

## تعیین مؤلفه‌های کشندی ترکیبی و جز اضافی در محدوده‌ی شرق سواحل ایرانی دریای مکران

سید مسعود محموداف<sup>۱\*</sup>، محمد باقری<sup>۲</sup>

۱- استادیار پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، پژوهشکده فناوری و مهندسی دریا، پست الکترونیکی:  
m\_mahmoudof@inio.ac.ir

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه‌های دریایی، سازمان بنادر و دریانوردی، اداره کل مهندسی سواحل و بنادر، پست الکترونیکی:  
mbagheri@pmo.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۲۱

\* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۰۲

ارایه شده در اولین همایش بین‌المللی اقیانوس‌شناسی غرب آسیا (۸ و ۹ آبان ماه ۱۳۹۶).

### چکیده

در این مطالعه با استفاده از روش تحلیل Bispectral، مؤلفه‌های ترکیبی و اضافی حاصل از اندرکنش‌های غیرخطی سه‌تایی (triad) مؤلفه‌های اصلی کشندی در محدوده‌ی شرق سواحل ایرانی مکران مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مهم‌ترین مؤلفه‌های ترکیبی در این منطقه KO2، KP2، MS4 و MN4 هستند. همچنین مؤلفه‌های جز اضافی M4 و S4 در این منطقه با استفاده از روش به کار گرفته شده قابل شناسایی هستند. برتری روش Bispectral در مقایسه با روش کمترین مربعات (تحلیل هارمونیک)، امکان شناسایی برخی مؤلفه‌های ترکیبی نظیر KO2 است که توسط روش کمترین مربعات هرگز قابل شناسایی نیست. با مقایسه‌ی نتایج روش‌های تحلیل کمترین مربعات و فوریه، فرکانس همسازهای نظیر مؤلفه‌های اصلی کشندی تعیین شدند. در نهایت تحلیل با ۳ درجه آزادی ۱۶، ۳۲ و ۶۴ انجام گردید و مقادیر قابل توجه Bicoherence که در هر ۳ درجه آزادی تکرار شده و در محدوده‌ی فرکانسی مؤلفه‌های اصلی کشندی بودند، به عنوان اندرکنش‌های قوی و مؤثر تعیین شدند.

کلمات کلیدی: کشند ترکیبی، کشند جز اضافی، اندرکنش غیرخطی، Bispectral، دریای مکران.

### ۱. مقدمه

مؤلفه‌های کشندی بر اساس متغیری به نام دامنه‌ی بالقوه کشندی<sup>۱</sup> الویت‌بندی می‌شوند. امواج کشندی هم مانند سایر امواج در محدوده‌ی آب‌های کم عمق تحت اثر بستر قرار می‌گیرند. اما با توجه به طول موج بسیار بلند آن‌ها و شرط  $(kd < 0.25)$  (k عدد موج و d عمق آب است)، این اثرگذاری در اعماق بسیار بیشتری نسبت به امواج ناشی از باد پدیدار می‌شود. در آب‌های کم عمق، اثرات بستر و توپوگرافی در تغییرات مشخصات مؤلفه‌های

نوسانات تراز سطح آب‌های آزاد، در اثر نیروهای گرانشی سماوی خورشید، ماه و از سوی دیگر چرخش کره زمین، کشند نامیده می‌شود. اثر هر یک از عوامل با یک مؤلفه‌ی کشندی شناخته می‌شود. هر مؤلفه دارای دوره‌ی تناوب، دامنه‌ی نوسان و فاز مشخص بوده که دوره‌ی تناوب آن در تمامی گستره‌ی کره زمین ثابت ولی دامنه و فاز هر مؤلفه در آب‌های عمیق تابع مکان مورد نظر است (Zounemat-Kermani and Bay, 2013).

<sup>1</sup> tidal potential amplitude

روش Bispectral می‌توان وقوع مؤلفه‌های ترکیبی را تحقیق کرد که دامنه‌ی نوسان کوچک آن‌ها در ابعاد خطای طبیعی محاسبات روش تحلیل هارمونیک است.

به هر حال شدت اندرکنش‌های مؤلفه‌های کشندی و تشکیل مؤلفه‌های ترکیبی و اضافه، جزو مشخصات ذاتی کشندی هر منطقه و تابع شکل توپوگرافی و تغییرات بستر در آن منطقه است. هدف از انجام این مطالعه، شناسایی مهم‌ترین مؤلفه‌های جز اضافی و ترکیبی حاصل از اندرکنش‌های سه‌گانه تجمعی موج-موج مؤلفه‌های اصلی کشندی با استفاده از روش تحلیل Bispectral و بدون استفاده از داده‌های جریان‌سنجی در محدوده‌ی شرق سواحل ایرانی مکران است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱-۲ معرفی روش تحلیل Bispectral

به طور کلی اولین اثر مشهود اندرکنش‌های سه‌گانه‌ی موج در محدوده‌ی آب‌های کم‌عمق، نامتقارن شدن پروفیل موج<sup>۴</sup> است. نامتقارنی پروفیل موج به صورت بلند و تیز شدن تاج، مسطح و کشیده شدن قعر امواج خواهد بود.

Phillips (1960) به شکل نظری ثابت کرد که تئوری موج مرتبه دوم استوکس<sup>۵</sup> حاصل اندرکنش غیرخطی دو قطار موج اولیه است. این نظریه از طریق مشاهدات آزمایشگاهی توسط Longuet-Higgins و Smith (۱۹۶۶) به اثبات رسید. اندرکنش غیرخطی سه‌تایی عبارت است از انتقال انرژی بین سه همساز<sup>۶</sup> که اعداد موج ( $k_i$ ) و سرعت زاویه‌ای ( $\omega$ ) آن‌ها در رابطه‌های ۱ و ۲ صادق باشد (Armstrong et al., 1962).

$$f_1 \pm f_2 = f_3 \quad \text{رابطه ۱}$$

$$k_1 \pm k_2 = k_3 \quad \text{رابطه ۲}$$

به طور کلی رابطه‌ی پراکنش خطی (رابطه‌ی ۳) برای دو همساز اولیه حاکم است، اما برای مؤلفه‌ی سوم می‌تواند صادق نباشد.

