هم‌جوشی داده‌های موج در خلیج فارس با مدل طیفی ویوواچ۳

حمیدرضا معظمی[۱]، سید مصطفی سیادت‌موسوی[۲*]، سعید مظاهری[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد / دانشگاه علم و صنعت ایران؛ hamid.moazzami@gmail.com
[۲] استادیار/ دانشگاه علم و صنعت ایران؛ siadatmousavi@iust.ac.ir
[۲] استادیار/ موسسه‌ی ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی؛ Said.mazaheri@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

کلمات کلیدی:
هم جوشی
مدل نسل سوم موج
درون‌یابی بهینه
سار

چکیده

از جمله مشکلات مهم در مدل‌سازی پارامترهای مختلف هواشناسی و اقیانوس‌شناسی، محدودیت‌های موجود در روش‌های عددی و دانش ناقص بشر نسبت به فرآیندهای فیزیکی موثر در آن‌ها است که باعث می‌شود در بسیاری موارد، نتایج این مدل‌ها با مقادیر واقعی فاصله‌ی قابل توجهی داشته باشد. یکی از راه‌حل‌های موثر در این مواقع برای کاهش خطای پیش‌بینی در مدل‌ها، استفاده از هم‌جوشی است. در این مطالعه روش هم‌جوشی درون‌یابی بهینه که مبتنی بر اصول آماری است مورد استفاده قرار گرفته است. هم‌چنین از روش کانادایی سریع برای تخمین طول مقیاس‌شده‌ی همبستگی در بهینه‌سازی هم‌جوشی مورد استفاده در مدل استفاده شد. مقایسه‌ی نتایج اجرای مدل ویوواچ۳ با به کارگیری و بدون اعمال هم‌جوشی با داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی محیطی سار در خلیج فارس نشان داد که با اعمال هم‌جوشی در مدل، خطای محاسبه‌ی ارتفاع موج به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

Data Assimilation for Wave Data in Persian Gulf Using WAVEWATCH-III Spectral Model

Hamidreza Moazzami[1], Seyed Mostafa Siadatmousavi[2], Said Mazaheri [3]

[1] M.A Student, Iran University of Science and Technology; hamid.moazzami@gmail.com
[2] Assistant Professor, Iran University of Science and Technology; siadatmousavi@iust.ac.ir
[3] Assistant Professor, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science; Said.mazaheri@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 2 Feb. 2016
Accepted: 27 Nov. 2016

Keywords:
Data Assimilatio
WAVEWATCH-III
optimal interpolation
SAR

ABSTRACT

The major problems in modeling of different oceanographic and meteorological parameters are limitations in numerical methods and human incomplete knowledge in physical processes involved. As a result, significant differences between the results of these models and in situ observations of these parameters might exist. One of the powerful solutions for decreasing the forecast errors in the models is to use data assimilation technique. In this study the optimal interpolation data assimilation method is employed which is based on statistical rules. Moreover, the quick Canadian method is used to optimize the data assimilation method used in model. Model assessment is performed by comparison between running wave model with and without using data assimilation and SAR wave data in Persian Gulf. It shows that using data assimilation in WAVEWATCH-III model reduces the error in wave height predictions significantly.

۱ – مقدمه

امروزه یکی از مسائل مهم و حیاتی در علـوم، پـیش‌بینـی تغییـرات پارامترهای مختلف درگیر در یـک پدیـده‌ی فیزیکـی اسـت کـه در نهایت منجر به تبیین دقیق آن پدیده و تعیین چگونگی مواجهه بـا آن از جنبه‌های مختلف است. از جمله‌ی این پدیده‌ها مـی‌تـوان بـه فرآیندهای مختلف هواشناسی و اقیانوس‌شناسی اشاره کـرد کـه بـه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.6.3]

علت تنوع چشم‌گیر پارامترهای مختلف موثر در آن‌ها از پیچیدگی‌های زیادی برخوردارند. از این رو روش‌های عددی مختلف و مدل‌های فیزیکی مبتنی بر آنها ایجاد شدند تا بتوانند پیش‌بینی دقیقی از این پدیده‌ها داشته باشند. اما به دلیل نواقص موجود در روش‌های عددی و شناخت ضعیف فرآیندهای فیزیکی، در بسیاری از اوقات، نتایج این مدل‌ها با مقادیر واقعی، فاصله‌ی قابل توجهی دارد. یک از راه‌حل‌های موثر در این مواقع برای کاهش خطای پیش‌بینی در مدل‌ها، استفاده از هم‌جوشی است. هم‌جوشی فرآیندی مبتنی بر فرضیات و اصول آماری است که به ما کمک می‌کند تا با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی محیطی، خطای مدل‌های فیزیکی را کاهش داده و پیش‌بینی دقیق‌تری از پدیده‌های اقیانوس‌شناسی و هواشناسی ارائه شود. یکی از پدیده‌های مهم و چالش برانگیز در بحث اقیانوس شناسی، موج است. پیش‌بینی دقیق موج از اهمیت زیادی برخوردار است که از آن جمله می‌توان به افزایش امنیت در اجرای پروژه‌های دریایی و فراساحلی، به ویژه امکان تشخیص زمان مناسب برای نصب و راه‌اندازی سکو، طراحی بهینه‌ی سازه‌های دریایی، شناخت بهتر اقلیم و محیط و موارد دیگر اشاره کرد. به همین دلیل هم‌جوشی موج از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ولی هم‌جوشی داده‌های موج به دلیل عدم وجود داده‌های اندازه‌گیری کافی در آب‌های اطراف کشور ما، کمتر مورد توجه بوده است. با پیشرفت‌های اخیر در حوزه‌ی سنجش از راه دور و تولید انواع داده‌های راداری و ماهواره‌ای، و برداشت داده‌های اندازه‌گیری محیطی موج، بحث هم‌جوشی داده‌های موج مورد توجه محققان قرار گرفته است. دقت روش‌های عددی به مقدار زیادی وابسته به شرایط اولیه و شرایط مرزی آن‌ها است که این مساله در مورد موج نیز صادق است. تعیین شرایط اولیه و مرزی دقیق، کار پیچیده و چالش‌برانگیزی است. یکی از دانش‌هایی که در جهت حل این مساله گام‌های موثری برداشته، هم‌جوشی است. هم‌جوشی تلاش می‌کند تا با ترکیب موثر داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی محیطی با مدل‌های عددی، تخمین مناسبی از حالت سیستم به دست دهد که نتیجه‌ی آن به مقدار قابل توجهی بهتر از اجرای مدل بدون هم‌جوشی خواهد بود. هم‌جوشی به طور گسترده در هواشناسی استفاده شده و به صورت فزاینده‌ای در اقیانوس‌شناسی در حال استفاده است. علاوه بر این، اکثر کارهای گذشته در حوزه‌ی هم‌جوشی داده‌های موج، با مدل‌های وم و سوان انجام شده و تحقیقات در مورد استفاده از هم‌جوشی با مدل ویوواچ۳ انگشت‌شمار است. با توجه به ویژگی‌های خاص این مدل مخصوصاً بهینه‌بودن روش عددی آن برای آب عمیق، در این تحقیق سعی بر این است تا با ترکیب موثر هم‌جوشی، مدل برای پیش‌بینی موج اصلاح شود.

۲ – تعریف هم‌جوشی

تکنیک هم‌جوشی، روشی است که خطای مدل‌های هواشناسی و اقیانوس‌شناسی را با اصول آماری، و به وسیله‌ی داده‌های مشاهداتی کاهش می‌دهد، و سبب بهینه شدن آن‌ها می‌شود و مانع تجمیع خطا در زمان می‌شود. روش‌های هم‌جوشی داده‌ها به دو نوع کلی تغییراتی و ترتیبی تقسیم می‌شوند.

انواع مختلف روش‌های هم‌جوشی عبارت‌اند از درون‌یابی بهینه[۱]، فیلترکالمن[۲]، و اصلاح‌شده‌های فیلتر کالمن مثل فیلترکالمن توسعه‌داده‌شده، فیلترکالمن مجموعه‌ای[۳و۴]و ...

