

ارائه روشی برای آنالیز طیفی مشاهدات ماهواره Jason-2 بر اساس ایستایی سری زمانی مطالعه موردی: آنالیز طیفی سطح لحظه‌ای آب دریای خزر

عبدالرضا صفری^۱، سیمین کلانتریون^{۲*}، هادی امین^۳

^۱دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
asafari@ut.ac.ir

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروگرافی - دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
simin.kalantarioun@yahoo.com

^۳کارشناس ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
amin_hadi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۳، تاریخ تصویب خرداد ۱۳۹۴)

چکیده

پدیده جزرومد از موضوعات مورد توجه محققان در جامعه ژئودزی، ژئوفیزیک، علوم دریایی و اقیانوس‌شناسی بوده و در امور مهندسی دریا، ناوبری، امور نظامی دریایی، کشتیرانی، حمل و نقل دریایی، تأسیسات نیرو در مناطق دریایی و بنادر، صنعت شیلات و شهرسازی بنادر از اهمیت بالایی برخوردار است. با اطلاع دقیق از فرکانس‌های جزرومدی می‌توان پدیده جزرومد و همچنین سطح آب دریا را پیش‌بینی کرد. برای تعیین فرکانس‌های جزرومدی روش‌های متعددی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش کمترین مربعات (LSSA) و آنالیز فوریه و حتی روش‌های آماری اشاره کرد. در تحقیق حاضر به منظور تعیین فرکانس‌های جزرومدی در دریای خزر از روش آنالیز فوریه با تکیه بر مفهوم ایستایی سری زمانی استفاده شده است. بدین ترتیب که ابتدا برای بررسی دقیق‌تر داده‌ها و نمود بهتر سایر نوسانات موجود در سری‌های زمانی، مؤلفه روند با استفاده از سری‌های فوریه از داده‌ها حذف گردید. سپس فرکانس‌های تشکیل‌دهنده سری زمانی از طریق آنالیز فوریه و روش کمترین مربعات به همراه دامنه و فاز مشخص شدند و برای تشخیص مؤلفه‌های اصلی جزرومد در این تحقیق از مفهوم ایستایی در دو مرحله استفاده شد. برای بررسی کارایی روش پیشنهادی در ۷ نقطه در دریای خزر با استفاده از داده‌های ماهواره ارتفاع‌سنجی Jason-2 در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا اوایل ۲۰۱۴ سری زمانی ارتفاع لحظه‌ای آب دریا تشکیل و با روش پیشنهادی مؤلفه‌های اصلی جزرومدی محاسبه شده است. بررسی نتایج و مقایسه با تحقیقات پیشین نشان‌دهنده موفقیت روش پیشنهادی در شناسایی مؤلفه‌های اصلی جزرومدی دریای خزر است. به دلیل تأثیر رودخانه ولگا بر نوسانات دریای خزر و حجم آب ورودی بسیار زیاد این رودخانه که حدود ۸۰ درصد حجم آب ورودی رودخانه‌های منتهی به دریای خزر را به خود اختصاص داده است، با استفاده از تحلیل طیفی تأثیر رودخانه ولگا در تغییرات سطح دریای خزر نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: فرکانس‌های جزرومدی، روش کمترین مربعات، آنالیز فوریه، ایستایی سری زمانی، ماهواره ارتفاع‌سنجی Jason-2، فرکانس الایس

نویسنده رابط*

۱- مقدمه

سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۱ مدلی برای جزرومد جهانی ارائه کردند [۵] که از مدل Schwiderski نیز دقیق‌تر و کارتر بود.

با توجه به اهمیت اقتصادی و بازرگانی مناطق ساحلی و نیازهای مهندسی همچون ساخت اسکله‌ها، موج‌شکن‌ها، سکوه‌های نفتی و سازه‌های دریایی، در سال‌های اخیر نیز تلاش‌هایی در راستای مدل‌سازی جزرومد انجام شده است. هاشمی فراهانی در سال ۱۳۸۲ نقشه‌های هم‌دامنه و هم-فاز جزرومدی را در مقیاس جهانی از طریق ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای تهیه نمود [۶].

طوریان در سال ۱۳۸۵ به مدل‌سازی جزرومد در دریای عمان و خلیج فارس با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و تایدگیج‌های ساحلی پرداخت [۷].

مدل‌سازی روند تغییرات سطح آب دریای خزر با استفاده از مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و تایدگیج‌های ساحلی توسط جعفری انجام شد [۸].

وانگ یو در سال ۲۰۰۴ مدل‌سازی جزرومد اقیانوسی در اقیانوس جنوبی را انجام داد [۱].

شریفی و همکاران در سال ۲۰۱۲ از روش آنالیز طیفی کمترین مربعات و مشاهدات ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی Jason-1 و TOPEX / Poseidon به صورت نقطه به نقطه^۲ استفاده کرده و نوسانات سطح دریای خزر را مورد بررسی قرار دادند [۹].

در این مقاله از روش آنالیز فوریه با تکیه بر مفهوم ایستایی سری زمانی برای تخمین فرکانس‌های اصلی تشکیل‌دهنده سری زمانی و در نتیجه پیدا کردن فرکانس‌های جزرومدی استفاده شده است. مزیت عمده این روش، ساده‌تر کردن مدل آنالیز جزرومدی می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های ماهواره ارتفاع‌سنجی Jason-2 در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا اوایل ۲۰۱۴ برای ۷ نقطه در دریای خزر، سری زمانی ارتفاع لحظه‌ای آب دریا تشکیل شده است.

این ۷ نقطه مشاهداتی در نقاط پای ماهواره ارتفاع-سنجی Jason-2 در دریای خزر قرار دارد. به عبارت دیگر، در این تحقیق از اطلاعات ارتفاع‌سنجی به صورت نقطه به نقطه استفاده شده است در حالی که در تحقیقات گذشته این اطلاعات به صورت زمانی، مکانی و یا تلفیقی از این دو مورد استفاده قرار می‌گرفت.

از آنجائی که پدیده جزرومد یکی از عوامل مؤثر در تغییرات لحظه‌ای سطح آب دریا می‌باشد، اطلاع از وضعیت جزرومدی در انجام کلیه پروژه‌های دریایی نظیر عملیات عمرانی (احداث اسکله و شهرسازی بنادر)، امور مهندسی دریا و تأسیسات نیرو در مناطق دریایی و بنادر و همچنین در صنایع مرتبط مانند ناوبری، امور نظامی دریایی، کشتیرانی، حمل و نقل دریایی و صنعت شیلات امری ضروری می‌باشد. در این راستا تاکنون تلاش‌های زیادی به منظور مدل‌سازی این پدیده صورت گرفته است.

مطالعه در زمینه جزرومد از دیرباز مورد توجه محققان در علوم مختلف بوده است. اولین اقدام در این خصوص در سال ۱۶۸۷ با مطالعه دینامیکی جزرومد توسط نیوتن صورت پذیرفت و تئوری تعادل هیدروستاتیکی جهت تشریح جزرومد از طریق نیروهای مولد آن ارائه شد [۱]. حدود یک قرن بعد لاپلاس تئوری دینامیکی خود را بر مبنای معادلات دیفرانسیل^۱ جهت مدل‌سازی جزرومد در سطح اقیانوس‌ها ارائه داد [۱].

وابستگی جواب‌های این معادلات به شرایط محیطی، همواره مانع دستیابی به جواب تحلیلی این معادله دیفرانسیل بوده است. استفاده از تایدگیج‌های ساحلی، افزوده شدن تایدگیج‌های اقیانوسی بر مبنای اندازه‌گیری فشار از سال ۱۹۶۰ و نیز کاربرد کامپیوترهای مدرن و روش‌های عددی، باعث بهبود مدل‌سازی جزرومد بیش از پیش شده است [۲].

با شروع مأموریت‌های ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی در سال ۱۹۷۳ فصل جدیدی در تاریخ مدل‌سازی جزرومد در مقیاس جهانی گشوده شد. امروزه، ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی با دقتی در حد سانتیمتر و پوششی تقریباً جهانی، امکان پایش دقیق و قابل اطمینان آب‌های جهان و مدل‌سازی جزرومدی را پدید آورده‌اند [۳].

در سال ۱۹۸۰ مدل Schwiderski بر پایه حل معادلات لاپلاس جزرومدی به دست آمد [۴]. با شروع استفاده از ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی، اولین مدل جهانی جزرومدی بر پایه مشاهدات دقیق ماهواره ارتفاع‌سنجی Geosat در سال ۱۹۸۳ توسط Le Provost ارائه گردید [۱]. در ادامه دو محقق به نام‌های Cartwright و Ray

^۲ Pointwise

^۱ Laplace Tidal Equations

روش‌های بکار گرفته شده در تحقیقات پیشین فقط در بررسی‌های با مقیاس جهانی و بخش‌های عمده‌ای از آب‌های جهان کاربردی بود، در حالی که روش جدید مورد استفاده در این مقاله برای تحقیقات جزرومدی در مقیاس کوچک‌تر و محلی و حتی بزرگ و جهانی قابل استفاده می‌باشد.

