

# ارزیابی کارایی مدل WAVAWATCH III در پیش‌بینی عملیاتی امواج خلیج فارس با کاربرد روش‌های مختلف مدل‌سازی انرژی ورودی از باد و استهلاك موج

محمدحسین کاظمی‌نژاد

استادیار، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، پژوهشکده فناوری و مهندسی دریا، پست الکترونیکی: mkazeminezhad@inio.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۸

\* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۲۳

## چکیده

با توجه به اهمیت پیش‌بینی مشخصات امواج ناشی از باد، در این مطالعه کارایی مدل عددی نسل سوم موج در پیش‌بینی عملیاتی امواج خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا با استفاده از داده‌های باد پیش‌بینی GFS، پیش‌بینی امواج با استفاده از سه روش مختلف مدل‌سازی انرژی ورودی باد به موج و استهلاك امواج موجود در مدل WAVEWATCH III صورت پذیرفت و نتایج مدل عددی با ارتفاع و پریود اندازه‌گیری شده در محدوده‌ی لاوان و فارور مقایسه شدند. نتایج حاصل نشان دادند که روش WAM4-BJA دارای عملکرد بهتری در پیش‌بینی ارتفاع و پریود امواج با ارتفاع بیش از ۱/۵ متر است. با استفاده از این روش مشاهده شد که ارتفاع امواج در شرایط توفانی در دوره پاییز و زمستان کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی می‌شود در صورتی که در دوره زمانی بهار و تابستان در برخی مواقع ارتفاع موج اندکی دست بالا نیز پیش‌بینی می‌شود. در مجموع خطای مدل در پیش‌بینی عملیاتی امواج در دو ایستگاه لاوان و فارور در حدود ۲۶٪ (برای امواج با ارتفاع بیش از ۱/۵ متر) به دست آمد.

کلمات کلیدی: داده‌های اندازه‌گیری، داده باد GFS، لاوان، فارور، WAM4، BJA.

## ۱. مقدمه

نام برد. در این راستا مدل‌های عددی نسل سوم مختلفی نظیر مدل‌های WAM (WAMDIG, 1988)، SWAN (Booij et al., 2004) و WAVEWATCH III (Tolman, 2014) ارائه شده‌اند که بر مبنای حل معادله تعادل طیف چگالی کنش موج استوار هستند. این معادله بیانگر این است که توسعه امواج ناشی از باد با فرآیندهای فیزیکی مختلفی شامل انرژی ورودی باد، اندرکنش غیر خطی موج-موج و استهلاك امواج کنترل می‌شوند. از آنجایی که فرآیندهای فیزیکی حاکم بر ورود انرژی باد به سطح دریا و استهلاك امواج در آب عمیق به طور کامل شناخته شده نیستند (Lee, 2015)، تاکنون یک فرمول‌بندی جامع برای مدل‌سازی این

امواج ناشی از باد به دلیل انرژی بالای خود یکی از مهمترین پدیده‌های هیدرودینامیکی دریا هستند که از اهمیت ویژه‌ای در مهندسی دریا برخوردار هستند. با توجه به اهمیت تخمین مشخصات امواج دریا در قالب پیش‌بینی و یا بازتولید اطلاعات قبلی، در دهه‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای توسعه روش‌های تخمین مشخصات موج انجام شده است. در میان روش‌های مختلف، مدل‌های عددی-طیفی را می‌توان به عنوان پیچیده‌ترین و البته دقیق‌ترین روش‌های تخمین مشخصات امواج ناشی از باد

تدقیق مدل‌سازی، ضرایب موجود در پارامتربندی WAM4-ACC350 را به صورت سیستماتیک تغییر دادند و در نهایت مشخص شد با تغییر این ضرایب، بهبود چندانی در مدل‌سازی ارتفاع و پریود موج حاصل نمی‌شود. مدل WW III (نسخه ۳/۱۴) در سواحل دریای شرق (ناحیه کشور کره) نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است (Lee, 2015). در این راستا مدل‌سازی‌های مختلفی بر اساس روش‌های WAM Cycle 3 (به اختصار WAM3)، TC و WAM4-BJA انجام شد و مقادیر محاسباتی پارامترهای موج با مقادیر اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه واقع در دریای باز و دو ایستگاه واقع در نواحی ساحلی مقایسه شدند. نتایج حاصله نشان دادند که دقت پارامتربندی WAM4-BJA در شبیه‌سازی ارتفاع امواج بیشتر از سایر پارامتربندی‌ها است، در حالی‌که برای شبیه‌سازی پریود موج، پارامتربندی WAM3 دارای عملکرد بهتری در ایستگاه‌های واقع در نزدیک ساحل و پارامتربندی WAM4-BJA دارای کارایی بهتری در ایستگاه‌های واقع در دریای باز بودند.