روش هم‌جوشی مورد استفاده در این مطالعه، درون‌یابی بهینه است. رابطه(۱)، رابطه‌ی اصلی روش‌های هم‌جوشی ترتیبی است که در درون‌یابی بهینه نیز استفاده می‌شود.

$$\boldsymbol{x}^a = \boldsymbol{x}^f + \boldsymbol{W}(\boldsymbol{y} - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^f) \quad (۱)$$

در این رابطه $\boldsymbol{x}^f$ بردار خروجی‌های مدل قبل از هم‌جوشی، $\boldsymbol{y}$ بردار مشاهدات، $\boldsymbol{H}$ ماتریس درون‌یابی است که خروجی‌های مدل در روی نقاط شبکه را به روی نقاط مشاهداتی درون‌یابی می‌کند. $\boldsymbol{W}$ ماتریس وزن است و $\boldsymbol{x}^a$ بردار خروجی‌های مدل بعد از اعمال هم‌جوشی است. در واقع مقادیر بردار $\boldsymbol{x}^f$ بعد از بهبود یافتن و کاهش خطا به مقادیر بردار $\boldsymbol{x}^a$ در فرآیند هم‌جوشی تبدیل می‌شوند.

ماتریس وزن $\boldsymbol{W}$ وابسته به خطاهای پارامترهای مختلف است و با رابطه‌ی (۲) تعیین می‌شود[۵].

$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{C}^f \boldsymbol{H}^T (\boldsymbol{H}\boldsymbol{C}^f \boldsymbol{H}^T + \boldsymbol{C}^o)^{-1} \quad (۲)$$

در این رابطه $\boldsymbol{C}^f$ ماتریس کواریانس خطای مدل قبل از هم‌جوشی و $\boldsymbol{C}^o$ ماتریس کواریانس خطای مشاهدات است.

هم‌جوشی موج به دو طریق کلی انجام می‌شود. راه اول این است که این روش، بر روی طیف یک بعدی یا دو بعدی انجام شود و راه دوم اعمال روش‌های هم‌جوشی برای پارامترهای میانگین، مثل ارتفاع موج مشخصه، دوره‌ی تناوب موج، سرعت باد و جهت باد است. مشکل حالت اول (انجام هم‌جوشی طیفی موج) این است که نیاز به داده‌های کامل اندازه‌گیری شده‌ی انرژی موج در فرکانس‌های مختلف برای هم‌جوشی طیف یک بعدی و داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی انرژی موج در فرکانس‌ها و جهت‌های مختلف برای هم‌جوشی طیف دو بعدی دارد. این داده‌ها باید در مکان‌ها و زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شده باشند تا بتوان هم‌جوشی مکانی و زمانی مناسبی در کل میدان موج انجام داد. در اکثر مناطق دنیا چنین داده‌های اندازه‌گیری شده‌ای بسیار محدودند. نکته‌ی دیگر در انجام این نوع هم‌جوشی، پیچیده بودن تعیین کواریانس بین این مولفه‌های مختلف طیفی در یک نقطه و هم‌چنین بین مولفه‌های

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.6.3]

طیفی نقاط مختلف است (تعیین مولفه‌های ماتریس C^f) و همین‌طور این حجم داده، باعث افزایش قابل توجه حجم محاسبات می‌شود. از این رو، در اکثر کارهای هم‌جوشی موج، از رویکرد دوم استفاده می‌شود و پارامترهای میانگین برای هم‌جوشی استفاده می‌شوند.

۴- هم‌جوشی در موج

در حالی که همیشه تلاش‌های مختلف برای بهبود مدل‌های موج با اعمال روش‌های مختلف وجود داشته اما استفاده از هم‌جوشی در کاهش خطای مدل‌سازی موج، سال‌ها به تاخیر افتاد که دلیل آن کمبود داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی محیطی با کیفیت بوده است. تنها استثنا در این زمینه، دریای شمال بوده که اولین کارهای هم‌جوشی موج نیز در این منطقه انجام شده است [۶]. اطلاعات موج تنها در بویه‌ها و سکوهای محدودی وجود داشته که توزیع آن‌ها نیز مناسب نبوده، و معمولاً محدود به مناطق نزدیک به ساحل بوده است. تنها اطلاعاتی که نسبتاً به صورت گسترده در دسترس قرار داشته، اندازه‌گیری‌های چشمی موج بوده که آن‌ها نیز از دقت پایینی برخوردار بوده است. اما با راه‌اندازی ماهواره‌های اقیانوس‌شناسی و هواشناسی و انواع رادارها، حجم گسترده‌ای از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی هواشناسی و اقیانوس‌شناسی به دست آمد که در نتیجه‌ی آن، افق‌های جدیدی در تاثیر موثر هم‌جوشی در بهبود مدل‌های موج ایجاد شد.

لیونلو و همکاران از روش هم‌جوشی ترتیبی به این شکل استفاده کردند که ابتدا ارتفاعات موج به دست آمده از مدل، با کمک داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی رادار به کمک مدل وم بهبود یافت و سپس با کمک این نتایج بهبود یافته، طیف موج نیز به نسبت فرض اولیه‌ای که برای آن شده اصلاح گردید[۷]. هولتهایزن و همکاران از داده‌های مشاهداتی رادار ارتفاع‌سنج و دو بویه استفاده و هم‌جوشی را برای دو طوفان پی در پی در دریای نروژ بررسی کردند. این مطالعه، تاثیر روش هم‌جوشی تغییراتی مشاهدات در مدل موج را در بویه‌های مورد اشاره بررسی کرده است و در نتیجه باعث کاهش خطای ارتفاع موج از ۲۵ درصد به ۱۲ درصد شده است [۸]. هاسلمان و همکاران با استفاده از تجزیه‌ی طیف به سیستم‌های اصلی آن و اعمال روش هم‌جوشی درون‌یابی بهینه، میدان موج و در نهایت میدان باد را با کمک موج اصلاح شده بهبود بخشیدند. برای محاسبه‌ی ماتریس کواریانس خطای مدل و در نهایت ماتریس وزن از یک رابطه‌ی نمایی استفاده شد، که این رابطه، وابسته به شعاع تاثیر از محل قرارگیری دستگاه مشاهداتی است [۹]. ووریپس و همکاران نیز از طیف موج تجزیه شده استفاده کردند. آن‌ها طیف انرژی موج را به دو طیف که یکی حرکت پیچ و دیگری حرکت رول را در بویه ایجاد می‌کنند، تجزیه کرده و با استفاده از روش هم‌جوشی درون‌یابی بهینه، مقادیر بهینه‌ی مشخصات هر مولفه‌ی طیفی تجزیه شده را، که شامل انرژی، فرکانس میانگین و جهت هست، بعد از هم‌جوشی به دست آوردند[۱۰]. سیدونز و همکاران با استفاده از سه روش هم‌جوشی فیلتر کالمن مجموعه‌ای، درون‌یابی بهینه‌ی مجموعه‌ای و تغییراتی سه بعدی، داده‌های رادار با فرکانس بالا را در مدل سوان هم‌جوشی کردند. نتایج نشان داد که روش‌های تغییراتی سه بعدی و درون‌یابی بهینه‌ی مجموعه‌ای، بهبود مناسبی در میدان موج ایجاد کردند اما فیلتر کالمن مجموعه‌ای فقط در یکی از آنالیزها نتایج مناسب داشته است و در نتیجه، محاسبه‌ی خطا با این روش در این مورد مطالعاتی، نیازمند تحلیل دوباره است [۱۱]. ساناسیراج و گلدستین روش درون‌یابی بهینه را در مدل وم و برای آب‌های هند به کار بردند. بهره‌وری هم‌جوشی داده‌های اندازه‌گیری بویه در این منطقه بررسی شد. نتایج نشان داد که جذر میانگین مربعات خطا در بویه‌های مقایسه ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش داشته است [۱۲]. واترز و همکاران داده‌های رادار با فرکانس بالا را در مدل ویوواچ۳ با روش درون‌یابی بهینه، برای منطقه‌ای کوچک مقیاس، هم‌جوشی کردند. در این مطالعه، شرایط ویژه و مشکلاتی که برای هم‌جوشی در مناطق کوچک‌مقیاس و ساحلی وجود دارد بررسی شده است. هم‌جوشی برای دوحالت ۱) ارتفاع و دوره‌ی تناوب موج ۲) طیف موج تجزیه شده انجام شده است. نتیجه‌ی هم‌جوشی برای ارتفاع موج، مناسب اما برای دوره‌ی تناوب، در بسیاری موارد نامناسب بود [۱۳]. کوربلا و همکاران تلاش داشتند تا با یافتن رابطه‌ی بین الگوهای گردشی هواشناسی و موج و همچنین استفاده از هم‌جوشی، مدل‌سازی امواج در شرایط طوفانی و حدی را برای کاربردهای مهندسی بهبود ببخشند. ارتباط برقرار کردن بین مشخصه‌های طیفی موج و الگوهای گردشی هواشناسی، نیازمند تخمین منشا ایجاد امواج است. منشأ ایجاد امواج دورا، الگوهای گردشی هواشناسی بزرگ‌مقیاس هستند محققان در این مقاله، امواج دورا که در فواصل دور از ساحل در فراساحل به توسعه‌یافتگی کامل رسیده‌اند، مدنظر قرار دادند[۱۴].

