

شبیه‌سازی امواج در جنوب دریای خزر با به‌کارگیری میدان باد ISWM II و مقایسه با نتایج ECMWF (ERA-Interim)

فرشته کمیجانی^{۱*}، مسعود صدری‌نسب^۲، وحید چگینی^۳، سید مصطفی سیادت موسوی^۴

۱- دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، استان خوزستان، خرمشهر، پست الکترونیکی: fereshtekomijani@gmail.com

۲- عضو هیات علمی، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، استان خوزستان، خرمشهر، پست الکترونیکی: masoud.sadri@gmail.com

۳- عضو هیات علمی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: v_chegini@inio.ac.ir

۴- عضو هیات علمی، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: siadatmousavi@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۲۳

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۲/۲۵

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۳، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

در این مقاله، شبیه‌سازی مشخصات امواج در دریای خزر جنوبی، با استفاده از خاصیت روش تودرتو در مدل SWAN و به‌کارگیری میدان باد ECMWF-ERA-Interim انجام گردید. این شبیه‌سازی با مقایسه نتایج و مقادیر اندازه‌گیری در ایستگاه‌های نکا، نوشهر و انزلی با ضریب همبستگی ۰.۹۴٪ صحت‌سنجی شد. سپس مدل‌سازی‌ها با میدان باد مورد استفاده در ISWM II انجام گردید. هرچند میدان باد مورد استفاده در ISWM II در دریای خزر اصلاح شد، اما بالاتر بودن دقت مکانی میدان باد ECMWF-ERA-Interim سبب بهبود دقت نتایج پریود موج تا ۱ ثانیه و ارتفاع موج تا ۱/۵-۰/۵ متر، در بخش شرقی و مرکزی خزر شد. البته در غرب محدوده، نتایج مدل با میدان باد ECMWF-Reanalysis INIO، روند مقادیر اندازه‌گیری را دقیق‌تر به‌دست آورد. به‌علاوه در زمان‌هایی که ارتفاع موج اندازه‌گیری کمتر از ۱/۵ متر بود، نتایج مدل با میدان باد مورد استفاده در ISWM II به مقادیر اندازه‌گیری نزدیک‌تر بود.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی امواج، SWAN، ECMWF، ISWM II، دریای خزر.

۱. مقدمه

(Sverdrup and Munk, 1947) روش‌های ساده برای پیش‌بینی

مشخصات امواج ناشی از باد (صرف‌نظر از امواج دوراً) در مناطق

خاص هستند. مدل‌های عددی مانند WAM (Komen et al., 1994)

SWAN (Booij et al., 1999) و WAVEWATCH III (Tolman, 1991)

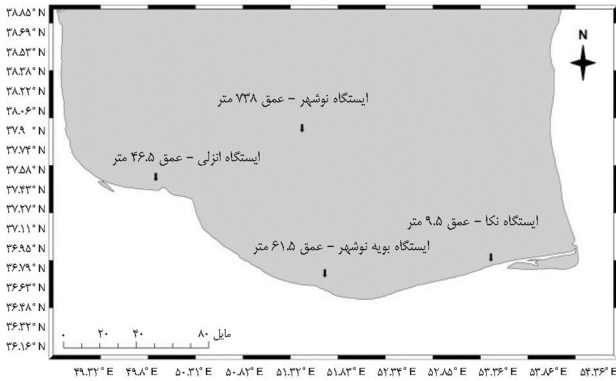
از دقت بالایی برخوردار هستند. SWAN مدلی

مدل‌سازی مشخصات امواج از روش‌های تجربی، عددی و

ابزار محاسبات نرم امکان‌پذیر است. روش‌های تجربی مانند

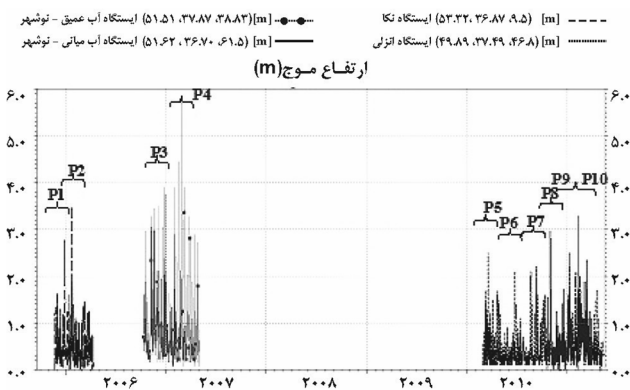
CEM (US Army, 2003)، SPM (US Army, 1984) و SMB

ایستگاه در غرب (ایستگاه انزلی) قرار داشته باشد (شکل ۱). از این طریق، علاوه بر بررسی نتایج در عمق‌های مختلف به بررسی شرایط موج در مکان‌های مختلف نیز پرداخته می‌شود.



شکل ۱: موقعیت و عمق ایستگاه‌های اندازه‌گیری مشخصه موج در خزر جنوبی

پوشش زمانی داده‌های اندازه‌گیری شده موج، از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱ است که سری زمانی مشخصه ارتفاع موج ثبت شده در کل ایستگاه‌ها و گلموج‌های حاصل به ترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) الف تا ج) آورده شده است. لازم به ذکر است که جهت موج در ایستگاه انزلی ثبت نشده است.



