

ارزیابی عملکرد مدل SWAN در پیش‌بینی امواج ناشی از باد خلیج فارس (مطالعه موردی: جزایر فارور و لاوان)

حمید طاهری^۱، محمدحسین کاظمی‌نژاد^۲، عباس یگانه‌بختیاری^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه علم و صنعت ایران، پست الکترونیک:

hamid_taheri@civileng.iust.ac.ir

۲- استادیار، پژوهشکده فناوری و مهندسی دریا، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم‌جوی، پست الکترونیک:

mkazeminezhad@inio.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، پست الکترونیک: yeganeh@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۱۶

* نویسنده مسوول

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۸

چکیده

در این تحقیق به ارزیابی عملکرد مدل SWAN در پیش‌بینی امواج ناشی از باد خلیج فارس با استفاده از روش‌های مختلف پرداخته شد. سه روش مختلف مدل‌سازی با استفاده از فرمولاسیون متفاوت در تولید و زوال انرژی موج، با بهره‌گیری از داده‌های باد CCMP به کار گرفته شد. در انتها، نتایج مدل‌سازی با ارتفاع، پرپود و جهت موج اندازه‌گیری شده در محدوده جزایر فارور و لاوان، حداث سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ مقایسه شدند. نتایج حاصل نشان داد روش WAM4-AB در مقایسه با روش‌های دیگر دارای عملکرد بهتری است. خطای این روش در مدل‌سازی HS در ایستگاه جزایر فارور و لاوان به ترتیب برابر با ۴۴ و ۴۸ درصد است. در مجموع مدل‌سازی با این روش با تخمین دست پایین نتایج به نسبت داده‌های اندازه‌گیری شده همراه بود.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی، داده باد CCMP، SWAN، داده اندازه‌گیری، خلیج فارس.

۱. مقدمه

حل معادلات بسیار و در نظر گرفتن گستره زیادی از پدیده‌های فیزیکی تأثیرگذار در حرکت موج به سمت ساحل، توانست بیش از روش‌های دیگر جهت مدل‌سازی امواج ناشی از باد مورد توجه قرار گیرد. مدل‌های عددی نسل سوم مختلفی بر اساس ایده رشد طیفی موج برای پیش‌بینی مشخصات امواج ناشی از باد تهیه شده‌اند. از بین این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های WAM (WAMDIG, 1988)، SWAN (et al., 2004) و TOMAWAC (Booij et al., 1997) و WAVEWATCH III (Tolman, 1997) اشاره کرد. در ابتدا مدل عددی SWAN تنها قادر به بررسی شرایط موج در حالت مانا و با در نظر گرفتن شبکه‌بندی تمام مستطیلی بوده است، با گذشت

تأثیر امواج بر فعالیت‌های مرتبط با محیط دریا از قبیل ساخت و نگهداری سازه‌های ساحلی و فراساحلی، کشتیرانی و حمل‌ونقل دریایی، حفاظت از سواحل و حفظ محیط‌زیست موجب شده است تا راه‌حل‌های گوناگونی برای تعیین مشخصات موج توسط محققین ارائه شود. اندازه‌گیری‌های میدانی، بررسی‌های تحلیلی، روش‌های تجربی و نیمه تجربی، مدل‌سازی بر اساس روش‌های طیفی-عددی از جمله روش‌هایی هستند که بنا به مقتضیات طرح، مورد استفاده قرار می‌گیرند (گلشنی، ۱۳۸۹). از میان روش‌های بیان‌شده، روش‌های طیفی-عددی با توجه به توسعه فن‌آوری، با

از منطقه چابهار است که بین ارتفاع ۱ تا ۳ متر و پریود ۴ تا ۸ ثانیه قرار دارند. در مطالعات مذکور نشان داد، مدل‌سازی امواج ناشی از باد با استفاده از مدل طیفی عددی SWAN عمدتاً با استفاده از داده‌های باد پایگاه ECMWF و نیز داده‌های باد اصلاح شده این پایگاه انجام شده است. هدف اصلی این تحقیق استفاده از داده‌های باد جدید CCMP^۱ و ارزیابی عملکرد مدل عددی SWAN با بهره‌گیری از این نوع داده میدان باد در منطقه خلیج فارس است. در نهایت نیز نتایج حاصل از مدل‌سازی امواج ناشی از باد، در دو ایستگاه در محدوده جزایر فارور و لاوان با داده‌های اندازه‌گیری شده در این دو محدوده از لحاظ پریود، ارتفاع و جهت موج مقایسه می‌شوند.

۲. مدل عددی موج

در این مطالعه به منظور مدل‌سازی امواج ناشی از باد در منطقه خلیج فارس از مدل عددی SWAN نسخه A ۴۱/۱۰ استفاده گردید. تمام اطلاعات مربوط به سطح آب دریا به نوعی در طیف واریانس موج یا چگالی انرژی موج $E(\sigma, \theta)$ (توزیع انرژی موج بر اساس فرکانس زاویه‌ای و جهت انتشار موج) نهفته است. معمولاً مدل‌های موج، تکامل چگالی کنش موج $N(x, t, \sigma, \theta)$ را بر اساس مکان و زمان، اندازه‌گیری می‌نمایند. چگالی کنش موج به صورت $N = E/\sigma$ تعریف می‌شود و در شرایط حضور جریان محیطی دارای بقا است. این موضوع در مورد انرژی موج صادق نیست (Whitman, 1974). تکامل چگالی کنش موج معمولاً بر اساس معادله تعادلی کنش طیفی موج با در نظر گرفتن جریان محیطی (\bar{U}) به صورت معادله ۱ بیان می‌شود.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \bar{U})N] + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