مرور مطالعات قبلی نشان داد که کارایی روش‌های مختلف موجود در مدل WW III برای مدل‌سازی انرژی ورودی و استهلاك موج، در مناطق مختلف لزوماً یکسان نیستند. با توجه به اینکه از نسخه ۳/۱۴ به بعد مدل WW III با اضافه شدن جملات چشمه جدید به مدل، امکان مدل‌سازی امواج در نواحی نسبتاً کم عمق نیز فراهم شده است، لذا ارزیابی عملکرد این مدل در نواحی مانند خلیج فارس که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است قابل انجام است. در مطالعات قبلی عمدتاً مدل‌های عددی نظیر SWAN در محدوده خلیج فارس مورد ارزیابی جامع قرار گرفته‌اند (Moieni et al., 2010) ولی تاکنون ارزیابی جامعی از عملکرد مدل WW III در خلیج فارس صورت پذیرفته است. علاوه بر این در مطالعات قبلی عمدتاً مدل‌سازی امواج ناشی از باد مد نظر بوده است و معمولاً از داده‌های باد بازتحلیل نظیر داده‌های ECMWF و یا داده‌های باد اصلاح شده برای مدل‌سازی دقیق‌تر مشخصات امواج استفاده شده است. هدف اصلی این مقاله ارزیابی جدیدترین نسخه مدل WW III (۴/۱۸) در پیش‌بینی امواج خلیج فارس است. بدین منظور از داده‌های پیش‌بینی عملیاتی باد در محدوده خلیج فارس بدون اعمال هیچ‌گونه اصلاحی استفاده می‌شود. در حقیقت با انجام این تحقیق دقت پیش‌بینی عملیاتی موج در محدوده خلیج فارس مشخص خواهد شد. در این راستا با بارگذاری مدل توسط داده‌های پیش‌بینی

دو عامل که در تمامی شرایط و نواحی صادق باشند ارایه نشده است. بنابراین روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی ورودی باد و استهلاك امواج توسعه یافته و در مدل‌های عددی به کار گرفته شده است. مدل WAVEWATCH III (به اختصار WW III) یکی از مدل‌های عددی نسل سوم است که دارای بسته‌های مختلفی برای محاسبه جملات چشمه ورودی باد و استهلاك موج<sup>۱</sup> است.

Montoya و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی و ارزیابی روش‌های مختلف ورودی باد و استهلاك موج مدل WW III (نسخه ۳/۱۴) برای شرایط حدی توفان کاترینا در محدوده خلیج مکزیک پرداختند.

آنها دو روش Tolman and Chalikov (1996) (به اختصار TC) و WAM Cycle 4 (Gunther et al., 1992) شامل پارامتربندی BJA (Bidlot et al., 2005)، ACC350 (Ardhuin et al., 2008) و WAM4 (به ترتیب به اختصار WAM4-BJA، WAM4-ACC350 و WAM4-WAM4) را مورد بررسی قرار دادند. با مقایسه نتایج مدل‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده در ۱۰ ایستگاه مشاهده شد که روش TC در ۶ ایستگاه نتایج بهتری نسبت به سایر پارامتربندی‌ها برای شبیه‌سازی ارتفاع موج شاخص ارایه می‌کند. همچنین مقایسه میان WAM4-WAM4، WAM4-BJA و WAM4-ACC350 نشان داد که علی‌رغم شباهت زیاد نتایج WAM4-WAM4 و WAM4-BJA، نتایج WAM4-WAM4 اندکی دقیق‌تر هستند و پارامتربندی‌های WAM4-WAM4 و WAM4-BJA، نتایج بهتری نسبت به پارامتربندی WAM4-ACC350 در شبیه‌سازی ارتفاع موج ارایه دادند. Mentaschi و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی عملکرد روش‌های مختلف ورودی باد و استهلاك موج مدل WW III (نسخه ۳/۱۴) در مدل‌سازی امواج دریای مدیترانه پرداختند. در این راستا مدل‌سازی‌ها با روش‌های TC، WAM4-BJA و WAM4-ACC350 انجام گردید. مقایسه نتایج مدل‌سازی‌ها با داده‌های اندازه‌گیری نشان داد که روش TC و روش WAM4-BJA ارتفاع و پریود موج را دست پایین پیش‌بینی می‌کنند و پارامتربندی WAM4-ACC350 گرچه ارتفاع موج را اندکی دست بالا و پریود موج را اندکی دست پایین تخمین می‌زند ولی در مجموع از نتایج بهتری برخوردار است. در مرحله بعد آنها به منظور

<sup>1</sup> Input and dissipation source term package

مدل‌سازی عبارت  $S_{nl}$  استفاده شده است. عبارات چشمه  $S_{in}$  و  $S_{ds}$  گرچه بیانگر فرآیندهای فیزیکی متفاوتی هستند ولی این دو جمله به نحوی با یکدیگر مرتبط هستند زیرا تعادل این دو جمله بر رشد موج در مدل‌های عددی موثر است. بنابراین در مدل WW III روش‌های مختلفی برای محاسبه دو عبارت وجود دارد که در این مطالعه از روش‌های WAM3، TC و WAM4-BJA استفاده می‌شود. لازم به ذکر است در روش WAM4 پارامتربندی‌های دیگری نیز وجود دارند ولی مطالعات قبلی و نیز اجراهای اولیه در این پژوهش نشان داد نتایج حاصل از آنها به هم نزدیک هستند و مطابق (Tolman 2014) پارامتربندی BJA دقیق‌تر از سایر موارد است و به عنوان پیش‌فرض در مدل WW III انتخاب شده است. روش WAM3 بر مبنای مطالعات Snyder و همکاران (۱۹۸۱) و Komen و همکاران (۱۹۸۴) ارایه شده است و در این روش جملات چشمه مربوط به انرژی ورودی باد و استهلاك موج به صورت زیر مدل‌سازی می‌شوند:

(۳)

$$S_{in}(k, \theta) = C_{in} \frac{\rho_a}{\rho_w} \max \left[ 0, \left( \frac{28u_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right) \right] \sigma N(k, \theta)$$

$$u_* = u_{10} \sqrt{(0.8 + 0.065u_{10})10^{-3}} \quad (۴)$$

(۵)

$$S_{ds}(k, \theta) = C_{ds} \hat{\sigma} \frac{k}{\hat{\alpha}_{PM}} \left( \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^2 N(k, \theta), \quad \hat{\sigma} = (\overline{\sigma^{-1}})^{-1}, \quad \hat{\alpha} = Ek^2g^{-2}$$