شکل ۲: سری زمانی اندازه‌گیری مشخصه موج در کل ایستگاه‌ها به همراه دوره‌های شبیه‌سازی

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مرتفع‌ترین امواج با ارتفاع بیش از ۵/۵ متر، در عمق ۷۳۸ متری ایستگاه نوشهر رخ داده است، که بیشترین فراوانی امواج با ارتفاع بیش از ۲ متر، در جهت موج غالب (شمال غربی تا شمال) این ایستگاه قرار دارد (شکل ۳ الف). همچنین، درحالی‌که در ایستگاه‌های نکا (عمق ۹/۵ متر) و نوشهر (در محل آب با عمق میانی، عمق ۶۱ متر)

برای شبیه‌سازی تولید و انتقال موج است که قادر به محاسبه پدیده‌های ژرفاکاستگی، شکست موج، تفرق و انکسار است. در این مدل، امواج به وسیله طیف دو بعدی چگالی کنش موج (N) توصیف می‌شوند:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + (\vec{C}_g + \vec{U}) \cdot \nabla N + \frac{\partial C_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

در معادله ۱، \vec{C}_g سرعت گروه موج و \vec{U} جریان محدود پیرامونی است. کمیت‌های C_{σ} و C_{θ} سرعت‌های انتشار در فضای طیفی (σ و θ) هستند که فرکانس نسبی و θ جهت انتشار است. S_{tot} با معادله ۲ ارایه می‌شود:

$$S_{tot} = S_{wind} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{wc} + S_{bot} + S_{db} \quad (2)$$

پارامترهای سمت راست معادله ۲ به ترتیب ورود انرژی میدان باد، انتقال انرژی موج تحت برهمکنش سه‌گانه و چهارگانه، استهلاک انرژی ناشی از سفیدک راس موج، استهلاک انرژی در اثر اصطکاک کف و شکست موج را نشان می‌دهند.

۲. منطقه مورد مطالعه

دریای خزر در عرض جغرافیایی $36^{\circ}33'$ تا $47^{\circ}7'$ شمالی و طول جغرافیایی $45^{\circ}43'$ تا $52^{\circ}20'$ شرقی قرار دارد (بیدختی و شکرباغی، ۱۳۸۴). مدل‌سازی مشخصات امواج در دریاچه‌های ایران در پروژه "مدل‌سازی امواج دریاچه‌های ایران (ISWM)" انجام شده است. در فاز دوم این پروژه، داده‌های میدان باد ECMWF-Operational با بزرگنمایی مکانی ۰/۵ درجه و بزرگنمایی زمانی ۶ ساعت خریداری شده و علاوه بر مقایسه با داده‌های باد ثبت شده در ایستگاه‌های همدیدی، با داده‌های باد ماهواره QuikSCAT و اسنچی شده است (مظاهری و همکاران، ۱۳۹۲).

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. ایستگاه‌های اندازه‌گیری

به منظور دستیابی به الگوی امواج در بخش‌های مختلف خزر جنوبی، پراکنش ایستگاه‌های اندازه‌گیری موج به شکلی در نظر گرفته شده است که ۱ ایستگاه در شرق (ایستگاه نکا)، ۲ ایستگاه در مرکز (ایستگاه‌های نوشهر در ۲ عمق مختلف) و ۱

۳-۲. اجرای شبیه‌سازی‌ها

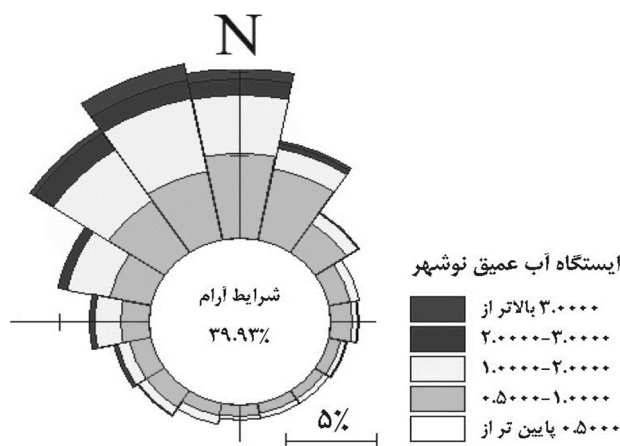
شبیه‌سازی مشخصات موج در دو بخش انجام شد. بخش اول با به‌کارگیری اطلاعات باد پایگاه ECMWF-ERA Interim (دقت مکانی ۰/۱۲۵ درجه و دقت زمانی ۳ ساعته) انجام گردید که با مقایسه نتایج آن با مقادیر اندازه‌گیری، مدل SWAN در بخش‌های مختلف دریای خزر جنوبی و اسنجی شد. در بخش دوم، مدل-سازی‌ها با به‌کارگیری داده‌های باد مورد استفاده در پروژه ISWM II انجام شد. سپس نتایج آن با نتایج مدل صحت‌سنجی شده در مرحله ۱ مقایسه گردید، تا از این طریق میزان تأثیر و اسنجی‌های صورت گرفته روی اطلاعات باد مشخص گردد. با توجه به پراکنش زمانی داده‌های اندازه‌گیری، چندین دوره زمانی کوتاه (به طول چند روز) به‌عنوان نماینده فصول مختلف انتخاب شد، تا مدل‌سازی‌ها در این دوره‌ها صورت گیرد. دوره‌های فوق در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. در انتخاب این دوره‌ها معیارهای مختلفی همچون وجود امواج مرتفع در جهات مختلف، مدنظر قرار گرفت.

۳-۲-۱. ساخت شبکه‌های ورودی

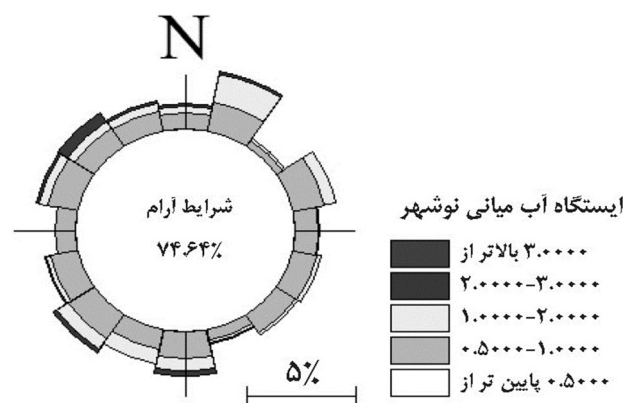
با توجه به این که دقت نتایج مدل به طور مستقیم به دقت شبکه‌های محاسباتی و ورودی‌هایی همچون عمق‌نگاری^۱ بستگی دارد، لذا از بین مراجع موجود، دقیق‌ترین اطلاعات عمق‌نگاری با دقت ۳۰ ثانیه از پایگاه Geodas انتخاب شد و سپس پردازش-هایی مانند اصلاح داده‌های عمق به سطح آزاد دریا و هموارسازی^۲ خط ساحلی با استفاده از کدهای نوشته شده در محیط ARCGIS 10.1 و به‌کارگیری زیربرنامه Mesh Generator از برنامه MIKE21 روی اطلاعات موجود صورت گرفت. در نهایت، شبکه عمق‌نگاری کل دریای خزر با ابعاد تقریبی هر سلول ۳۳۰۰×۳۳۰۰ مترمربع ساخته شد (شکل ۴). قابل ذکر است که ابعاد نهایی شبکه، پس از انجام حساسیت‌سنجی مدل نسبت به بزرگنمایی مکانی شبکه به‌دست آمده است.