کشندی از جمله پروفیل امواج کشندی مؤثر هستند. شکل‌گیری دو پدیده‌ی جز اضافی کشند<sup>۱</sup> و کشند ترکیبی<sup>۲</sup> جزو پدیده‌های کشندی در آب‌های کم‌عمق است. اهمیت شناخت این دو پدیده‌ی کشندی در پیش‌بینی دقیق‌تر تراز کشند است. هرگاه مؤلفه‌ای پدید آید که فرکانس آن برابر با جمع و یا تفاضل دو فرکانس مؤلفه‌ی اصلی و آب عمیق باشد به آن یک مؤلفه‌ی کشندی ترکیبی اطلاق شده و اگر فرکانس مؤلفه‌ی ترکیبی دو برابر فرکانس یک مؤلفه‌ی اصلی باشد، به آن مؤلفه‌ی جز اضافی کشند گفته می‌شود (Le Provost, 1991). این شرط دقیقاً یکی از ۲ شرط لازم برای شکل‌گیری اندرکنش‌های غیرخطی سه‌تایی موج-موج<sup>۳</sup> برای امواج ناشی از باد است که در محدوده‌ی آب‌های کم‌عمق ساحلی و پیش از شکست موج شکل می‌گیرد (Elgar et al., 1995). در خصوص دو پدیده‌ی کشندی مذکور، نتایج مطالعه‌ی Gallo و Vinzon (۲۰۰۵) نشان داد که بر اساس نوع و شدت پدیده‌ی کشند ترکیبی، مصب رودخانه آمازون به ۳ محدوده با رفتار متفاوت کشند ترکیبی قابل تقسیم‌بندی است. همچنین Gómez-Valdés و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از مشاهدات میدانی و اندازه‌گیری‌های شدت جریان نشان دادند که در خلیج Ensenada de la Paz در کشور مکزیک، مؤثرترین کشند ترکیبی حاصل از اندرکنش دو مؤلفه‌ی K1 و M2 پدیدار می‌شود. استفاده از روش استاندارد Bispectral به منظور مطالعه‌ی پدیده‌ی اندرکنش‌های سه‌گانه امواج آب کم‌عمق در دو دهه‌ی اخیر بسیار متداول است (به عنوان مثال Elgar et al., 1995; Eldeberky, 2012). اما بر اساس اطلاعات گردآوری شده توسط نویسندگان، تاکنون با استفاده از این روش هیچ‌گونه مطالعه‌ای در خصوص شناسایی مؤلفه‌های کشندی اضافی و ترکیبی انجام نشده است. لذا هیچ‌گونه سابقه‌ی مطالعاتی در این خصوص یافت نشده است. اهمیت بسیار بالای انجام چنین مطالعه‌ای با استفاده از روش Bispectral، امکان شناسایی برخی مؤلفه‌های ترکیبی با دوره‌ی تناوب دقیقاً برابر با مؤلفه‌های اصلی است. با توجه به تساوی دوره‌های تناوب این دو گروه مؤلفه، با استفاده از روش متداول کمترین مربعات (هارمونیک) امکان تشخیص وقوع و حضور مؤلفه‌ی ترکیبی دارای دوره‌ی تناوب برابر با مؤلفه‌ی اصلی وجود ندارد. از سوی دیگر با استفاده از

<sup>4</sup> wave asymmetry

<sup>5</sup> Stokes

<sup>6</sup> Harmonic

<sup>1</sup> overtide

<sup>2</sup> compound tide

<sup>3</sup> Nonlinear triad interaction

به عبارتی هر گاه مقادیر Bic از  $b_{95\%}^2$  بزرگ‌تر باشند، آنگاه به احتمال حداقل ۹۵٪ مقدار Bic مورد نظر معرف یک اندرکنش واقعی و قابل توجه است. در این رابطه  $d.o.f.$  درجه‌ی آزادی تحلیل فوریه و یا Bispectral است. به طور کلی هر تحلیل فوریه دارای درجه آزادی ۲ است. حال اگر تعداد و تکرار دفعات انجام تحلیل‌های فوریه را افزایش داده و از نتایج میانگین‌گیری شود، آنگاه درجه آزادی تحلیل افزایش می‌یابد. نکته‌ی قابل توجهی که باید به آن توجه شود، این است که مشخصات تحلیل Bispectral همانند تحلیل فوریه است و فرکانس همسازهای آن مانند فوریه بر اساس طول مدت زمان داده‌ها تعیین می‌شوند. توجه به این نکته ضروری است که هرگز فرکانس همسازهای فوریه (و یا Bispectral) منطبق بر فرکانس مؤلفه‌های کشندی نیستند، لذا ضروری است با مقایسه‌ی نتایج تحلیل فوریه و تحلیل کمترین مربعات، فرکانس همسازهای متناظر با مؤلفه‌های کشندی تعیین شوند. از آنجایی که در فرکانس‌های متناظر با مؤلفه‌های ترکیبی و اضافی کشندی هیچ منشاء انرژی جز اندرکنش غیرخطی وجود ندارد، انتظار داریم مقادیر Bic مربوط به این مؤلفه‌ها بسیار بزرگ‌تر از  $b_{95\%}^2$  و یا حتی نزدیک به ۱ باشد.