۵-مدل‌سازی با مدل ویوواچ۳

مدل طیفی-عددی ویوواچ۳ از مدل‌های نسل سوم است که برای مدل‌سازی امواج در محدوده‌های بزرگ‌مقیاس و کوچک‌مقیاس مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل بر مبنای مدل وم [۱۵] در بخش تحلیل و مدل‌سازی دریایی مرکز مدل‌سازی محیطی مراکز ملی پیش‌بینی محیطی آمریکا توسعه یافته است [۱۶]. ویوواچ۳ برای مطالعات آب عمیق طراحی شده؛ گرچه در نسخه‌های اخیر مثل ۴,۱۸ قابلیت‌هایی برای در نظر گرفتن اثرات کم‌عمقی بر موج و فیزیک ناحیه‌ی شکست در نظر گرفته شده است. کدهای این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.6.3]

مدل بر اساس زبان برنامه‌نویسی فرترن۹۰ است. یکی از قابلیت‌های اصلی این مدل، کد باز بودن آن است. در این مطالعه، با استفاده از همین قابلیت، روش هم‌جوشی در مدل وارد شد.

در مدل ویوواچ۳، روش‌ها یا بسته‌های مختلفی برای محاسبه‌ی جملات چشمه و چاه وجود دارد. تفاوت این روش‌ها در مبنای فیزیکی، روابط مورد استفاده، و ضرایب متفاوتی است که در مجموعه‌ی مولفه‌ها به کار رفته است. از جمله روش‌هایی که در نسخه‌ی ۴,۱۸ وجود دارد می‌توان به ترم‌های رشد موج و زوال سفیدک تولمن و کالیگوف [۱۷]، وم۳، وم۴، آردهوین و همکاران[۱۸] و بی‌وای‌دی‌آر زد اشاره کرد [۱۹-۲۱].

حوزه‌ی جغرافیایی مورد مطالعه، خلیج فارس است که محدوده‌ی قرارگیری آن، طول جغرافیایی ۴۸ تا ۵۷ درجه و عرض جغرافیایی ۲۴ تا ۳۰ درجه است. این دریا دارای میانگین عمق ۳۵ متر است که در عمیق‌ترین نقطه به ۱۰۷ متر نیز می‌رسد [۲۲-۲۴]. در این مطالعه، خلیج فارس به همراه بخشی از دریای عمان (برای در نظر گرفتن اثرات اقیانوسی بر روی خلیج فارس) در مدل‌سازی وارد شده‌اند. مدل‌سازی برای ماه‌های ژانویه و فوریه‌ی سال ۲۰۱۳ انجام و از داده‌های عمق‌سنجی جبکو [۲۵] با دقت ۳۰ ثانیه استفاده شد. داده‌های باد مورد استفاده در این مطالعه، متعلق به مرکز اروپایی پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی با دقت ۰/۱۲۵x۰/۱۲۵ درجه است. ورودی موج در محل مرز باز محدوده‌ی مدل‌سازی نیز با اجرای مدل برای کل کره‌ی زمین و محاسبه‌ی خروجی طیف دو بعدی در محل مرز باز تعیین شده، به دست می‌آید. تفکیک مکانی اجرای این مدل، ۱/۲۵x۱ درجه بود. داده‌های میدان باد مورد استفاده در آن از روش هم‌جوشی جهانی و مدل پیش‌بینی چرخه‌ی هوایی[۲۶-۲۹] به دست آمده که با بازه‌ی زمانی سه ساعته در دسترس هستند. حساسیت‌سنجی‌ها نشان داد خروجی موج در داخل خلیج فارس به اطلاعات مرز باز حساس نیست که علت آن، تنگ شدگی و تغییر زاویه‌ی حوزه در محل تنگه‌ی هرمز است. شکل۱ محدوده‌ی مدل‌سازی و محل اعمال مرز باز را نشان می‌دهد.

شکل۱- محدوده‌ی مدل‌سازی و محل اعمال مرز باز

۶- روش هم‌جوشی مورد استفاده

روش هم‌جوشی مورد استفاده در این مطالعه، درون‌یابی بهینه است که مبنای آن رابطه(۱) است. همان‌طور که ذکر شد برای محاسبه‌ی ماتریس وزن در این رابطه از رابطه‌ی (۲) استفاده می‌شود. چالش اصلی در هم‌جوشی تعیین مقادیر این ماتریس است. روش‌های مختلفی برای تعیین آن استفاده شده است. در این مطالعه، از رابطه‌ی (۳) برای تعیین مقادیر ماتریس وزن استفاده شد.

$$\mathrm{P(i,j)} = \frac{V^f}{V^f+V^o}\left(1+\frac{r_{ij}}{L}\right)\exp\left(\frac{-r_{ij}}{L}\right) \qquad (۳)$$

در این رابطه $\mathrm{P(i,j)}$ کواریانس بین نقاط i , j است. L معرف طول مقیاس‌شده‌ی همبستگی، V^f واریانس خطای مدل قبل از هم‌جوشی، V^o واریانس خطای داده‌ی اندازه‌گیری شده‌ی مورد استفاده در فرآیند هم‌جوشی و r_{ij} فاصله‌ی بین نقاط i , j است. داده‌ی اندازه‌گیری‌شده‌ی مورد استفاده برای اعمال هم‌جوشی در مدل، داده‌های ای‌دی‌سی‌پی در نزدیکی سکوی فرزاد-الف است که در در طول جغرافیایی ۵۰/۰۵ و عرض جغرافیایی ۲۸/۱۲۸ قرار دارد. خطای ای‌دی‌سی‌پی صفر فرض می‌شود در نتیجه V^o برابر صفر است و کسر پشت عبارت برابر یک می‌شود. در رابطه‌ی (۳) به جای i نقطه‌ی مشاهداتی (ای‌دی‌سی‌پی) و به جای j تمام نقاط شبکه‌ی محاسباتی مدل عددی قرار داده می‌شود. به این طریق، مقدار وزنی که هر یک از نقاط محیط از مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی ای‌دی‌سی‌پی، در طول فرآیند هم‌جوشی می‌برند با توجه به فاصله‌ی نقطه از نقطه‌ی مشاهداتی تعیین می‌شود.