در دریای خزر به دلیل اهمیت خاص منطقه‌ای و نیز فعالیت‌های تجاری و ناوبری و شهرسازی در امتداد سواحل آن، محاسبه و پیش‌بینی جزرومد در هر زمان و هر مکانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین دلیل در تحقیق حاضر هفت منطقه در دریای خزر مورد بررسی کامل قرار گرفته است.

$$U_2(R_e, \phi, \lambda) = \frac{3GM R_e^2}{4R^3} (\cos 2\theta + \frac{1}{3}) \quad (2)$$

و با در نظر گرفتن روابط مثلثات کروی [۱]:

$$U_2(R_e, \phi, \lambda) = \sum_{m=0}^2 U_{2m}(R_e, \phi, \lambda) \\ = \frac{3GM R_e^2}{4R^3} \{ \cos^2 \phi \cos^2 \delta \cos 2H + \sin 2\phi \sin 2\delta \cos H + (1 - 3 \sin^2 \phi) (\frac{1}{3} - \sin^2 \delta) \} \quad (3)$$

در بخش ۲ در مورد تئوری جزرومد، روش‌های مختلف مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل جزرومد شامل حذف روند، پدیده‌ی الایسینگ و تعیین فرکانس‌های اصلی از طریق مفهوم ایستایی بحث می‌شود.

در بخش ۳ نتایج ارائه شده و مورد بحث قرار می‌گیرد، و در نهایت تأثیر رودخانه ولگا در تغییرات سطح دریای خزر بررسی می‌شود.

بخش ۴ نیز به بحث و نتیجه‌گیری در خصوص یافته‌ها می‌پردازد.

۲- تجزیه و تحلیل جزرومد

۲-۱- تئوری جزرومد

اولین ترم این رابطه به ازای $m = 2$ مربوط به اثر نیم‌روزانه، ترم دوم به ازای $m = 1$ مربوط به اثر روزانه و ترم سوم به ازای $m = 0$ مؤلفه با پیوند بلند جزرومد می‌باشد [۱].

نیروهای گرانشی وارده از طرف اجرام سماوی مخصوصاً ماه و خورشید، یک تغییر شکل دوره‌ای در زمین غیرصلب ایجاد می‌کند که آنرا جزرومد می‌نامند [۱]. میدان برداری ناشی از این نیروها را می‌توان با یک میدان اسکالر بنام میدان پتانسیل جزرومد جایگزین نمود. این پتانسیل در هر نقطه از سطح زمین با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [۱]:

۲-۲- مدل‌سازی جزرومد

رابطه فوق نشان می‌دهد که پتانسیل جزرومد تابعی از موقعیت جسم جاذب (ماه و خورشید) است. البته به جز نیروهای گرانشی یاد شده عوامل دیگری نیز در ایجاد و تشدید جزرومد مؤثرند.

عمده‌ترین عواملی که باعث تغییر سطح آب دریا می‌گردند عبارتند از: نیروی جاذبه ماه و خورشید و سایر اجرام آسمانی، نیروهای جزرومد، باد، تغییرات فشار اتمسفریکی، تغییرات دما، تغییرات میزان شوری آب، تخلیه رودخانه‌ها، تبخیر و باران‌ها (که در همین اثر گنجانده می‌شود)، بالا آمدن سطح آب در اثر ذوب شدن یخ‌های قطبی، حرکت‌های تکتونیک و جریان‌های دریایی.

برای مدل‌سازی جزرومد سه روش مختلف وجود دارد [۱]:

- (۱) مدل‌های تجربی، (۲) مدل‌های هیدرودینامیکی و (۳) مدل‌های ترکیبی.

$$U(R_e, \phi, \lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{i=2}^{\infty} (\frac{R_e}{R})^i P_i(\cos \theta) \quad (1)$$

که در این رابطه، GM حاصل از ثابت جهانی گرانش ($G = 6.67384 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$) و جرم جسم جاذب (ماه یا خورشید) بوده، R_e شعاع میانگین زمین و R و θ فاصله ژئوسنتریک و فاصله زینتی نقطه‌ای به مختصات

با در اختیار داشتن سری زمانی که شامل ارتفاع آب و لحظه قرائت هر ارتفاع می‌باشد، می‌توان مدل‌سازی روند تغییرات سطح دریا را انجام داد. روش‌های مختلفی برای حذف روند وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش مشاهده مستقیم، روش میانگین متحرک، روش نصف کردن داده‌ها و روش برازش کمترین مربعات که بیشتر برای سری‌های زمانی با روند خطی و غیر پریودیک استفاده می‌شود، اشاره کرد.

در کل تحلیل در قلمرو زمان دارای محدودیت‌هایی می‌باشد و در مواردی که سری زمانی دارای دوره برگشت‌های طولانی و همچنین تناوبات کوتاه مدت باشد، این تحلیل قابل استفاده نمی‌باشد؛ لذا با توجه به ماهیت بسیاری از پارامترهای هیدرولوژیکی که عمدتاً دارای نوسانات با دوره‌های مختلفی می‌باشند، تحلیل در قلمرو فرکانس و استفاده از روش‌های چگالی طیفی ابزاری مفید برای بررسی ویژگی‌های این‌گونه سری‌های زمانی می‌باشد [۱۱]. روش‌های چگالی طیفی مبتنی بر سری‌های فوریه و اساساً با تقریب زدن یک تابع با جملات سینوسی و کسینوسی انجام می‌گیرد که در آن بر یک سری n مشاهده‌ای، یک تابع n پارامتری برازش داده می‌شود. این تابع با توجه به معنی‌دار بودن تعدادی از هارمونی‌ها، برای تشخیص نمودهای فصلی، روند و نوسانات نامشخص سری استفاده می‌شود [۱۲].

این تابع به صورت غیر خطی زیر خواهد بود [۹]:

$$y(t) = at^n + bt^{n-1} + \dots + c + e \cos(2\pi f_1 t) + f \sin(2\pi f_1 t) + g \cos(2\pi f_2 t) + h \sin(2\pi f_2 t) \quad (4)$$

که در آن y ارتفاع مشاهده شده، t زمان مشاهده، n حداکثر درجه چندجمله‌ای، f_1 فرکانس سالانه و f_2 فرکانس نیم سالانه می‌باشد. ضرایب مجهول با استفاده از روش کمترین مربعات تخمین زده می‌شود.

۲-۴- مطالعه و مدل‌سازی جزرومد از طریق آنالیز فرکانس‌ها

جزرومد پدیده‌ای پریودیک است که از ترکیب امواج با پریودهای مختلف به وجود آمده است. توابع پایه از نوع مثلثاتی و برآورد ضرائب آن از طریق تبدیل فوریه و آنالیز

مدل‌های تجربی با استفاده از مشاهدات سطح آب و بدون در نظر گرفتن عوامل ایجادکننده به بررسی جزرومد می‌پردازند. به طور کلی روش‌های تجربی در صورت وجود مشاهدات با تراکم و دقت کافی از موفق‌ترین روش‌های مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی محسوب می‌شوند. امروزه با وجود ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی متعدد و پوشش مناسبی که این ماهواره‌ها در اختیار می‌گذارند، می‌توان با استفاده از داده‌های این ماهواره‌ها به مدل‌های تجربی دقیقی دست یافت.

در مدل‌های هیدرودینامیکی از نیروهای جزرومدی و توپوگرافی کف دریا، شکل سواحل و اصطکاک بستر دریا با جریانات جزرومدی در حل معادلات دیفرانسیل لاپلاس استفاده می‌گردد.

مدل‌های ترکیبی از بکارگیری مشاهدات جزرومد سنج‌های ساحلی و ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای به عنوان مقادیر مرزی در معادلات هیدرودینامیکی حاصل می‌شوند. بنابراین مشاهدات تایدگیج‌ها و ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای هم می‌توانند ورودی روش‌های تجربی و هم روش‌های ترکیبی را تشکیل دهند.

در این تحقیق از مدل‌سازی تجربی بر اساس مشاهدات مستقیم جزرومدی حاصل از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در یک سرشکنی کمترین مربعات استفاده شده است.

۲-۳- بررسی و حذف روند

مدل‌سازی به وسیله روش‌های آماری سری زمانی مستلزم ایستا بودن داده‌های مورد نظر می‌باشد. لازمه ایستا بودن داده‌ها حذف روند و تغییرات پریودیک و همچنین تغییرات تصادفی است. برای بررسی دقیق‌تر داده‌ها و نمود بهتر سایر نوسانات موجود در سری‌های زمانی، باید مؤلفه روند از داده‌ها حذف گردد.

برای حذف روند لازم است مدل تحلیلی و تعریف صحیحی از روند وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، می‌بایست رفتار سیستماتیک مشاهدات را با توجه به مختصات زمان در اختیار داشت. روند عبارت از تغییرات دراز مدت در میانگین سری زمانی است. به عبارت دیگر، سیر طبیعی سری زمانی در دراز مدت روند نامیده می‌شود [۱۰].