در این مطالعه وقوع و حضور مؤلفه‌های ترکیبی و اضافی کشندی حاصل از اندرکنش‌های سه‌گانه تجمعی در محدوده‌ی جغرافیایی نزدیک به سواحل شرقی منطقه‌ی مکران در ۳ ایستگاه در محدوده‌ی آب‌های سرزمینی جمهوری اسلامی ایران با استفاده از روش Bispectral مورد مطالعه قرار گرفت. حال با توجه به محدودیت‌های تحلیل Bispectral که در بالا ذکر شد، لازم است علاوه بر متغیر  $b_{95\%}^2$  فرضیات دیگری در مطالعه لحاظ شوند تا از صحت نتایج اطمینان حاصل شود.

- بدین‌منظور فرضیات اساسی زیر در این مطالعه مدنظر قرار گرفتند.
- ۱- با توجه به فاصله ناچیز ۳ ایستگاه، مؤلفه‌های اصلی کشندی در این ایستگاه‌ها یکسان باشند.
  - ۲- اندرکنش‌هایی قابل توجه باشند که مقدار Bic جفت فرکانس بسیار بزرگ‌تر از سطح معنی‌داری ۹۵٪ باشد.
  - ۳- مقادیر قابل توجه Bic، در تحلیل‌هایی با درجه آزادی‌های مختلف در یک ایستگاه تکرارپذیر باشند (مشابه مطالعه Sénéchal و همکاران (۲۰۰۲)).
  - ۴- فرکانس مؤلفه‌های اندرکنش‌کننده در محدوده‌ی مؤلفه‌های اصلی کشندی باشند.

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه  $g$  شتاب گرانشی و  $d$  عمق آب است. بهترین ابزار به منظور مطالعه‌ی اندرکنش‌های سه‌گانه موج-موج تحلیل Bispectral است. متغیر Bispectrum به عنوان کواریانس مرتبه‌ی دوم تبدیل فوریه به شکل رابطه ۴ تعریف می‌شود (Hasselmann et al., 1963):

$$B(f_1, f_2) = E[X(f_1)X(f_2)X^*(f_1 \pm f_2)] \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن  $E[\ ]$  امید ریاضی،  $X(f_i)$  فرم مختلط همساز نام تبدیل فوریه و  $X^*$  فرم مزدوج  $X$  است. شکل نرمال شده‌ی متغیر Bispectrum با عنوان Bicoherence به شکل رابطه ۵ تعریف می‌شود (Kim and Powers, 1979):

$$b^2(f_1, f_2) = \frac{|B(f_1, f_2)|^2}{E[|X(f_1)X(f_2)|]^2 E[|X(f_1 \pm f_2)|]^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

متغیر Bicoherence مقداری بین ۰ تا ۱ است که به ترتیب به معنای حداقل و حداکثر شدت اندرکنش اشاره دارد (از این پس، از عبارت کوتاه Bic به جای متغیر Bicoherence استفاده می‌گردد). این متغیر نشان دهنده‌ی کسری از انرژی موجود در همساز سوم است که در اثر اندرکنش دو همساز اول و دوم به همساز سوم منتقل شده است (Eldeberky, 1996). اگر انتقال انرژی از فرکانس پایین به فرکانس بالاتر باشد (علامت جمع در روابط ۱، ۲، ۴ و ۵)، به آن اندرکنش تجمعی و یا مثبت گفته می‌شود و حاصل اندرکنش یک بالا مؤلفه<sup>۱</sup> است.

نتایج تحلیل Bispectral به شدت نسبت به حضور هرز داده‌ی پس‌زمینه<sup>۲</sup> در داده‌ها و همچنین خطاهای بسیار ناچیز محاسباتی حاصل از گرد شدن اعداد، حساس بوده و می‌تواند منجر به نتایج کاذبی شود. لذا به منظور اجتناب از نتایج گمراه‌کننده، سطح معنی‌داری ۹۵٪ متغیر Bic به شکل رابطه ۶ تعریف می‌شود (Haubrich, 1965):

$$b_{95\%}^2 = 6 / d.o.f. \quad \text{رابطه ۶}$$

<sup>۱</sup> super-harmonic  
<sup>۲</sup> noise

## ۲-۲ مشخصات داده‌های میدانی

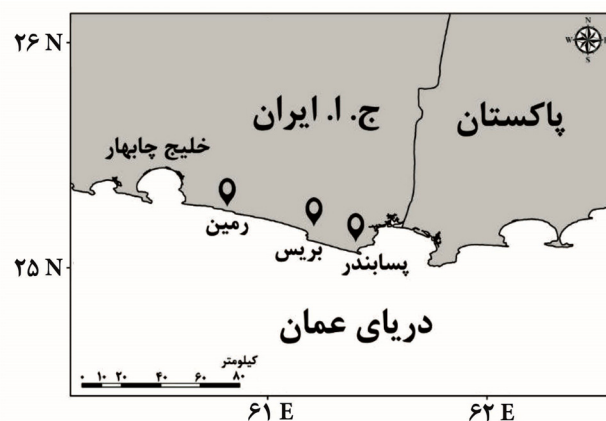
با توجه به نتیجه‌ی به دست آمده و بزرگی دامنه‌ی نوسان، ۷ مؤلفه‌ی SSA, M2, S2, N2, O1, K1 و P1 به عنوان مؤلفه‌های اصلی این منطقه شناسایی شدند که در جدول ۱ با قلم ضخیم‌تر نشان داده شده‌اند.