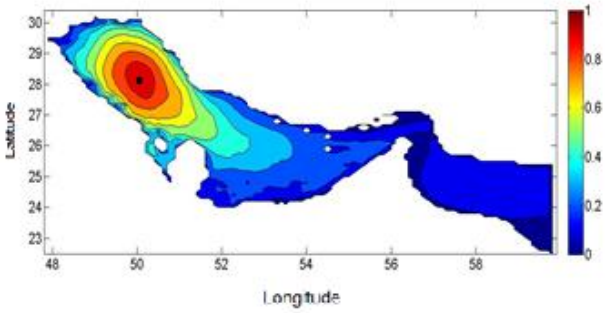
نکته‌ی دیگر در رابطه(۳) تعیین طول L است. تعیین طول بهینه‌ی L نقش عمده‌ای در عملکرد هم‌جوشی و بهبود بهتر میدان موج دارد. هاسلمان و همکاران[۱۰] این طول را به صورت تجربی ۱۰۰۰ کیلومتر در نظر گرفتند. در این مطالعه، روش دیگری برای تعیین طول بهینه‌ی L استفاده شد. در این روش که کواریانس کانادایی سریع[۳۰] نام دارد، با استفاده از خروجی‌های مدل، قبل از هم‌جوشی، مقادیری برای ماتریس وزن تعیین می‌شود که به کمک آن‌ها شکل تابع تعیین‌کننده‌ی مقادیر ماتریس وزن تعیین می‌شود. با تطبیق رابطه‌ی (۳) برای طول‌های مختلف L با نتایج به دست آمده از این روش، طول بهینه‌ی L که بیش‌ترین تطبیق را با مقادیر روش کانادایی سریع داشته باشد برای استفاده در رابطه‌ی (۳) استفاده شد و هم‌جوشی برای این طول انجام شد. روش کانادایی سریع که برای خروجی‌های ارتفاع موج مدل استفاده می‌شود به شکل زیر است که ابتدا ماتریس زیر با رابطه‌ی(۴) تعیین می‌شود:

$$B_{i,j} = E\Big([(Hs_{t+1}-Hs_t)-E(Hs_{t+1}-Hs_t)]_i[(Hs_{t+1}-Hs_t)-E(Hs_{t+1}-Hs_t)]_j\Big) \qquad (۴)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-06]

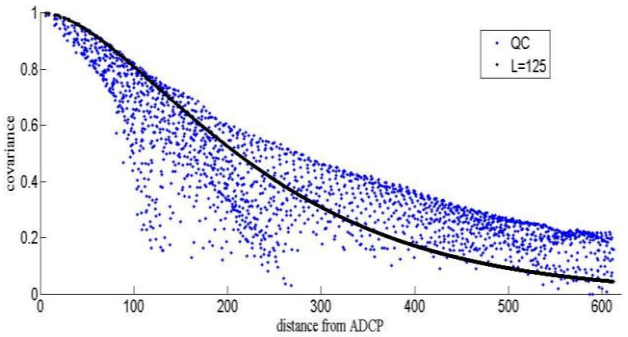
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.6.3]

در این رابطه، Hs_t ارتفاع موج در ساعت t است. برای محاسبه‌ی طول بهینه‌ی L ابتدا با استفاده از رابطه‌ی (۴) کواریانس بین نقطه‌ی اندازه‌گیری و نقاط دیگر محیط تعیین می‌شود. در این رابطه، در کروشه‌ی i خروجی‌های مدل در نقطه‌ی ای‌دی‌سی‌پی و در کروشه‌ی j خروجی‌های مدل در نقاط مختلف محیط قرار داده می‌شود. برای جلوگیری از تاثیر احتمالی بد، درایه‌های منفی ماتریس B مساوی صفر قرار داده شد. در واقع، همبستگی این نقاط با نقطه‌ی مشاهداتی، صفر فرض می‌شود. شکل۲، کواریانس نسبی نقاط محیط نسبت به ای‌دی‌سی‌پی را که با روش QC محاسبه شده‌اند نشان می‌دهد. نقطه‌ی سیاه، محل قرارگیری ای‌دی‌سی‌پی است. همان‌طور که در شکل مشخص است، هر چه فاصله از محل ای‌دی‌سی‌پی زیادتر شود، مقادیر هم‌بستگی مقدار ارتفاع موج با ارتفاع موج در مکان ای‌دی‌سی‌پی کم‌تر می‌شود.



شکل۲- کواریانس نسبی محاسبه‌شده در نقاط مختلف محیط نسبت به ای‌دی‌سی‌پی

در مرحله‌ی دوم، کواریانس بین نقطه‌ی مشاهداتی و نقاط مختلف محیط با استفاده از رابطه‌ی (۳) تعیین می‌شود. در این رابطه، مقادیر مختلف L مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقداری از L که کمترین خطا را بین مقادیر به دست آمده با دو رابطه‌ی (۳) و (۴) ایجاد کند، طول بهینه‌ی L است. جدول (۱) طول‌های L مختلف مورد استفاده در رابطه‌ی (۳) و مقادیر خطای آن‌ها را نسبت به مقادیر QC که از رابطه‌ی (۴) به دست می‌آیند نشان می‌دهد. با توجه به جدول، طول بهینه L برابر ۱۲۵ کیلومتر به دست آمد. در نهایت، این مقدار مبنای محاسبه‌ی مقادیر کواریانس خطا که با رابطه‌ی (۳) به دست می‌آیند شد. در شکل ۳ نمودار کواریانس‌های به دست آمده با روش QC و همین طور کواریانس‌های به دست آمده با رابطه‌ی (۳) با استفاده از طول L برابر ۱۲۵ کیلومتر رسم شده‌اند.



شکل۳- مقایسه کواریانس‌های به‌دست‌آمده با روش QC و رابطه‌ی (۳) با طول L برابر ۱۲۵ کیلومتر

در شکل۳ نقاط آبی رنگ، مقادیر به‌دست‌آمده از روش QC و خط مشکی رنگ، مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه‌ی(۳) با طول L برابر ۱۲۵ کیلومتر است. در شکل۳ در مبدا بیشترین مقدار کواریانس مشاهده می‌شود، که نشان از هم‌بستگی در نقطه‌ی ای‌دی‌سی‌پی با خودش است. هر چه فاصله از این نقطه بیشتر می‌شود مقدار کواریانس نقاط نسبت به نقطه‌ی مشاهداتی ای‌دی‌سی‌پی کاهش می‌یابد.

نکته‌ی مهم دیگر که در هم‌جوشی امواج باید در نظر گرفته شود تاثیر کاهش عمق و اثرات بستر بر میدان موج است که بر عملکرد هم‌جوشی تاثیر منفی می‌گذارد. این مساله زمانی مهم‌تر می‌شود که با مطالعات کوچک‌مقیاس و نزدیک به ساحل مواجه هستیم. پیچیدگی‌های آب کم‌عمق و اثری که کاهش عمق بر میدان موج دارد باعث می‌شود که نقاط کم‌عمق، همبستگی بسیار ناچیزی با نقاط موجود در آب عمیق داشته باشند. لذا با توجه به اینکه نقطه‌ی مشاهداتی در این پروژه، که ای‌دی‌سی‌پی است، در آب عمیق قرار دارد، فرض شد که همبستگی بین نقاط آب کم‌عمق و این نقطه، به‌وسیله‌ی یک تابع نمایی که در رابطه‌ی(۵) نشان داده شده، کاهش می‌یابد[۱۳]. با توجه به شرایط خلیج فارس، عمق ۳۰ متر برای جایی که تاثیر بستر حس می‌شود در نظر گرفته شد و برای اعماق زیر آن، با کمک تابع نمایی در رابطه‌ی (۵) تاثیر هم‌جوشی کاهش می‌یابد.

$$P_2(i,j) = \begin{cases} 1 & d_j > 30\ m \\ \exp\left[-\left(\left[30-\frac{d_j}{13}\right]\right)^4\right] & d_j < 30\ m \end{cases} \quad (۵)$$

