

تعیین مشخصه‌های امواج ناشی از باد به کمک مدل عددی WaveWatch-III و مقایسه نتایج آن با مدل Mike21- SW

رضا دزواره رسانی*، پریسا محمدی کله‌سر، محمد حاجی تبار

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/jmst.2019.142502.2186](https://doi.org/10.22113/jmst.2019.142502.2186)

چکیده

امواج ناشی از باد به دلیل انرژی بالای خود یکی از مهم‌ترین پدیده‌های هیدرودینامیکی دریا هستند که از اهمیت ویژه‌ای در مهندسی دریا برخوردار می‌باشند. با توجه به اهمیت پیش‌بینی مشخصات امواج ناشی از باد، در این مطالعه کارایی مدل عددی نسل سوم موج در پیش‌بینی امواج (WaveWatch-III) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج این مدل، با ارتفاع موج بدست‌آمده از ماژول SW نرم‌افزار MIKE مقایسه شده است. به عبارت دیگر در این مقاله روش پیش‌بینی مشخصه‌های موج به کمک دو مدل WW3 و SW ارائه می‌شود. برای مقایسه بهتر نتایج این دو مدل، محیط و سرعت باد یکسان در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تطابق خوبی مدل WW3 با نتایج مدل SW دارد که این تطابق با افزایش عمق آب و فاصله گرفتن از ساحل، کم خواهد شد به نحوی که در آب‌های عمیق (عمق آب تقریبی ۵۰۰ متر) و در فواصل دور از ساحل (۵۰ کیلومتری از ساحل)، مدل SW مقادیر بیشتر و محافظه‌کارانه‌تری برای مشخصات موج پیش‌بینی می‌کند. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مدل WW3 مدت زمان بیشتری می‌بایست صرف کند تا به حالت پایدار برسد.

واژه‌های کلیدی: امواج ناشی از باد، پیش‌بینی امواج، مدل نسل سوم WW3، نرم‌افزار تجاری MIKE21

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: rdezvareh@nit.ac.ir

۱. مقدمه

امواج ناشی از باد به دلیل انرژی بالای خود یکی از مهم‌ترین پدیده‌های هیدرودینامیکی دریا هستند که از اهمیت ویژه‌ای در مهندسی دریا برخوردار می‌باشند. 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. پیش‌بینی‌های اولیه‌ای از وضعیت دریا به صورت دستی بر اساس روابط تجربی بین وضعیت فعلی دریا، شرایط باد مورد انتظار، مدت زمان رسیدن، و جهت انتشار موج انجام شده است (Wittmann, Paul and Mike Clancy, 2004). همچنین در سال ۱۹۲۰ با استفاده از مشاهدات از راه دور موج، پیش‌بینی شده است (Robert Montagne, 1922). در طول دهه پنجاه و شصت میلادی، بسیاری از زمینه‌های نظری لازم برای توصیف عددی تکامل موج به نقد و بررسی گذاشته شد. دانشمندان طی این بررسی‌ها به این نتیجه رسیدند که بهترین توصیف برای ماهیت تصادفی شرایط دریا استفاده از تجزیه طیفی است که در آن انرژی امواج به صورت قطاری از موج که هر کدام جهت و پرپود خاص خود را دارند، تعریف می‌شود. این رویکرد اجازه داد که پیش‌بینی‌های متفاوتی از موج‌های محلی و دورا صورت پذیرد. اولین مدل عددی بر اساس تجزیه طیفی شرایط دریا در سال ۱۹۵۶ توسط سازمان هواشناسی فرانسه اجرا شد و در شمال آتلانتیک متمرکز بود (Gelci et al., 1957). در دهه ۷۰ میلادی اولین مدل نیمکره‌ای موج با نام مدل اقیانوس موج طیفی (SWOM) در مرکز اقیانوس شناسی Fleet ارائه شد. امروزه با استفاده از ترکیب مدل‌های ریاضی، میدان باد و داده‌های میدانی دیگر می‌توان پارامترهای مهم موج از قبیل ارتفاع موج، پرپود موج و انرژی موج را به دست آورد. در این راستا هر چه مطالعات مربوط به داده‌های باد که به‌عنوان مهم‌ترین ورودی مدل موج شناخته می‌شود، دقیق‌تر باشد، می‌تواند منجر به پیش‌بینی دقیق‌تری