معمولاً در تحلیل Bispectral امواج ناشی از باد، به منظور اطمینان از وقوع اندرکنش‌های غیرخطی درجه آزادی تحلیل‌ها ۲۴ و ۲۵ انتخاب می‌شوند. در صورتی که هدف مطالعه‌ی اندرکنش-های ضعیف‌تر باشند، درجه آزادی تحلیل افزایش می‌یابد ( $2^{>5}$ ) (Elgar et al., 1995; Elgar and Guza, 1985). از آنجایی که فرکانس همسازهای حاصل از تحلیل فوریه با درجه آزادی‌های ۳۲ و ۶۴ زیرمجموعه فرکانس‌های حاصل از درجه آزادی ۱۶ خواهند بود، لذا در این مرحله، داده‌های کشندی با درجه آزادی ۱۶ تحلیل شده‌اند. نتایج به دست آمده در شکل ۲، به صورت دامنه‌های نوسان همسازهای فوریه (خاکستری)، نشان داده شده است. همچنین در این شکل علاوه بر دامنه‌ی نوسان مؤلفه‌های فوریه، دامنه‌ی نوسان مؤلفه‌های اصلی کشندی حاصل از تحلیل کمترین مربعات با رنگ سیاه نشان داده شده است. در این نمودار تمامی مؤلفه‌ها و همسازهای حاصل، بر حسب دوره‌ی تناوب از بزرگ به کوچک، از چپ به راست مرتب شده‌اند. از آنجایی که مؤلفه‌های اصلی کشندی و همسازهای فوریه به لحاظ فرکانس هرگز بر یکدیگر منطبق نمی‌شوند، انرژی مؤلفه‌های کشندی بین همسازهای فوریه که در مجاورت آن‌ها قرار دارند، توزیع می‌شود. لذا رعایت شاخص محتوای انرژی به منظور اطمینان از صحت نتایج، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Mahmoudof et al., 2012). از آنجایی که مقدار متغیر F برای منطقه‌ی مورد مطالعه برابر با ۰/۵۶ است، لذا رژیم کشندی از نوع آمیخته و متمایل به نیم روزانه است. نتایج در برخی مطالعات میدانی پیشین نشان داده‌اند که شدت وقوع پدیده‌ی کشند ترکیبی برای مناطقی با رژیم کشندی متمایل به نیم روزانه بیشتر است (Le Provost, 1997; Sinha and Pingree, 1991). این در حالی است که بر اساس تئوری موج مرتبه دوم انتظار داریم با افزایش طول موج، پتانسیل وقوع اندرکنش‌های غیرخطی موج افزایش یابد (Longuet-Higgins and Smith, 1966).

به منظور تعیین رژیم کشندی منطقه از معیار Dietrich (1963) بر اساس رابطه‌ی ۷ استفاده گردید.

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad \text{رابطه ۷}$$

داده‌های نوسانات کشندی در ۳ ایستگاه در نزدیکی سواحل بریس، پسابندر و رمین همگی در شرق خلیج چابهار مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفتند (شکل ۱). مدت زمان تقریبی داده‌های پیوسته مربوط به این ۳ ایستگاه که در این مطالعه بررسی شدند به ترتیب عبارتند از ۷، ۵ و ۴ ماه که با فواصل زمانی ۱۰ دقیقه توسط کشند نگار<sup>۱</sup> به ثبت رسیدند. عمق آب در این ۳ ایستگاه مشابه یکدیگر و به طور تقریبی برابر با ۵ متر بود. با توجه به نقشه‌های عمق‌سنجی‌های به عمل آمده، شیب بستر صخره‌ای در این ۳ منطقه مشابه و نزدیک به ۱٪ بود. این داده‌ها بخشی از داده‌های حاصل از پروژه‌ی پایش سواحل مکران بوده که توسط اداره‌ی کل سواحل و بنادر سازمان بنادر و دریانوردی در اختیار نویسندگان قرار گرفت.

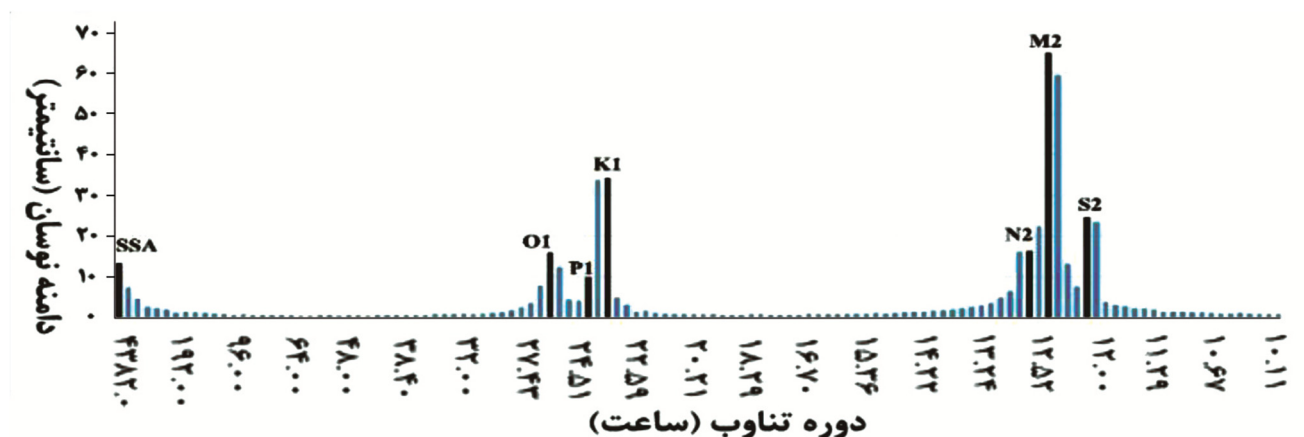


شکل ۱: محدوده‌ی جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

## ۳. نتایج و بحث

با توجه به طول مدت زمان بیشتر داده‌های موجود در ایستگاه بریس و همچنین فرض ثابت بودن مؤلفه‌های اصلی کشندی در این ۳ ایستگاه، از داده‌های این ایستگاه به منظور تعیین مؤلفه‌های اصلی کشندی استفاده گردید. بدین منظور با در نظر گرفتن الویت مؤلفه‌های کشندی بر اساس ضریب دامنه‌ی بالقوه کشندی و همچنین معیار رایلی و با استفاده از روش تحلیل کمترین مربعات، ۳۴ مؤلفه‌ی کشندی انتخاب و در تحلیل لحاظ شدند (Foreman, 2004). نتیجه‌ی حاصل از آن در جدول ۱ آمده است.