در روابط ۳، ۴ و ۵،  $C_{in}$  ضریب ثابت،  $u_*$  سرعت برشی باد،  $\rho_w$  و  $\rho_a$  چگالی هوا و آب،  $c$  سرعت فاز،  $u_{10}$  سرعت باد در تراز ۱۰ متری،  $\theta$  و  $\theta_w$  جهت میانگین موج و باد،  $C_{ds}$  ضریب ثابت،  $\hat{\alpha}_{PM}$  مقدار  $\hat{\alpha}$  در طیف PM،  $g$  شتاب ثقل و  $\sigma$  و  $k$  به ترتیب فرکانس زاویه‌ای و عدد موج هستند.

در روش TC، انرژی ورودی باد بر مبنای مطالعات Chalikov و Belevich (۱۹۹۳) و (Chalikov 1995) فرمول‌بندی شده است و عبارت استهلاك انرژی موج دارای دو بخش مربوط به فرکانس‌های پایین (رابطه ۷) و بالا (رابطه ۸) است که روابط کلی آن به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$S_{in}(k, \theta) = \sigma \beta N(k, \theta) \quad (۶)$$

$$S_{ds,l}(k, \theta) = -2 u_* h k^2 \phi N(k, \theta) \quad (۷)$$

عملیاتی باد، مقادیر ارتفاع و پرپود شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه مقایسه می‌شوند.

## ۲. روش کار

### ۲-۱ مدل عددی WW III و معادلات حاکم

در این مطالعه از مدل WW III نسخه ۴/۱۸ (Tolman, 2014) که در مرکز NCEP<sup>۱</sup>-NOAA توسعه یافته است برای مدل‌سازی امواج استفاده می‌شود. این مدل یک مدل نسل سوم کاملاً طیفی است که معادله تعادل طیف چگالی کنش موج  $N(k, \theta; x, t)$  را در مختصات‌های کارتیزین و کروی حل می‌کند ( $k$  عدد موج،  $\theta$  جهت،  $x$  بردار مکان و  $t$  زمان). در دستگاه مختصات کروی ( $\lambda$  طول جغرافیایی و  $\phi$ : عرض جغرافیایی) این معادله به صورت زیر نوشته می‌شود:

(۱)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + (\cos \phi)^{-1} \frac{\partial}{\partial \phi} (N \dot{\phi} \cos \phi) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} N) + \frac{\partial}{\partial k} (\dot{k} N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta} N) = \frac{S}{\sigma}$$

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos \theta + U_\phi}{R}, \quad \dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta + U_\lambda}{R \cos \phi}, \quad \dot{\theta} = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \phi \cos \theta}{R} \quad (۲)$$

در معادلات فوق  $R$  شعاع کره زمین و  $U_\phi$  و  $U_\lambda$  مولفه‌های سرعت جریان هستند. در سمت راست معادله انتشار موج، عبارت  $S$  در برگرفته جملات چشمه و چاه است که بیانگر رشد و زوال موج در اثر پدیده‌های مختلف است. این عبارات در آب عمیق شامل جمله مربوط به اندرکنش باد-موج ( $S_{in}$ )، جمله مربوط به اندرکنش چهارگانه موج-موج ( $S_{nl}$ ) و جمله مربوط به استهلاك ناشی از سفیدک راس موج ( $S_{ds}$ ) است. در آخرین نسخه مدل فرآیندهای فیزیکی حاکم در آب کم عمق نظیر اندرکنش موج - بستر و استهلاك انرژی موج در اثر شکست موج ناشی از عمق آب و اندرکنش سه‌گانه موج-موج نیز مدل‌سازی می‌شوند. در مدل عددی نحوه در نظر گرفتن اندرکنش‌های غیر خطی (اندرکنش موج-موج،  $S_{nl}$ ) بیانگر نسل سوم بودن مدل عددی است که در مطالعه حاضر از روش Hasselmann (et al., 1985) DIA<sup>۲</sup> برای

<sup>۱</sup> National Center for Environmental prediction

<sup>۲</sup> Discrete Interaction Approximation

میدان باد در مکان و زمان هستند. علاوه بر این به منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی لازم است داده‌های اندازه‌گیری شده امواج حداقل در یک ایستگاه نیز در دسترس باشد.

در این مطالعه به منظور تهیه فایل عمق‌سنجی در محدوده خلیج فارس و دریای عمان، از اطلاعات پایگاه داده‌های ETOPO1 مرکز ملی داده‌های ژئوفیزیکی (NGDC) با دقت مکانی ۱ دقیقه استفاده شده است. این اطلاعات به طور وسیع در مدل‌های بزرگ مقیاس قبلی نیز مورد استفاده قرار گرفته است و با توجه به اینکه هدف این مطالعه شبیه‌سازی امواج در مناطق نزدیک ساحل و بسیار کم عمق نمی‌باشد کاربرد داده‌های هیدروگرافی محلی ضروری نیست.