آورد. برای یافتن دامنه و فاز تمام مؤلفه‌های موجود در یک سری زمانی، پس از اینکه یک موج به‌طور کامل از داده‌ها استخراج شد، فرمول ریاضی موج به‌صورت معادله (۶) بازسازی می‌شود. برای حذف اثر این موج سه روش وجود دارد؛ در روش اول استخراج تک به تک مؤلفه‌ها را داریم و هر موج به تنهایی از اطلاعات بیرون کشیده می‌شود. در روش دوم، دامنه و اختلاف فاز تمام مؤلفه‌ها به‌صورت همزمان و یکجا به‌دست می‌آیند. در این روش‌ها روند حذف تا کوچک‌تر شدن دامنه مؤلفه‌های به‌دست آمده از دقت مورد نظر، ادامه می‌یابد. در روش سوم که روش غیرخطی است، ابتدا به‌وسیله دو روش فوق فرکانس‌ها و سپس دامنه و اختلاف فازها تشخیص داده شده و سپس با روش غیرخطی مجهولات به‌دست می‌آیند [۷].

۲-۶- ایستایی

همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، فرکانس‌های تشکیل‌دهنده سری زمانی از طریق آنالیز فوریه و روش کمترین مربعات به‌همراه دامنه و فاز مشخص شدند که در این سه روش، روند تشخیص مؤلفه‌های اصلی تا کوچک‌تر شدن دامنه مؤلفه‌های به‌دست آمده از دقت مورد نظر، ادامه می‌یافت.

راه‌های دیگری از جمله تست‌های آماری نظیر تست آماری فیشر [۹] و یا فیلترینگ [۳] وجود دارد که به‌دلیل زیاد بودن فرکانس‌های مجهول و بالا رفتن درجه آزادی روش‌های مناسبی نمی‌باشند. روشی که در این تحقیق مدنظر می‌باشد استفاده از مفهوم ایستایی برای تشخیص مؤلفه‌های اصلی جزرومد است. به بیان ریاضی، فرآیند $\{Z_t : t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$ ایستای اکید است هرگاه تابع توزیع آن به ازای تمام زمان‌ها یکسان باشد. برای یک فرآیند ایستای اکید، چون تابع توزیع برای تمام زمان‌ها یکسان است، تابع میانگین $\mu_t = E(Z_t) = \mu$ ثابت است، مشروط به این که $E(|Z_t|) < \infty$. به‌همین ترتیب اگر $E(Z_t^2) < \infty$ ، آن‌گاه برای هر t ، تابع واریانس $\sigma_t^2 = E(Z_t - \mu_t)^2 = \sigma^2$ نیز ثابت خواهد بود [۱۰]. بنابراین هرگاه در یک سری زمانی تغییرات دوره‌ای حذف شده باشند و میانگین و واریانس تغییر منظمی را نشان دهند، آن سری را سری زمانی ایستا می‌نامند [۱۰]. برای

طیفی کمترین مربعات از جمله توابعی هستند که در این مقاله به‌منظور مدل‌سازی جزرومد استفاده شده است. برای سری زمانی $h(t)$ ، مدل مناسب برای مدل‌سازی جزرومد به‌صورت زیر است [۱]:

$$h(t) = a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + \dots + \sum_{K=1}^m A_K \sin(2\pi f_k t_i + \phi_k) \quad (5)$$

که در آن A_k دامنه، f_k فرکانس، ϕ_k فاز مربوطه و m تعداد فرکانس‌های موجود در مدل می‌باشد. در یک سری زمانی با داده‌های هم‌فاصله، یک مجموعه گسسته از فرکانس‌های f_i را می‌توان توسط رابطه

$$f_i = \frac{j}{\Delta t_{total}} = \frac{j}{t_n - t_1} ; j = 1, 2, \dots, \left(\frac{N-1}{2}\right)$$

به‌دست آورد که در آن t_1 زمان اولین مشاهده و t_n زمان آخرین مشاهده است. فرکانس نایکویست f_N با

$$f_N = \frac{N}{\Delta t_{total}}$$

رابطه f_N تعیین می‌شود. با اندکی تغییر می‌توان رابطه (۵) را به فرم زیر نوشت [۱]:

$$h(t) = a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + \dots + \sum_{K=1}^m A_K \sin(\omega_k t_i) + B_k \cos(\omega_k t_i) \quad (6)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۶) و فرکانس‌های f_i ، با انجام یک سرشکنی کمترین مربعات دامنه‌های مربوط به هر فرکانس محاسبه می‌شود. با توجه به این دامنه‌ها می‌توان فرکانس‌های عمده و مؤثرتر موجود در سیگنال را شناسایی نمود.

۲-۵- استخراج کامل مؤلفه‌های پدیده پریودیک از بین داده‌ها

در روش فوریه داده‌ها از فضای زمان به فضای فرکانس برده می‌شوند و بدین ترتیب می‌توان از روی اطلاعات، فرکانس را یافت. تحلیل در قلمرو فرکانس روشی است که نوسانات سری زمانی را بر حسب رفتار سینوسی در فرکانس‌های مختلف، بیان می‌کند. برای اینکه بتوان یک موج سینوسی را استخراج نمود، باید سه المان هر موج یعنی فرکانس، دامنه و اختلاف فاز آن موج را به‌دست

دریای خزر در شکل ۱ نمایش داده شده است. این داده‌ها شامل ارتفاع سطح لحظه‌ای آب دریا از بیضوی مرجع می‌باشند که برای اثرات محیطی (اثرات مرطوب تروپوسفری، خشک تروپوسفری و یونسفر) تصحیح شده‌اند. برای مطالعه تغییرات سطح لحظه‌ای آب و فرکانس‌های جزرومدی دریای خزر ۷ نقطه در موقعیت‌های مختلف دریای خزر انتخاب شده‌اند. این نقاط در شکل ۱ نشان داده شده است. تغییرات سطح لحظه‌ای آب دریای خزر در نقاط مورد مطالعه در بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ در شکل ۲ نشان داده شده است.

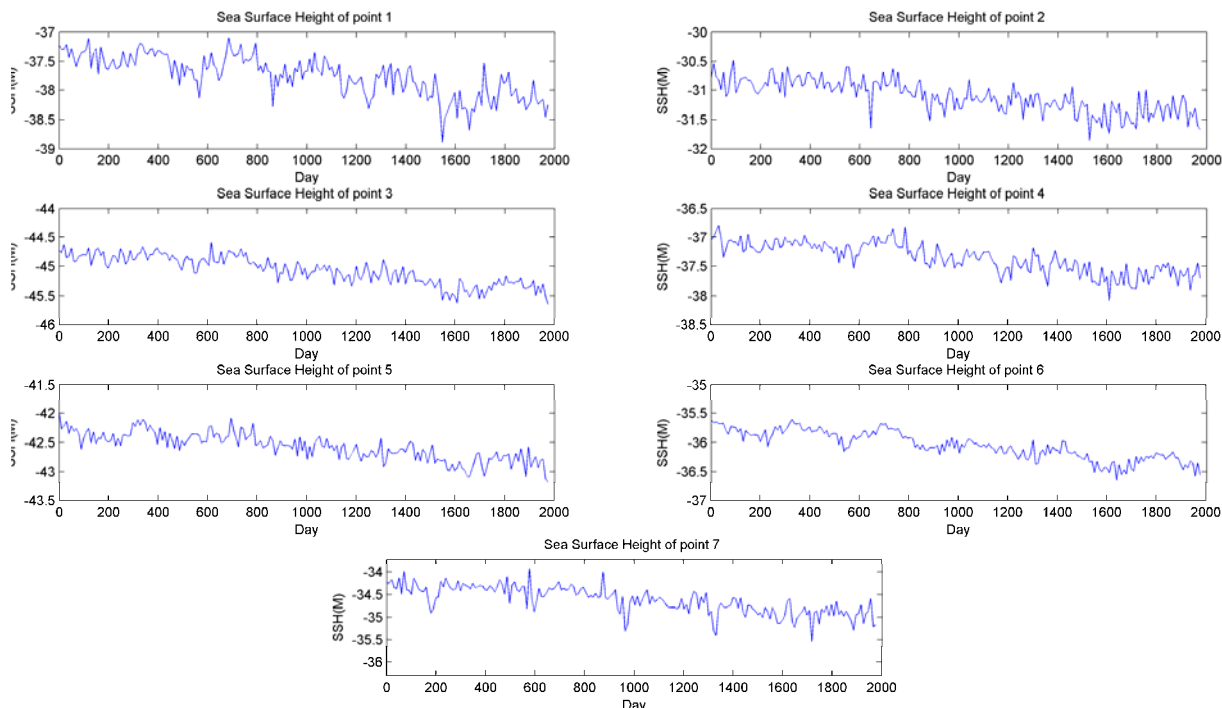
استفاده از مفهوم ایستایی لازم است در مرحله استخراج کامل مؤلفه‌های پدیده پریودیک که در بالا ذکر شد، روند حذف فرکانس‌ها از روی داده‌ها تا مرحله‌ای ادامه یابد که سری باقیمانده در میانگین و واریانس ثابت بماند. در نتیجه سری حاصل ایستا می‌باشد و به راحتی تمام مؤلفه‌های اصلی آن نیز مشخص می‌شود.

