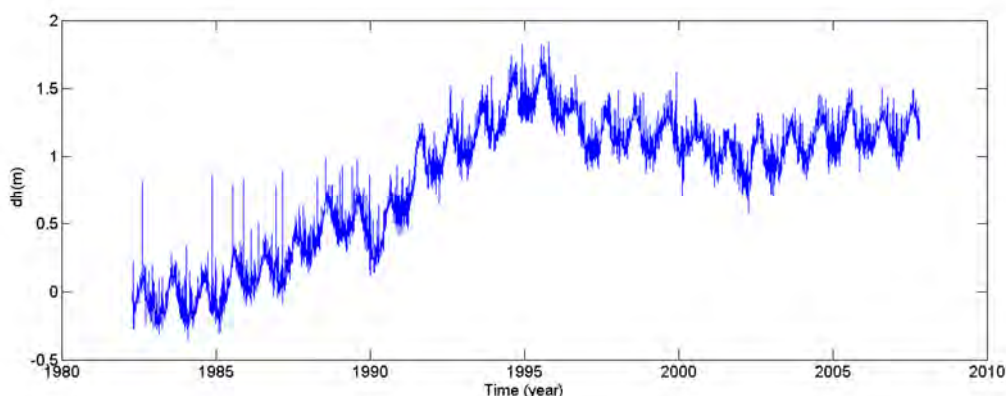
همانطور که دیده می‌شود، مؤلفه‌های هارمونیک مشاهده شده در سری‌های زمانی جزرومدسنجی‌ها و نقطه ارتفاعسنجی کاملاً مشابه هم نیستند. به عبارت دیگر بعضی مؤلفه‌ها در برخی از سری‌های زمانی دیده می‌شود در حالی که در سری‌های زمانی دیگر قابل تشخیص نیست که این موضوع در مؤلفه‌های با دوره‌ی تناوب بیش از ۱ سال دیده می‌شود. علت این امر تفاوت طول سری‌های زمانی جزرومدسنجی‌ها با همدیگر و با سری زمانی ارتفاعسنجی است.



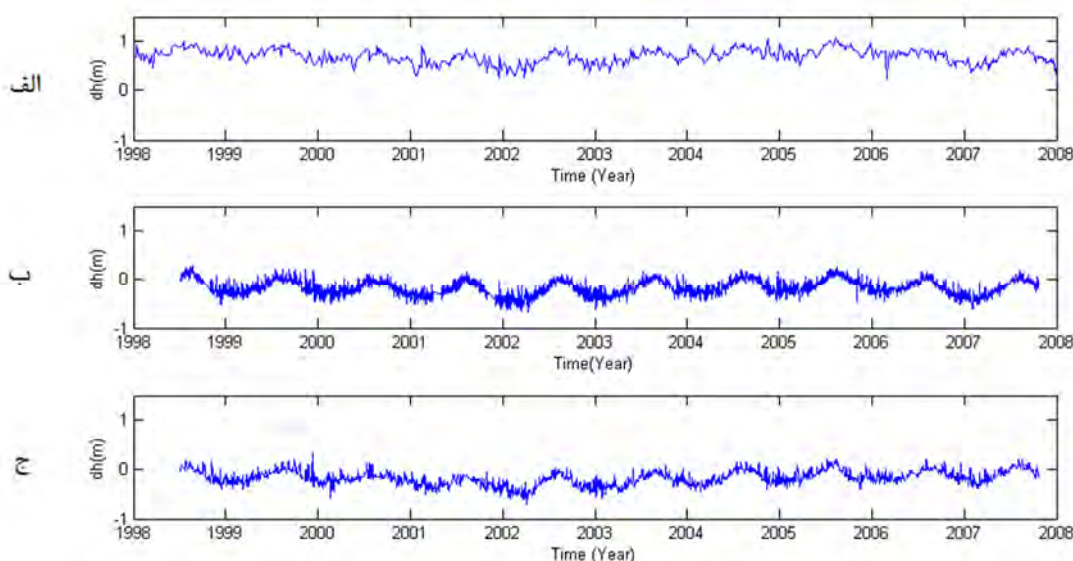
شکل ۷- سری زمانی تغییرات ارتفاعی سطح دریای خزر در نقطه‌ی تقاطع گذرهای ۱۶ و ۳۱



شکل ۸- سری زمانی تغییرات ارتفاعی ایستگاه جزرومدسنجی نکا



شکل ۹- سری زمانی تغییرات ارتفاعی ایستگاه جزرومدسنجی بندرانزلی



شکل ۱۰- تغییرات زمانی ارتفاع سطح خزر در (الف) نقطه ارتفاعسنجی با مختصات (۳۷/۱۰۶۰ و ۵۱/۰۲۶۰)، (ب) ایستگاه جزرومدسنجی نکا و (ج) ایستگاه جزرومدسنجی بندرانزلی در بازه زمانی مشترک