محل قرارگیری ایستگاه‌ها در آب با عمق میانی و کم‌عمق (که در نخستین سلول‌های نزدیک ساحل شبکه کل دریای خزر قرار می‌گیرند)، سبب شده است که به منظور افزایش دقت، مدل-سازی‌ها با روش شبکه‌های تودرتو انجام شود. بدین منظور پس

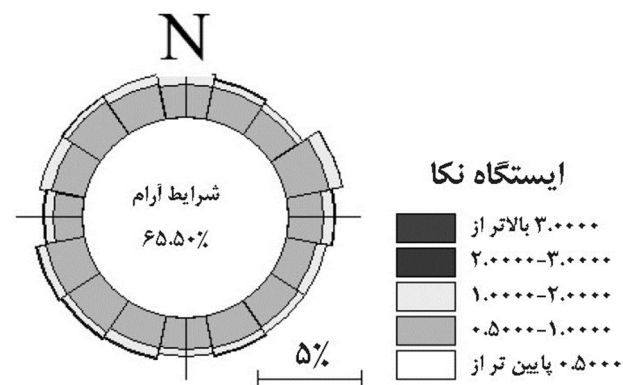
بلندترین موج ارتفاع بیش از ۳ متر دارد، چنین موجی در ایستگاه انزلی وجود ندارد (شکل ۲). برای ایستگاه‌های نوشهر (عمق ۶۱ متر) و نکا بیشترین فراوانی به امواج با ارتفاع کمتر از ۱ متر تعلق دارد که در همه جهات فراوانی وقوع یکسانی دارد (شکل‌های ۳ ب و ۳ ج).



شکل ۳ الف: گلموج اندازه‌گیری در محل ایستگاه نوشهر-آب عمیق



شکل ۳ ب: گلموج اندازه‌گیری در محل ایستگاه نوشهر-آب میانی

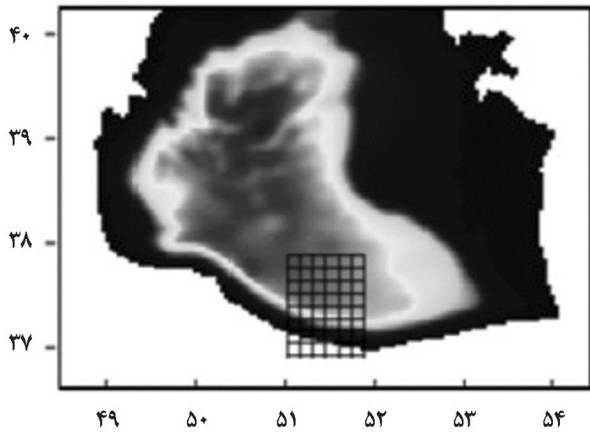


شکل ۳ ج: گلموج اندازه‌گیری در محل ایستگاه نکا

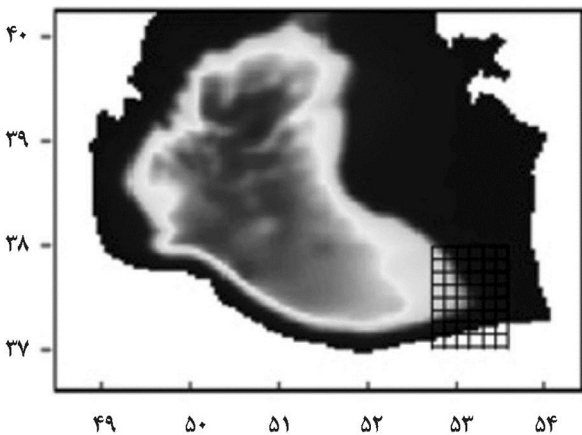
¹ Hydrography

² Smoothing

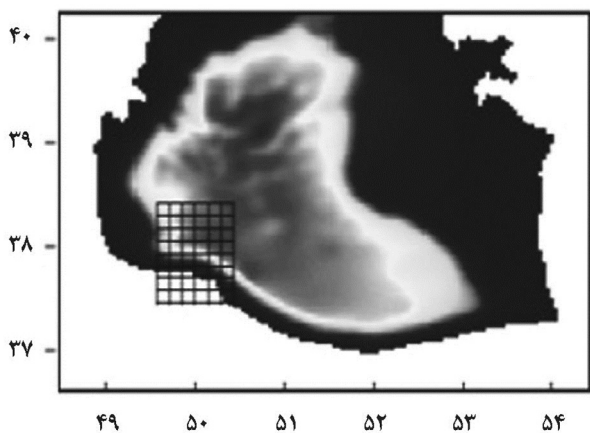
ECMWF- باد دوم، مرحله ساخت ۱۹۵×۳۴۵. در مرحله دوم، اطلاعات باد Reanalysis INIO با تعداد سلول ۲۵×۲۰، به‌کار برده شد.