یکی از مهم‌ترین داده‌های ورودی مدل‌های عددی موج، داده‌های میدان باد است. مطالعات قبلی نشان داده است که دقت مدل‌های پیش‌بینی موج، کاملاً وابسته به دقت داده‌های باد ورودی به مدل است به طوری که ۱۰٪ تا ۲۰٪ خطای میدان باد می‌تواند منجر به ۱۰٪ تا ۲۰٪ خطا در مدلسازی ارتفاع موج شود (Cavaleri, 1994). در اکثر مطالعات قبلی مربوط به مدل‌سازی امواج در خلیج فارس، از داده‌های عملیاتی، باز تحلیل و یا اصلاح شده ECMWF استفاده شده است (Mazaheri et al., 2013, Moeini et al., 2010). با توجه به اینکه هدف اصلی این مطالعه بررسی مدل در زمینه پیش‌بینی عملیاتی است لازم است از داده‌های پیش‌بینی عملیاتی باد استفاده نمود. در این زمینه پایگاه‌های جهانی مختلفی به پیش‌بینی عملیاتی میدان باد می‌پردازند.

در این مطالعه از داده‌های تولید شده توسط سامانه پیش‌بینی جهانی (GFS)<sup>۱</sup> مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (NCEP) سازمان ملی جوی و اقیانوسی آمریکا (NOAA)<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. داده‌های GFS استفاده شده مربوط به پیش‌بینی‌های ۹۶ ساعته این سامانه است که با تفکیک مکانی ۰/۵ × ۰/۵ درجه و با فواصل زمانی ۳ ساعته در دسترس می‌باشند. لازم به ذکر است که این داده‌ها در مطالعات قبلی محدودی نیز برای پیش‌بینی عملیاتی و مدلسازی امواج در محدوده خلیج فارس و دریای عمان استفاده شده است (کاظمی نژاد و همکاران، ۱۳۹۳، Kazeminezhad and Ghavanini, 2015). در مواردی که محدودی مدلسازی دارای مرز باز نیز می‌باشد لازم است شرایط مرزی در این مرزها نیز تعریف شوند. در مدل WW III این شرایط مرزی به صورت پارامترهای

$$S_{ds,h}(k,\theta) = -a_0 \left(\frac{u_*}{g}\right)^2 f^3 \alpha_n^B N(k,\theta) \quad (8)$$

در روابط ۶، ۷ و ۸،  $\beta$  پارامتر بدون بعد اندرکنش باد-موج،  $h$  مقیاس اختلاط (که بر اساس بخش فرکانس بالای موج تعیین می‌شود)،  $\phi$  تابع تجربی (بیانگر مرحله توسعه میدان موج)،  $\alpha_n$  تراز بدون بعد فیلیپس برای حداکثر انرژی در هر فرکانس (طیف اشباع)،  $f$  فرکانس،  $B$  تابعی از فرکانس و سرعت برشی باد و  $a_0$  ضریب ثابت تجربی است.

روش WAM4 بر مبنای تئوری رشد موج مایلز (Miles, 1957) و اصلاحات Janssen (1982) ارایه شده است و فرمول‌بندی کلی عبارات چشمه ورودی باد و استهلاك موج به صورت زیر است:

$$S_{in}(k,\theta) = \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{\beta_{max}}{\kappa^2} e^{Z Z^4} \left(\frac{u_*}{C} + z_{\alpha}\right)^2 \cos^{p_m}(\theta - \theta_u) \sigma N(k,\theta) + S_{out}(k,\theta) \quad (10)$$

$$S_{ds}(k,\theta) = c_{ds} \bar{\alpha}^2 \bar{\sigma} \left[\delta_1 \frac{k}{k} + \delta_2 \left(\frac{k}{k}\right)^2\right] N(k,\theta) \quad (11)$$

در روابط ۱۰ و ۱۱،  $\beta_{max}$  پارامتر بدون بعد رشد (ثابت)،  $\kappa$  ثابت فن کارمن،  $p_{in}$  ثابت کنترل کننده توزیع جهتی،  $z_{\alpha}$  پارامتر تنظیم سن موج و  $S_{out}$  استهلاك بخش امواج دورا،  $\bar{\alpha} = EK^2$ ،  $\delta_1$  و  $\delta_2$  ضرایب ثابت و علامت - نشان دهنده مقادیر میانگین هستند. روابط کامل مربوط به روش‌های فوق‌الذکر در Tolman (2014) ارایه شده است.

## ۲-۲- محدوده مورد مطالعه و داده‌های مورد نیاز

همان‌طور که اشاره شد هدف اصلی این مقاله ارزیابی روش‌های مختلف مدل WW III در محدوده خلیج فارس است. به دلیل احتمال تاثیر امواج دریای عمان بر امواج خلیج فارس (به طور اندک در نواحی شرقی)، مدلسازی عددی در خلیج فارس و دریای عمان به صورت یکپارچه انجام می‌شود. بدین منظور محدوده مدلسازی و در حقیقت دامنه محاسباتی مطابق شکل ۱ بین طول جغرافیایی ۴۷/۵° تا ۶۳/۵° و عرض جغرافیایی ۲۲/۰° تا ۳۰/۵° انتخاب شده است. به منظور اجرای مدل‌های عددی امواج لازم است که داده‌های مختلفی در مدل بارگذاری شوند که مهمترین آنها داده‌های عمق‌سنجی، داده‌های مرزی و داده‌های