<sup>۱</sup> tide gauge



شکل ۲: دامنه‌ی نوسان مؤلفه‌های اصلی کشندی (سیاه) و همسازهای فوریه (خاکستری) با ۱۶ درجه آزادی

جدول ۱: تعیین مشخصات مؤلفه‌های اصلی کشندی در منطقه‌ی مورد مطالعه

مؤلفه	SSA	MSM	MM	MSF	MF	M2	S2	N2	ETA2	EPS2	MU2	L2	MKS2	K2	MSN2	K1	O1
دامنه (cm)	۱۳,۲۴	۲,۰۳	۰,۸۶	۰,۸۵	۱,۲۷	۶۴,۸۲	۲۴,۴۴	۱۶,۲۳	۰,۹۱	۰,۵۲	۱,۴۵	۱,۲۰	۶,۴۵	۲,۹۱	۰,۵۱	۳۴,۱۶	۱۵,۷۹
مؤلفه	OO1	2Q1	Q1	NO1	J1	UPS1	ALP1	TAU1	BET1	P1	PHI1	SO1	M3	MK3	MO3	SK3	SO3
دامنه (cm)	۱,۰۶	۰,۵۶	۳,۲۷	۲,۶۰	۲,۴۳	۰,۲۷	۰,۱۹	۱,۱۵	۰,۱۲	۹,۶۸	۲,۱۸	۰,۴۹	۰,۸۱	۰,۰۹	۰,۱۵	۰,۷۴	۰,۱۷

مورد نظر در محدوده‌ی فرکانسی مؤلفه‌های اصلی (ساعت/چرخه  $f_i \leq 0.1$ ) در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل‌های ۳ الف تا ۳ ج مشاهده می‌گردد، شدیدترین اندرکنش‌های سه‌گانه تجمعی مربوط به فرکانس‌های آزادی، حدوداً برابر ۰/۹ است و اختلاف بسیار زیادی با سطح ۹۵٪ معنی‌داری هر ۳ درجه آزادی اعمال شده دارد. مقادیر راهنمای نمودارها از سطح ۹۵٪ معنی‌داری به بالا برای هر درجه آزادی تنظیم شده است. با استفاده از شکل ۲ می‌توان دریافت که این دو فرکانس متناظر با مؤلفه‌های K1 و O1 است.

در این مطالعه از فهرست استاندارد (2017) TWCWG به منظور نام‌گذاری مؤلفه‌های ترکیبی و اضافی کشندی استفاده شد. لذا بر این اساس مهم‌ترین مؤلفه‌ی ترکیبی در این ایستگاه KO2 است. همچنین شدت اندرکنش‌های جفت مؤلفه‌های (K1,P1) و (P1,O1) در مرتبه‌های بعدی و با مقادیر Bic نزدیک به ۰/۹ قرار دارند. پس از این جفت مؤلفه‌ها، شدت اندرکنش‌های (M2,N2)، (M2,S2) و خود اندرکنشی مؤلفه‌های M2 و S2 از مؤلفه‌های نیم‌روزانه با بزرگی تقریبی متغیر Bic نزدیک به ۰/۷ قابل توجه هستند. بنابراین در این ایستگاه مؤلفه‌های ترکیبی KO2، KP2، OP2، MN4 و MS4 و همچنین دو جز اضافی M4 و S4 شایان

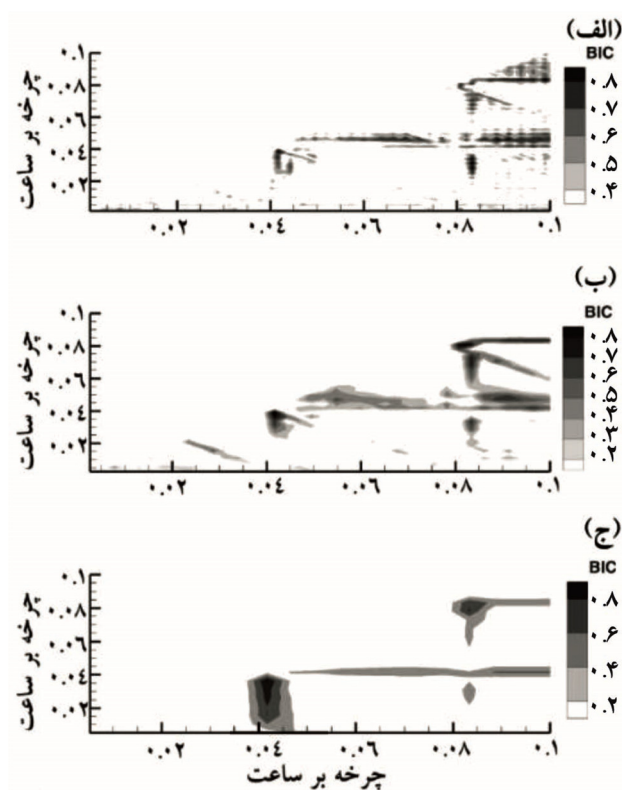
به منظور تعیین شدت اندرکنش‌های غیرخطی مؤلفه‌های اصلی کشندی در منطقه‌ی مورد مطالعه، داده‌های کشندی در هر ۳ ایستگاه با استفاده از روش تحلیل Bispectral و با ۳ درجه‌ی آزادی ۱۶، ۳۲ و ۶۴ تحلیل شدند. به عبارت دیگر کل داده‌های کشندی در هر ایستگاه را به ۸، ۱۶ و ۳۲ دسته داده با ۵۰٪ هم-پوشانی از بالادست و پایین‌دست تقسیم شدند. سطح ۹۵٪ معنی-داری متغیر Bic برای این ۳ درجه آزادی به ترتیب برابر با ۰/۳۷۵، ۰/۱۸۷۵ و ۰/۰۹۳۷ بود. شرایط تحلیل Bispectral به صورت خلاصه در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۲: شرایط تحلیل Bispectral داده‌های کشندی در ۳ ایستگاه مورد مطالعه