شکل ۵ الف: شبکه تودرتو برای میانه خزر جنوبی

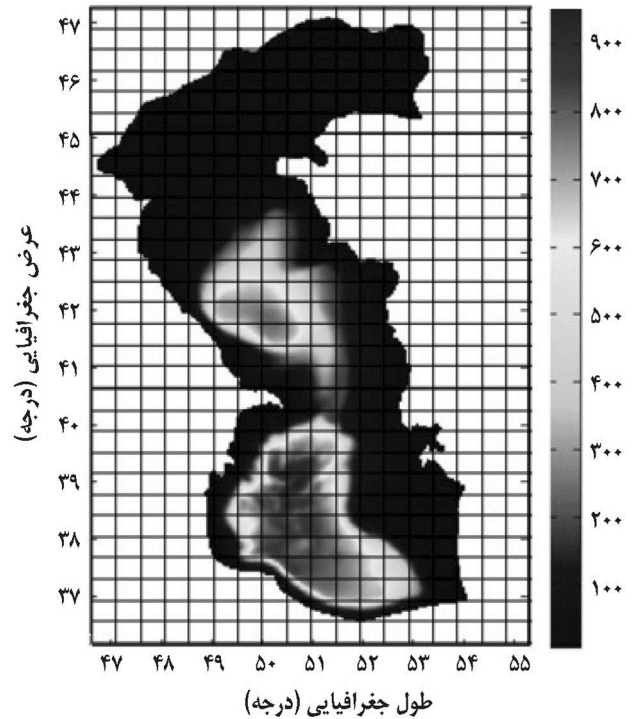


شکل ۵ ب: شبکه تودرتو برای شرق خزر جنوبی



شکل ۵ ج: شبکه تودرتو برای غرب خزر جنوبی

از ساخت شبکه کل دریای خزر به عنوان شبکه بزرگ^۱ (شکل ۴)، شبکه دیگر برای شرق، مرکز و غرب منطقه مورد مطالعه به عنوان شبکه‌های ریز^۲ (با ابعاد تقریبی ۷۸۵×۷۸۵ مترمربع) و با مقیاس ریزسنجی ۱/۵ ساخته شد.



شکل ۴: شبکه بزرگ به همراه اطلاعات عمق‌نگاری (متر) در کل دریای خزر

در این روش، حل معادلات در هر گام زمانی در شبکه بزرگ و یکی از شبکه‌های ریز صورت می‌گیرد. شبکه‌های ریز ساخته شده در مرکز، شرق و غرب خزر جنوبی به ترتیب در شکل‌های (۵ الف، ۵ ب و ۵ ج) آورده شده است. قابل ذکر است که ساخت شبکه محاسباتی و عمق‌سنجی با مختصات ساختاریافته مستطیلی^۳، و تهیه فایل ورودی اطلاعات عمق و باد، با استفاده از کدهای نوشته شده در برنامه Matlab انجام شده است.

۳-۲-۲. تهیه و ساخت میدان باد ورودی مدل

در قدم نخست اطلاعات باد پایگاه ECMWF-ERA Interim برای بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۰۵ از نسخه Forecast برداشت شد و پس از انجام پردازش‌های اولیه، شبکه میدان باد با ابعاد

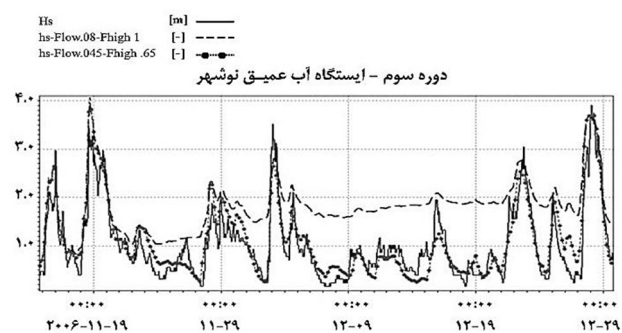
¹ Coarse grid

² Child grid

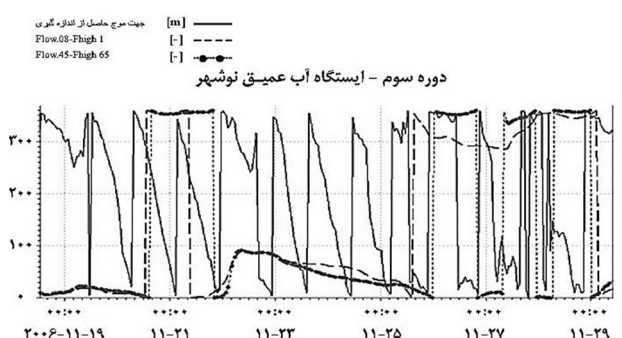
³ Structured rectangular coordinates

۳- فرکانس کمینه کوچکتر از ۰/۷ برابر کمترین فرکانس اوجی^۱ و فرکانس بیشینه ۳-۲/۵ برابر بزرگترین فرکانس اوجی^۲ باشد (Swanteam).

مقایسه نتایج مدل‌سازی و اندازه‌گیری ارتفاع، جهت و پرید موج در محل ایستگاه آب عمیق (نوشهر) به ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۸ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با تعیین مقدار ۰/۴۵ و ۰/۶۵ هرتز به عنوان فرکانس‌های کمینه و بیشینه، علاوه بر این‌که روند ارتفاع موج اندازه‌گیری به خوبی به دست می‌آید (همبستگی بیش از ۹۰٪، جدول ۱)، بهبود ۱ ثانیه‌ای پرید موج را نیز موجب می‌شود (شکل ۸). با توجه به شکل ۶ در زمان‌هایی که ارتفاع موج اندازه‌گیری کمتر از ۲ متر است، نتایج مدل با فرکانس کمینه و بیشینه ۰/۰۸ هرتز و ۱ هرتز، نسبت به ترکیب دیگر برای فرکانس موج، دست بالا بوده است و نتوانسته روند مقایره اندازه‌گیری را به خوبی نشان دهد (همبستگی ۷۰٪، جدول ۱). لذا در مراحل بعدی، فرکانس کمینه و بیشینه با مقادیر ۰/۴۵ هرتز و ۰/۶۵ هرتز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل ۷، بخش-بندی مختلف فرکانس، اثری روی جهت موج نداشته است.