<sup>1</sup> Global Forecasting System

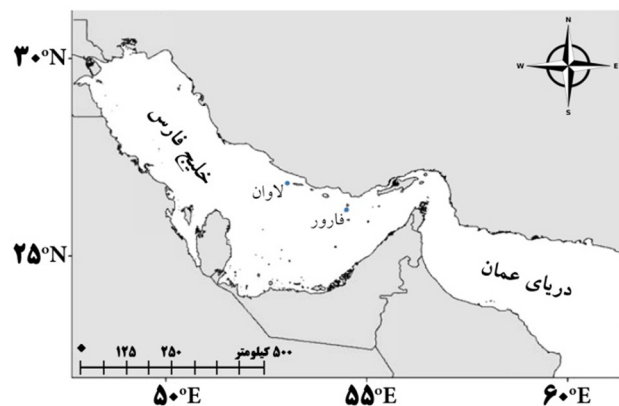
<sup>2</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration

هرتز) نیز به ۳۰ فرکانس و فضای جهتی نیز به ۲۴ جهت گسسته‌سازی شده است. در مدل WW III نیاز به تعریف چهار گام زمانی است که مقادیر ۲۰۰، ۴۰۰، ۲۰۰ و ۱۵ ثانیه به ترتیب برای گام زمانی کلی، گام زمانی مربوط به انتشار در مکان، گام زمانی مربوط به انتشار در فضای طیفی و گام زمانی مربوط به جملات چشمه انتخاب شدند.

به منظور مشاهده عملکرد روش‌های مختلف و تفاوت نتایج حاصله از هر روش، در شکل ۲ به طور نمونه مقایسه ارتفاع موج پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های مختلف و داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه لاوان برای دوره زمانی محدودی ارایه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با استفاده از روش‌های متفاوت مدل‌سازی جملات چشمه، تفاوت زیادی بین نتایج حاصله در محدوده مورد مطالعه وجود ندارد. نتایج حاصل از روش‌های WAM4-BJA و WAM3 بسیار به یکدیگر نزدیک هستند و با استفاده از روش TC مشاهده می‌شود که ارتفاع موج در محدوده‌های قله، کمتر از مقادیر متناظر حاصل از دو روش دیگر به دست می‌آید. بررسی پرپودهای شبیه‌سازی شده نیز بیانگر رفتار مشابه روش‌های مختلف می‌باشد.

به منظور بررسی کمی و ارزیابی روش‌های مختلف، خطای روش‌های مختلف در پیش‌بینی ارتفاع و پرپود امواج در دو ایستگاه لاوان و فارور برای امواج مشاهداتی با ارتفاع بیش از ۰/۵ متر در جدول ۱ ارایه شده است. در این راستا شاخص انحراف (Bias) و شاخص پراکندگی (SI) استفاده شده است. شاخص انحراف منفی برای پیش‌بینی ارتفاع موج بیانگر این است که تمامی روش‌ها در دو ایستگاه مورد مطالعه منجر به پیش‌بینی دست پایین ارتفاع موج می‌شوند. بر اساس مقادیر SI محاسباتی مشاهده می‌شود که روش TC از دقت بیشتری نسبت به دو روش دیگر در پیش‌بینی ارتفاع امواج بزرگتر از ۰/۵ متر برخوردار است. البته در خصوص پیش‌بینی پرپود موج مشاهده می‌شود که مجدداً تمامی روش‌ها پرپود موج را دست پایین پیش‌بینی می‌کنند ولی روش WAM4-BJA از دقت بیشتری برخوردار است. مقایسه نتایج حاصل در ایستگاه لاوان و فارور نشان می‌دهد که مدل، مشخصات موج در ایستگاه لاوان را بهتر از ایستگاه فارور پیش‌بینی می‌نماید. یکی از دلایل این امر می‌تواند مربوط به موقعیت ایستگاه اندازه‌گیری فارور باشد. این ایستگاه گرچه دارای عمقی بیش از ۲۴ متر است ولی فاصله طولی آن از سواحل جزیره فارور کم است و ممکن است تحت تاثیر خشکی واقع

طیفی در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به اینکه هدف مطالعه حاضر، ارزیابی مدل در محدوده خلیج فارس است، با توجه به گستردگی مدل، مشخصات امواج در مرز باز مدل اثر خاصی بر امواج خلیج فارس ندارد و لزومی به در نظر گرفتن شرایط مرزی در مرز باز مدل نمی‌باشد. در این مطالعه به منظور ارزیابی مدل، از داده‌های موج اندازه‌گیری شده در شرق جزیره لاوان و جنوب جزیره فارور (شکل ۱) استفاده شده است که مربوط به پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل استان هرمزگان به کارفرمایی سازمان بنادر و دریانوردی هستند. در این نقاط که دارای عمقی بیش از ۲۴ متر هستند، اندازه‌گیری مشخصات موج در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ توسط دستگاه ADCP<sup>۱</sup> با فواصل زمانی یک ساعت انجام شده است. بازه زمانی که در هر دو ایستگاه به طور همزمان اندازه‌گیری مشخصات موج اندازه‌گیری شده است ۲۰۰۹/۰۹/۱۲ تا ۲۰۱۰/۰۷/۰۸ است.