سمت چپ معادله ۱، مربوط به بخش سینماتیک است. ترم دوم از سمت چپ انتشار موج در فضای مکانی دوبعدی را با در نظر گرفتن سرعت گروهی موج $\vec{c}_g = \partial \sigma / \partial \vec{k}$ برگرفته از معادله پراکنش موج $\sigma^2 = g|\vec{k}| \tanh(|\vec{k}|d)$ نشان می‌دهد که در این روابط، \vec{k} بردار سرعت موج و d عمق آب است. ترم سوم تأثیر جابه‌جایی فرکانس زاویه‌ای در اثر تغییرات در عمق و جریان

زمان و گذر از نسل اول، نسل دوم SWAN محدودیت‌های نسل قبل را نداشته و توانایی در نظر گرفتن شرایط مانا و غیرمانا در صورت نیاز و نیز شبکه‌بندی غیر مستطیلی را جهت محاسبه انتشار موج دارد. در نظر گرفتن پدیده‌های فیزیکی همانند اندرکنش غیرخطی امواج نیز با پیشرفت فرمولاسیون این مدل عددی، سبب ایجاد نسل سوم مدل SWAN گردید. این مدل عددی، فرمولاسیون فرآیندهای فیزیکی ایجاد و زوال موج در آب‌های عمیق همانند اندرکنش چهارگانه موج-موج^۱ و سفیدک رأس موج^۲ را لحاظ می‌کند. در آب‌های کم‌عمق، این فرآیندها با در نظر گرفتن فرمولاسیون برای اصطکاک بستر، اندرکنش سه‌گانه موج^۳ و شکست ناشی از کاهش عمق تکمیل می‌گردد. مدل SWAN به صورت طیفی (در هر فرکانس و جهت)، سیر تکاملی امواج را در مناطق ساحلی محاسبه می‌کند. فراهانی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از شبکه غیرساختاریافته در منطقه خلیج فارس به پیش‌بینی امواج پرداختند. در این تحقیق، محققین از ماژول SW^۴ نرم افزار ایرانی PMODynamic^۵ و از دو منبع باد ECMWF^۶ و NCEP/CFSR^۷ استفاده کردند. در پایان مشخص گردید در ارتباط با ارتفاع موج، شاخص استفاده از منبع باد ECMWF خطای کمتری را در پی خواهد داشت اما در مورد پریود قله طیف این خطا کمی بیش از منبع باد NCEP/CFSR است. رضایی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از مدل عددی SWAN مشخصات موج را با بهره‌گیری از شبکه مستطیلی در بازه زمانی یک ماهه سال ۲۰۰۹ در منطقه قشم و هرمز پیش‌بینی کردند. نقشه‌های هیدروگرافی برای داده عمق و منبع باد ECMWF به‌عنوان ورودی‌های مدل انتخاب شدند. پس از انجام تحقیق مشخص گردید استفاده از فرمولاسیون Janssen در ارتباط با سفیدک رأس موج به نتایج بهتری از مدل منجر می‌شود. Saket و Etemad-Shahidi (۲۰۱۲) در طول مدت ۲۳ سال مابین سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۷ مدل‌سازی را برای منطقه چابهار انجام دادند. آن‌ها از مدل SWAN و داده‌های باد QuickSCAT استفاده کردند و اساس مطالعه را بر مبنای پارامترهای انرژی بنا نهادند. نتایج حاصله نشان داد که بیشتر حجم انرژی، مربوط به موج‌هایی

¹ Quadruplet wave-wave interactions

² Whitecapping

³ Triad wave-wave interactions

⁴ Spectral Wave

⁵ Persian Model for Ocean Dynamics

⁶ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

⁷ National Centers for Environmental Prediction/Climate Forecast System Reanalysis

⁸ Cross-Calibrated Multi-Platform

که در این معادله A و B بستگی به فرکانس و جهت موج و نیز سرعت و جهت باد دارند. تأثیر جریان حاضر در منطقه مورد مطالعه، زمانی در نظر گرفته می‌شود که از سرعت و جهت باد محلی استفاده گردد. ترم A توسط Cavaleri و Rizzoli (۱۹۸۱) با ایجاد فیلتری برای این پارامتر جهت دوری از رشد موج در فرکانسی پایین‌تر از فرکانس Pierson-Moskowitz با استفاده از معادله‌های ۵ و ۶ بیان گردید. برای پارامتر B نیز دو حالت با استفاده از فرمولاسیون ارائه شده توسط Janssen (1989) بر اساس معادله ۱۰ و Komen و همکاران (۱۹۸۴) مطابق معادله ۹ در مدل SWAN در نظر گرفته شده است. در این رابطه θ_w جهت باد، H فیلتر و σ_{PM}^* فرکانس پیک در حالت کاملاً توسعه‌یافته است.

$$A = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{2\pi g^2} (U_* \max[0, \cos(\theta - \theta_w)])^4 H, \quad (5) \text{ و } (6)$$

$$H = \exp\left\{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_{PM}^*}\right)^{-4}\right\}, \quad \sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi$$

در فرمولاسیون WAMcycle3 ارتباط U_{10} و سرعت برشی (U^*) با استفاده از رابطه ۷ مشخص می‌شود:

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (7)$$

که ضریب C_D (ضریب دراگ) توسط (WU 1982) با استفاده از رابطه ۸ به دست آمد.

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.065 \text{ s/m} \times U_{10}) \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (8)$$

دو رابطه به‌صورت اختیاری در ارتباط با رشد نمایی موج به‌وسیله باد در مدل عددی SWAN استفاده می‌شود.

$$B = \max[0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} (28 \frac{U_*}{c_{ph}} \cos(\theta - \theta_w) - 1)] \sigma \quad (9)$$

در رابطه ۹، C_{ph} نمایانگر سرعت فاز و ρ_a و ρ_w به ترتیب چگالی هوا و آب را بیان می‌کنند که در مدل عددی WAMCycle 3 استفاده می‌شود.

