

به کارگیری داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در مطالعه‌ی رفتار دریاچه‌ها

مورد مطالعاتی: دریاچه‌ی خزر

محمد علی شریفی^۱، علیرضا مفتاح‌هلقی^۲

۱- گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

چکیده

جهت اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع سطح دریاها، به طور سنتی، از جزر و مدسنج‌ها (tide-gauge) استفاده می‌شود. جزر و مدسنج‌ها، اغلب در نواحی ساحلی نصب می‌شوند و تعداد آنها نسبت به وسعت حوضه‌های آبی اندک است که از معایب این سامانه‌های اندازه‌گیری است. در این میان، اندازه‌گیری‌هایی که بر مبنای فناوری‌های ماهواره‌ای صورت می‌گیرند، کمک قابل توجهی به تولید داده‌های ارتفاع سطح دریاها (SSH) به صورت گسترده و در تمام سطح آب می‌کنند و مکمل خوبی برای جزر و مدسنج‌ها در مطالعه‌ی تغییرات ارتفاعی حوضه‌های بزرگ هستند. در این تحقیق قصد داریم با کمک داده‌های ماهواره‌ای به بررسی تغییرات ارتفاعی دریاچه‌ی خزر، به عنوان بزرگ‌ترین حوضه‌ی آبی بسته‌ی روی کره‌ی زمین بپردازیم. ارتفاع سطح آب این دریاچه، مانند بسیاری از دریاچه‌ها، رفتاری پویا داشته و در زمان‌های مختلف دچار نوسانات متعددی شده است. اندازه‌گیری‌های موجود در یک و نیم قرن اخیر، افزایش‌ها و کاهش‌های متعددی را در ارتفاع سطح آب این دریاچه نشان می‌دهد. این تغییرات که خود ناشی از عوامل مختلفی مثل تبخیر سطحی آب دریاچه، بارش‌ها و نزولات جوی، ورودی آب رودخانه‌ها و عوامل دیگر هستند، در مسائل مختلفی مانند مطالعه چرخه‌های هیدرولوژیک محلی، آب و هوای منطقه، فرسایش سواحل و مدیریت ساخت و سازهای ساحلی تاثیر گذارند. برای مطالعه تغییرات حوضه‌ی خزر از داده‌های ماهواره‌ای ارتفاع‌سنج تاپکس/پوزایدون (TOPEX/POSEIDON) و جیسون (Jason) یک و دو در فاصله بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۲ برای تولید سری‌های زمانی و از روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات برای تجزیه و تحلیل سری‌ها استفاده می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی: دریاچه‌ی خزر، ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، ارتفاع سطح آب، سری زمانی، برآورد هارمونیک کمترین مربعات

مقدمه

دریاچه‌ی خزر، باقیمانده‌ی اقیانوس باستانی تتیس است. در حدود ۵۰ الی ۶۰ میلیون سال قبل، این اقیانوس به اقیانوس اطلس و اقیانوس آرام متصل بوده است. پس از آغاز حرکت صفحات قاره‌ای و فاصله گرفتن آن‌ها از یکدیگر، ارتباط تتیس با اقیانوس آرام و سپس اقیانوس اطلس قطع شده و تبدیل به یک دریای بسته شد [۱]، [۲]. در حدود یک و نیم قرن گذشته، ارتفاع آب دریاچه‌ی خزر در ۱۸۹۶ به بالاترین حد خود در حدود ۲۵ متر پایین‌تر از سطح متوسط آب‌های آزاد رسید. در این مدت، پایین‌ترین سطح آب خزر، در سال ۱۹۷۷ و در حدود ۲۹ متر پایین‌تر از سطح متوسط آب‌های آزاد گزارش شده است [۳]. تغییرات ارتفاع آب خزر، از جنبه‌های مختلفی قابل بررسی است. ناظم السادات و قاسمی [۴]، به