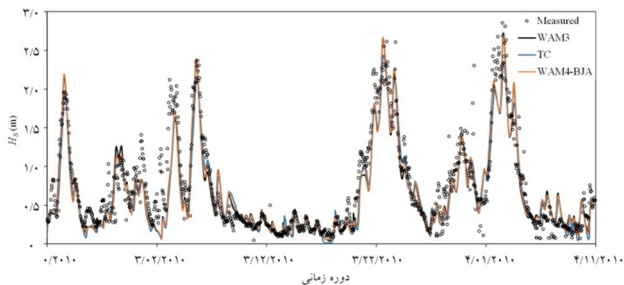
شکل ۱: دامنه محاسباتی و محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری باد و موج

### ۳. نتایج و بحث

مدل‌سازی عددی امواج با استفاده از داده‌های باد پیش‌بینی عملیاتی GFS در دوره زمانی ۲۰۰۹/۱۰/۰۱ تا ۲۰۱۰/۰۷/۰۸ با استفاده از مدل عددی WW III انجام شد. با توجه به هدف این مطالعه، مدل‌سازی‌ها با استفاده از روش‌های مختلف مدل‌سازی ورودی انرژی باد و استهلاك موج در آب عمیق شامل روش‌های WAM3، WAM4-BJA و TC تکرار شدند. در تمامی مدل‌سازی‌ها، دامنه محاسباتی با شبکه منظم با دقت ۰/۰۵×۰/۰۵ درجه گسسته‌سازی شده است. دامنه فرکانسی (از ۰/۰۴ تا ۰/۶۹

<sup>۱</sup> Acoustic Doppler Current Profiler

پایین و در برخی مواقع اندکی دست بالا پیش‌بینی کرده است لذا تغییر ضرایب مدل راهکار مناسبی برای بهبود نتایج در کل دوره زمانی مدل‌سازی نمی‌باشد. علاوه بر این Mentaschi و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان دادند با تغییر ضرایب مدل بهبود زیادی در نتایج مدل‌سازی حاصل نمی‌شود. علاوه بر این در شکل‌های ۳-ب و ۴-ب مشاهده می‌شود که در برخی از مواقع، اختلاف زیادی بین پریود موج مدل‌سازی و اندازه‌گیری شده وجود دارد (به طور مثال در دوره زمانی ۱۰/۲۰/۲۰۰۹ تا ۱۰/۳۰/۲۰۰۹ در هر دو ایستگاه). با مشاهده ارتفاع موج در زمان‌های متناظر، ملاحظه می‌شود که در این مواقع عمدتاً ارتفاع موج کمتر از ۰/۵ متر بوده است و شرایط حاکم امواج از اهمیت چندانی برخوردار نبوده است و در حقیقت این داده‌ها در محاسبه شاخص‌های خطا لحاظ نشده‌اند.



شکل ۲: مقایسه مقادیر ارتفاع موج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از روش‌های مختلف در ایستگاه لاوان

جدول ۱: شاخص خطای پیش‌بینی پارامترهای موج برای روش‌های مختلف مدل‌سازی (امواج با ارتفاع بیشتر از ۰/۵ متر)

ایستگاه	روش مدل‌سازی ورودی باد و استهلاک	$H_s$		$T_p$	
		Bias (m)	SI (%)	Bias (s)	SI (%)
لاوان	WAM3	-۰/۱۶	۲۹/۹	-۰/۶۷	۱۷/۸
	TC	-۰/۱۵	۲۹/۴	-۰/۵۹	۱۷/۲
	WAM4-BJA	-۰/۱۴	۲۹/۶	-۰/۱۷	۱۴/۵
فارور	WAM3	-۰/۱۳	۳۴/۸	-۰/۷۵	۱۹/۳
	TC	-۰/۱۱	۳۳/۳	-۰/۶۲	۱۷/۸
	WAM4-BJA	-۰/۱۲	۳۴/۷	-۰/۱۵	۱۵/۶

جدول ۲: شاخص خطای پیش‌بینی پارامترهای موج برای روش‌های مختلف مدل‌سازی (امواج با ارتفاع بیشتر از ۱/۵ متر)

ایستگاه	روش مدل‌سازی ورودی باد و استهلاک	$H_s$		$T_p$	
		Bias (m)	SI (%)	Bias (s)	SI (%)
لاوان	WAM3	-۰/۳۰	۲۴/۶	-۰/۷۰	۱۳/۷
	TC	-۰/۳۶	۲۵/۸	-۰/۸۸	۱۵/۸
	WAM4-BJA	-۰/۲۹	۲۴/۶	-۰/۱۶	۹/۵
فارور	WAM3	-۰/۳۴	۲۸/۸	-۰/۶۶	۱۷/۰
	TC	-۰/۴۰	۲۹/۰	-۰/۷۰	۱۷/۳
	WAM4-BJA	-۰/۳۴	۲۸/۴	-۰/۰۴	۱۴/۳