درجه آزادی	تعداد بلوک‌های داده‌ای	$b_{95\%}^2$
۱۶	۸	۰,۳۷۵
۳۲	۱۶	۰,۱۸۷۵
۶۴	۳۲	۰,۰۹۳۷

از آنجایی که تحلیل Bispectral براساس فرکانس همسازهای فوریه انجام می‌شود، لذا تفسیر نتایج این تحلیل، ارتباط و تعمیم دادن نتایج آن به مؤلفه‌های اصلی کشندی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این فرآیند به کمک شکل ۲ انجام گرفت. به عنوان مثال نتایج تحلیل Bispectral داده‌های کشندی در ایستگاه بریس برای اندرکنش‌های تجمعی با ۳ درجه آزادی

بروز این تفاوت را می‌توان مربوط به تغییرات در شکل بستر و شیب در آب‌های دور از ساحل دانست.

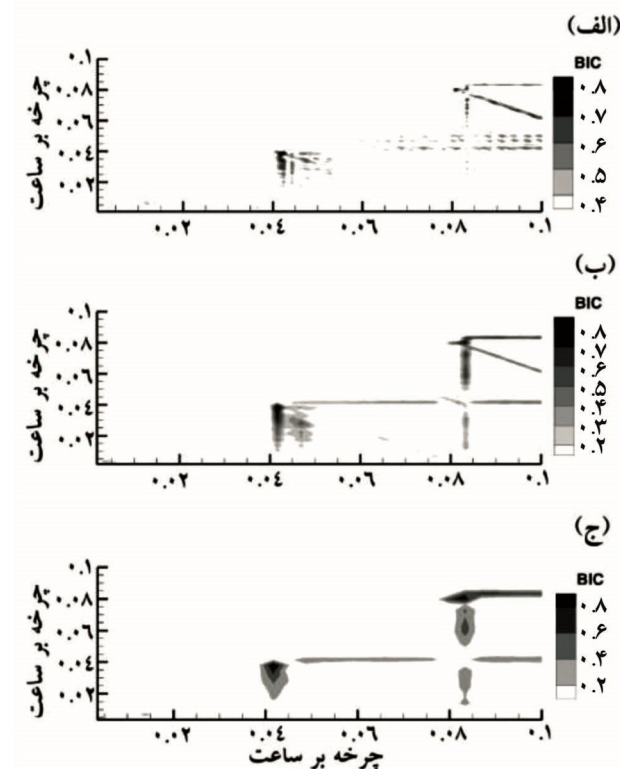


شکل ۴: اندرکنش‌های تجمعی در ایستگاه پسابندر برای درجه‌های آزادی الف) ۱۶، ب) ۳۲، ج) ۶۴

نتایج مربوط به اندرکنش‌های تجمعی مؤلفه‌های کشندی در ایستگاه رمین در شکل ۵ آمده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، شدیدترین اندرکنش‌های تجمعی در این ایستگاه به ترتیب مربوط به جفت مؤلفه‌های (O1,P1) و (K1,O1) با مقادیر متوسط BIC حدود ۰/۹۵ است و پس از آن جفت مؤلفه‌های (M2, S2) اندرکنش قابل توجهی با مقدار متوسط BIC نزدیک به ۰/۸ از خود نشان داده‌اند. بنابراین در این ایستگاه مهم‌ترین مؤلفه‌های ترکیبی OP2, KO2, MS4 و هستند. در این ایستگاه، مؤلفه‌ی جز اضافی شاخصی دیده نمی‌شود.

با توجه به نتایج به دست آمده به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در منطقه‌ی مورد مطالعه شدیدترین اندرکنش‌های تجمعی مربوط به ۳ مؤلفه‌ی روزانه‌ی O1, K1, P1 با مقادیر متوسط BIC حدود ۰/۹ است. هر چند که شدت اندرکنش‌های تجمعی مؤلفه‌های نیم روزانه‌ی M2, S2, با مقادیر متوسط BIC حدود ۰/۷ کاملاً شدید و قابل توجه ارزیابی می‌شود.

توجه هستند. اما نکته‌ی قابل توجه در نتایج، بروز مقادیر قابل توجه BIC است که به ظاهر مربوط به اندرکنش‌های غیرخطی بین مؤلفه‌های اصلی کشندی با دامنه‌ی وسیعی از فرکانس‌هایی است که فاقد انرژی قابل توجهی بوده و هرگز جزو مؤلفه‌های اصلی کشندی نیستند.