از پارامترهای موردنظر امواج و وضعیت اقیانوس شود. همچنین در پیش‌بینی این پارامترها استفاده از مدل‌های ریاضی کامل‌تر با در نظر گرفتن شرایط واقعی بیشتر، می‌تواند موجب افزایش دقت پیش‌بینی گردد. به‌طور کلی در پیش‌بینی امواج و پارامترهای مرتبط با آن‌ها از مدل‌های نیمه تجربی، تجربی و مدل‌های کامل ریاضی استفاده می‌شود. این مدل‌ها در حال توسعه می‌باشند و در آن‌ها سعی می‌شود شرایط دریا و اقیانوس به شرایط واقعی نزدیک‌تر شود. در میان روش‌های مختلف، مدل‌های عددی-طیفی را می‌توان به‌عنوان پیچیده‌ترین و البته دقیق‌ترین روش‌های تخمین مشخصات امواج ناشی از باد نام برد. در این راستا مدل‌های عددی نسل سوم مختلفی نظیر مدل‌های SWAN (Booij et al., 2004)، WAM، WaveWatch-III (WAMDI Group, 1988) و (Tolman, 2009) که بر مبنای حل معادله تعادل طیف چگالی کنش موج استوار هستند، ارائه شده‌اند. این معادله بیانگر این است که توسعه امواج ناشی از باد با فرآیندهای فیزیکی مختلفی شامل انرژی ورودی باد، اندرکنش غیرخطی موج-موج و استهلاک امواج کنترل می‌شوند (Lee, 2015).

برای تعیین خصوصیات موج ناشی از وزش باد در مناطقی که اندازه‌گیری محلی امکان‌پذیر نیست دو روش وجود دارد: استفاده از مدل‌های تجربی و یا استفاده از مدل‌های ریاضی. تعیین مشخصات موج با استفاده از مدل‌های ریاضی از اهمیت خاصی برخوردار است و این مدل‌ها به تدریج تکمیل‌تر شده و پیشرفته‌ترین آن‌ها نظیر مدل WAVEWATCH-III (WW3) و مدل MIKE21-SW (SW) هستند.

اگرچه تحلیل ریاضی روشی دربارهی تئوری موج در اواسط قرن نوزدهم انجام گردید لیکن تحلیل عملیاتی موج بطور محدودی صورت گرفت. این فقدان در تحلیل عملیات موج به دو دلیل بوده است، اول آنکه دیده‌بانی نظام‌یافته موج اقیانوسی و گزارش آن‌ها مشکل است و دوم آنکه امواج اقیانوسی جهت بررسی ریاضی بسیار تصادفی می‌باشند. در

بینی مشخصه‌های موج در دریای عمان مورد بررسی قرار گرفته‌است.

مرور مطالعات قبلی نشان می‌دهد که کارایی روش‌های مختلف موجود در مدل WW3 برای مدل‌سازی انرژی ورودی و استهلاک موج، در مناطق مختلف لزوماً یکسان نیستند. با توجه به اینکه از نسخه 3.14 به بعد مدل WW با اضافه شدن جملات چشمه جدید به مدل، امکان مدل‌سازی امواج در نواحی نسبتاً کم‌عمق نیز فراهم شده است، ارزیابی مدل WW3 و SW هر یک به‌تنهایی در بعضی از مطالعات پیشین صورت گرفته، ولی تاکنون مقایسه جامعی از عملکرد این دو مدل انجام نشده‌است. از این‌رو در این مطالعه سعی بر آن است که مقایسه پارامترهای موج حاصل از این دو مدل انجام شود. به عبارت دیگر نقص موجود در تحقیقات پیشین مقایسه مدل جدید WW3 با مدل‌های شناخته‌شده تر است. در این راستا در این مطالعه مدل WW3 با یک مدل تجاری که امروزه در صنعت مهندسی دریا کاربرد دارد مقایسه خواهد شد.

۲. مواد و روش‌ها

در نرم‌افزار MIKE انواع تحلیل‌های هیدرودینامیکی را می‌توان با ماژول‌های مختلف برنامه انجام داد. از معروف‌ترین ماژول‌های برنامه MIKE، MIKE21 است که از آن برای تحلیل جریان‌های دریایی، رسوب‌گذاری و یا تحلیل‌های مرتبط با حوضچه آرامش در بنادر استفاده می‌شود. MIKE21 یک از پیشروترین نرم‌افزارها در مدل‌سازی دوبعدی هیدرودینامیک، امواج، دینامیک رسوبات، کیفیت آب و اکولوژی است. نرم‌افزاری با کیفیت بالا و تضمین خروجی‌ها که در کارهای مهم و پروژه‌های تجاری از آن استفاده می‌شود. مدل نسل سوم SW جایگزین مدل نسل دومی OSW در مجموعه تجاری MIKE21 شده است. این ماژول به اندازه‌ای در صنعت مهندسی دریا حائز اهمیت است که در طرح‌های مختلف سازمان‌های مرتبط با دریا نظیر سازمان

برخی از نظریه‌های پیش‌بینی موج از تحلیل‌های آماری علاوه بر تحلیل‌های ریاضی استفاده می‌گردد. در این مدل‌ها، از مشاهدات آزمایشگاهی و همچنین بررسی موج به‌صورت طیفی استفاده می‌گردد. هرچند علاوه بر این روش‌ها روش‌های دیگری نیز هستند که بر اساس آنالیز ابعادی استوار شده‌اند. در این روش‌ها با استفاده از پارامترهای سرعت باد، زمان وزش باد و طول مکان بادگیر می‌توان به‌پیش‌بینی رفتار موج پرداخت (Lee, 2015).