بررسی اثر دمای سطح آب خزر و اثر آن بر میزان بارش در ناحیه‌ی خزر می‌پردازد. کاستیانوی و لیدوف [۵] با توجه به افزایش مداوم جزء بلند مدت ارتفاع خزر از اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰، با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، به استخراج مولفه‌های فصلی تغییرات ارتفاع آب خزر پرداخته‌اند. آزموده اردلان و جعفری [۶]، با انجام آنالیز فوریه بر روی سری‌های زمانی ۱۳ ساله حاصل از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، به تجزیه و تحلیل تغییرات سطح آب خزر پرداخته‌اند. رنسن و همکاران [۷] تلاش کردند با در نظر گرفتن عوامل آب و هوایی موثر بر نوسانات ارتفاع آب، رفتار آن را نیز پیش بینی کنند. شاه کرمی و همکاران [۸]، با استفاده از داده‌های پذیرفتاری مغناطیسی، تغییرات تراز آب دریاچه‌ی خزر را تفسیر کرده‌اند. شریفی و همکاران [۹]، با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و آنالیز طیفی کمترین مربعات، نوسانات سطح آب دریاچه خزر را به صورت نقطه به نقطه بررسی کرده‌اند. در این تحقیق بر آنیم که تغییرات ارتفاع سطح آب دریاچه‌ی خزر را، اعم از تغییرات تناوبی و غیرتناوبی، به استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای بررسی کنیم.

ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

اساس مساله‌ی ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای بر مبنای دو اندازه‌گیری استوار است. یکی فاصله‌ی سنجنده از سطح لحظه‌ای آب و دیگری موقعیت سنجنده در مدار [۱۰]. با تعیین موقعیت سنجنده (ارتفاع ماهواره بالای بیضوی مینا در لحظه‌ی اندازه‌گیری) و تعیین تفاضل آن با فاصله‌ی اندازه گرفته شده‌ی سنجنده از سطح آب، فاصله‌ی سطح لحظه‌ای آب از بیضوی مینا بدست خواهد آمد. پارامترهای متعددی در این اندازه‌گیری‌ها دخالت دارند که تصحیحاتی متناسب با هریک از آنها به ارتفاع محاسبه شده افزوده می‌شود. با توجه به اینکه ماهواره‌هایی که به منظور ارتفاع‌سنجی به طراحی می‌شوند، دارای مدار تکرار شونده هستند، مشاهدات با فاصله زمانی یکسان در همان نقاط تکرار می‌شوند که قابلیت تشکیل سری‌های زمانی را دارند. با توجه به داده‌های مورد استفاده، فاصله زمانی مشاهدات در سری‌های زمانی ۹.۹۱۵۶ روز است. ذکر این نکته لازم است که در برخی از گذرهای ماهواره، به دلایل متعدد از جمله دقت پایین برخی مشاهده، شرایط نامساعد جوی و یخ‌زدگی سطح آب، مشاهدات از دست رفته و فواصل مساوی مشاهدات از بین می‌رود [۳]. در این شرایط استفاده از روش‌هایی که بر اساس آنالیز داده‌ها با فواصل مساوی کار می‌کنند، از جمله روش آنالیز فوریه، امکان‌پذیر نیست. در صورتی که قصد داشته باشیم بدون تحمیل درونیایی به مساله و تبدیل مشاهدات اولیه به مشاهدات هم‌فاصله، از آن‌ها استفاده کنیم، باید از روش‌هایی که این محدودیت را ندارند بهره برد. روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات از این جزء این دسته از روش‌ها است که در بخش بعد به توضیح آن خواهیم پرداخت.

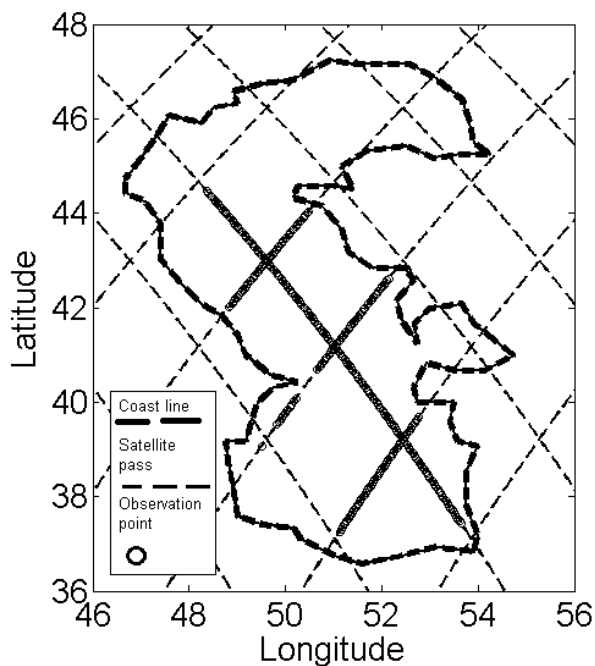
۱- استادیار، تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۰۸۸۴۱، آدرس الکترونیکی: sharifi@ut.ac.ir (نویسنده