شکل ۶: مقایسه ارتفاع موج اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده در دوره سوم- در محل آب عمیق (نوشهر)



شکل ۷: مقایسه جهت موج اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده در دوره سوم- در محل آب عمیق (نوشهر)

با انجام حساسیت‌سنجی‌ها، چنین به دست آمد که مدل نسبت به بزرگنمایی زمانی و مکانی، ضریب زبری بستر و روابط مختلف آن (Collins و Madsen)، ضریب سفیدک رأس موج و بخش-بندی فرکانسی امواج حساسیت دارد. پس از حساسیت‌سنجی نسبت به بزرگنمایی زمانی، گام زمانی ۱۵ دقیقه برای انجام مدل‌سازی‌ها انتخاب شد. در مرحله واسنجی، مقادیر مربوط به ضرایب فوق تغییر داده شد و نتایج با مقادیر اندازه‌گیری مقایسه گردید. به منظور تخمین میزان دقت مدل‌سازی‌ها از پارامترهای ضریب همبستگی (R)، جذر متوسط مربع خطاها ($RMSE$) و شاخص پراکندگی (SI) استفاده شد. این پارامترها مطابق روابط ۳، ۴ و ۵ محاسبه شدند (Zanaganeh et al., 2009):

$$R = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - x_i)^2} \quad (4)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100 \quad (5)$$

پس از دست‌یابی به مقدار نهایی برای هر ضریب، صحت-سنجی مدل برای دوره زمانی دلخواه در ایستگاه نوشهر (در محل آب با عمق میانی) انجام شد.

۴. نتایج

در این بخش، برخی نتایج حاصل از واسنجی مدل در محل هر ایستگاه اندازه‌گیری آورده شده است.

۴-۱. واسنجی نسبت به بخش‌بندی فرکانسی امواج

در این بخش با توجه به نکات زیر، فرکانس بیشینه و کمینه در مرحله اول، ۱ هرتز و ۰/۰۸ هرتز و در مرحله دوم ۰/۶۵ هرتز و ۰/۴۵ هرتز تعیین شد:

۱- فرکانس کمینه و فرکانس بیشینه باید در محدوده تغییر فرکانس امواج منطقه مورد مطالعه باشد (Swanteam).

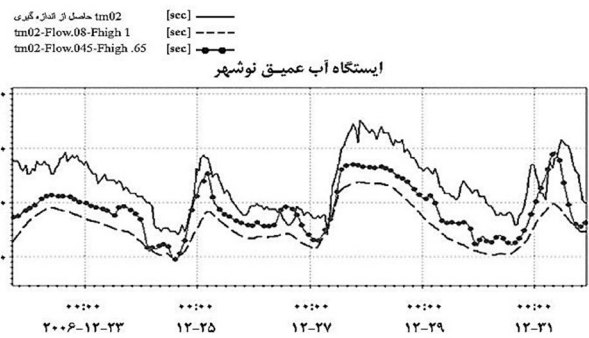
۲- فرکانس بیشینه به طور تقریبی برابر با ضریبی از توان‌های ۱/۱ از فرکانس کمینه باشد (Swanteam).

¹ Lowest peak frequency

² Highest peak frequency

مقایسه نتایج مدل‌ها در محل ایستگاه نوشهر (شکل ۹) نشان می‌دهد که در زمان‌های بیشینه ارتفاع موج اندازه‌گیری، به‌کارگیری مدل با میدان باد ECMWF-ERA Interim سبب افزایش دقت ارتفاع موج تا ۱ متر نسبت به مدل با میدان باد مورد استفاده در ISWM II شده است. اما در زمان‌هایی که ارتفاع موج اندازه‌گیری کمتر از ۲ متر است، نتایج مدل‌ها با به‌کارگیری دو میدان باد ذکر شده، اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند.

در ایستگاه نکا (شکل ۱۱) نیز نتایج مدل با استفاده از میدان باد ECMWF مقدار ارتفاع موج بیشینه را تا بیش از ۱ متر دقیق‌تر از مدل با میدان باد مورد استفاده در ISWM II پیش‌بینی کرده است. با این وجود، در سایر زمان‌هایی که ارتفاع موج کمتر از ۱/۵ است، نتایج مدل با میدان باد استفاده شده در ISWM II به مقادیر اندازه‌گیری نزدیک‌تر است. با توجه به شکل ۱۰، به‌کارگیری دو دسته میدان باد ECMWF-ERA Interim و میان باد ECMWF-Reanalysis INIO، اثر چندانی روی پرپود موج (و همچنین جهت موج) ندارند.



شکل ۸: مقایسه پرپود میانگین موج اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده در دوره سوم- در محل آب عمیق (نوشهر)

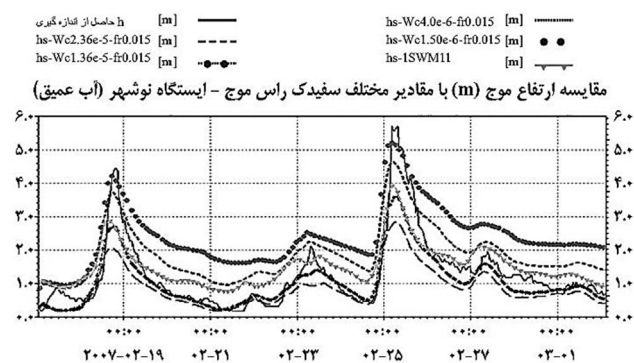
جدول ۱: مقادیر آماری مربوط به واسنجی نسبت به بخش‌بندی فرکانسی امواج- ایستگاه نوشهر (عمق ۲۳۸ متر)

پارامتر	متوسط اندازه‌گیری	متوسط مدل‌سازی		ضریب همبستگی		جزر متوسط مربع خطاها		شاخص پراکندگی	
		حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲
ارتفاع موج	۱/۰۰	۱/۶۶	۱/۱۱	٪۹۱	٪۷۶	۰/۸۲	۰/۳۳	۱	۲
پرپود موج	۴/۲۷	۲/۳۱	۳/۷۸	٪۸۷	٪۸۱	۲/۳۹	۱/۰۲	۵۵	۲۳