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای بررسی تغییرات سطح دریای خزر در یک بازه زمانی تقریباً ۱۹ ساله از داده‌های ماهواره‌های ارتفاعسنجی استفاده شد. در نهایت، روی هم رفته بر روی دریای خزر تعداد ۹ گذر و در هر گذر به طور متوسط ۶۸۰ دور در طول ۱۹ سال داده برداری صورت گرفته است. سری‌های زمانی مربوط به نقاط تقاطع استخراج گردید. همچنین بر روی هر گذر در فواصل ۲۰ کیلومتری، سری‌های زمانی تولید شدند. در هیچ یک از این سری‌های زمانی، مقادیر غیرمتعارف دیده نشد و سری‌های زمانی دارای داده‌های خطادار نبودند. علت این موضوع این است

که در این تحقیق از داده‌های پالایش شده استفاده شده است. سری‌های زمانی موجود به طور متوسط کاهش یافته با ۲/۵ سانتی‌متر در سال را در سطح آب خزر در طی این سال‌ها نشان دادند.

بر روی سری‌های زمانی مربوط به نقاط تقاطع، آنالیز طیفی کمترین مربعات صورت گرفت. مؤلفه‌های هارمونیک با دوره‌های تناوب ۹/۶، ۶/۱، ۴/۸، ۲/۴ و ۱ ساله و نیز ۶ ماهه و ۴ ماهه مؤلفه‌های بارز قابل تشخیص هستند. دوره‌های تناوب ۶ ماهه، ۴ ماهه و ۳ ماهه را می‌توان به عنوان هارمونیک‌های تغییرات سالیانه‌ی سطح آب در نظر گرفت. برای دوره‌های تناوب دیگر تفسیر فیزیکی قابل دفاعی نمی‌توان ارائه داد. در ادامه‌ی

هم تفاوت دارند که این تفاوت در مؤلفه‌های با دوره‌ی تناوب بیش از ۱ سال دیده می‌شود. علت این امر تفاوت طول سری‌های زمانی جزرومدسنج‌ها با یکدیگر و با سری زمانی ارتفاع‌سنجی است.

داده‌های جزرومدسنج نکا ضریب همبستگی ۰/۸۱۹۸ و داده‌های جزرومدسنج بندرانزلی ضریب همبستگی ۰/۶۶۶۳ را با داده‌های ارتفاع‌سنجی نشان می‌دهند.

محاسبات، آنالیز طیفی بر روی کلیه‌ی سری‌های زمانی استخراج شده از گذرها در فواصل ۲۰ کیلومتری صورت گرفت که نتایجی کم و بیش مشابه با نقاط تقاطع نشان داد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای با نتایج حاصل از سری‌های زمانی جزرومدسنج‌های ایستگاه‌های نکا (از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۱) و بندرانزلی (از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۷)، مقایسه شد. مؤلفه‌های هارمونیک مشاهده شده در سری‌های زمانی جزرومدسنج‌ها و نقطه ارتفاع‌سنجی با

مراجع

- [1] Amiri-Simkooei AR, Asgari J. (2012). "Harmonic analysis of total electron contents time series: methodology and results." GPS Solutions 16(1): 77-88. DOI : 10.1007/s10291-011-0208-x.
- [2] AVISO. Ocean, Altimetry and Climate group, France. <http://www.aviso.oceanobs.com>.
- [3] <http://www.aviso.oceanobs.com/en/newsstand/newsletter/newsletter07/jason-1-after-tp/index.html>
- [4] http://www.grida.no/graphicslib/detail/annual-discharge-into-the-caspian-sea_7569
- [5] Kostianoy, A. G. and Lebedev. S.A. (2006). "Satellite altimetry of the Caspian sea." European Space Agency, (Special Publication) ESA SP 614. NO.6.
- [6] Mamedov, R. (2010). "Satellite altimetry to support studies of sea level change in the Caspian Sea." Climate & Water Balance Changes in the Caspian Region – Astrakhan – 19-20 Oct 2010.
- [7] Naderi Beni, A. Lahijani H., et al. (2013). "Caspian Sea level changes during the last millennium: historical and geological evidences from the south Caspian Sea" Climate of the Past, 9, 1645-1665. DOI:10.5194/cp-9-1645-2013.
- [8] Pagiatakis SD. (1999). "Stochastic significance of peaks in the least-squares spectrum". Journal of Geodesy 73(2): 67-78.
- [9] Sharifi, M. A., Forootan E., et al. (2013). "A point-wise least squares spectral analysis (LSSA) of the Caspian Sea level fluctuations, using TOPEX/Poseidon and Jason-1 observations." Advances in Space Research. VOL.51, NO.5, P858.
- [10] Ozyavas, A., Khan S. D., et al. (2010). "A possible connection of Caspian Sea level fluctuations with meteorological factors and seismicity." Earth and Planetary Science Letters 299(1-2): 150-158.
- [11] Ozyavas, A., Khan S. D. (2008). "Assessment of Recent Short-Term Water-Level Fluctuations in Caspian Sea Using Topex/Poseidon." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. VOL.5, NO.4, P720.
- [12] Ozyavas, A., S. Khan. (2011). "The driving forces behind the Caspian Sea mean water level oscillations." Environmental Earth Sciences; Mar2012, Vol. 65 Issue 6, p1821