مخاطب)

۲- دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد مهندسی نقشه‌برداری-ژئودزی،

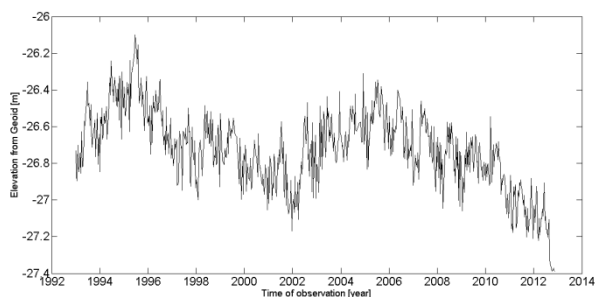
- ارتفاع سنجنده بالای بیضوی مبنا
- فاصله‌ی اندازه گرفته شده از سطح آب
- تصحیحات اتمسفری مربوط به فاصله‌ی اندازه‌گیری شده
- تصحیحات ژئوفیزیکی
- پارامترهای مربوط به ارزیابی کیفیت داده‌ی تهیه شده [۳].

به کمک این داده‌ها، بیش از ۳۰۰ سری زمانی با حداقل ۶۰۰ مقدار مشاهداتی در سطح دریاچه‌ی خزر تولید شده است. موقعیت این سری‌های زمانی در شکل (۱)، نمایش داده شده است.



شکل ۱- موقعیت مکانی سری‌های زمانی تولید شده

در شکل (۲)، نمونه‌ای از این سری‌های زمانی تولید شده ارائه شده است.



شکل ۲- یک نمونه از سری‌های زمانی تغییرات ارتفاع سطح آب در طول ۲۰ سال

همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود تغییرات تناوبی و غیر تناوبی در ارتفاع سطح آب خزر مشاهده می‌شود. تغییرات غیر تناوبی خزر دارای الگوی غیرخطی هستند. برای تعیین مدل رفتار این تغییرات در بازه‌ی مورد مطالعه، از چندجمله‌ای‌ها استفاده شده است. استفاده از چندجمله‌ای درجه‌ی پنجم، به خوبی رفتار غیرتناوبی تغییر ارتفاع سطح آب را مدل می‌کند. برای رسیدن به این نتیجه، کافیست چندجمله‌ای‌های درجات مختلف را به سری زمانی برازش کرده و میزان باقیمانده‌ها و فاکتور وریانس ثانویه را در حالات مختلف مقایسه کنیم. با تقسیم بازه ۲۰ ساله‌ی

برآورد هارمونیک کمترین مربعات

روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات (LS-HE) در سال ۲۰۰۷ توسط امیری-سیمکویی معرفی و جهت آنالیز سری‌های زمانی از داده‌های مکانی به‌دست آمده از GPS به کار گرفته شد. در این روش برای مشاهدات، یک مدل تابعی متشکل از یک جزء تناوبی و یک جزء غیر تناوبی در نظر گرفته می‌شود [۱۱].

$$y = Ax + A_k \bar{x}_k \quad (1)$$

بخش تناوبی این مدل، به صورت:

$$A_k \bar{x}_k = a_k^1 \cos(\omega_k t) + a_k^2 \sin(\omega_k t) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، ضرایب سینوس و کسینوس و فرکانس ω_k مجهول و t زمان‌های مشاهداتی هستند. جهت تعیین فرکانسی که بیشترین سهم را در سری زمانی دارد، مساله بهینه‌سازی:

$$\omega_k = \arg \max(P(\omega_j)) \quad (3)$$

را حل می‌کنیم. در این رابطه،

$$P(\omega_j) = \hat{e}_0^T Q_y^{-1} A_j (A_j^T Q_y^{-1} P_A^\perp A_j)^{-1} A_j^T Q_y^{-1} \hat{e}_0 \quad (4)$$