۳- مطالعه موردی: تعیین فرکانس‌های جزرومدی در دریای خزر

در این تحقیق از داده‌های ماهواره ارتفاع‌سنجی Jason-2 استفاده شده است. مسیر این ماهواره در منطقه



شکل ۱- نمایش مسیر حرکت ماهواره ارتفاع‌سنجی Jason-2 در دریای خزر و محل نقاط مورد بررسی



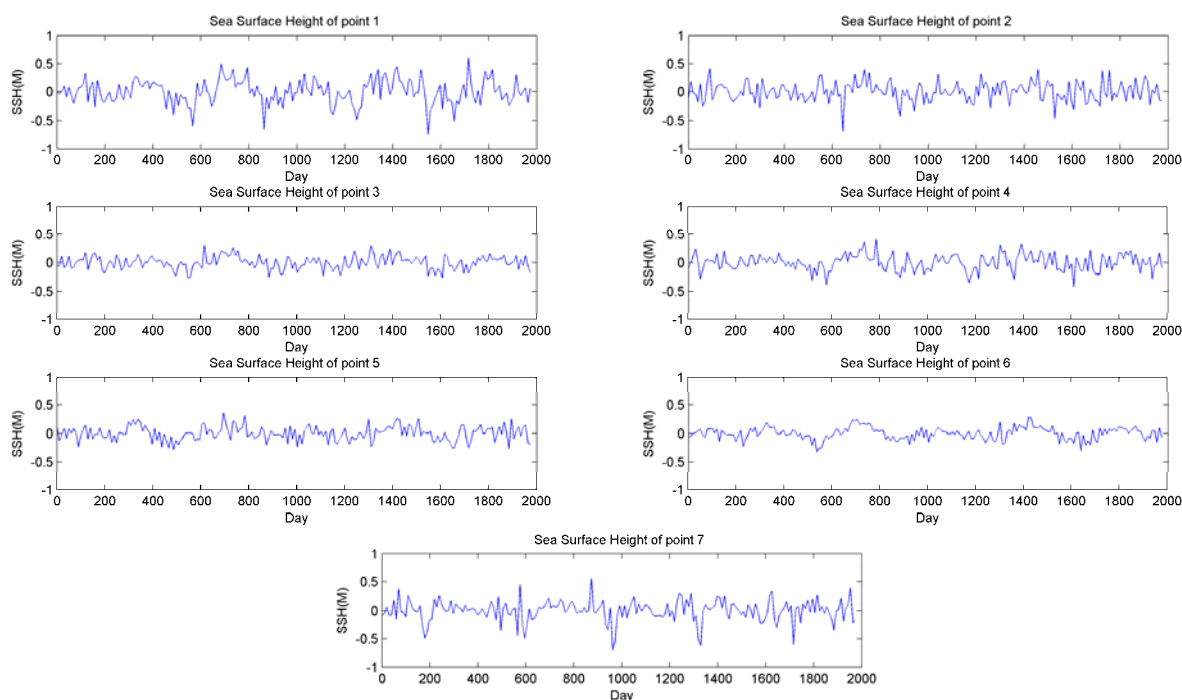
شکل ۲- تغییرات سطح لحظه‌ای آب دریا در بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ برای نقاط مورد نظر

سری‌های زمانی در طول بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ بر اساس کمترین مربعات، چندجمله‌ای از درجه هفت برای همه سری‌های زمانی در نظر گرفته شد. علت انتخاب این چندجمله‌ای دارا بودن کمترین RMSE بوده است، به طوری که در چند جمله‌ای با درجات بالاتر کاهش معناداری در مقادیر RMSE مشاهده نشد. شکل ۳ نشان‌دهنده تغییرات سطح لحظه‌ای آب بعد از حذف روند از روی داده‌ها می‌باشد.

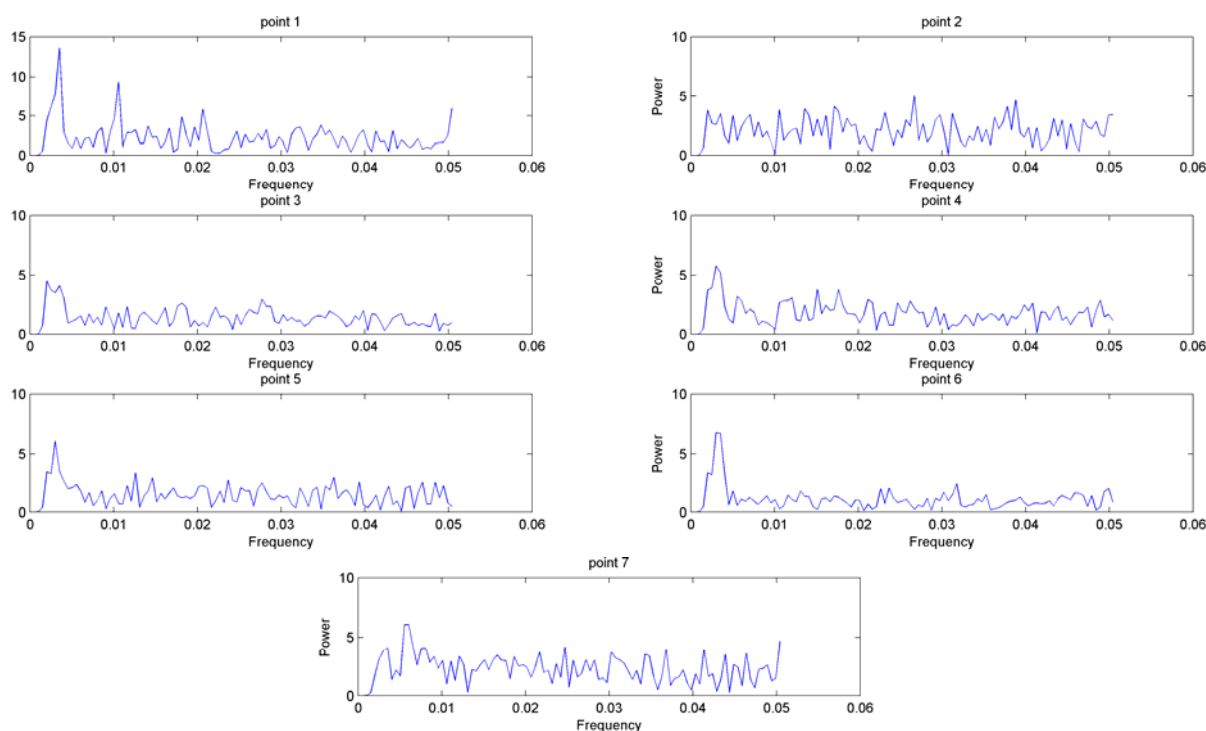
پس از اینکه روند با استفاده از روش کمترین مربعات از سری زمانی مشاهدات حذف شد، برای مقادیر باقیمانده با استفاده از تحلیل در قلمرو فرکانس می‌توان نوسانات سری زمانی را بر حسب رفتار سینوسی در فرکانس‌های مختلف بیان نمود. بدین منظور، با استفاده از تبدیل فوریه مشاهدات از فضای زمان به فضای فرکانس برده شده و با استفاده از آنالیز فوریه و کمترین مربعات، فرکانس‌های موجود در مشاهدات به دست می‌آیند.

در شکل ۴ کلیه فرکانس‌های موجود قبل از حذف اثر جزرومد در هر سری زمانی به همراه بزرگی آن‌ها نشان داده شده است.

بخش‌های مختلف از دریای خزر دامنه‌های مختلف از تغییرات و نوسانات سطح را نشان می‌دهد، که به همین علت ۷ نقطه در مناطق مختلف دریای خزر انتخاب شده است تا بتوان با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای یک نظارت اولیه بر نوسانات دریای خزر انجام داد. با در اختیار داشتن ارتفاع آب و لحظه قرائت هر ارتفاع، برای هر نقطه یک سری زمانی از روند تغییرات سطح آب با پیروی ۹/۹۱۵ روز در یک بازه زمانی ۶ ساله به دست خواهد آمد. عواملی که باعث ناپایداری سری زمانی می‌شود را می‌توان به روند و تغییرات فصلی و دوره‌ای تقسیم‌بندی کرد. در دریای خزر عوامل زیادی باعث ناپایداری سری زمانی سطح لحظه‌ای آب دریا می‌شود. افزایش و یا کاهش سطح آب که خود را به صورت روند نشان می‌دهد، همچنین تغییرات فصلی مثل طغیان رودخانه‌ها در فصل بهار و گرانش خورشید و ماه که باعث جزرومد و تغییرات ماهانه و روزانه سطح آب می‌شود، از جمله مهمترین عوامل ناپایداری سری زمانی می‌باشند که پس از حذف این عوامل، سری زمانی ایستا می‌باشد. با ملاحظه شکل ۲ یک روند غیر خطی در طول زمان در داده‌ها مشاهده می‌شود که برای ایستا نمودن داده‌ها باید از مشاهدات حذف شود. به منظور مدل کردن روند در



شکل ۳- تغییرات سطح لحظه‌ای آب دریا بعد از حذف روند برای نقاط مورد نظر



شکل ۴- کلیه فرکانس‌های موجود قبل از حذف اثر جزرومد در هر سری زمانی به‌همراه بزرگی آن‌ها

این کار در دو مرحله انجام می‌گیرد؛ یکبار برای سری زمانی اصلی که دارای پریود ۹/۹۱۵ روز است، که با استفاده از روش آنالیز فوریه فرکانس‌های امواج با پریود بیشتر از ۱۹/۸۳ روز تعیین شده، و بار دیگر برای فاصله زمانی ۲/۰۴ ساعت فرکانس‌های امواج با پریود بیشتر از ۴/۰۸ روز تعیین می‌شوند.