شکل ۳: اندرکنش‌های تجمعی در ایستگاه بریس برای درجه‌های آزادی الف) ۱۶، ب) ۳۲، ج) ۶۴

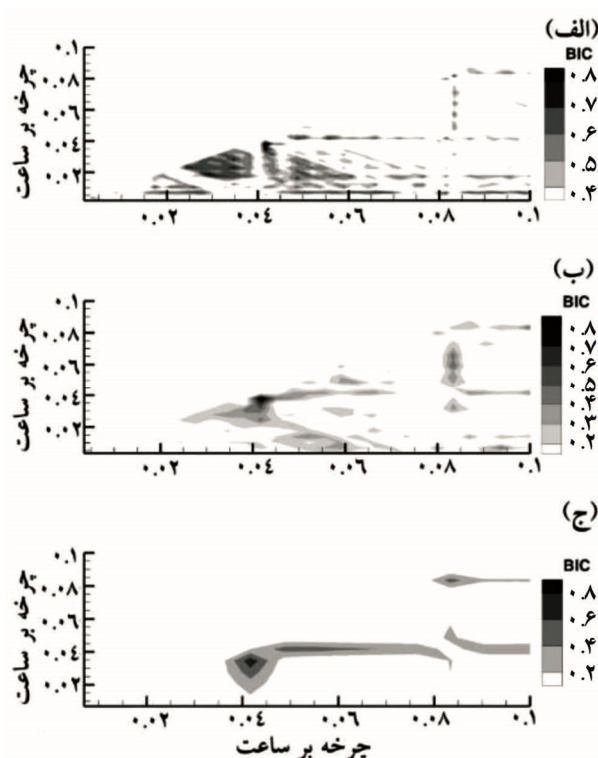
این نوع رفتار ریشه در حساسیت نتایج تحلیل Bispectral به خطاهای ناچیز عددی دارد، موردی که پیش از این در بخش ۲ به آن اشاره شد. همان‌گونه که مشخص است رفتار این مقادیر برای درجه آزادی‌های مختلف متفاوت بوده و از آنجایی‌که در دامنه‌ی فرکانس‌های مؤلفه‌های اصلی نیستند، لذا بر اساس فرضیات مطالعه از آن‌ها صرف نظر می‌شود. در ایستگاه پسابندر شرایط کمی با ایستگاه بریس متفاوت است. در این ایستگاه شدیدترین اندرکنش‌های تجمعی به ترتیب مربوط به خود اندرکنشی مؤلفه‌ی S2, (O1,P1), (K1,O1) با مقادیر متوسط BIC حدود ۰/۹ و پس از آن‌ها (M2,S2) با مقدار متوسط BIC حدود ۰/۷۵ قرار دارد (شکل ۴). بنابراین مهم‌ترین مؤلفه‌های کشندی ترکیبی و اضافی در این ایستگاه OP2, KO2, MS4 و S4 است. مهم‌ترین عامل در

آب کم عمق KO2، KP2، OP2، MS4 و MN4 جزو مهم‌ترین مؤلفه‌های ترکیبی منطقه‌ی مورد مطالعه هستند. همچنین با استفاده از روش به‌کار گرفته شده، مؤلفه‌های کشندی جز اضافی M4 و S4 قابل تشخیص هستند. شایان توجه است مؤلفه‌ی KO2 در هر ۳ ایستگاه به عنوان مهم‌ترین مؤلفه‌ی ترکیبی شناسایی شده است، در حالی‌که به دلیل مساوی بودن دوره‌ی تناوب آن با مؤلفه‌ی اصلی M2، با استفاده از روش متداول هارمونیک (کم‌ترین مربعات) به هیچ عنوان قابل تشخیص و شناسایی نیست.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مؤلفه‌های کشندی ترکیبی و جز اضافه حاصل از اندرکنش‌های غیر خطی سه‌تایی موج-موج تجمعی مؤلفه‌های اصلی کشندی در شرق سواحل ایرانی مکران با استفاده از روش تحلیل Bispectral (روش استاندارد مطالعه‌ی اندرکنش‌های غیرخطی امواج ناشی از باد) مورد مطالعه و شناسایی قرار گرفت. طول مدت زمان داده‌های کشندی در ایستگاه‌های بریس، پسابندر و رمین به ترتیب برابر با ۷، ۵ و ۴ ماه بود. با انجام تقسیم‌بندی داده‌های کشندی به بخش‌های کوچک‌تر و با وجود همپوشانی ۵۰٪ از بالا و پایین دست، درجه‌های آزادی ۱۶، ۳۲ و ۶۴ در تحلیل فوریه و Bispectral حاصل شد. ابتدا با استفاده از تحلیل کمترین مربعات و طول مدت زمان داده‌های موجود در ایستگاه بریس و بر اساس معیار رایلی و الویت‌بندی دامنه‌ی بالقوه مؤلفه‌های اصلی کشندی در منطقه‌ی مورد نظر شناسایی شدند. سپس با مقایسه‌ی نتایج مربوط به تحلیل کمترین مربعات و فوریه، فرکانس همسازهای فوریه که متناظر با مؤلفه‌های کشندی هستند، تعیین شدند. با انجام تحلیل Bispectral و لحاظ نمودن مقادیر بسیار بزرگ Bicoherence که در هر ۳ درجه‌ی آزادی تکرار شده و در محدوده‌ی فرکانسی مؤلفه‌های اصلی کشندی بودند، مشخص شد که مهم‌ترین مؤلفه‌های ترکیبی حاصل از اندرکنش مؤلفه‌های روزانه هستند. همچنین شاخص‌ترین مؤلفه‌های کشندی ترکیبی در منطقه‌ی مورد مطالعه KO2، KP2، OP2، MS4 و MN4 هستند.