توان مربوط به هر فرکانس دلخواه ω_j است. در این رابطه،

$$P_A^\perp = I - A(A^T Q_y^{-1} A)^{-1} A^T Q_y^{-1} \quad (5)$$

بیانگر تصویرگر قائم فضای برد A بر فضای برد A^\perp است و \hat{e}_0 باقی‌مانده کمترین مربعات (تصویر بردار مشاهدات بر P_A^\perp است، یعنی:

$$\hat{e}_0 = P_A^\perp y \quad (6)$$

در روابط فوق، Q_y^{-1} ماتریس وریانس-کووریانس مشاهدات می‌باشد [۱۱].

فرکانسی که به ازای آن، مقدار (۴) بیشینه شود، دارای بیش‌ترین سهم تناوبی در مشاهدات است. برای حل ساده‌تر مساله بهینه‌سازی، می‌توان با روش‌های عددی این مقدار (مقادیر) را به‌دست آورد. بدین منظور کافیست یک مجموعه مناسب از فرکانس‌ها را انتخاب و مقادیر (۴) را به ازای آن‌ها محاسبه کنیم.

در حالتی که چندین سری زمانی از یک پدیده‌ی مورد مطالعه، در اختیار داریم، می‌توان از حالت چند متغیره‌ی این روش استفاده کرد. در حالت چند متغیره، با فرض اینکه فرکانس موثر در سری‌های زمانی مختلف یکی بوده و دامنه و فاز آن در سری‌ها، متفاوت است، مساله به صورت همزمان برای تمام مشاهدات حل می‌شود [۱۱]. برای این کار یک ماتریس Σ که بیانگر رابطه مکانی بین سری‌های زمانی است به روابط افزوده می‌شود. در این صورت، رابطه (۴) به شکل:

$$P(\omega_j) = \text{tr}(\hat{E}_0^T Q_Y^{-1} A_j (A_j^T Q_Y^{-1} P_A^\perp A_j)^{-1} A_j^T Q_Y^{-1} \hat{E}_0 \Sigma^T) \quad (7)$$

نوشته می‌شود. در رابطه (۷)، Y ماتریسی است که سری‌های زمانی ستون‌های آن‌را تشکیل می‌دهند. از مزایای این روش می‌توان به قابلیت انجام آزمون‌های آماری بر روی نتایج آن اشاره کرد. جزئیات مربوط به این آزمون در [۱۱] و [۱۲] ارائه شده است.

تولید سری‌های زمانی و پیاده‌سازی روش‌ها

جهت تولید سری‌های زمانی، از مشاهدات ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی تاپکس/پوزایدون و جیسون یک و دو در فاصله بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۲ استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده همگی از فرمت GDR هستند که برای کاربردهای ژئوفیزیکی پردازش و تهیه شده‌اند. اطلاعات موجود در این داده‌ها که برای محاسبه‌ی ارتفاع لحظه‌ای سطح آب به کار می‌روند عبارتند از:

- زمان دقیق اندازه‌گیری
- موقعیت سنجنده در لحظه‌ی اندازه‌گیری

در شکل (۳)، خط‌چین‌ها، نشانگر سطح اطمینان ۹۵٪ برای معنی‌دار بودن فرکانس‌ها است. این مقدار بر اساس آزمون آماری ذکر شده در [۱۱] محاسبه شده است. مقادیر فرکانس‌هایی که در آزمون پذیرفته شده‌اند، در جدول (۲) ارائه شده است.

لازم به ذکر است که ماتریس \sum که توصیف‌کننده‌ی رابطه‌ی مکانی بین سری‌های زمانی است، با استفاده از ماتریس خودهم‌بستگی (رابطه (۸)) مشاهدات محاسبه و در روابط به کار رفته است.

$$\sum = \frac{(E_0^T E_0)}{df} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، df بیانگر درجه آزادی مساله می‌باشد که معادل تفاضل تعداد مشاهدات و مجهولات است. در این‌جا، مجهولات ضرایب سینوس و کسینوس در رابطه (۲) هستند. بنابراین:

$$df = n - 2 \quad (9)$$

که در آن، n برابر است با تعداد مشاهدات در سری‌های زمانی.