متوسط را نشان می‌دهد. ترم چهارم در سمت چپ نیز مربوط به انکسار ناشی از عمق و جریان است. مقادیر C_θ و C_σ عبارت است از سرعت انتشار موج در فضای طیفی. در سمت راست معادله نیز پدیده‌های فیزیکی مؤثر در ایجاد، زوال و یا باز توزیع انرژی موج را نشان می‌دهد. معادله ۲ بازنویسی معادله تعادلی کنش طیفی موج بر اساس مختصات کارتزین با در نظر گرفتن کارایی برای مقیاس کوچک است.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (2)$$

به‌طورکلی شش پدیده علاوه بر اثر گل‌ولای و گیاهان دریایی در راستای تشکیل دادن پارامتر S_{tot} در معادله ۲، حین حرکت موج از آب‌های عمیق به‌طرف ساحل بر اساس معادله ۳ دخالت دارند.

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (3)$$

این ترم‌ها به ترتیب ایجاد و رشد موج بر اثر باد، اندرکنش سه‌گانه و چهارگانه موج، زوال موج بر اثر سفیدک رأس موج، اصطکاک بستر و شکست موج ناشی از کاهش عمق را نشان می‌دهد. در نظر گرفتن اندرکنش چهارگانه امواج در آب عمیق در این نسخه، دلیل نسل سوم بودن مدل عددی مذکور است. پارامتر ایجاد موج ناشی از باد S_{in} و پارامتر سفیدک رأس موج $S_{ds,w}$ از پارامترهای بسیار تأثیرگذار در حرکت موج از آب عمیق به سمت ساحل است. این پارامترها که در آب عمیق و در مراحل ابتدایی شکل‌گیری موج دخالت دارند به نحوی با یکدیگر مرتبط هستند. زیرا تعادل این دو جمله بر رشد موج در مدل‌های عددی مؤثر است (کاظمی‌نژاد، ۱۳۹۵). در مدل طیفی-عددی SWAN روش‌های متفاوتی جهت محاسبه این دو عبارت وجود دارد. با استفاده از تئوری Miles (1957) و Phillips (1957)، ایجاد موج به‌وسیله باد در محیط دریا با استفاده از جمع دو حالت خطی و نمایی به‌گونه معادله ۴ تعریف می‌شود.

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (4)$$

¹ Wind Input

$$\tilde{S} = \tilde{K} \sqrt{E_{tot}} \quad (14)$$

پارامترهای قابل تغییر در رابطه ۱۳ (δ , C_{ds} و p) توسط Komen و همکاران (۱۹۸۴) و Janssen (1991) به وسیله انرژی موج در بهترین شرایط رشد موج برای آب عمیق (در حالت کاملاً توسعه یافته) به دست آمده است. در فرمولاسیون Komen و همکاران (۱۹۸۴) که در مدل WAMcycle3 نیز استفاده گردید، ضرایب δ , C_{ds} و p به ترتیب برابر $10^{-5} \times 2/36$ ، 0 و 4 در نظر گرفته شد که از نسخه A ۴۰/۹۱ به بعد پارامتر δ به صورت پیش فرض براساس نتایج Rogers و همکاران (۲۰۰۳) برابر با ۱ در نظر گرفته شد. Günther و همکاران (۱۹۹۲) در مدلشان ضرایب δ , C_{ds} و p را به ترتیب برابر با $10^{-5} \times 4/10$ ، $0/5$ و 4 قرار دادند که در مدل WAMcycle4 مدنظر قرار داده شد. Alves و Banner (۲۰۰۳) با ارائه رابطه‌ی ۱۵، زوال به وسیله سفیدک رأس موج را در نظر گرفتند.

$$S_{ds,break}(\sigma, \theta) = -C'_{ds} \left(\frac{B(k)}{B_r} \right)^{p/2} (\tanh(kh))^{(2-p_0)/4} \sqrt{gk} E(\sigma, \theta) \quad (15)$$

در معادله ۱۵ رابطه‌ی چگالی $B(k)$ ، طیف اشباع و یکپارچه سمتی است. این پارامتر به طور مثبت با احتمال شکست ناشی از گروه موج همبستگی دارد، که با استفاده از رابطه‌ی ۱۶ به دست می‌آید.

$$B(k) = \int_0^{2\pi} c_g k^3 E(\sigma, \theta) d\theta \quad (16)$$

در معادله ۱۵، پارامتر B_r حد اشباع بوده و برابر $1/75 \times 10^{-3}$ در نظر گرفته می‌شود. ضریب تناسب برابر با $5/100 \times 10^{-5}$ لحاظ می‌شود. زمانی که $B(k) > B_r$ باشد، موج‌ها می‌شکنند و توان p برابر با ضریب واسنجی p_0 مدنظر قرار می‌گیرد. همچنین اگر $B(k) \leq B_r$ باشد، شکستی رخ نمی‌دهد، اما ثابت شده است که مقداری زوال به صورت پسماند وجود خواهد داشت. این موضوع با در نظر گرفتن $p = 0$ به دست آمده است. حدفاصل این دو وضعیت با استفاده از رابطه‌ی ۱۷ توسط Alves و Banner (۲۰۰۳) به دست آمد.

$$p = \frac{p_0}{2} + \frac{p_0}{2} \tanh \left[10 \left(\sqrt{\frac{B(k)}{B_r}} - 1 \right) \right] \quad (17)$$

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{U_*}{c_{ph}} \right)^2 \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \sigma \quad (10)$$

پارامتر β موجود در رابطه ۱۰، ضریب ثابت Miles است که به وسیله ارتفاع بحرانی بدون بعد λ به صورت معادله ۱۱ تخمین زده می‌شود.