شده باشد. گرچه شاخص‌های خطای محاسباتی بیانگر این است که خطای روش TC در پیش‌بینی ارتفاع موج کمتر از سایر روش‌ها است. ولی با ملاحظه نتایج ارایه شده در شکل ۲ مشاهده می‌شود که روش TC در نواحی قله، ارتفاع موج را کمتر از سایر روش‌ها و کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌نماید. به همین دلیل گرچه در مجموع روش TC دارای خطای کمتری در پیش‌بینی امواج بزرگتر از ۰/۵ متر است ولی احتمالاً دقت این روش در پیش‌بینی امواج در شرایط توفانی کمتر از سایر روش‌ها است. به منظور بررسی بهتر این موضوع، شاخص‌های خطای روش‌های مختلف برای پیش‌بینی امواج با ارتفاع بیشتر از ۱/۵ متر محاسبه و در جدول ۲ ارایه شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهند که در این شرایط، خطای روش TC در پیش‌بینی ارتفاع و پریود امواج بیشتر از سایر روش‌ها است. در میان روش‌های مختلف، روش WAM4-BJA بهتر از سایر روش‌ها در پیش‌بینی هر دو پارامتر ارتفاع و پریود موج عمل می‌کند. مقایسه نتایج حاصل در جدول ۱ و ۲ نیز نشان می‌دهد که خطای مدل در پیش‌بینی امواج مرتفع‌تر از ۱/۵ متر در هر دو ایستگاه مورد مطالعه کاهش می‌یابد. در خصوص پارامترهای خطای ارایه شده در جدول ۱ و ۲ لازم به ذکر است که این مقادیر خطا مربوط به پیش‌بینی عملیاتی موج با استفاده از داده‌های پیش‌بینی عملیاتی باد در محدوده خلیج فارس است. در صورتی که از داده‌های اصلاح شده یا بازتحلیل باد برای مدل‌سازی امواج در این محدوده استفاده شود انتظار می‌رود خطای مدل‌سازی موج کاهش یابد. در مجموع برای شرایط موج با ارتفاع بیش از ۱/۵ متر، به طور میانگین شاخص خطا در دو ایستگاه مورد مطالعه تقریباً برابر ۲۶٪ است که برای شرایط پیش‌بینی عملیاتی مقدار قابل قبولی است. به منظور مشاهده بهتر نتایج پیش‌بینی عملیاتی، در شکل‌های ۳ و ۴ داده‌های ارتفاع و پریود موج پیش‌بینی شده (توسط روش WAM4-BJA) با مقادیر اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه لاوان و فارور مقایسه شده است. در تمامی شکل‌ها مشاهده می‌شود که روند تغییرات ارتفاع و پریود موج به خوبی پیش‌بینی شده است. نتایج نشان می‌دهند که در فصل بهار و اوایل تابستان در برخی موارد ارتفاع موج اندکی بیشتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی شده است در صورتی که در فصل پاییز و زمستان در هر دو ایستگاه ارتفاع موج در مواقع توفانی کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی شده است که این موارد با علامت  $\downarrow$  در شکل ۳-الف و ۴-الف مشخص شده‌اند. با توجه به اینکه مدل در برخی مواقع ارتفاع موج را دست

روش‌های WAM3 و WAM4-BJA به یکدیگر نزدیک هستند. برای امواج با ارتفاع بیش از ۰/۵ متر، روش TC دارای بهترین شاخص خطا در پیش‌بینی ارتفاع موج و روش WAM4-BJA دارای بهترین عملکرد در پیش‌بینی پریرود امواج بودند. با این حال مشاهده شد که روش TC ارتفاع امواج را در مواقع توفانی کمتر از سایر روش‌ها و مقادیر واقعی پیش‌بینی می‌کند. در شرایط امواج با ارتفاع بیش از ۱/۵ متر (شرایطی که از نظر عملیاتی از اهمیت بالایی برخوردار است) روش WAM4-BJA دارای عملکرد بهتری در پیش‌بینی ارتفاع و پریرود امواج داشت. علاوه بر این مشاهده شد که با استفاده از داده‌های باد GFS، در دوره زمستان در شرایط توفانی ارتفاع امواج دست پایین پیش‌بینی می‌شوند، در حالی که در دوره زمانی بهار و تابستان در برخی مواقع ارتفاع موج اندکی دست بالا پیش‌بینی می‌شود. به طور کلی نتایج حاصله نشان دادند که مدل WWIII برای مدل‌سازی امواج در مناطقی نظیر خلیج فارس نیز کارایی مناسبی دارند و با استفاده از داده‌های باد پیش‌بینی عملیاتی GFS در مدل WWIII، پیش‌بینی روند کلی ارتفاع و پریرود موج در خلیج فارس امکان‌پذیر است گرچه در دوره پاییز و زمستان ارتفاع امواج در مواقع توفانی عمدتاً دست پایین پیش‌بینی می‌شوند.

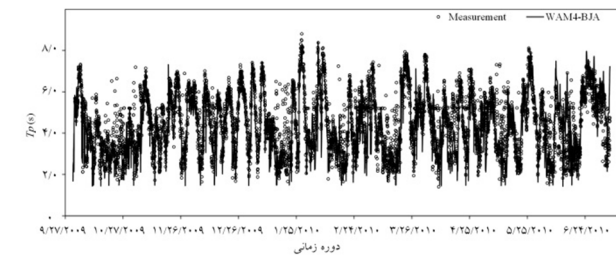
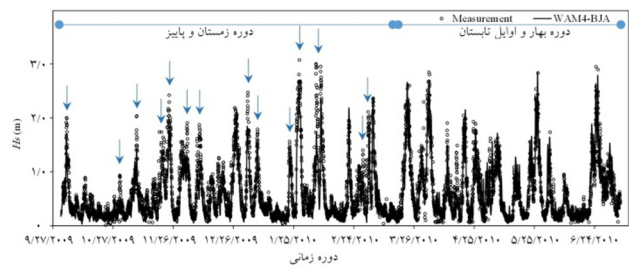
## ۵. سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسنده مراتب قدردانی و سپاس خود را از اداره کل مهندسی سواحل و بنادر سازمان بنادر و دریانوردی کشور، جهت در اختیار قرار دادن داده‌های اندازه‌گیری موج اعلام می‌دارد.