اگر خروجی رابطه‌ی (۳) را $P_1(i\ ,\ j)$ و خروجی رابطه‌ی (۵) را $P_2(i\ ,\ j)$ بنامیم، آن‌گاه ماتریس وزن نهایی با رابطه‌ی (۶) تعیین می‌شود.

$$P(i,j) = P_1(i,j) \times P_2(i,j) \quad (۶)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.6.3]

جدول۱- مقادیر مختلف طول L استفاده شده وخطاهای متناظر

L (km)	۵۰۰	۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۲۵	۱۰۰	۸۰	۵۰
RMSE (m)	۰/۴۸۰۷	۰/۴۲۹۱	۰/۳۹۳۷	۰/۳۴۹۵	۰/۲۹۴۵	۰/۲۲۹۰	۰/۱۶۴۹	۰/۱۴۹۱	۰/۱۶۱۵	۰/۱۹۶۹	۰/۲۹۲۳

اگر عمق نقطه، بزرگتر از ۳۰ متر باشد مقدار P_2 برابر با ۱ می‌شود و در واقع اثر عمق در این حالت وجود ندارد، و اگر عمق نقطه کمتر از ۳۰ متر باشد، با توجه به مقدار عمق، P_2 عددی کوچکتر از ۱ می‌شود و با توجه به رابطه‌ی (۶) مقدار همبستگی بین نقطه مورد نظر و نقطه مشاهداتی را کاهش می‌دهد که نتیجه آن، کاهش وزن آن نقطه در تاثیرپذیری از نقطه‌ی مشاهداتی در فرآیند هم‌جوشی است. هر چه مقدار عمق نقطه کمتر باشد، P_2 مقداری کوچک‌تر و اثر همجوشی در نقطه‌ی مورد نظر کمتر می‌شود.

در این مطالعه، هم‌جوشی برای ارتفاع موج مشخصه انجام شد. اما چون مدل‌های موج از جمله ویوواچ۳ مدل‌های طیفی هستند، برای اثرگذاری هم‌جوشی در میدان موج و انتقال اثرات بهبود یافته از یک زمان به زمان بعد، اثر اصلاح ارتفاع موج، در هرگام زمانی به طیف انرژی موج منتقل شد. طیف انرژی با توان دوم ارتفاع موج رابطه دارد. به همین دلیل از رابطه‌ی (۷) برای انتقال اثر ارتفاعات موج بهبود یافته به طیف انرژی استفاده شد.

$$\frac{F^a(k,\theta)}{F^f(k,\theta)} = \left(\frac{Hs^a}{Hs^f}\right)^2 \qquad (۷)$$

در این رابطه Hs^f ارتفاع موج قبل از هم‌جوشی و Hs^a ارتفاع موج بهبود یافته بعد از اعمال هم‌جوشی بر روی پارامتر ارتفاع موج در نقطه‌ی مورد نظر جغرافیایی است. با کمک این رابطه، طیف انرژی موج قبل از هم‌جوشی $F^f(f,\theta)$ به طیف انرژی موج بهبود یافته‌ی بعد از هم‌جوشی $F^a(f,\theta)$ تبدیل می‌شود. اما در مدل ویوواچ۳ رابطه‌ای که با حل عددی، مبنای اصلی محاسبات میدان موج قرار می‌گیرد، طیف کنش موج است. به همین دلیل باید اثرات طیف انرژی موج اصلاح شده به طیف کنش موج منتقل شود تا بتوان اثر هم‌جوشی را در میدان موج در تمام حوضه اعمال کرد. انتقال اثر طیف انرژی موج بهبود یافته به طیف کنش موج، با استفاده از رابطه‌ی (۸) انجام می‌شود. حال این طیف کنش اصلاح شده، به عنوان شرایط اولیه برای گام زمانی بعد استفاده می‌شود و به این شکل، اثرات هم‌جوشی از یک زمان به زمان دیگر منتقل می‌شود.

$$N(k,\theta) = F(k,\theta)/\sigma \qquad (۸)$$

در این رابطه σ فرکانس ذاتی موج است.

۷- بحث و بررسی نتایج

الف)نتایج مدل قبل از اعمال هم‌جوشی

همان‌طور که در بخش(۵) گفته شد، چندین روش در مدل ویوواچ۳ برای محاسبه‌ی مولفه‌های مختلف جملات چشمه و چاه وجود دارد. عملکرد این روش‌ها به مقدار زیادی وابسته به مورد مطالعاتی است. در این مطالعه، مدل ویوواچ۳ برای خلیج فارس با چند روش برای ترم‌های منبع و زوال مورد سنجش قرار گرفت و از میان آن‌ها روشی که کمترین خطا را نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده داشت، برای مرحله‌ی بعدی که اجرای مدل با اعمال هم‌جوشی است، انتخاب شد. این محاسبات در نقطه‌ی ای‌دی‌سی‌پی انجام شد. شکل ۴ مقایسه‌ی بین نتایج روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. در شکل، خط قرمز مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی ای‌دی‌سی‌پی و خط‌های دیگر، هر یک مربوط به یکی از روش‌ها است. شکل نشان می‌دهد که مدل، ارتفاع موج را دست پایین محاسبه می‌کند که علت آن می‌تواند دقت پایین داده‌های باد، و یا عدم در نظر گرفتن فیزیک تولید موج در عمق‌های زیر ۱۰۰ متر (همانند خلیج فارس) باشد. برای محاسبه‌ی خطای هر یک از روش‌ها، جذر میانگین مجذور خطا برای آن‌ها نسبت به مقادیر ای‌دی‌سی‌پی، حساب گردید. جدول(۲) مقادیر خطا را برای هر یک از روش‌ها نشان می‌دهد.

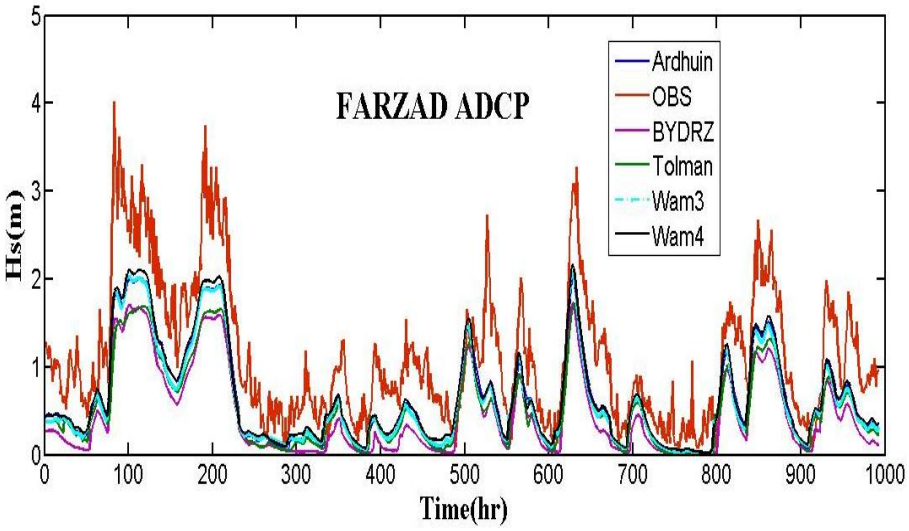
جدول۲-خطای هر یک از روش‌ها نسبت به مقادیر ای‌دی‌سی‌پی

روش	Tolman	Ardhuin	WAM3	WAM4	BYDRZ
RMSE (m)	۰/۶۹۴۹	۰/۵۸۶۸	۰/۶۱۴۵	۰/۵۶۵۲	۰/۷۵۷۵

با توجه به جدول و شکل۴، وم۴ کمترین خطا را در مقایسه با دیگر روش‌ها دارد. از این رو، این روش، برای حالت اجرای مدل با کد هم‌جوشی انتخاب شد. لازم به ذکر است در صورتی که روش‌های دیگر استفاده شود، نتایج استفاده از هم‌جوشی به مراتب بهتر خواهد بود، و در واقع شرایط استفاده شده، سخت‌گیرانه‌ترین شرایط برای ارزیابی کیفیت مدل بعد از به کارگیری هم‌جوشی خواهد بود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.6.3]