در شکل (۳) فرکانس‌های متعددی دیده می‌شوند که بعضاً مقادیر بسیار متفاوتی را نشان می‌دهند. در این میان مولفه‌هایی با دوره‌های تناوب بلندمدت و کوتاه‌مدت مشاهده می‌شود مولفه‌ای با تناوب یک سال (۳۶۵.۲۴ روز) دارای بیش‌ترین توان در بین همه فرکانس‌ها است. هم‌چنین مولفه نیم‌سالانه (۱۸۲ روز) دارای توان قابل توجه است. علاوه بر این مولفه‌ها، فرکانس دگرنام شده‌ی برخی مولفه‌های نیم روزانه‌ی جزر و مدی نیز در این میان به چشم می‌خورد. مقادیر فرکانس و دوره‌ی تناوب این مولفه‌ها، در جدول (۲) ارائه شده است که مجموع ۴۵ مولفه را شامل می‌شود.

جدول ۲- فرکانس‌های اصلی حاصل از روش برآورد هارمونیک کمترین

مربعات در حالت چند متغیره			
دوره تناوب (روز)	فرکانس ($1/\text{روز}$)	دوره تناوب (روز)	فرکانس ($1/\text{روز}$)
1930.5	0.000518	159.0	0.006290
1314.1	0.000761	126.9	0.007881
896.1	0.001116	121.6	0.008226
762.2	0.001312	115.3	0.008671
682.1	0.001466	110.9	0.009017
578.4	0.001729	107.2	0.009325
526.3	0.001900	91.3	0.010954
477.3	0.002095	85.1	0.011755
430.1	0.002325	78.4	0.012759
393.7	0.002540	76.3	0.013106
364.7	0.002742	62.0	0.016123
339.8	0.002943	59.8	0.016735
323.3	0.003093	58.8	0.017014
308.0	0.003247	56.8	0.017605
293.2	0.003411	50.2	0.019938
283.9	0.003522	42.8	0.023368
256.7	0.003895	41.3	0.024239
237.5	0.004210	40.2	0.024857
222.4	0.004496	39.2	0.025493
209.7	0.004769	26.5	0.037802
188.8	0.005298	25.0	0.040041
182.0	0.005494	23.0	0.043547
173.3	0.005770		

مشاهدات به بازه‌های کوتاه‌تر، می‌توان ۶ بازه‌ی زمانی به دست آورد که در هریک از آن‌ها، تغییرات خطی (دارای نرخ کاهش یا افزایش ثابت) باشند (این بازه‌ها می‌تواند حذف‌های بین ماکزیمم‌ها و می‌نیمم‌های چندجمله‌ای برآزش شده باشد). جدول (۱) این تغییرات را از ماه آگوست ۱۹۹۲ تا پایان سال ۲۰۱۲ نمایش می‌دهد:

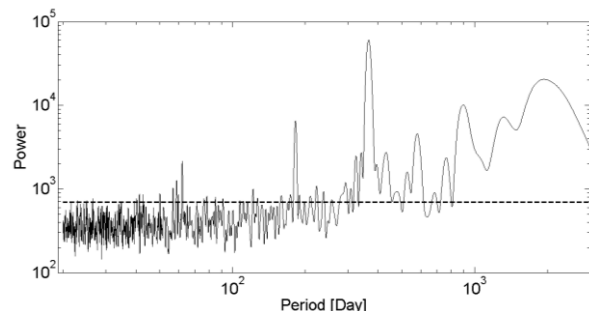
جدول ۱- تغییرات غیرتناوبی ارتفاع سطح آب خزر در ۶ بازه‌ی مجزا در

فاصله‌ی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۲

شماره بازه	طول بازه زمانی (سال)	نرخ تغییرات (cm/year)
۱	۲.۴	۱۸
۲	2.5	-16
۳	3.5	-8
۴	3.3	12
۵	5.5	-6
۶	3.2	-16