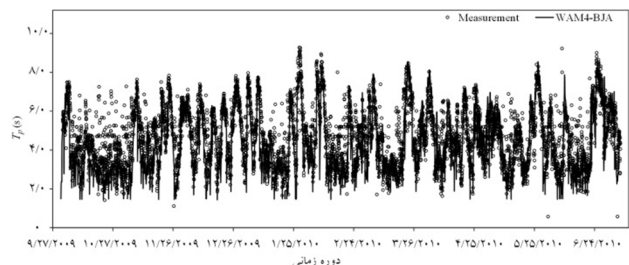
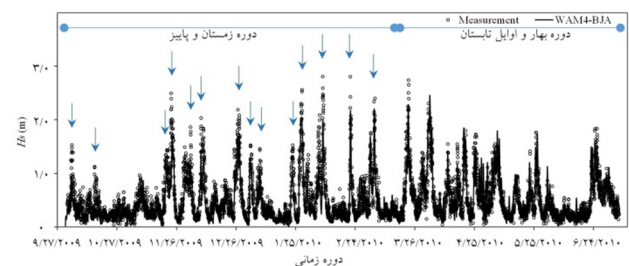
## منابع

کاظمی‌نژاد، م.ح.؛ مظاهری، س.؛ خانی‌پور، م.؛ عرفانی، م.، ۱۳۹۴، ارزیابی مدل WAVEWATCH III در خلیج فارس، شماره انتشارات: ۰۱-۱۰۷-۳۹۴، انتشارات پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، صفحات ۵۵-۱۰۴.

Ardhuin, F.; Chapron, B.; Collard, F., 2008. Ocean swell evolution from distant storms. Nature Geoscience.  
Bidlot, J.R.; Abdalla, S.; Janssen, P.A.E.M., 2005. A revised formulation for ocean wave dissipation in CY25R1. Technical Report Memorandum R60.9/JB/0516, Research Department, ECMWF,



شکل ۳: مقایسه مقادیر الف (ارتفاع و ب) پریرود موج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در ایستگاه لاوان



شکل ۴: مقایسه مقادیر الف (ارتفاع و ب) پریرود موج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در ایستگاه فارور

## ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از داده‌های باد پیش‌بینی عملیاتی GFS، روش‌های مختلف آخرین نسخه از مدل WW III برای پیش‌بینی امواج در خلیج فارس مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از روش‌های WAM3 و TC، WAM4-BJA برای مدل‌سازی انرژی ورودی باد و استهلاك موج مشاهده شد که نتایج حاصل از این روش‌ها تفاوت اندکی با یکدیگر دارند؛ به طوری که عمدتاً نتایج

- Lee, H.S., 2015. Evaluation of WAVEWATCH III performance with wind input and dissipation source terms using wave buoy measurements for October 2006 along the east Korean coast in the East Sea, *Ocean Engineering*, 100: 67-82.
- Mazaheri, S.; Kamranzad, B.; Hajivalie, F., 2013. Modification of 32 years ECMWF windfield using QuikSCAT data for wave hindcasting in Iranian Seas. *Journal of Coastal Research*, SI 65: 344-349.
- Mentaschi, L.; Besio, G.; Cassola, F.; Mazzini, A., 2015. Performance evaluation of WavewatchIII in the Mediterranean Sea, *Ocean Modelling*, 90: 82-94.
- Miles, J.W., 1957. On the generation of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 185-204PP.
- Moeini, M.H.; Etemad-Shahidi, A.; Chegini, V., 2010. Wave modelling and extreme value analysis off the northern coast of the Persian Gulf, *Applied Ocean research*, 32: 209-218.
- Montoya, R.D.; Osorio Arias, A.; Ortiz Royero, J.C.; Ocampo-Torres, F.J., 2013. A wave parameters and directional spectrum analysis for extreme winds, *Ocean Engineering*, 67: 100-118.
- Snyder, R.L.; Dobson, F.W.; Elliott J.A.; Long, R.B., 1981. Array measurements of atmospheric pressure actuations above surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 102: 1-59.
- Tolman, H.L., 2014. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. NOAA / NWS / NCEP / MMAB.
- Tolman, H.L.; Chalikov, D.V., 1996. Source terms in a third-generation wind-wave model, *Journal of Physical Oceanography*, 26: 497-518.
- WAMDI Group, 1988. The WAM model-A third generation ocean wave prediction model, *Journal of Physical Oceanography*, 18: 1775-1810.
- Reading, U.K.
- Booij, N.; Haagsma, I.G.; Holthuijsen, L.H.; Kieftenburg, A.T.M.M.; Ris, R.C.; Westhuy-sen, A.J.v.d.; Zijlema, M., 2004. SWAN User Manual SWAN Cycle III version 40.41. Delft University of Technology.
- Cavaleri, L., 1994. Wave models and input wind. In: Komen, G.J. (Ed.), *Wave dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge University Press, Cambridge, 259-378PP.
- Chalikov, D.V., 1995. The parameterization of the wave boundary layer. *Journal of Physical Oceanography*, 25 (1): 333-349.
- Chalikov, D.V.; Belevich, M.Y., 1993. One-dimensional theory of the wave boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 63: 65-96.
- Gunther, H.; Hasselmann, S.; Janssen, P.A.E.M., 1992. The WAM model Cycle 4 (revised version), *Deutsch. Klim. Rechenzentrum, Technical Report no. 4*, Hamburg, Germany.
- Hasselmann, S.; Hasselmann, K.; Allender, J.H.; Barnett, T.P., 1985. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography*, 15: 378-391.
- Janssen, P.A.E.M., 1982. Quasilinear approximation for the spectrum of wind-generated water waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 117: 493-506.
- Kazeminezhad, M.H.; Ghavanini, F.A., 2015. Numerical modelling of cyclone-induced waves using WAVEWATCH III, E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands.
- Komen, G.J.; Hasselmann, S.; Hasselmann, K., 1984. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, 14: 1271-1285.