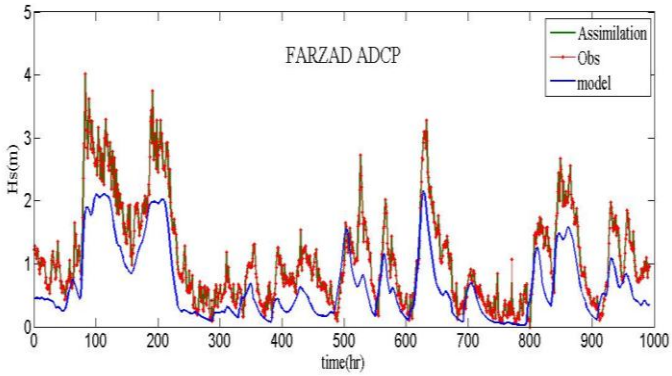


شکل۴- مقایسه ۵ روش مختلف مدل ویوواچ۳ با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی ای‌دی‌سی‌پی در طول زمان در محل ای‌دی‌سی‌پی

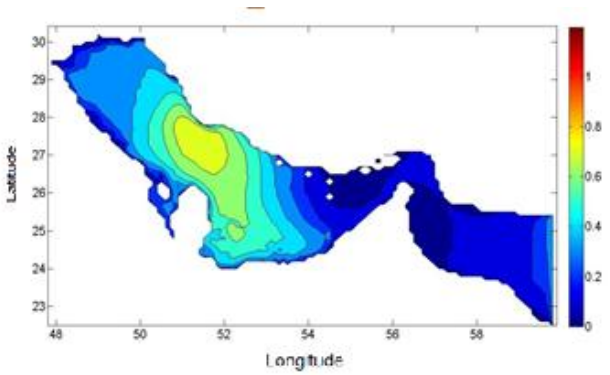
ب- نتایج اجرای مدل با اعمال هم‌جوشی

در ویوواچ۳ کدی برای انجام فرآیند هم‌جوشی وجود ندارد لذا در این مطالعه، کد فرترن هم‌جوشی به نحوی به مدل اضافه شد که با دیگر کدهای مدل نیز هم‌خوانی داشته باشد. همان‌طور که بیان شد، اعمال هم‌جوشی در مدل، نیازمند تعیین هر چه دقیق‌تر ماتریس وزن است که مقادیر این ماتریس با رابطه‌ی (۳) تعیین می‌شوند. مقدار طول L با کمک روش QC، ۱۲۵ کیلومتر به دست آمد. در نتیجه، مدل با روش وم۴ که کمترین خطا را داشت و طول L برابر ۱۲۵ کیلومتر که مقدار بهینه‌ی به دست آمده از روش QC است، با اعمال کد هم‌جوشی اجرا شد.

در فرآیند هم‌جوشی، در نقاط مشاهداتی، خروجی‌های مدل بعد از اعمال هم‌جوشی، منطبق بر مقادیر اندازه‌گیری شده می‌شوند و در نقاط دیگر با توجه به فاصله‌ی نقاط از نقاط مشاهداتی و مقدار وزن موثر به دست آمده از رابطه‌ی (۳) برای هر یک از نقاط محیط، خروجی‌ها به مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت به حالت بدون هم‌جوشی، نزدیک‌تر می‌شوند. همان طور که قبلاً ذکر شد، نقطه‌ی اندازه‌گیری در نزدیکی سکوی فرزاد-الف، به عنوان نقطه‌ی مشاهداتی در فرآیند هم‌جوشی، مورد استفاده قرار گرفت. از این رو، انتظار می‌رود در این نقطه، خروجی مدل بعد از هم‌جوشی تقریبا منطبق بر مقادیر اندازه‌گیری شده باشد. شکل۵ مقایسه‌ی بین خروجی مدل در حالت بدون هم‌جوشی با حالت هم‌جوشی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در شکل مشخص است که مقادیر مدل بدون هم‌جوشی (خط آبی) بعد از اعمال هم‌جوشی در مدل(خط سبز) کاملا منطبق بر مقادیر اندازه‌گیری شده‌اند(خط قرمز). این موضوع تایید کننده‌ی انجام درست فرآیند هم‌جوشی است. شکل۶ ارتفاعات موج در کل حوزه در حالت بدون هم‌جوشی و شکل۷ در حالت هم‌جوشی‌شده است. هر دو شکل در ساعت اول هم‌جوشی هستند.



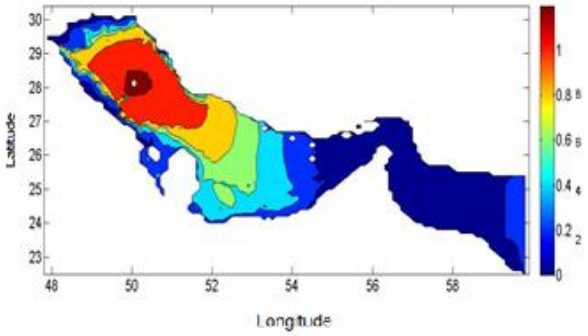
شکل۵- مقایسه‌ی نتایج مدل قبل و بعد از اعمال هم‌جوشی با مقادیر ای‌دی‌سی‌پی



شکل۶-ارتفاعات موج در کل محدوده‌ی مدل‌سازی در ۷ ژانویه‌ی ۲۰۱۳ ساعت ۱ قبل از اعمال هم‌جوشی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.6.3]



شکل۷- ارتفاعات موج در کل محدوده‌ی مدل‌سازی در ۷ ژانویه‌ی ۲۰۱۳ ساعت ۱ در حالت هم‌جوشی شده

مقایسه‌ی دو شکل ۶ و ۷ نشان می‌دهد که هم‌جوشی در کل میدان موج اثر گذاشته و باعث افزایش ارتفاع موج در اکثر نقاط محیط شده است و بیشترین تاثیر در نقاط نزدیک به محل قرارگیری ای‌دی‌سی‌پی است که به عنوان نقطه‌ی مشاهداتی در فرآیند هم‌جوشی مورد استفاده قرار گرفته است.

برای بررسی دقیق‌تر اثر هم‌جوشی روی میدان موج، نیازمند مقایسه‌ی نتایج با داده‌های اندازه‌گیری شده در مکان‌ها و زمان‌های مختلف هستیم. از داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی سار برای صحت‌سنجی و بررسی عملکرد هم‌جوشی و میزان بهبود نتایج استفاده شد. شکل۸ مقایسه‌ی بین خروجی‌های مدل بدون هم‌جوشی، مدل هم‌جوشی‌شده و داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی سار را در کل دوره‌ی مدل‌سازی نشان می‌دهد. شکل۹ همین مقایسه را برای امواج با ارتفاع موج بالای یک متر و شکل۱۰ برای نقاطی که در فاصله‌ی کمتر از ۱۰۰ کیلومتر از نقطه‌ی مشاهداتی ای‌دی‌سی‌پی هستند نشان می‌دهد. جدول۳ مقادیر جذر میانگین مربعات خطا در حالت بدون هم‌جوشی و در حالت هم‌جوشی‌شده را نشان می‌دهد که نشان از کاهش ۲۶/۳ درصدی خطا دارد. جدول(۴) مقادیر خطا را برای حالت امواج بالای یک متر و جدول(۵) برای امواجی که در فواصل زیر ۱۰۰ کیلومتر از نقطه‌ی مشاهداتی قرار دارند نشان می‌دهد.

جدول۳- خطای محاسبه‌ی ارتفاع موج در کل دوره با و بدون اعمال هم‌جوشی

حالت اجرای مدل	بدون هم‌جوشی	هم‌جوشی‌شده
RMSE (m)	۰/۵۱۹۴	۰/۳۸۲۷

کاهش خطا برای امواج بالای یک متر، ۲۴/۸۵ درصد به دست آمد.