$$\begin{cases} \beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \lambda \ln^4 \lambda & , \quad \lambda \leq 1 \\ \lambda = \frac{g z_e}{c_{ph}^2} e^r & , \quad r = kc / |U_* \cos(\theta - \theta_w)| \end{cases} \quad (11)$$

ضریب فن کارمن (κ) مدنظر در رابطه ۱۱ برابر ۰/۴۱ در نظر گرفته شده است و پارامتر Z_e بیانگر زبری موثر سطح است. در صورتی که ضریب λ از مقدار یک بیشتر باشد، پارامتر β که ضریب Miles نام دارد برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. سفیدک رأس موج در وهله اول با استفاده از تیزی موج کنترل می‌شود. فرمولاسیون سفیدک رأس موج به صورت معادله ۱۲ بیان می‌گردد.

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{\sigma}} E(\sigma, \theta) \quad (12)$$

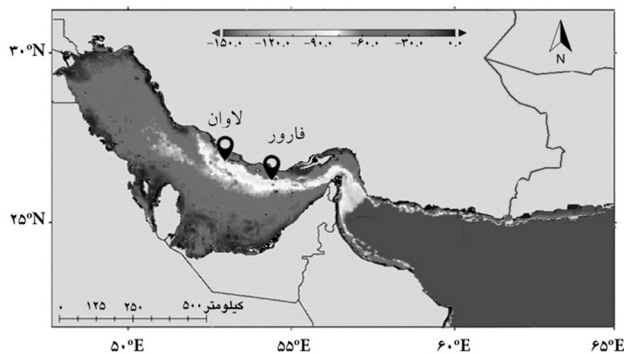
در رابطه ۱۲، Γ ضریب مرتبط با تیزی k عدد موج، $\tilde{\sigma}$ و \tilde{k} به ترتیب مرتبط با فرکانس میانگین و عدد موج میانگین است. مقدار Γ وابسته به فرمولاسیون استفاده شده در باد ورودی است. توصیفات مختلفی با در نظر گرفتن موارد گوناگون همانند تیزی طیف موج، هیدرودینامیک غیرخطی گروه موج و... در جهت افزایش دقت مدل عددی SWAN توسط Komen و همکاران (۱۹۸۴)، Janssen (1991) و Alves, Banner و Yan (۲۰۰۳) و نیز Yan (1987) در رابطه با تخمین پارامتر سفیدک رأس موج پیشنهاد گردیده است. ضریب وابسته به تیزی موج نیز به صورت معادله ۱۳ بیان می‌گردد.

$$\Gamma = \Gamma_{KJ} = C_{ds} ((1 - \delta) + \delta \frac{k}{\tilde{\sigma}} \left(\frac{\tilde{\sigma}}{\tilde{s}_{PM}} \right)^p) \quad (13)$$

در صورتی که $\delta = 0$ ، عبارت بخش دوم داخل پرانتز موجود در رابطه‌ی ۱۳ صفر شده و ضرایب C_{ds} و δ و p پارامتر قابل تغییر بوده و پارامتر Γ به آنچه توسط WAMDIG (1988) عنوان کرد، قابل تغییر است. \tilde{S} نیز بیانگر تیزی موج به صورت کلی و S_{PM} نیز به همین ترتیب بیانگر تیزی موج در طیف $P-M$ است. مقدار عددی \tilde{S}_{PM} برابر $\sqrt{3.02} * 10^{-3}$ در نظر گرفته می‌شود و تیزی موج نیز با استفاده از رابطه‌ی ۱۴ بیان می‌شود.

۳. محدوده مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

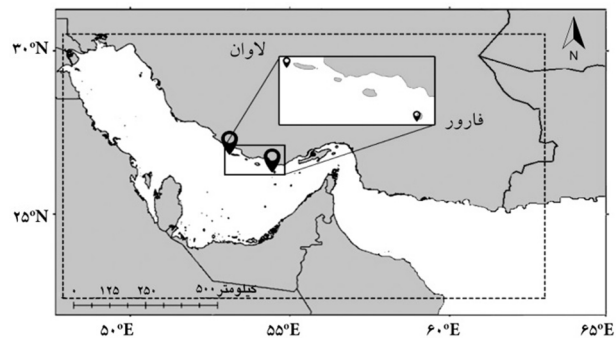
زمانی ۶ ساعت و گام مکانی ۰/۲۵ درجه در طول و عرض جغرافیایی ارائه می‌گردد. CCMP ترکیبی از تمام داده‌های باد ماهواره‌ای برگرفته از سنجش از راه دور و دیگر مشاهدات در دسترس همانند اطلاعات ثبت‌شده از کشتی‌ها، بویه‌ها و... با در نظر گرفتن میدان بادی به‌عنوان پس‌زمینه، است. از جولای ۱۹۸۷ تا دسامبر ۱۹۹۸ میلادی پس‌زمینه مدنظر، داده باد با تحلیل پایگاه ECMWF با عنوان ERA-40^۳ است و از سال ۱۹۹۹ تاکنون میدان باد عملیاتی از این پایگاه است. گرچه ممکن است خطای ناشی از تکرر زمانی و تفکیک پذیری مکانی این باد نتایج را تحت تأثیر قرار دهد، اما با این حال این موضوع نیاز به بررسی و ارزیابی دارد که کدام روش به منظور مدل‌سازی مشخصات موج در این منطقه دارای عملکرد بهتری است.