برای مشخص کردن فرکانس‌های موثر بر سری که باعث ناپیوستگی سری می‌شود، این فرکانس‌ها را به‌ترتیب حذف کرده و کار تا جایی ادامه می‌یابد که سری زمانی باقیمانده در میانگین و واریانس ایستا باشد.

که در رابطه فوق، $f_s = \frac{1}{P}$ همان فرکانس نمونه برداری ماهواره ارتفاعسنجی می‌باشد. طبق فرمول (۷) برای هر فرکانس جزرومدی فرکانس الایس محاسبه شده است که در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

نتیجه طیف فرکانسی در نقاط مورد مطالعه در دریای خزر به همراه فرکانس‌های جزرومدی مشاهده شده در هر نقطه، در شکل‌های ۵ تا ۱۱ نشان داده شده است.

در شکل‌های ۵ تا ۱۱ مرز فرکانس‌های جزرومدی مؤثر در نا ایستایی سیگنال توسط یک خط مشخص گردیده است. کلیه فرکانس‌های بالای این خط فرکانس‌های مؤثر بوده در حالی که فرکانس‌های پایین این خط را می‌توان مرتبط به عوامل محلی تصادفی نظیر باد، فشار و غیره در نظر گرفت که باعث نا ایستایی سری نمی‌شود.

بنابراین فرکانس‌هایی که در بالای خط قرار گرفته‌اند باید از روی سری زمانی برداشته شوند تا سری زمانی باقیمانده ایستا شود، و فرکانس‌هایی که در پایین این خط قرار دارند در روند و ایستایی سری زمانی نقشی ندارند و تأثیرگذار نمی‌باشند.

بدین ترتیب، نتیجه حاصل یک سری زمانی ایستا بوده که روند و فرکانس‌های اصلی جزرومدی نیز از روی آن حذف شده است.

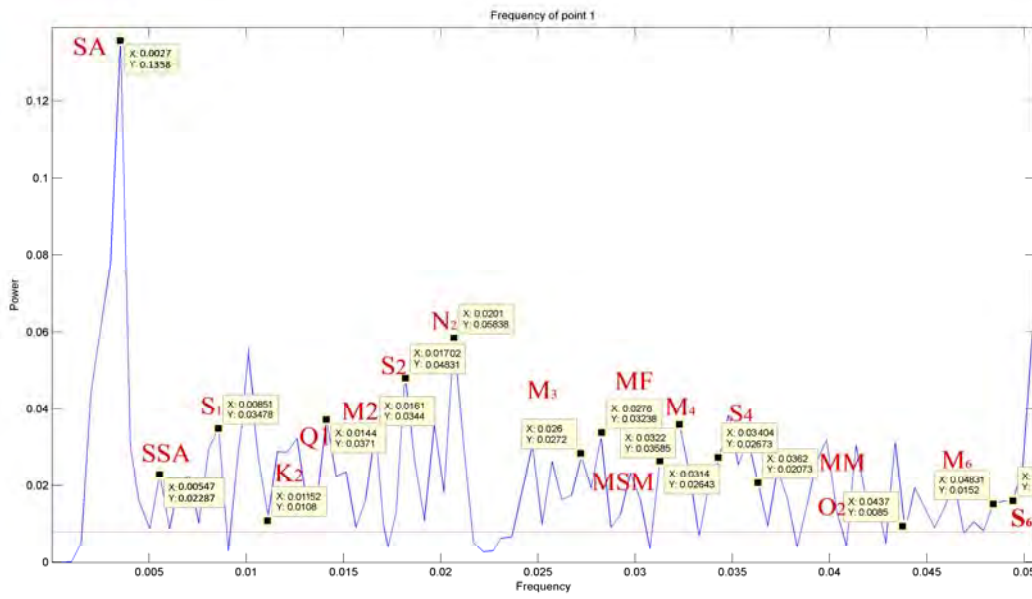
داده‌های ماهواره ارتفاعسنجی بر مبنای فواصل زمانی ۹/۹۱۵ روزه می‌باشند. طبق تئوری نمونه‌برداری اگر فاصله زمانی داده‌ها ΔT باشد، آن‌گاه می‌توان فرکانس‌های با پریود بزرگتر از $2\Delta T$ را از سری زمانی استخراج نمود. همان‌طور که گفته شد، فرکانس‌های اصلی جزرومدی دارای پریودهای روزانه، نیم‌روزانه، ماهیانه، نیم‌ماهیانه و بلند مدت هستند. بنابراین برای آن‌که بتوان از داده‌های ماهواره ارتفاعسنجی با فواصل زمانی ۹/۹۱۵ روزه فرکانس‌های با پریود کوچک و بزرگ را استخراج و مدل‌سازی نمود، باید داده‌ها را با فواصل زمانی کوچکتری مرتب کرد. اما نکته قابل توجه اینکه با توجه به ساعت انجام مشاهده می‌توان دریافت که مشاهدات طول شبانه‌روز را پوشش می‌دهند، و در واقع می‌توان مشاهدات را با فواصل زمانی ۲/۰۴ طی یک ۲۴ ساعت فرض کرد و طی یک شبانه‌روز آن‌ها را مرتب کرد [۷].

با توجه به نرخ نمونه‌برداری (۹/۹۱۵۹۶۵ روز) در Jason-2، برخی از فرکانس‌های الایس در طیف پدید آمده است. با نمایش فرکانس جزرومدی با f_k و فرکانس الایس آن یعنی f_a ، رابطه زیر بین فرکانس‌های جزرومدی و فرکانس الایس برقرار است [۱]:

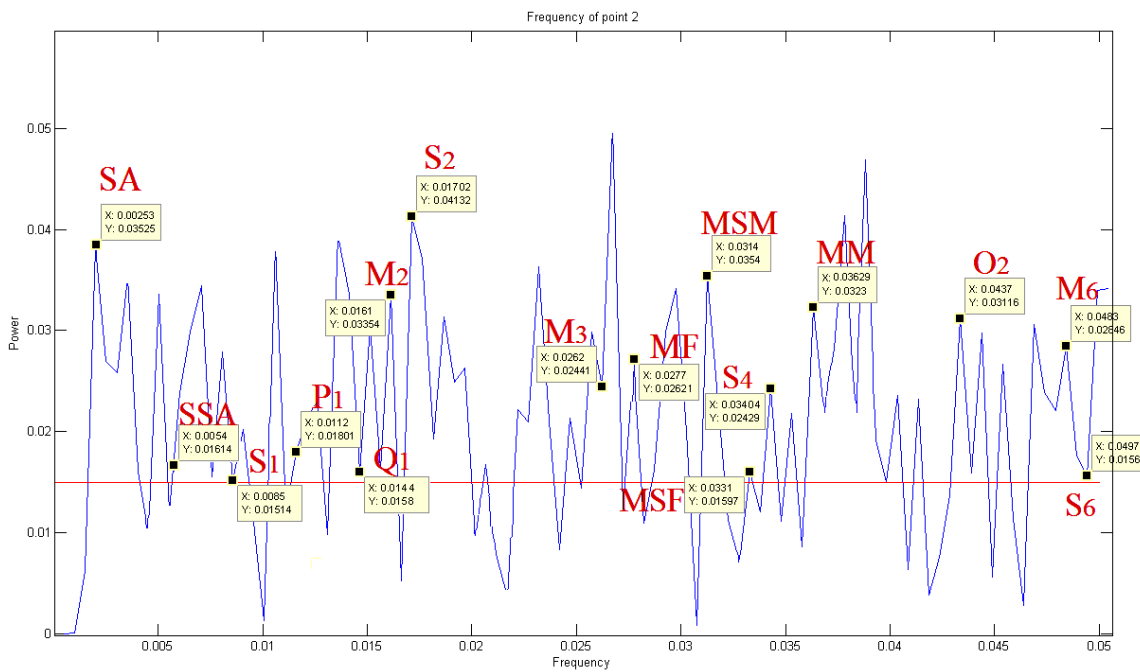
$$f_a = \left| \text{mod}\left(f_k + \frac{f_s}{2}, f_s\right) - \frac{f_s}{2} \right| \quad (7)$$