در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از روش Bispectral مؤلفه‌ی ترکیبی KO2 در تمامی ایستگاه‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های ترکیبی شناسایی شد. در حالی‌که به دلیل برابر بودن دوره‌ی تناوب آن با مؤلفه‌ی اصلی M2، این مؤلفه هرگز با استفاده از روش کمترین مربعات قابل شناسایی نیست. همچنین در منطقه‌ی مورد



شکل ۵: اندرکنش‌های تجمعی در ایستگاه رمین برای درجه‌های آزادی (الف) ۱۶، (ب) ۳۲، (ج) ۶۴

این اختلاف در شدت اندرکنش مؤلفه‌های روزانه و نیم روزانه دقیقاً با ویژگی ذاتی پدیده‌ی اندرکنش غیرخطی سازگار است؛ زیرا در حالت کلی و شرایط تقریباً برابر انتظار می‌رود اندرکنش سه‌تایی بین امواج با طول موج بیشتر ( $kd$  کوچک‌تر)، شدیدتر از اندرکنش امواج با طول موج کوتاه‌تر، حاصل شود (Elgar and Guza, 1985). بنابراین انتظار می‌رود با افزایش انرژی (دامنه‌ی نوسان) و اهمیت مؤلفه‌های روزانه و میل رژیم کشندی به سمت روزانه، شاهد افزایش انرژی و یا احتمال وقوع مؤلفه‌های ترکیبی و جز اضافی کشندی باشیم. هر چند که پیش از این برخی مطالعات که به آن‌ها اشاره شد (Le Provost, 1991; Sinha and Pingree, 1997)، نتایجی مغایر با این موضوع گزارش نموده‌اند. البته لازم به ذکر است که در مطالعه‌ی حاضر کمبود طول مدت زمان داده‌های کشندی جزو محدودیت‌های نسبی محسوب می‌شود، چرا که تفکیک اثر اندرکنشی مؤلفه‌های K1 و P1 در درجه‌های آزادی بالاتر مستلزم دسترسی به داده‌های کشندی با طول بیشتر و حصول تعداد بیشتر همسازهای فوریه بین دو مؤلفه‌ی مذکور است. در هر صورت مؤلفه‌های کشندی

- Ensenada de la Paz lagoon, Baja California Sur, Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(4): 623-634.
- Hasselmann, K.; Munk, W.; MacDonald, G., 1963. *Bispectra of ocean waves. Time Series Analysis*. Wiley, New York, 125-139.
- Haubrich, R.A., 1965. Earth noise, 5 to 500 millicycles per second: 1. Spectral stationarity, normality, and nonlinearity. *Journal of Geophysical Research*, 70: 1415-1427.
- Kim, Y.C.; Powers, E.J., 1979. Digital bispectral analysis and its applications to nonlinear wave interactions. *Plasma Science, IEEE Transactions on Plasma Science*, PS7, 120-131.
- Le Provost, C., 1991. Generation of overtides and compound tides. In: Parker BB, editor. *Tidal hydrodynamics*. John Wiley & Sons, 269-295.
- Longuet-Higgins, M.; Smith, N., 1966. An experiment on third-order resonant wave interactions. *Journal of Fluid Mechanics*, 25: 417-435.
- Mahmoudof, M.; Banijamali, B.; Chegini, V., 2012. Least square analysis of noise-free tides using energy conservation and relative concentration of periods criteria. *Journal of Persian Gulf*, 3(8): 13-24.
- Mahmoudof, S.M.; Badiei, P.; Siadatmousavi, S.M.; Chegini, V., 2016. Observing and estimating of intensive triad interaction occurrence in very shallow water. *Continental Shelf Research*, 122: 68-76.
- Phillips, O., 1960. On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude Part 1. The elementary interactions. *Journal of Fluid Mechanics*, 9: 193-217.
- Sénéchal, N.; Bonneton, P.; Dupuis, H., 2002. Field experiment on secondary wave generation on a barred beach and the consequent evolution of energy dissipation on the beach face. *Coastal Engineering*, 46: 233-247.
- Sinha, B.; Pingree, R.D., 1997. The principal lunar semidiurnal tide and its harmonics: baseline solutions for M2 and M4 constituents on the North-West European Continental Shelf. *Continental Shelf Research*, 17: 1321-1365.
- مطالعه مؤلفه‌های M4 و S4 به عنوان مهم‌ترین جز اضافی کشندی شناسایی شدند.
- ### ۵. سپاسگزاری
- نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از اداره‌ی کل سواحل و بنادر سازمان بنادر و دریانوردی و جناب آقای مهندس الهیار به دلیل حمایت‌های به عمل آمده از این مطالعه، تقدیر و تشکر نمایند.
- ### منابع
- Armstrong, J.; Bloembergen, N.; Ducuing, J.; Pershan, P., 1962. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric. *Physical Review*, 127: 1918-1939.
- Dietrich, G., 1963. *General oceanography*. First edition Interscience Publishers. New York. 78-82.
- Eldeberky, Y., 1996. Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology, Delft, Netherland.
- Eldeberky, Y., 2012. Nonlinear effects in gravity waves propagating in shallow water. *Coastal Engineering Journal*, 54 (4): 1250024-1:21.
- Elgar, S.; Guza, R., 1985. Observations of bispectra of shoaling surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 161: 425-448.
- Elgar, S.; Herbers, T.; Chandran, V.; Guza, R., 1995. Higher-order spectral analysis of nonlinear ocean surface gravity waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 100: 4977-4983.
- Foreman, M.G.G., 2004. *Revised manual for tidal heights analysis and prediction*. Institute of Ocean Sciences. Patricia Bay, Sidney, B.C.
- Gallo, M.N.; Vinzon, S.B., 2005. Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary. *Ocean Dynamics*, 55: 441-448.
- Gómez-Valdés, J.; Delgado, J.A.; Dworak, J.A., 2003. Overtides, compound tides, and tidal-residual current in



Zounemat-Kermani, M.; Bay, Y., 2013. Efficiency analysis of artificial neural networks and multiple linear regression methods for tides prediction. Journal of Oceanography, 4: 1-10. (In Persian)

Tide, Water Level and Current Working Group (TWCWG), 2017. Standard list of Tidal Constituents. IHO.

Young, I.; Eldeberky, Y., 1998. Observations of triad coupling of finite depth wind waves. Coastal Engineering, 33: 137-154.