شکل ۲: نقشه عمق سنجی دامنه محاسباتی و محل اندازه‌گیری موج

در این تحقیق، مدل‌سازی عددی امواج ناشی از باد در منطقه خلیج فارس با استفاده از داده‌های میدان باد CCMP در بازه زمانی ۲۰۰۹/۱۰/۰۱ تا ۲۰۱۰/۰۷/۰۷ برابر با ۶۷۱۵ ساعت متداوم با در نظر گرفتن گام زمانی ۳۰ دقیقه و با بهره‌گیری از مدل طیفی- عددی SWAN انجام شد. گام زمانی انتخاب‌شده براساس تحلیل حساسیت صورت‌گرفته، بین پنج گام زمانی ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ دقیقه انتخاب گردید. بررسی نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد، در صورت استفاده از فرمولاسیون ارائه شده توسط Janssen و Alves و Banner (۱۹۹۱) (۲۰۰۳) به ترتیب برای اندرکنش هوا و آب و سفیدک رأس موج، کاهش گام زمانی تأثیری در بهبود نتایج حاصل از مدل‌سازی ندارد و در مواردی بر خلاف انتظار، منجر به افزایش خطای مدل‌سازی در نقاط مورد مطالعه می‌شود. بررسی‌های بیشتر نشان داد در صورت استفاده از

در این مطالعه به‌منظور در نظر گرفتن اثرات هرچند ناچیز امواج دریای عمان بر امواج ناشی از باد منطقه خلیج فارس، دامنه محاسباتی مورد مطالعه، بین طول جغرافیایی ۴۷/۵۰ تا ۶۳/۵۰ درجه و عرض جغرافیایی ۲۲ تا ۳۰/۵۰ درجه در نظر گرفته شده است تا دامنه محاسباتی، منطقه خلیج فارس و بخش عمده‌ای از دریای عمان را پوشش دهد. شکل ۱ دامنه محاسباتی مدنظر را نمایش می‌دهد. جهت ارزیابی عملکرد مدل عددی، نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده ارتفاع موج شاخص، پرپود و جهت در دو ایستگاه از محدوده فارور و لاوان مقایسه شده است. داده‌های مذکور با گام زمانی ۱ ساعت توسط دستگاه ADCP^۱ نصب‌شده در کف دریا در عمق ۲۵ متری مقایسه شده است. داده‌های مذکور در پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل استان هرمزگان به کارفرمایی سازمان بنادر و دریانوردی اندازه‌گیری شده‌اند. به منظور تهیه داده‌های عمق سنجی ورودی مدل، از داده‌های پایگاه اطلاعات (GEBCO^۲)، با دقت مکانی ۰/۰۵ × ۰/۰۵ درجه استفاده شده است که در شکل ۲ به همراه محل اندازه‌گیری مشخصات موج ارائه شده است.



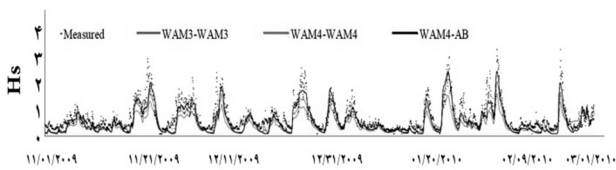
شکل ۱: دامنه محاسباتی و محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری موج

داده‌های ورودی باد، یکی از مهم‌ترین داده‌های ورودی مدل‌های عددی است به‌گونه‌ای که خطای کوچک در این نوع داده‌ها منجر به خطای بزرگ‌تر در مدل‌سازی خواهد شد. همانطور که بیان شد در این تحقیق از داده‌های باد CCMP استفاده شده است. این نوع داده منبعی با داده‌های درازمدت از بردار باد در سطح اقیانوس‌های جهان است. این منبع داده، با گام

^۱ Acoustic Doppler Current Profiler

^۲ General Bathymetric Chart of the Oceans

^۳ ECMWF Re-Analysis



شکل ۳: مقایسه مقادیر H_s مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در ایستگاه فارور