جدول ۱- پریودها و فرکانس‌های الایس مربوط به مؤلفه‌های اصلی نیم‌روزانه، روزانه، نیم‌ماهیانه، ماهیانه، نیم‌سالیه و سالیه جزرومد برای مشاهدات ماهواره Jason-2 [۱]

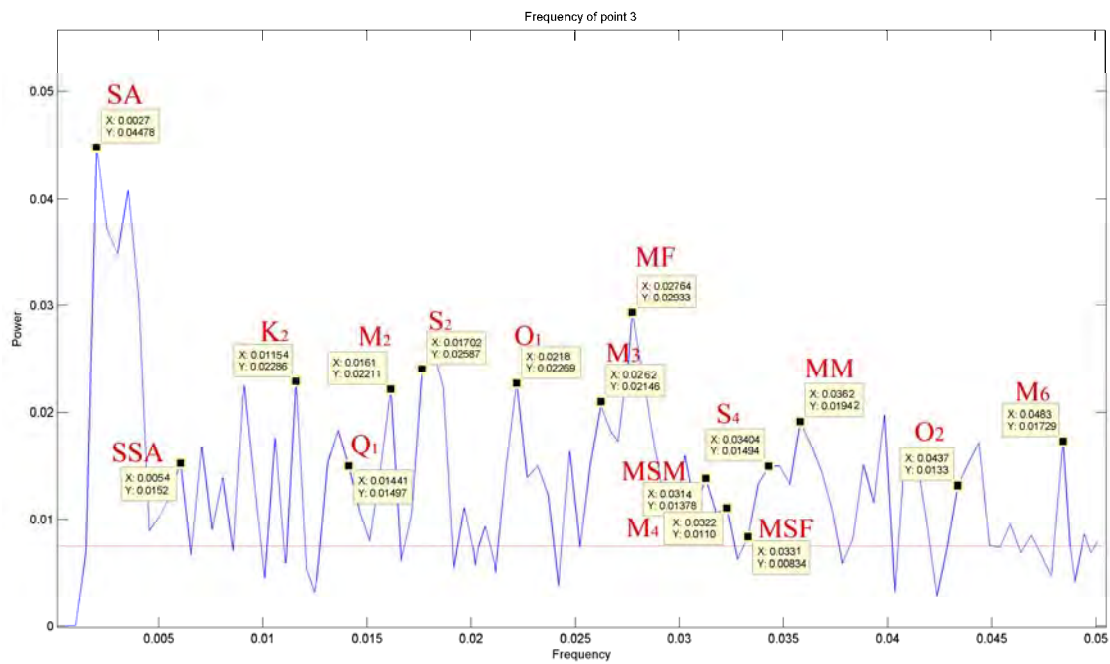
علامت	فرکانس (دور در روز)	پریود (روز)	فرکانس الایس (دور در روز)	پریود الایس (روز)
SA	0/002738	365/260	0/002738	365/260
SSA	0/005476	182/621	0/005476	182/621
MSM	0/031435	31/812	0/031435	31/812
MM	0/036292	27/555	0/036292	27/555
MSF	0/067726	14/765	0/033125	30/189
MF	0/073202	13/661	0/027649	36/168
Q1	0/893244	1/120	0/014417	69/365
O1	0/929536	1/076	0/021875	45/714
P1	0/997262	1/003	0/011250	88/891
S1	1/000000	1/000	0/008512	117/485
K1	1/002738	0/997	0/005774	173/192
O2	1/859071	0/538	0/043750	22/857
N2	1/895982	0/527	0/020191	49/528
M2	1/932274	0/518	0/016101	62/107
S2	2/000000	0/500	0/017024	58/742
K2	2/005476	0/499	0/011548	86/596
M3	2/898410	0/345	0/026274	38/061
M4	3/864547	0/259	0/032202	31/054
S4	4/000000	0/250	0/034047	29/371
M6	5/796821	0/173	0/048303	20/702
S6	6/000000	0/167	0/049780	20/088
M8	7/729094	0/129	0/036447	27/437



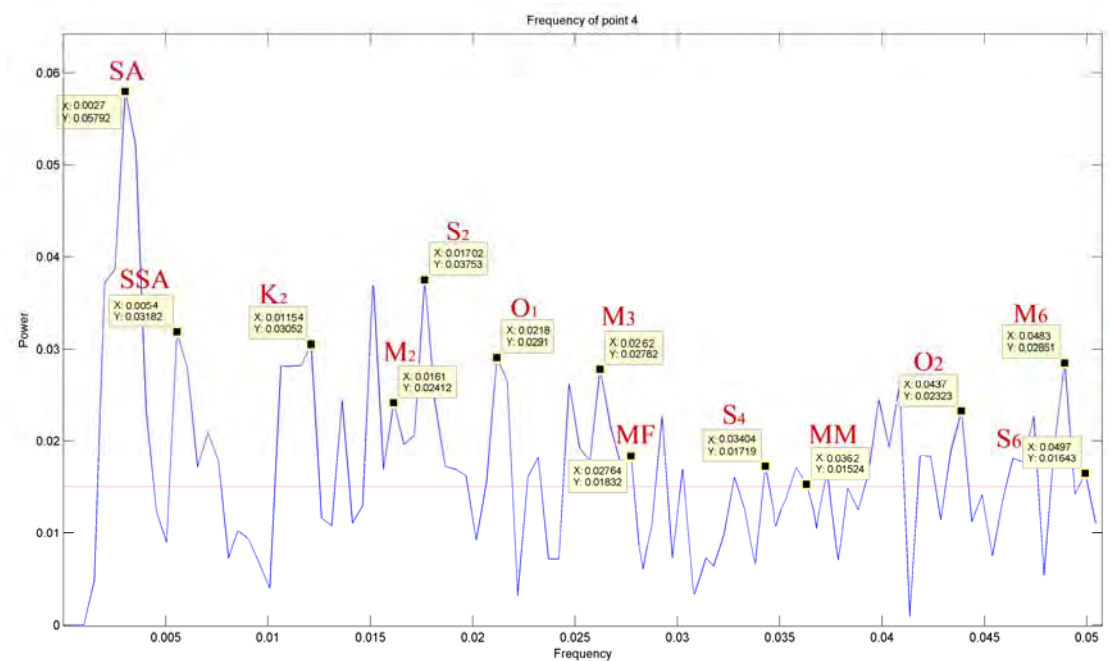
شکل ۵- نتیجه طیف فرکانسی در نقطه شماره ۱ در دریای خزر و فرکانس‌های جزرومدی مشاهده شده



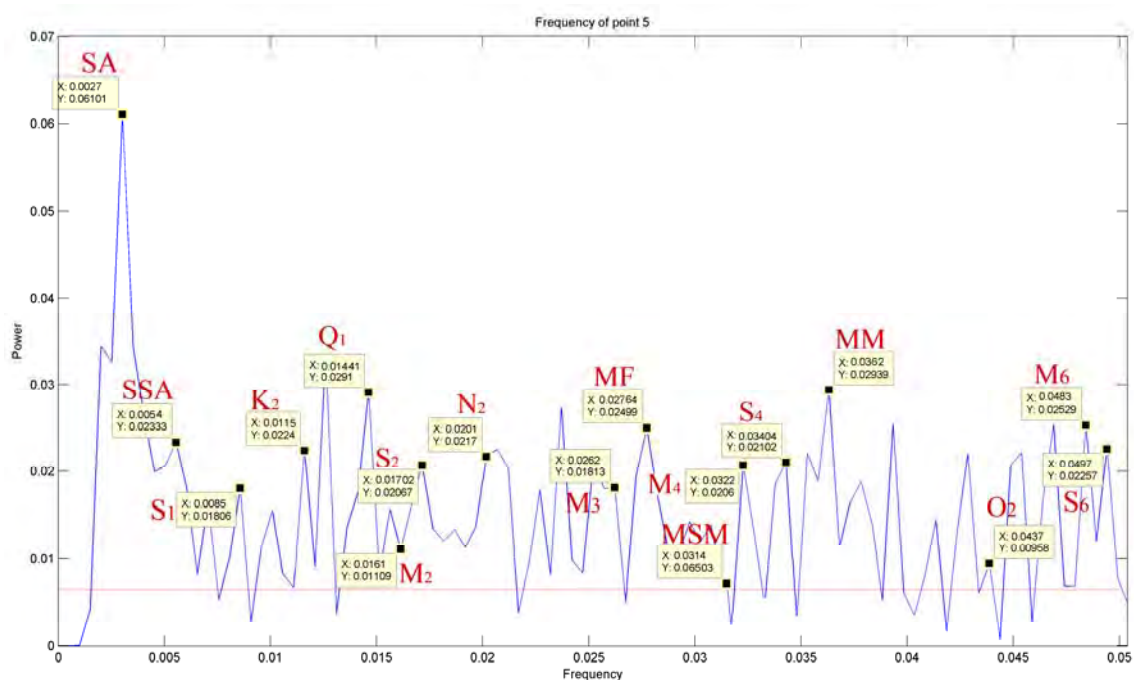
شکل ۶- نتیجه طیف فرکانسی در نقطه شماره ۲ در دریای خزر و فرکانس‌های جزرومدی مشاهده شده