جدول۴- خطای محاسبه‌ی ارتفاع موج در کل دوره برای امواج بالای یک متر

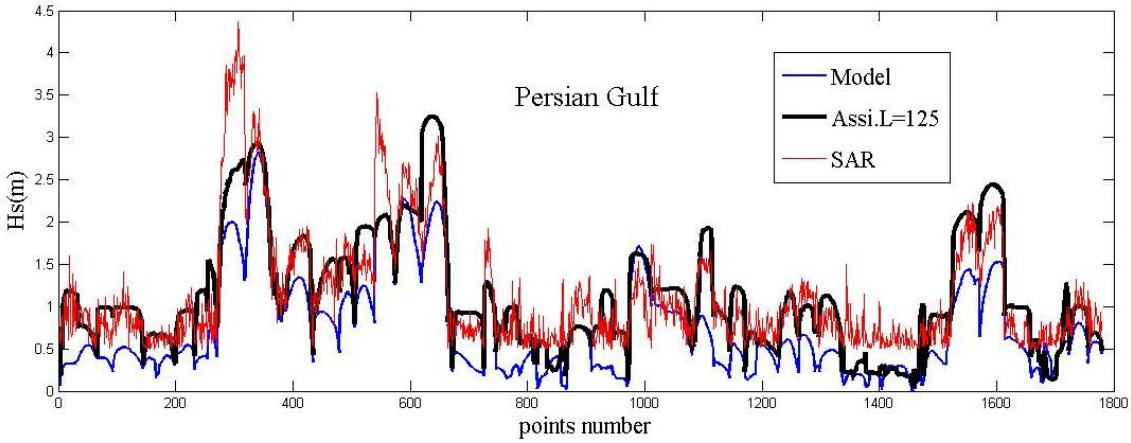
حالت اجرای مدل	بدون هم‌جوشی	هم‌جوشی‌شده
RMSE (m)	۰/۶۷۲۵	۰/۵۰۵۴

و میزان کاهش خطا برای امواج در فواصل زیر ۱۰۰ کیلومتر از نقطه‌ی مشاهداتی نیز ۱۱/۶۷ درصد شد.

جدول۵- خطای محاسبه‌ی ارتفاع موج در کل دوره برای امواج در فواصل زیر ۱۰۰ کیلومتر از ای‌دی‌سی‌پی

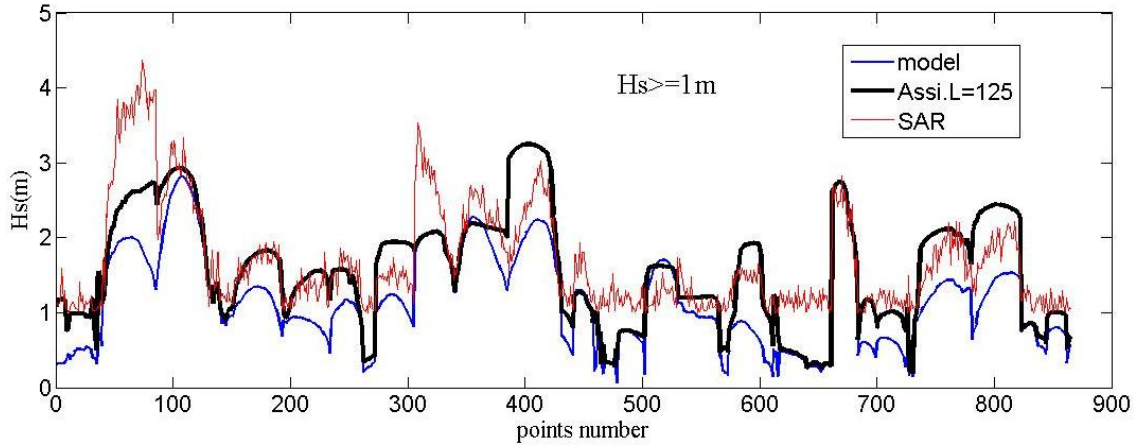
حالت اجرای مدل	بدون هم‌جوشی	هم‌جوشی‌شده
RMSE (m)	۰/۴۵۵۰	۰/۴۰۱۹

این نتایج نشان می‌دهد که اعمال هم‌جوشی در مدل، تاثیر قابل توجهی در کاهش خطای محاسبه‌ی ارتفاع موج و بهبود میدان موج دارد.

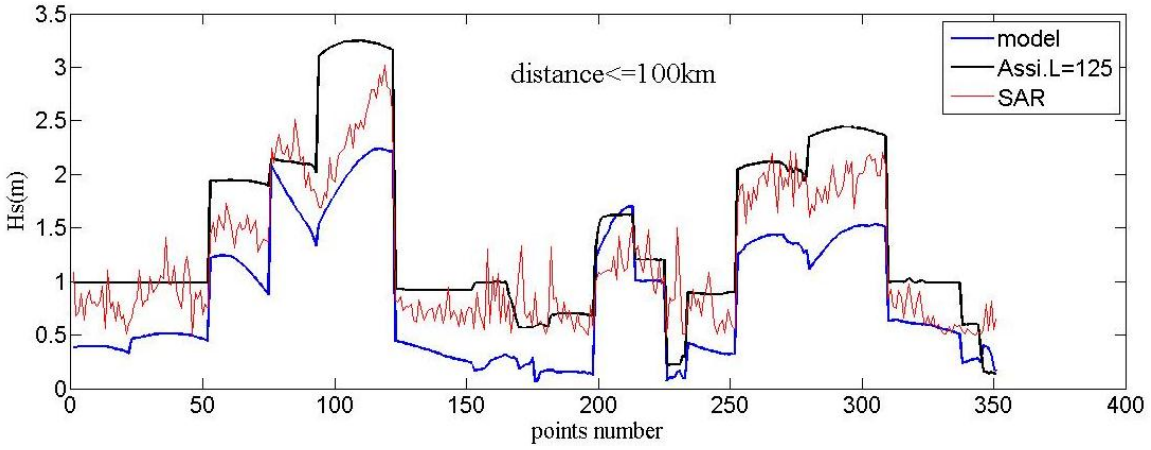


شکل۸-مقایسه‌ی ارتفاعات موج با و بدون اعمال هم‌جوشی با داده‌های سار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.6.3]



شکل ۹- مقایسه‌ی ارتفاعات موج با و بدون اعمال هم‌جوشی با داده‌های سار برای امواج بالای یک متر



شکل ۱۰- مقایسه‌ی ارتفاعات موج با و بدون اعمال هم‌جوشی با داده‌های سار برای امواج در فواصل زیر ۱۰۰ کیلومتر از ای‌دی‌سی‌پی

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ابتدا مدل بدون هم‌جوشی با استفاده از داده‌های باد، عمق و موج در مرز باز مدل، برای ماه‌های ژانویه و فوریه‌ی سال ۲۰۱۳ اجرا شد و ارتفاعات موج در کل خلیج فارس و بخشی از دریای عمان در دوره‌ی مدل‌سازی، محاسبه شد. طیف دو بعدی موج در مرز باز مدل، از اجرای مدل ویوواچ۳ برای کل کره‌ی زمین به دست آمد.

برای انتخاب بهترین روش محاسبه‌ی جملات چشمه و چاه در مورد مطالعاتی مد نظر، مدل ویوواچ۳ با پنج روش مختلف وم۳، وم۴، آردهوین، بی‌وای‌دی‌آر زد و تولمن-کالیگوف برای محدوده‌ی مدل‌سازی و دوره‌ی زمانی مد نظر اجرا شد. خروجی مدل با این پنج روش مختلف، در نقطه‌ی مشاهداتی ای‌دی‌سی‌پی که دارای سری زمانی کامل داده‌های اندازه‌گیری شده است محاسبه شد و خطای هر یک از روش‌ها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی این ای‌دی‌سی‌پی، محاسبه شد. از این میان، وم۴ کمترین خطا را دارا بود و برای حالت هم‌جوشی مورد استفاده قرار گرفت.