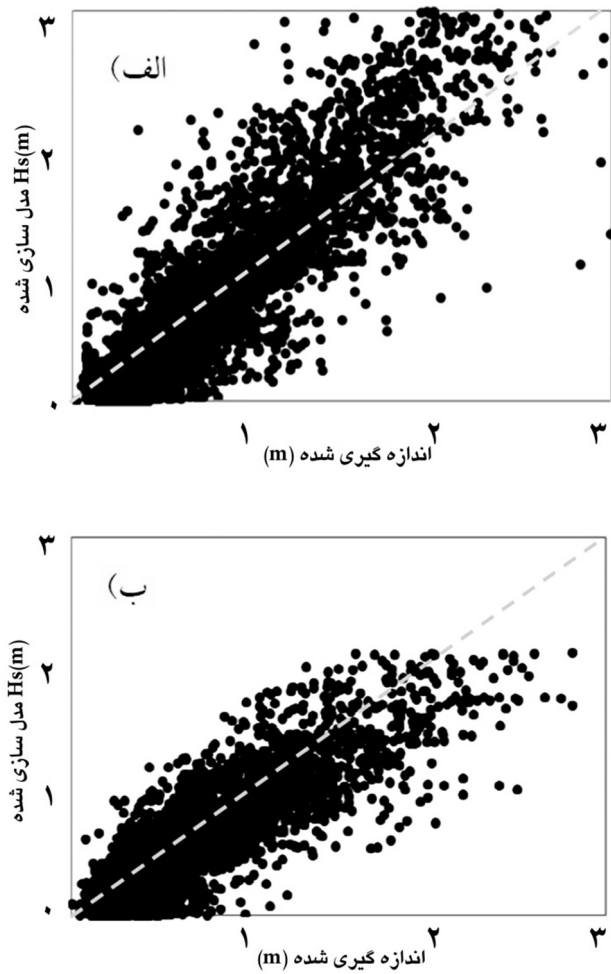
به‌منظور بررسی بیشتر و تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی و دستیابی به خطای مدل، از پارامترهای آماری متوسط پراکندگی نرمال شده (NMB)^۱، شاخص پراکندگی (SI)^۲، ضریب همبستگی (CC)^۳ و میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)^۴ استفاده شده است (Kazeminezhad et al., 2005). مطابق جدول ۱ مشاهده می‌شود در ایستگاه لاوان به‌طور مشخص برای ارتفاع موج شاخص، روش WAM4-WAM4 با کمترین شاخص پراکندگی برابر با ۴۱ درصد همراه است. همانطور که مشخص شد در هر سه روش و در هر دو ایستگاه مدل‌سازی برای ارتفاع موج شاخص و پیروی قله طیف با تخمین دست پایین همراه است که در این بین روش WAM4-AB با پیش‌بینی ۲ و ۳ درصد دست پایین برای ارتفاع موج شاخص و پیروی قله طیف در ایستگاه لاوان و روش WAM3-WAM3 با پیش‌بینی ۱۸ و ۳ درصد دست پایین برای H_s و T_p دارای کمترین انحراف هستند. بر اساس نتایج نشان داده شده در جدول ۱، در مدل‌سازی جهت موج در هر دو ایستگاه به‌جز دو مورد، تخمین صورت گرفته دست بالا بوده و در هر دو ایستگاه روش WAM4-AB دارای کمترین انحراف است. در مدل‌سازی ارتفاع موج شاخص اگرچه روش WAM4-WAM4 همانطور که عنوان گردید دارای کمترین شاخص پراکندگی است، اما با توجه به ضریب همبستگی ۰/۹۲ و میانگین انحراف نرمال شده بیان‌شده، روش WAM4-AB دارای بهترین وضعیت است. این موضوع در ایستگاه فارور نیز صادق بوده و روش WAM4-AB در مدل‌سازی ارتفاع موج شاخص در این ایستگاه نیز بر اساس پارامترهای آماری دارای بهترین وضعیت است. در پیش‌بینی پیروی قله طیف و جهت موج در ایستگاه لاوان روش WAM3-WAM3 با شاخص پراکندگی به ترتیب ۲۴ و ۱۹ درصد و ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۷۰ مدل‌سازی را بهتر از

سایر فرمولاسیون‌ها، خطای مدل‌سازی در برخی موارد تا ۲ درصد کاهش می‌یابد. با این حال به علت ناچیز بودن مقدار کاهش خطا و امکان مقایسه نتایج حاصل از فرمولاسیون‌های مختلف در شرایط یکسان، در تمامی موارد از گام زمانی ۳۰ دقیقه استفاده شد. مدل‌سازی مذکور در طول بازه مدنظر با استفاده از سه روش مدل‌سازی بر اساس پارامتر ایجاد انرژی موج به‌وسیله باد S_{in} و پارامتر استهلاك انرژی موج به‌وسیله سفیدک رأس موج $S_{ds,w}$ انجام گردید (نام‌گذاری روش‌ها براساس WindInput-Wcap است). در روش اول از فرمولاسیون ورودی باد Komen (از اینجا به بعد WAM3) و نیز فرمولاسیون پارامتر سفیدک رأس موج ایشان بر اساس آنچه در بخش دوم ارائه گردید، استفاده شد. در دو روش دیگر تحقیق از فرمولاسیون ورودی باد Janssen (از اینجا به بعد WAM4) استفاده گردید. در روش دوم فرمولاسیون پارامتر سفیدک رأس موج WAM4 و در روش سوم فرمولاسیون پارامتر سفیدک رأس موج Alves and Banner (به اختصار AB) استفاده شد. در طول این سه روش، برای شبکه‌بندی مکانی، مش‌بندی یکپارچه مستطیلی ۰/۰۵ درجه در طول و عرض جغرافیایی در نظر گرفته شد. برای شبکه‌بندی زاویه‌ای نیز، دایره کامل به ۳۶ قسمت ۱۰ درجه‌ای تقسیم گردید تا تمام فضای زاویه‌ای موج پوشش داده شود. محدوده فرکانسی مدنظر نیز مابین ۰/۰۵ تا ۰/۶ هرتز لحاظ شد. در صورت انتخاب ترکیب WAM4-AB، فرمولاسیون Yan (1987) برای ورودی باد فعال می‌گردد (Booij et al., 2004).

۴. نتایج و بحث

پس از مدل‌سازی امواج در بازه زمانی فوق‌الذکر با استفاده از فرمولاسیون‌های مختلف، سری زمانی ارتفاع و پیروی امواج مدل‌سازی و اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های فارور و لاوان مقایسه شدند که یک نمونه از آن در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود کاربرد باد CCMP و سه فرمولاسیون استفاده شده، توانسته است روند تغییرات ارتفاع موج در ایستگاه فارور را به خوبی مدل‌سازی نماید. گرچه تفاوت محسوسی بین نتایج فرمولاسیون‌های مختلف وجود دارد. نتایج حاصله نشان می‌دهند که ارتفاع موج حاصل از روش WAM4-AB در زمان‌های توفانی به مقادیر اندازه‌گیری شده، نزدیک‌تر است.