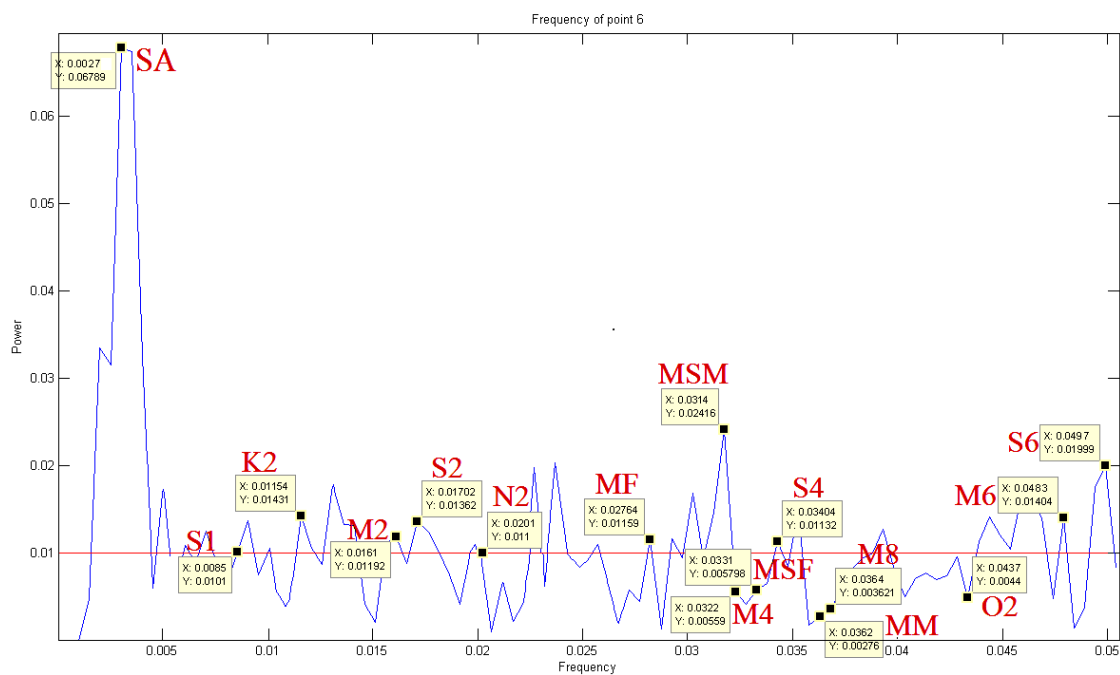
شکل ۷- نتیجه طیف فرکانسی در نقطه شماره ۳ در بای خزر و فرکانس‌های جزرومدی مشاهده شده



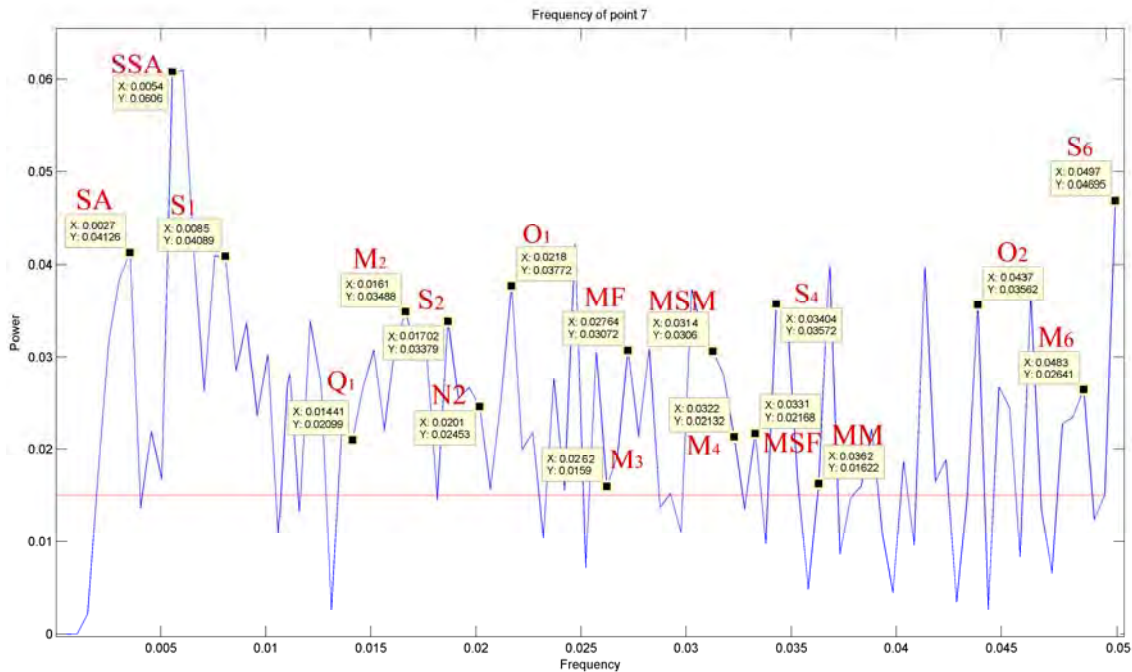
شکل ۸- نتیجه طیف فرکانسی در نقطه شماره ۴ در بای خزر و فرکانس‌های جزرومدی مشاهده شده



شکل ۹- نتیجه طیف فرکانسی در نقطه شماره ۵ در دریای خزر و فرکانس‌های جزرومدی مشاهده شده



شکل ۱۰- نتیجه طیف فرکانسی در نقطه شماره ۶ در دریای خزر و فرکانس‌های جزرومدی مشاهده شده



شکل ۱۱- نتیجه طیف فرکانسی در نقطه شماره ۷ در دریای خزر و فرکانس‌های جزرومدی مشاهده شده

۱-۳- تأثیر رودخانه ولگا بر تغییرات سطح دریای خزر

بر اساس آمار به‌دست آمده در سال‌های مختلف، رودخانه ولگا حدود ۸۰ درصد حجم آب ورودی به دریای خزر را به خود اختصاص داده است [۱۴] و کوچک‌ترین تغییر در دبی این رودخانه بر نوسانات تراز آب این دریا مؤثر است.

رودخانه ولگا همراه با کورا، ترک، اورال و سولاک، بیش از ۹۰ درصد از آب شیرین ورودی به دریای خزر را تأمین می‌کنند. رودخانه‌های ایران و رودخانه‌های کوچک‌تر کشورهای همسایه در بخش شمال شرقی کشور، ۱۰ درصد باقیمانده را تأمین می‌کنند. بنابراین، در سمت شرق هیچ جریان دائمی‌ای وجود ندارد (به‌عنوان مثال، مناطق قزاقستان و ترکمنستان) [۱۵].

برای بررسی روش ارائه شده و مطالعه تأثیر رودخانه ولگا بر نوسانات سطح آب دریای خزر، نقطه شماره ۷ در نزدیکی این رودخانه در نظر گرفته شده است. پس از حذف فرکانس‌های جزرومدی و روند از روی این داده‌ها و رسیدن به سری زمانی ایستا برای این نقطه، از طریق آنالیز فوریه فرکانس این سری زمانی به‌دست می‌آید. شکل ۱۲ الف نتایج حاصل در نقطه ۷ تحقیق حاضر بوده و شکل

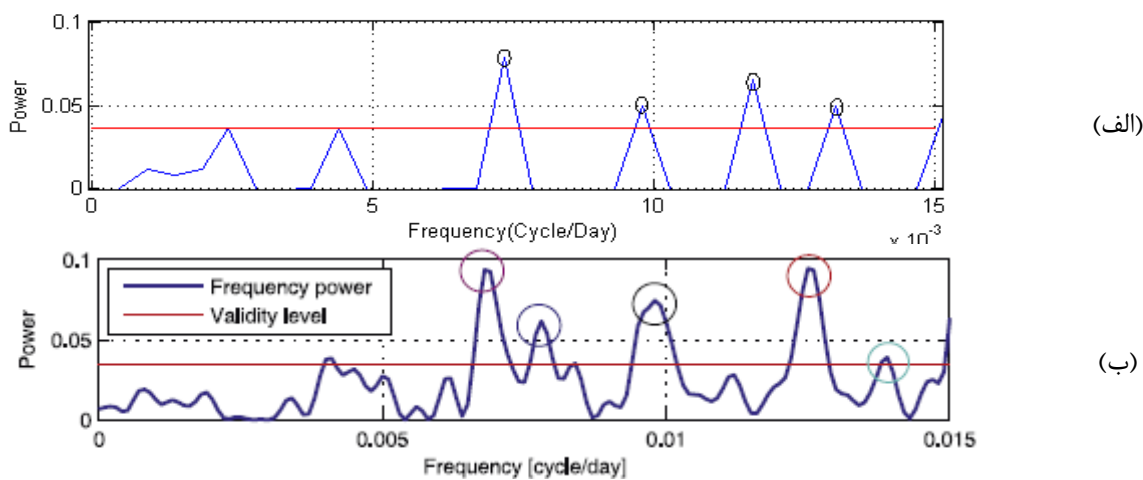
پس از کشف فرکانس‌های جزرومدی (که فرکانس‌های الایس هستند)، با روش کمترین مربعات، هر فرکانس و دامنه مربوط به آن برآورد شده و اثر آن‌ها از سری زمانی برداشته می‌شود.