در گام بعد، مدل در حالتی که بتواند هم‌جوشی داده‌های ارتفاع موج را انجام دهد اجرا شد. روش وم۴ به دلیل داشتن کمترین خطا، برای اجرای مدل در حالت هم‌جوشی نیز مورد استفاده قرار گرفت. چون هیچ کدی در مدل ویوواچ۳ برای انجام هم‌جوشی موج وجود ندارد لذا کد فرترن هم‌جوشی به نحوی به مدل اضافه شد که بتواند هم‌جوشی را به درستی در مکان‌ها و زمان‌های مختلف انجام دهد و خللی به کدهای دیگر مدل نیز وارد نکند.

روش هم‌جوشی مورد استفاده، درون‌یابی بهینه بود. انجام هم‌جوشی به این طریق بود که در هر گام زمانی، خروجی‌های ارتفاع موج مدل قبل از هم‌جوشی برای هر نقطه از محیط، وارد رابطه‌ی (۲) شده و خطای آن به‌وسیله‌ی داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی محیطی کاهش می‌یابد. از داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی ای‌دی‌سی‌پی در نزدیکی سکوی فرزاد-الف به عنوان نقطه‌ی مشاهداتی در فرآیند هم‌جوشی در رابطه‌ی (۲) استفاده شد و خروجی‌ها در نقاط مختلف با داده‌های راداری سار صحت‌سنجی شد.

با استفاده از روش QC طول L بهینه برای استفاده در رابطه‌ی(۳) ۱۲۵کیلومتر به دست آمد.

نتایج نشان داد که هم‌جوشی به شکل موثری در کاهش خطای محاسبه‌ی میدان موج تاثیر دارد و سبب کاهش خطا به میزان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.6.3]

۲۶/۳ درصد در کل دوره‌ی مدل‌سازی شد. هم‌چنین کاهش خطا برای امواج بالای یک متر ۲۴/۸۵ درصد و برای امواجی که در فواصل زیر ۱۰۰ کیلومتر از نقطه‌ی ای‌دی‌سی‌پی هستند نیز ۱۱/۶۷ درصد به دست آمد.

۹- مراجع

1- Gandin, L. S. and Hardin, R., (1965), *objective analysis of meteorological fields*, Israel program for scientific translations Jerusalem, vol. 242.

2- Kalman, R. E., (1960), *A new approach to linear filtering and prediction problems*, Journal of Fluids Engineering, vol. 82, pp. 35-45,.

3- Evensen, G., (2003), *The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation*, Ocean dynamics, vol. 53, pp. 343-367.

4- Livings, D., (2005), *Aspects of the ensemble Kalman filter*, Reading University Master Thesis

5- Kalnay, E. (2003), *Atmospheric modeling, data assimilation, and predictability*, Cambridge university press.

6- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and Janssen, P., (1996), *Dynamics and modelling of ocean waves* Cambridge university press.

7- Lionello, P., Günther, H. and Hansen, B. (1995), *A sequential assimilation scheme applied to global wave analysis and prediction*, Journal of Marine Systems, vol. 6, pp. 87-107, 1995.

8- Holthuijsen, L., Booij, N., Van Endt, M., Cakes, S. and Soares, C. G., (1997), *Assimilation of buoy and satellite data in wave forecasts with integral control variables*, Journal of marine systems, vol. 13, pp. 21-31.

9- Hasselmann, S., Lionello, P. and Hasselmann, K., (1997), *An optimal interpolation scheme for the assimilation of spectral wave data*, Journal of Geophysical Research, vol. 102, p. 15823.

10- Voorrips, A., Makin, V. and Hasselmann, S., (1997), *Assimilation of wave spectra from pitch-and-roll buoys in a North Sea wave model*, Journal of Geophysical Research: Oceans *(1978–2012)*, vol. 102, pp. 5829-5849.

11- Siddons, L., Wyatt, L. and Wolf, J., (2009), *Assimilation of HF radar data into the SWAN wave model*, Journal of Marine Systems, vol. 77, pp. 312-324.

12- Sannasiraj, S. and Goldstein, M., (2009), *Optimal interpolation of buoy data into a deterministic wind–wave model*, Natural hazards, vol. 49, pp. 261-274.

13- Waters, J., Wyatt, L. R., Wolf, J. and Hine, A., (2013), *Data assimilation of partitioned HF radar wave data into Wavewatch III*, Ocean Modelling, vol. 72, pp. 17-31.

14- Corbella, S., Pringle, J. and Stretch, D. D., (2015), *Assimilation of ocean wave spectra and atmospheric circulation patterns to improve wave modelling*, Coastal Engineering, vol. 100, pp. 1-10.

15- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and Janssen, P., (1996), *Dynamics and modelling of ocean waves*, Cambridge university press.

16- Tolman, H., Accensi, M., Alves, H., Ardhuin, F., Bidlot, J., Booij, N. *et al.*, (2014) *User manual and system documentation of Wavewatch III version 4.18*.

17- Tolman H. L. and Chalikov, D., (1996), *Source terms in a third-generation wind wave model*, Journal of Physical Oceanography, vol. 26, pp. 2497-2518.

18- Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A., Filipot, J.-F., Magne, R., Roland, A. *et al.*, (2009), *Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves: Part I, definition, calibration and validation*, arXiv preprint arXiv:0907.4240.

19- Donelan, M. A., Babanin, A. V., Young, I. R. and Banner, M. L., (2006), *Wave-follower field measurements of the wind-input spectral function. Part II: Parameterization of the wind input*, Journal of physical oceanography, vol. 36, pp. 1672-1689.

20- Babanin, A. V., Banner, M. L., Young, I. R. and Donelan, M. A., (2007), *Wave-follower field measurements of the wind-input spectral function. Part III: Parameterization of the wind-input enhancement due to wave breaking*, Journal of Physical Oceanography, vol. 37, pp. 2764-2775.

21- Rogers, W. E., Babanin, A. V. and Wang, D. W., (2012), *Observation-consistent input and whitecapping dissipation in a model for wind-generated surface waves: Description and simple calculations*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 29, pp. 1329-1346.

22- Moeini, M. H., Etemad-Shahidi, A., Chegini, V. and Rahmani, I., (2012), *Wave data assimilation using a hybrid approach in the Persian Gulf*, Ocean Dynamics, vol. 62, pp. 785-797.

23- Emery, K. O. (1956*), Sediments and water of Persian Gulf*, AAPG Bulletin, vol. 40, pp. 2354-2383.

24- Purser, B. and Seibold, E., (1973), *The principal environmental factors influencing Holocene sedimentation and diagenesis in the Persian Gulf*, in The Persian Gulf, ed: Springer, pp. 1-9.

25- *The General Bathymetric Chart of the Oceans*. Available: **www.Gebco.net/data-products/gridded-bathymetry-data**

26- Kanamitsu, M., (1989), *Description of the NMC global data assimilation and forecast system*, Weather and Forecasting, vol. 4, pp. 335-342.

27- Kanamitsu, i., Alpert, J., Campana, K., Caplan, P., Deaven, D., Iredell, M. et al., (1991), *Recent changes implemented into the global forecast system*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.6.3]

of purified, culture-expanded human mesenchymal stem cells in vitro, Journal of cellular biochemistry, vol. 64, pp. 295-312

30- Polavarapu, S., Ren, S., Rochon, Y., Sankey, D., Ek, N., Koshyk, J. *et al.*, (2005), *Data assimilation with the Canadian middle atmosphere model*, Atmosphere-Ocean, vol. 43, pp. 77-100.

at NMC, Weather and Forecasting, vol. 6, pp. 425-435.

28- Derber, J. C., Parrish, D. F. and Lord, S. J., *The new global operational analysis system at the National Meteorological Center*, Weather and Forecasting, vol. 6,

29- Jaiswal, N., Haynesworth, S. E., Caplan, A. I. and S. P. Bruder, (1997), *Osteogenic differentiation*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.6.3]