¹ Normalized Mean Bias
² Scatter Index
³ Correlation Coefficient
⁴ Root Mean Square Error



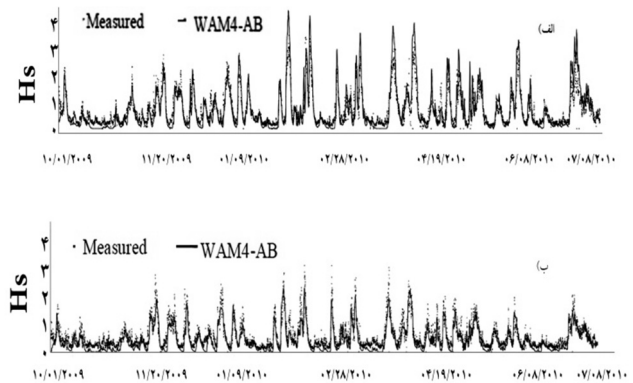
شکل ۵: نمودار پراکندگی (الف) ارتفاع موج شاخص در ایستگاه لاوان، (ب) ارتفاع موج شاخص در ایستگاه فارور

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدل‌سازی عددی امواج ناشی از باد در منطقه خلیج فارس با استفاده از داده‌های میدان باد CCMP با بهره‌گیری از مدل طیفی-عددی SWAN انجام گردید. از سه روش مدل‌سازی بر اساس پارامتر ایجاد انرژی موج به وسیله باد Sin و پارامتر استهلاك انرژی موج به وسیله سفیدک رأس موج Sds,w استفاده شد. از نتایج حاصل از مدل‌سازی مشخص گردید روش WAM4-AB در مقایسه با روش‌های WAM3-WAM3 و نیز روش WAM4-WAM4 دارای عملکرد بهتری در شبیه‌سازی و مدل‌سازی ارتفاع موج شاخص، پریود قله طیف و جهت موج بوده است. در روش WAM4-AB به خصوص در فصل بهار و تابستان، قله‌ها بیش

سایر روش‌ها انجام داده است. در ایستگاه فارور بازهم روش WAM4-AB مدل‌سازی دو پارامتر مذکور را با خطای کمتری نسبت به سایر روش‌ها انجام داده است. نکته حائز اهمیت مدل‌سازی جهت موج در ایستگاه فارور با روش WAM4-AB و با انحراف ۰ درصد است. به‌طورکلی روشی که در آن از فرمولاسیون ورودی باد WAM4 و فرمولاسیون سفیدک رأس موج AB استفاده شده است، دارای بهترین وضعیت از لحاظ خطای مدل‌سازی هر سه پارامتر در محدوده فارور و لاوان در صورت استفاده از میدان باد CCMP است. در مرحله بعد به‌منظور بررسی دقت مدل در مدل‌سازی امواج مهم و مرتفع‌تر، پس از حذف امواج با ارتفاع کمتر از ۱ متر شاخص‌های خطا مجدداً محاسبه شد و در جدول ۲ ارائه گردید. نتایج حاصل بیانگر کاهش محسوس شاخص‌های خطا در تمام روش‌ها و در هر دو ایستگاه برای امواج با ارتفاع بیش از ۱ متر است. به‌طوری‌که در روش WAM3-WAM3، WAM4-WAM4 و WAM4-AB در مدل‌سازی ارتفاع موج شاخص در ایستگاه لاوان خطای مدل‌سازی به میزان ۱۳، ۱۴ و ۱۴ درصد به ترتیب کاهش یافته است. این کاهش برای پریود قله طیف و جهت موج نیز صادق می‌باشد. نتیجه مهمی که از جدول ۲ می‌توان برداشت کرد این است که با حذف امواج کم‌اهمیت‌تر روش WAM4-WAM4 دارای عملکرد بهتری نسبت به جدول ۱ است، به‌گونه‌ای که در مدل‌سازی پریود قله طیف و جهت موج در هر دو ایستگاه دارای بهترین وضعیت هستند.

شکل‌های ۴ و ۵ مقایسه‌ای از وضعیت مدل‌سازی با روش WAM4-AB و داده‌های اندازه‌گیری در کل زمان مدل‌سازی را نشان می‌دهند.



شکل ۴: مقایسه مقادیر (الف) ارتفاع موج شاخص در ایستگاه لاوان، (ب) ارتفاع موج شاخص در ایستگاه فارور

از بقیه روش‌ها خود را بالا می‌کشند و دست پایین بودن مدل‌سازی را کاهش می‌دهند. در مجموع بیشتر تخمین دست پایین این روش، در موج‌هایی اتفاق افتاده است که دارای ارتفاع کمتر از ۱ متر است و از لحاظ اهمیت تأثیر در رتبه‌های پایین‌تر نسبت به سایر داده‌های موج هستند. مقایسه آماری

جدول ۱: مقایسه آماری روش‌های مدل‌سازی در پیش‌بینی پارامترهای موج برای کل امواج

ایستگاه	روش مدل‌سازی	HS				TP				Dir			
		SI %	RMSE m	CC	NMB %	SI %	RMSE s	CC	NMB %	SI %	RMSE Deg	CC	NMB %
لاوان	WAM3-WAM3	۵۲	-۰/۳۴	-۰/۹۱	-۳۷	۲۴	۱/۰۸	-۰/۸۲	-۱۵	۱۹	۴۸/۱۹	-۰/۷۰	۳
	WAM4-WAM4	۴۱	-۰/۲۶	-۰/۹۱	-۱۶	۳۷	۱/۶۵	-۰/۵۰	-۷	۲۰	۵۱/۱۷	-۰/۶۸	۳
	WAM4-AB	۴۸	-۰/۳۱	-۰/۹۲	-۲	۳۶	۱/۶۱	-۰/۵۶	-۳	۲۱	۵۱/۶۲	-۰/۶۶	۲
فارور	WAM3-WAM3	۶۸	-۰/۳۶	-۰/۵۸	-۱۸	۴۱	۱/۹۰	-۰/۶۹	-۳	۲۱	۵۱/۸۴	-۰/۶۱	۳
	WAM4-WAM4	۴۸	-۰/۲۶	-۰/۸۹	-۳۱	۳۵	۱/۶۵	-۰/۵۷	-۹	۲۱	۵۱/۸۹	-۰/۶۱	-۲
	WAM4-AB	۴۴	-۰/۲۳	-۰/۸۹	-۲۴	۳۷	۱/۷۶	-۰/۵۷	-۴	۱۹	۴۸/۰۲	-۰/۵۸	۰