همان‌طور که در فرکانس‌های این سری زمانی مشاهده شد، در هر شکل با توجه به موقعیت هر نقطه، از تمامی فرکانس‌های حاصل از نوسانات سطح آب تنها تعدادی از فرکانس‌های جزرومدی در طیف قدرت سیگنال دیده شده‌اند.

فرکانس‌هایی که در تمام نقاط دیده شدند شامل SSA, SA, S2, MF, MM, S4 و M6 می‌باشد. فرکانس‌های K1 و M8 در هیچ کدام از نقاط دیده نشدند. فرکانس P1 فقط در نقطه شماره ۲ و فرکانس N2 در نقاط ۱، ۴، ۵ و ۷ مشاهده گردید. فرکانس M4 در نقاط ۱، ۳، ۵ و ۷، فرکانس MSF در نقاط ۲، ۳ و ۷، و فرکانس O1 در نقاط ۳، ۴ و ۷ دیده شدند. فرکانس‌های M3 و Q1 در تمام نقاط به‌جز نقاط ۴ و ۶، و فرکانس K2 در تمام نقاط به‌جز نقاط ۲ و ۷ مشاهده شدند. فرکانس S1 در تمام نقاط به‌جز ۳ و ۴ مشاهده گردید. فرکانس MSM تنها در نقطه ۴، O2 تنها در نقطه ۶ و فرکانس S6 تنها در نقطه ۳ دیده نشدند.

به‌عنوان مثال، فرکانس‌های $0/0068$ چرخه در هر روز (CPD)، $0/0078$ CPD، $0/0098$ CPD و $0/0112$ CPD به‌عنوان چهار قله قابل توجه در شکل ۱۲ الف پدیدار شده‌اند که به‌ترتیب دارای پریودهای $147/05$ ، $128/2$ ، $102/04$ و 89 روز می‌باشند. این فرکانس‌ها، فرکانس‌های اصلی حاصل از نوسانات سطح رودخانه ولگا می‌باشد که با توجه به فاصله نقاط در دریای خزر تأثیرگذار می‌باشند [۹].

۱۲ نشان‌دهنده آنالیز طیفی تغییرات سطح لحظه‌ای ولگا حاصل از اندازه‌گیری‌های تغییرات سطح لحظه‌ای آب این رودخانه در طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۵ است [۹]. با مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق-که مربوط به داده‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ است- با نتایج حاصل از آنالیز طیفی ولگا، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر عمده‌ای در فرکانس‌های مؤثر در رودخانه ولگا رخ نداده است. در واقع می‌توان دید که طیف SSH از نقطه شماره ۷ در (شکل ۱۲ الف) بسیار شبیه به طیف ولگا (شکل ۱۲ ب) است.



شکل ۱۲- مقایسه فرکانس نهایی نقطه ۷ و فرکانس حاصل از تحقیق شریفی و همکاران برای رودخانه ولگا [۹]

بشمار آورد که به کمک آن‌ها می‌توان بخش جزرومدی تغییرات سطح آب در دریای خزر را آنالیز نمود، و بدین ترتیب راه برای پیش‌بینی عوامل غیر جزرومدی هموار گردید. به‌عبارت دیگر، در این تحقیق از اطلاعات ارتفاع‌سنجی به‌صورت نقطه به نقطه استفاده شده است در حالی که در تحقیقات گذشته این اطلاعات به صورت زمانی، مکانی و یا تلفیقی از این دو مورد استفاده قرار می‌گرفت.

مزیت عمده روش بکار برده شده در این تحقیق را می‌توان در ساده‌تر نمودن مدل‌های آنالیز جزرومدی و نیز امکان مدل‌سازی محلی و منطقه‌ای جزرومد به حساب آورد. چرا که روش‌های بکار گرفته شده در تحقیقات پیشین تنها در بررسی‌های با مقیاس جهانی و بخش‌های عمده‌ای از آب‌های جهان دارای کاربرد بود، در حالی که روش جدید مورد استفاده در این مقاله برای تحقیقات جزرومدی در مقیاس کوچک‌تر و محلی و حتی بزرگ و جهانی قابل بکارگیری می‌باشد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق ساختار فرکانسی سطح آب دریای خزر با استفاده از داده‌های ماهواره ارتفاع‌سنجی Jason-2 در فاصله زمانی بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ در ۷ نقطه در دریای خزر مورد مطالعه قرار گرفت. برای هر نقطه در دریا یک سری زمانی تشکیل داده شد و با استفاده از روش‌های چگالی طیفی مبتنی بر سری‌های فوریه و اساساً با تقریب زدن یک تابع با جملات سینوسی و کسینوسی، حذف روند از روی سری زمانی انجام شد. سپس از آنالیز فوریه برای یافتن تمامی فرکانس‌ها استفاده شد. در پریودگرام حاصل از هر نقطه با توجه به پدیده‌ی ایسینگ، فرکانس‌های مؤلفه‌های اصلی جزرومدی شامل SSA، SA، S2، M2، MF، MM، S4 و M6 در هر ۷ نقطه در دریای خزر به وضوح مشاهده شدند. بدین ترتیب، نتیجه این تحقیق را می‌توان افزودن شدن ۷ نقطه در سطح دریای خزر با آنالیز کامل فرکانس‌های آن‌ها بطور مجزا

این رودخانه در نوسانات سطح دریای خزر پرداخته شد. در این راستا، فرکانس‌های تأثیرگذار شناسایی شدند که در نقطه ۷، در مکانی نزدیک به این رودخانه، به‌وضوح مشاهده می‌شود. نتایج مقایسه این فرکانس‌ها با تحقیق‌های موجود، صحت این فرکانس‌ها را تأیید می‌کند.

پس از مرتب کردن داده‌ها برای دو فاصله نمونه‌برداری و حذف فرکانس‌ها با استفاده از آنالیز فوریه با تکیه بر مفهوم ایستایی، سری زمانی ایستا برای هر ۷ نقطه حاصل شد. با توجه به حجم آب ورودی بسیار زیاد رودخانه ولگا که حدود ۸۰ درصد حجم آب ورودی رودخانه‌های منتهی به دریای خزر را به خود اختصاص می‌دهد، به بررسی تأثیر

مراجع

- [1] Wang, Yu. (2004). Ocean Tide Modeling in the Southern Ocean, The Ohio State University. ReportNo.471
- [2] Lefebvre, M., Stewart, R. (1960–1992). HISTORY OF ALTIMETRY.
- [3] Torabi, M. (2007). Point-wise spectral analyse of topex-positon satellite altimetry data for Mean sea level determination, University of Tehran, Master thesis.
- [4] Schwiderski, E. W. (1980). On charting global ocean tides, Reviews of Geophysics and Space Physics, 18, 243-268.
- [5] Cartwright, D. E., Ray R. D. (1990). Oceanic tides from Geosat altimetry, Journal of Geophysical Research, 95(C3), 3069-3090.
- [6] Hashemi F, H. (2003). Tidal analysis and determination of same-pahse and amplitude maps using Topex/Poseidon satellite altimetry observations, University of Tehran, Master thesis.
- [7] Tourian, M. (2006). A new tidal model for the Persian Gulf and Oman Sea based on satellite altimetry and coastal tidal gauge observations, University of Tehran, Master thesis.
- [8] Jafari, A. (2006). Investigating Caspian sea level changes using satellite altimetry and coastal tidal gauge observations, University of Tehran, Master thesis.
- [9] Sharifi, M. A., Forootan, E., Nikkhoo, M., Awange, J. and Najafi Alamdari, M. (2012). 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, 01/03/2013, 51, 5.
- [10] Niroomand, H. and Bozorgnia, A. (2010). The analysis of time series introduction.
- [11] Chow, V. T., (1978). Stochastic modeling of watershed systems, Advances in hydrosciences, Vol.11 Academic press, New York.
- [12] Chatfield, C., (1989). The analysis of time series, An introduction, Chapman and Hall, London.
- [13] Shannon, C. (1984). Communication in the presence of noise, Proc. IEEE 72, 1192–1201.
- [14] Amini, A. (1992). Classification of lakes and seas based on the factors affecting the changes in water level.
- [15] TDA. (2002). Trans Boundary Diagnostic Analysis for the Caspian Sea, The Caspian Sea Environment Programme.