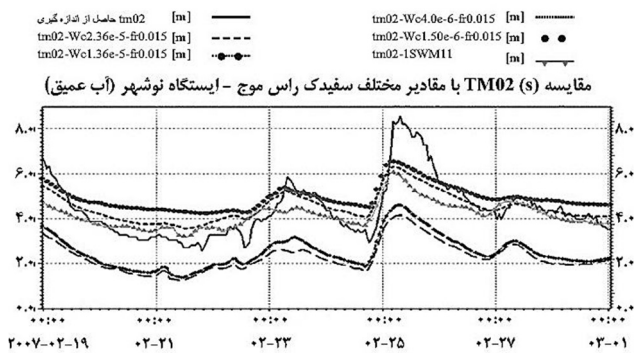
* حالت ۱: فرکانس بیشینه و کمینه به ترتیب ۱ هرتز و ۰/۰۸ هرتز
* حالت ۲: فرکانس بیشینه و کمینه به ترتیب ۰/۶۵ هرتز و ۰/۰۴۵ هرتز

۴-۲. واسنجی مدل نسبت به ضریب سفیدک رأس موج

این مرحله با تغییر ضریب فرآیند سفیدک رأس موج در مدل (پارامتر cds2) انجام شد. در این زمینه مقادیر مختلفی همچون $۲/۳۶ \times 10^{-5}$ (مقدار پیش‌فرض)، $۱/۳۶ \times 10^{-5}$ ، $۱/۱۶ \times 10^{-5}$ ، $۰/۹ \times 10^{-5}$ ، $۴/۰۰ \times 10^{-6}$ ، $۲/۰۰ \times 10^{-6}$ و $۱/۵۰ \times 10^{-6}$ برای این پارامتر در نظر گرفته شدند. بر اساس نتایج در محل آب عمیق (شکل‌های ۹ تا ۱۰)، کاهش ضریب سفیدک رأس موج سبب افزایش ارتفاع و پرپود موج می‌گردد، اما اثر چندانی روی جهت موج ندارد (حداکثر سبب تغییر ۲۰ درجه‌ای جهت موج می‌شود). که البته میزان تغییر ارتفاع موج بر اثر تغییر ضریب ذکر شده بیش از تغییر پرپود موج است. به عبارت دیگر تغییر سفیدک رأس موج بیش از این که روی پرپود موج اثر داشته باشد، بر ارتفاع موج اثر دارد. همچنین بررسی و مقایسه نتایج در محل آب عمیق و کم عمق (شکل‌های ۹ و ۱۱) نشان داد که سفیدک رأس موج بیشتر سبب استهلاك انرژی موج در محل آب عمیق می‌شود تا آب کم عمق. با بررسی نتایج به دست آمده، در نهایت مقدار $۴/۰۰ \times 10^{-6}$ که ضریب همبستگی بیش از ۹۰ درصد با مقادیر اندازه‌گیری شده ارتفاع موج را موجب می‌شود (جدول ۲) به عنوان مقدار مناسب برای cds2 تعیین می‌شود.



شکل ۹: مقایسه ارتفاع موج اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده در دوره چهارم- در محل آب عمیق (نوشهر)

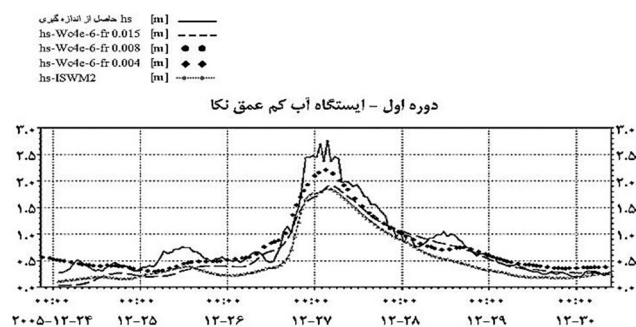


شکل ۱۰: مقایسه پرپود میانگین موج اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده در دوره چهارم- در محل آب عمیق (نوشهر)

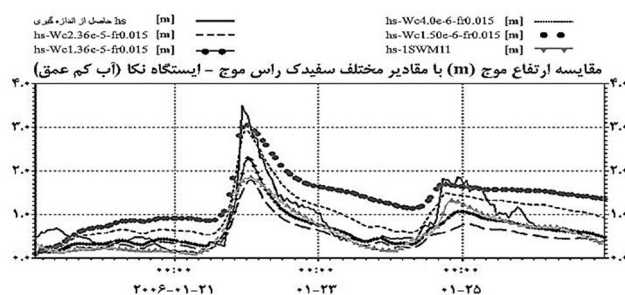
جدول ۲: مقادیر آماری مربوط به واسنجی نسبت به ضریب سفیدک رأس موج

ایستگاه	پارامتر	متوسط اندازه‌گیری	متوسط مقادیر مدل‌سازی		ضریب همبستگی		جذر متوسط مربع خطاها		شاخص پراکندگی
			ECMWF	ISWM II	ECMWF	ISWM II	ECMWF	ISWM II	
نوشهر	H_s	۱/۱	۰/۳۷	۰/۹۷	٪ ۹۲	٪ ۹۴	۰/۴۸	۰/۴۶	۴۱
نکا	Tm_{02}	۴/۲	۲/۷۳	۲/۳۶	٪ ۸۶	٪ ۸۸	۱/۹۷	۱/۶۰	۳۸
	H_s	۰/۸۲	۱/۰۱	۰/۶۰	٪ ۹۰	٪ ۹۴	۰/۳۵	۰/۳۶	۴۳

ولی افزایش آن به ۰/۰۱۵ سبب کاهش ۳۰ سانتی‌متری ارتفاع موج بیشینه شده است. در حالی که در انزلی، زبری اثری روی ارتفاع موج نداشته است (شکل ۱۴). در توضیح چرایی این مطلب باید گفت که: زمانی زبری بستر روی امواج اثرگذار است که موج بستر را احساس کند. با ورود موج به آب کم عمق، پدیده‌های مختلفی همچون ژرفاکاستگی روی آن اثر می‌گذارد. در زیر موج، حرکت اوربیتالی ذرات آب شکل می‌گیرد که در آب کم عمق این حرکات تا بستر امتداد دارد و قطر اوربیتال‌ها کاهش می‌یابد. از این رو زبری بستر روی موج اثر دارد. اما در آب عمیق که حرکت اوربیتالی ذرات آب به بستر نمی‌رسد، موج بستر را احساس نمی‌کند و زبری بستر روی نتایج اثر ندارد. بر اساس نتایج، کاهش ضریب زبری از ۰/۰۱۵ به ۰/۰۰۴، افزایش دقت نتایج پیروی موج تا ۲ ثانیه را موجب شد. در نهایت مقدار ۰/۰۰۸ برای ضریب فوق، نهایی شد. همچنین نتایج نشان داد که گرچه نتایج مدل با میدان باد ECMWF-Reanalysis INIO روند مقادیر اندازه‌گیری را در نکا به خوبی نشان می‌دهد (شکل ۱۳)، اما به طور متوسط نسبت به نتایج مدل با استفاده از میدان باد ECMWF-ERA Interim دست پایین بوده (۱ متر در ارتفاع موج و ۲ ثانیه برای پیروی موج) و جذر متوسط مربع خطای بیشتری دارد (جدول ۳). اما در انزلی ارتفاع موج مدل شده با میدان باد ECMWF-Reanalysis INIO روند مقادیر اندازه‌گیری را با بیشترین همبستگی و کمترین خطا نشان داد (جدول ۳).