برای تعیین رفتار تناوبی این تغییرات، روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات در حالت چند متغیره به کار گرفته شده است. جهت حل عددی مساله بهینه‌سازی (۷)، لازم است مقادیر اولیه برای ω انتخاب شوند. محدوده انتخاب این فرکانس‌ها، بر اساس فاصله نمونه‌برداری‌ها و طول سری زمانی و نزدیکی فرکانس‌های به یکدیگر تعیین می‌شوند. برای سری‌های موجود، با توجه به فاصله مشاهداتی ۱۰ روزه، کوتاه‌ترین دوره تناوبی که قابل بازیابی خواهد بود، طبق قضیه نایکوئیست، برابر ۲۰ روز خواهد بود. لذا مقدار (۷) برای نوسان‌هایی با دوره تناوب کوتاه‌تر، که شامل فرکانس مولفه‌های جزر و مد نیز هست، محاسبه نمی‌شوند [۱۳]. طراحی مدار ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی طوری صورت می‌گیرد که این مولفه‌ها خود را با فرکانسی پایین‌تر (دوره تناوب بلندتر) نشان می‌دهند که به فرکانس‌های دگرنام شده (Aliased) مشهور اند [۱۴]. بلندترین دوره تناوب نیز برابر طول سری زمانی در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. بنابراین یک مجموعه از فرکانس‌ها با زمان تناوبی بین ۲۰ روز تا ۲۰ سال، در رابطه (۷) قرار گرفته و ماکزیمم‌های نسبی از میان آن‌ها جدا می‌شوند. با انجام آزمون‌های آماری روی این نقاط، می‌توان میزان اعتمادپذیری خروجی‌ها را سنجید.

نتیجه‌ی محاسبه‌ی مقدار (۷)، به ازای مقادیر مختلف ω ، در شکل (۳) نمایش داده شده است. این شکل، نشان دهنده‌ی طیف توان فرکانس‌های مختلف در مجموعه‌ی تمام سری‌های زمانی است. فرکانس‌هایی که مقدار طیفی آن‌ها عدد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد، سهم بیشتری در رفتار تناوبی داده‌ها را دارا هستند.



شکل ۳- طیف توان مجموعه‌ی سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب دریای خزر

۴. ناظم السادات، سید محمد جعفر؛ قاسمی، احمد رضا، تأثیر نوسان‌های دمای سطح آب دریای خزر بر بارش فصول زمستان و بهار نواحی شمالی و جنوب غربی ایران، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال هشتم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۸۳.

5. Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Satellite Altimetry of the Caspian Sea, Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 19, No. 1-2, 71-82, April 2008, doi: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.71(SA)

۶. آزموده اردلان، علیرضا، جعفری، عباس، بررسی روند سیزده‌ساله تغییرات سطح آب دریای خزر از راه ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۳، شماره ۱، ۱۳۸۶، صفحه ۲۱-۳۰.

7. Renssen H., Lougheed, B.C., Aerts J.C.J.H., de Moel H., Ward P.J., Kwadijk J.C.J., Simulating long-term Caspian Sea level changes: The impact of Holocene and future climate conditions, Earth and Planetary Science Letters 261 (2007) 685-693.

۸. شاه کرمی، ستاره، رحیم پور بناب، حسین، علیزاده کتک لاهیجانی، حمید، لروی، سوزان، شاه حسینی، مجید، تفسیر تغییرات تراز آب دریای خزر با استفاده از داده‌های پذیرفتاری مغناطیسی رسوبات بستر، رخساره‌های رسوبی، جلد ۲، شماره ۱، تابستان ۱۳۸۸.

9. Sharifi, M.A., Forootan, E., Nikkhoo, M., Awange, J.L., Najafi-Alamdari, M., 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. Volume 51, Issue 5, 1 March 2013, Pages 858-873.

10. Chelton.B.D, Ries.J.C, Haines.B.J, Lee-Lueng Fu, Callahan. P .S, Satellite Altimetry, ACADEMIC PRESS, ISBN: 0-12-269545-3, 2000.

11. Amiri-Simkooei, A. R., Asgari, J, Harmonic analysis of total electron contents time series: methodology and results, Journal of GPS Solution, DOI 10.1007/s10291-011-0208-x. 2011.

۱۲. فروتن، احسان، آنالیز چند سنجنده‌ای تغییرات دریاچه‌ای، مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ویکتوریا، پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی‌ارشد در رشته ژئودزی- هیدروگرافی، گروه مهندسی نقشه برداری، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.