جدول ۲: مقایسه آماری روش‌های مدل‌سازی در پیش‌بینی پارامترهای موج برای امواج با ارتفاع بیش از یک متر

ایستگاه	روش مدل‌سازی	HS				TP				Dir			
		SI %	RMSE m	CC	NMB %	SI %	RMSE s	CC	NMB %	SI %	RMSE Deg	CC	NMB %
لاوان	WAM3-WAM3	۳۹	-۰/۶	-۰/۷۳	-۳۳	۲۸	۱/۶۷	-۰/۲۷	-۷	۵	۱۴/۴۵	-۰/۸۹	۰
	WAM4-WAM4	۲۷	-۰/۴۲	-۰/۷۵	-۸	۱۶	۱/۰۴	-۰/۲۷	-۹	۵	۱۴/۳۴	-۰/۹۰	۰
	WAM4-AB	۳۴	-۰/۵۲	-۰/۷۷	۶	۲۸	۱/۶۹	-۰/۲۸	۵	۶	۱۵/۸۲	-۰/۸۸	-۲
فارور	WAM3-WAM3	۴۸	-۰/۶۷	-۰/۴۹	-۴۳	۲۸	۱/۷۷	-۰/۴۰	-۷	۶	۱۷/۱۱	-۰/۶۰	-۲
	WAM4-WAM4	۳۶	-۰/۵۰	-۰/۶۱	-۲۹	۱۵	۱	-۰/۷۱	-۵	۷	۱۹/۸۲	-۰/۵۲	-۲
	WAM4-AB	۲۸	-۰/۳۹	-۰/۶۱	-۱۶	۲۶	۱/۶۳	-۰/۴۵	۱۴	۷	۱۹/۷۹	-۰/۵۴	-۴

منابع

- Alves, J.H.G.; Banner, M.L., 2003. Performance of a saturation-based dissipation-rate source term in modeling the fetch-limited evolution of wind waves. *Journal of Physical Oceanography*, 33(6): 1274-1298.
- Benoit, M.; Marcos, F.; Becq, F., 1997. Development of a third generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing. In *Coastal Engineering 1996*: 465-478PP.
- Booij, N.; Haagsma, I.J.G.; Holthuijsen, L.H.; Kieftenburg, A.T.M.M.; Ris, R.C.; Van Der Westhuysen, A.J.; Zijlema, M., 2004. SWAN cycle III version 40.41 user manual. Delft University of Technology, 115P.
- Cavaleri, L.; Rizzoli, P.M., 1981. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C11): 10961-10973.
- رضایی، ف؛ تجربه چی، م؛ سلطان‌پور، م؛ امامی، ع، ۱۳۹۳. پیش‌بینی مشخصات موج در محدوده جزایر قشم و هرمز با استفاده از مدل عددی SWAN. یازدهمین همایش بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی تهران.
- فراهانی، ا؛ مصطفی قره‌باغی، ا.ر؛ چنقلو، م.ر، ۱۳۹۳. بررسی تاثیر داده‌های میدان باد ECMWF و NCEP بر پیش‌بینی امواج خلیج فارس با استفاده از نرم افزار PMO Dynamics. یازدهمین همایش بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی تهران.
- کاظمی‌نژاد، م.ح، ۱۳۹۵. ارزیابی کارایی مدل WAVAWATCH III در پیش‌بینی عملیاتی امواج خلیج فارس با کاربرد روش‌های مختلف مدل‌سازی انرژی ورودی از باد و استهلاك موج. نشریه اقیانوس‌شناسی، سال هفتم، شماره ۲۸، صفحات ۲۸-۲۱.
- گلشنی، ع، ا، ۱۳۸۹. پیش‌یابی ۶۰ ساله مشخصات امواج در جنوب خلیج فارس با استفاده از مدل SWAN به روش شبه‌زمانی. نشریه مهندسی دریا، دوره ۶ شماره ۱۲، صفحات ۷۳-۸۷.

- 204.
- Phillips, O.M., 1957. On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics*, 2(5): 417-445.
- Rogers, W.E.; Hwang, P.A.; Wang, D.W., 2003. Investigation of wave growth and decay in the SWAN model: three regional-scale applications. *Journal of Physical Oceanography*, 33(2): 366-389.
- Saket, A.; Etemad-Shahidi, A., 2012. Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran. *Renewable Energy*, 40(1): 90-97.
- Tolman, H.L., 1997. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15. Technical Note.
- Whitman, G.B., 1974. *Linear and nonlinear waves*. Wiley, New York, 636P.
- Wu, J., 1982. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C12): 9704-9706.
- Yan, L., 1987. Improved wind input source term for third generation ocean wave modelling, Royal Netherlands Meteorological Inst., De Bilt, 24P.
- Group, T.W., 1988. The WAM model-A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12): 1775-1810.
- Günther, H.; Hasselmann, S.; Janssen, P.A., 1992. The WAM model cycle 4 (No. DKRZ-TR-4 (REV. ED.)). *Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)*, 26:1.
- Janssen, P.A., 1989. Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves. *Journal of Physical Oceanography*, 19(6): 745-754.
- Janssen, P.A., 1991. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *Journal of Physical Oceanography*, 21(11): 1631-1642.
- Komen, G.J.; Hasselmann, K.; Hasselmann, K., 1984. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, 14(8): 1271-1285.
- Kazeminezhad, M.H.; Etemad-Shahidi, A.; Mousavi, S.J., 2005. Application of fuzzy inference system in the prediction of wave parameters. *Ocean Engineering*, 32(14): 1709-1725.
- Miles, J.W., 1957. On the generation of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 3(02): 185-