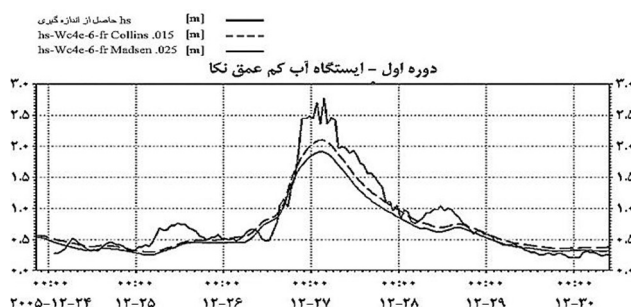
شکل ۱۳: مقایسه ارتفاع موج اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده برای ضریب زبری مختلف در دوره اول- نکا



شکل ۱۴: مقایسه ارتفاع موج اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده در دوره دوم- در محل آب کم عمق (نکا)

۳-۴. واسنجی نسبت به ضریب زبری

در ابتدا ارتفاع موج حاصل از مدل‌سازی با دو رابطه Collins و Madsen در محل آب کم عمق (ایستگاه نکا) با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، نتایج ارتفاع موج با دو رابطه فوق اختلاف چندانی ندارند. اما در زمان ارتفاع موج بیشینه، این اختلاف به ۱۵ سانتی‌متر می‌رسد که نتایج رابطه Collins دست بالا و نزدیک‌تر به مقادیر اندازه‌گیری شده است. با انتخاب رابطه Collins، مقادیر ۰/۰۱۵ (مقدار پیش فرض)، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۸ برای ضریب آن در نظر گرفته شد و نتایج در محل ایستگاه نکا و ایستگاه انزلی مقایسه شدند.



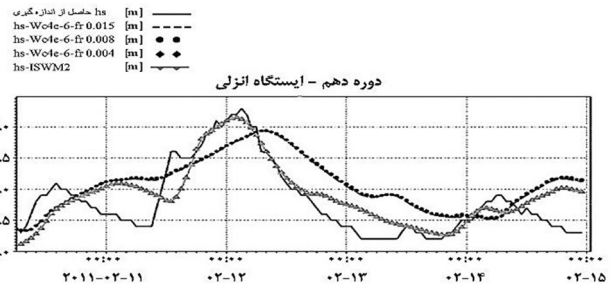
شکل ۱۲: مقایسه ارتفاع موج اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده برای فرمول‌بندی مختلف زبری در دوره اول- نکا

بررسی نتایج در نکا، نشان داد که تغییر ضریب زبری از ۰/۰۰۸ به ۰/۰۰۴ روی ارتفاع (شکل ۱۳) و پیروی موج اثر نداشته،

جدول ۳: مقادیر آماری مربوط به واسنجی نسبت به ضریب زبری

ایستگاه	پارامتر	متوسط اندازه-ه-گیری		متوسط مقادیر مدل‌سازی		ضریب همبستگی		جزر متوسط مربع خطاها		شاخص پراکندگی
		ECMWF	ISWM II	ECMWF	ISWM II	ECMWF	ISWM II	ECMWF	ISWM II	
نکا	H _s	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۶۸	۰/۵۰	% ۹۷	% ۹۷	۰/۱۸	۰/۳۰	۲۴
انزلی	Tm ₀₂	۴/۰۰	۲/۰۹	۳/۰۱	۲/۰۹	% ۸۷	% ۸۸	۱/۱	۱/۹۹	۲۷
انزلی	H _s	۰/۸۲	۰/۹۳	۱/۱۱	۰/۹۳	۰/۸۳	۰/۶۶	۰/۵۱	۰/۳۳	۶۲

سبب شده است که نتایج ارتفاع موج در زمان‌های ارتفاع موج بیشینه اندازه‌گیری شده، ۰/۵ تا ۱/۵ متر بیشتر و البته نزدیک‌تر به مقادیر اندازه‌گیری باشد. با این وجود، برای زمان‌هایی که ارتفاع موج اندازه‌گیری کمتر از ۱/۵ متر است، نتایج ارتفاع موج مدل-ساز شده با میدان باد مورد استفاده در ISWM II نسبت به میدان باد ECMWF-ERA Interim به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر است. با این وجود برای بخش غربی دریای خزر جنوبی نتایج ارتفاع موج با به‌کارگیری میدان باد مورد استفاده در ISWM II روند مقادیر اندازه‌گیری را بهتر نشان داد.