۱۳. صفری، عبدالرضا، شریفی، محمدعلی، موجک‌ها، با کاربرد در ژئودزی و ژئودینامیک، موسسه انتشارات دانشگاه تهران، شماره ۲۹۹۱، ۱۳۸۸.

14. Le Provost, C., Ocean Tides, satellite altimetry and earth sciences. ACADEMIC PRESS, ISBN: 0-12-269545-3, 2001.

نتیجه‌گیری

از مجموع اطلاعات بدست آمده از مراحل فوق می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- نتایج به‌دست آمده از آنالیزها در مورد تغییرات سطح آب خزر، نشانگر وجود تغییرات، هم از نوع وابسته به زمان (دارای ویژگی‌های تناوبی) و هم از نوع غیر وابسته به زمان (جزء غیر تناوبی تغییرات) هستند.
- برای بازه‌ی ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۲ که داده‌های ماهواره‌ای در اختیار داریم، چندجمله‌ای درجه‌ی پنجم به عنوان توصیف‌کننده رفتار غیرتناوبی در غالب سری‌های زمانی نتایج قابل قبولی بدست می‌دهد، اگرچه در صورتی که بخواهیم توصیف دقیق‌تری از تغییرات غیرتناوبی خزر داشته باشیم، می‌توانیم بازه‌ی فوق را به بازه‌های کوتاه‌تری تقسیم کنیم که در هر یک، تغییرات بلند مدت ارتفاع آب خطی باشد.
- مولفه‌ی غالب در تغییرات، مولفه‌ی سالیانه است. علاوه بر آن مولفه‌های نیم‌سالیه (۱۸۲/۴ روز) و چهارماهه (۱۲۱/۸ روز) جزء مولفه‌های شاخص محسوب می‌شوند.
- همچنین فرکانس‌های معادل با مولفه‌های نیم‌روزانه‌ی جزر و مدی M_2 ، S_2 ، O_2 و K_2 و مولفه‌های روزانه‌ی S_1 و K_1 و نیز در بین فرکانس‌های به‌دست آمده به چشم می‌خورد.
- تغییر در میزان بارش، تبخیر سطحی آب، ورود آب توسط رودخانه‌ها و جریانات زیرزمینی، دمای سطحی آب، تغییرات فشار هوا در سطح آب، جریان‌های آبی موجود در سطح دریا، اختلاف دمای هوا در شب و روز، اختلاف دمای نواحی شمالی و جنوبی و بسیاری عوامل دیگر می‌توانند در تغییرات خزر موثر باشند که اثر هر یک از آن‌ها و رابطه‌ی آن با مقادیر بدست آمده به صورت جداگانه قابل بررسی است.
- ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، خلا ناشی از کمبود اندازه‌گیری در سطح دریاچه را به خوبی پوشش داده و اطلاعات کافی را در تمام سطح دریاچه و نقاطی که دسترسی به آن دشوار است فراهم کرده است.
- کیفیت داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، به نحوی است که تغییراتی با دامنه بیش از دو سانتی‌متر را در بیشتر نواحی دریا به خوبی تشخیص داده و اندازه گرفته است که از طریق ساخت و آنالیز سری‌های زمانی به خوبی نمایش داده می‌شود.

مراجع

۱. دمیرچی لو، مجتبی، نگاه ایرانی به سیر تحولات رژیم حقوقی دریای خزر، دوفصلنامه مطالعات اوراسیای مرکزی، مرکز مطالعات عالی بین‌المللی، دانشکده‌ی حقوق و علوم سیاسی، سال اول، شماره ۱، زمستان و بهار ۱۳۸۶-۱۳۸۶، صفحات ۲۱-۴۶.
2. Aladin. Nicolai, Plotnikov. Igor, The Caspian Sea: Lake Basin Management Initiative, Thematic Paper, 2004.
۳. مفتاح هلقی، علیرضا، آنالیز مکانی-زمانی تغییرات سطح آب دریای خزر با استفاده از توابع متعامد تجربی و آنالیز طیفی کمترین مربعات، پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی نقشه‌برداری-ژئودزی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، شهریور ۱۳۹۲.

Surf and download all data from SID.ir: www.SID.ir

Translate via STRS.ir: www.STRS.ir

Follow our scientific posts via our Blog: www.sid.ir/blog

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: www.sid.ir/workshop