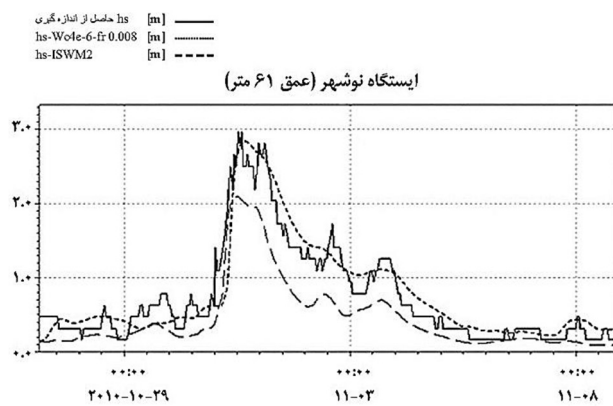


شکل ۱۴: مقایسه ارتفاع موج اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده برای ضریب زبری مختلف در دوره دهم - انزلی

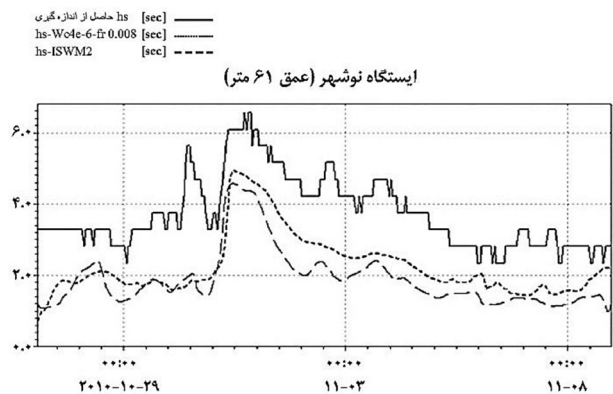
۵. بحث و نتیجه‌گیری

پس از تعیین مقادیر مناسب برای ابعاد شبکه، گام زمانی، بخش‌بندی فرکانسی امواج، ضریب زبری و سفیدک رأس موج، در نهایت صحت‌سنجی مدل برای دوره زمانی دلخواه در ایستگاه نوشهر (در محل آب با عمق میانی، عمق ۶۱/۵ متر) انجام شد. مقایسه ارتفاع و پریرود موج اندازه‌گیری شده و حاصل از مدل‌سازی، در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهد که نتایج مدل‌سازی به خوبی با روند مقادیر اندازه‌گیری تطابق دارد. مقادیر حاصله ارتفاع موج و پریرود موج به ترتیب، همبستگی ۹۴ و ۸۶ درصدی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند (جدول ۴). که علاوه بر آن، جذر متوسط خطای ارتفاع موج با مقدار ۱/۵۸ و شاخص پراکندگی ۴۲ درصدی حاکی از مناسب بودن تنظیمات مدل است.

با مقایسه نتایج مدل‌ها با به‌کارگیری میدان باد ECMWF-ERA Interim و میدان باد مورد استفاده در ISWM II چنین به دست آمد که با وجود اینکه داده‌های باد مورد استفاده در ISWM II در دریای خزر واسنجی شده‌اند، اما بالاتر بودن دقت مکانی میدان باد ECMWF-ERA Interim سبب بهبود نتایج (به‌خصوص ارتفاع موج) مدل برای بخش‌های شرقی و مرکزی دریای خزر جنوبی می‌گردد. به طوری که به‌کارگیری داده‌های باد ECMWF-ERA Interim نسبت به میدان باد مورد استفاده در ISWM II



شکل ۱۵: مقایسه ارتفاع موج اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده برای دوره زمانی مشخص شده - بویه نوشهر عمق ۶۱/۵ متر



شکل ۱۶: مقایسه پریرود موج اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده برای دوره زمانی مشخص شده - بویه نوشهر عمق ۶۱/۵ متر

جدول ۴: مقادیر آماری محاسبه شده بین مشخصه موج حاصل از اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده

ایستگاه	پارامتر	متوسط		ضریب همبستگی		مقدار مدل‌سازی		شاخص پراکندگی
		اندازه‌گیری	متوسط	ECMWF	ISWMI	ECMWF	ISWMI	
نوشهر	H_s	۰/۷۴	۰/۴۵	٪ ۹۴	٪ ۹۶	۰/۷۸	۰/۴۵	۳۱
	Tm_{02}	۳/۷	۱/۹۴	٪ ۸۴	٪ ۸۶	۲/۲۶	۱/۹۴	۴۲

۶. سپاسگزاری

Hasselmann, S.; Janssen, P.A.E.M., 1994. Dynamics and modeling of ocean waves. Cambridge University Press, UK, 556P.

Sverdrup, H.U.; Munk, W.H., 1947. Wind sea and swell: theory of relations for forecasting. Publication 601, U.S. Navy Hydrographic office, 60P.

Swan team. Swan user manual. Swan Cycle III version 40.91A. Delft university of Technology press. Netherlands, Delft. 165P.

Tolman, H.L., 1991. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. Journal of Physical Oceanography, 20: 782-797.

US Army., 1984. Shore Protection Manual. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station press. USA. 290P.

US Army., 2003. Coastal Engineering Manual. U.S. Army Corps of Engineers press, USA. 77P.

Zanaganeh, M.; Mousav, S.M.; EtemadShahidi, A.F., 2009. A hybrid genetic algorithm-adaptive network-based fuzzy inference system in prediction of wave parameters. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22: 1194-1202.

مولفین بر خود لازم می‌دانند که از سرکار خانم دکتر کامران‌زاد که با راهنمایی‌های ارزشمند خود ما را در نگارش این مقاله راهنمایی نمودند کمال تشکر و قدردانی را بنمایند. همچنین مولفین از پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی که برخی اطلاعات مورد نیاز در تحریر این مقاله را در اختیار آن‌ها قرار دادند، کمال تشکر را دارند.

منابع

بیدختی، ع.ا.؛ شکرباغی، اس.، ۱۳۸۴. نقش امواج درونی در ایجاد ساختار لایه‌ای در جریان‌های تبدلی شناوری بین دو حوضه دریایی بسته (حوضه‌های جنوبی و میانی خزر). مجله پژوهش فیزیک ایران، سال پنجم، شماره ۴، صفحات ۲۲۴-۲۱۳.

مظاهری، س.؛ حاج‌ولیی، ف.؛ کامران‌زاد، ب.، ۱۳۹۲. تهیه اطلس امواج خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر (ISWM II). پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، شماره ۰۱-۱۰۵-۳۹۲، ۷۴ صفحه.

Booij, N.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model Description and validation. Journal of Geophysical Research, 104: 7649-7666.

Komen, G.J.; Cavaleri, L.; Donelan, M.; Hasselmann, K.;