در میان مدل‌های موج نسل سوم، مدل موج WAM از مشهورترین مدل‌ها می‌باشد که توسط مرکز تحقیقاتی هواشناسی ماکس-پلانک تهیه شده است. در این مدل معادلات انتقال موج بدون هیچ پیش‌فرضی از نظر شکل طیف بیان می‌شود و معادلات به‌صورت صریح حل می‌گردند (CMRC, 2013). در مدل موج WAM می‌توان گام زمانی را به دلخواه انتخاب کرد، شبکه را به‌صورت کلی و یا برای دو ناحیه‌ی خاصی به مدل اعمال نمود، از این مدل در آب‌های کم‌عمق و عمیق استفاده نمود و اثر انکسار جریان و عمق را برای حل در نظر گرفت. در این زمینه Bauer و همکاران (1992) با انجام تغییراتی در محاسبه‌ی انتگرال نوع بولتزمن و تابع چشمه طیف خطی استفاده از تابع نسل سوم WAM را میسر ساختند. مدل موج WW3 که بر پایه‌ی مدل WAM و مدل‌های نسل اولی و دومی WAVEWATCH است، به عنوان جدیدترین مدل نسل سوم شناخته می‌شود و در این مقاله از آن استفاده می‌گردد. مدل موج WW3 هرچند از مدل‌های قبلی پیش‌بینی موج بدست‌آمده است ولی در ساختار مدل، روش‌های عددی و پارامترهای فیزیکی متفاوت است (Tolman, 2009). از جمله کارهای انجام‌شده در ایران می‌توان به مقاله Jafarian و Mohebolhojat اشاره کرد که به بررسی و امکان‌سنجی پیش‌بینی موج در دریای خزر با استفاده از مدل عددی WAM پرداختند. همچنین مقاله Saedi و همکاران را می‌توان نام برد که در آن پیش

که در این رابطه g شتاب گرانشی زمین، d عمق آب، \bar{U} بردار سرعت جریان و \bar{k} بردار عدد موج با اندازه k و زاویه θ می باشد. چگالی کنش موج (N) مطابق رابطه زیر با چگالی انرژی موج (E) در ارتباط است.

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (2)$$

معادله حاکم بر کنش موج در MIKE21 SW در هر دو مختصات دکارتی یا کروی می تواند تعریف شود. در مختصات دکارتی این معادله مطابق رابطه زیر است.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (3)$$

که در این رابطه $N(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$ چگالی کنش موج، t زمان، $\bar{x} = (x, y)$ محورهای مختصات دکارتی، $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ سرعت انتشار گروهی موج در فضای چهار بعدی \bar{x} ، σ و θ است. S ترم اصلی برای معادلات تعادل انرژی است. ∇ یک عملگر دیفرانسیل چهار بعدی در فضای \bar{x} ، σ و θ می باشد. مشخصات سرعت های انتشار موج با توجه به روابط سینماتیک خطی به ترتیب ذیل است.

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{c}_g + \bar{U} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k} + \bar{U} \quad (4)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla_{\bar{x}} d \right] - c_g \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial s} \quad (5)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right] \quad (6)$$

محاسبات و همچنین امکان استفاده در محیط قدرتمند Linux بسیار محبوب بوده و امروزه از کاربرد بسیار زیادی در پیش بینی موج برخوردار است.

این مدل یک مدل نسل سوم کاملاً طیفی است که معادله تعادل طیف چگالی کنش موج $N(t, x; \theta, k)$ را در مختصات کارتزین و کروی حل می کند (k عدد موج، θ جهت، x بردار مکان و t زمان). در دستگاه مختصات کروی (λ : طول جغرافیایی و ϕ : عرض جغرافیایی) این معادله به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + (\cos\phi)^{-1} \frac{\partial}{\partial \phi} (N \cos\phi) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\lambda N) + \frac{\partial}{\partial k} (kN) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\theta N) = \frac{S}{\sigma} \quad (7)$$

$$\dot{\phi} = \quad (8)$$

$$\frac{C_g \cos\theta + U_\phi}{R}$$

$$\dot{\lambda} = \quad (9)$$

$$\frac{C_g \sin\theta + U_\lambda}{R \cos\phi}$$

بنادر و دریانوردی کشور مورد استفاده قرار می گیرد، به نحوی که در پروژه مدلسازی امواج دریا های ایران (ISWM) و پروژه پایش و مطالعات شبیه سازی سواحل کشور (مانیتورینگ)، از نرم افزار MIKE21 و ماژول SW آن استفاده شده است. ماژول SW در MIKE21 به دلیل استفاده از محیط با کاربری آسان در ویندوز نسبت به مدل WW3 ساده تر است اما برخلاف آن کنترل کمتری بر پارامترهای مدل به کاربر داده می شود (DHI Software, 2003).

در MIKE21 SW امواج ناشی از باد با طیف چگالی کنش موج $N(\sigma, \theta)$ معرفی می شود (Zareii, 2017). پارامترهای مستقل مستقل فاز موج به عنوان فرکانس زاویه ای نسبی (ذاتی) (σ) و جهت انتشار موج (θ) انتخاب شده است. ارتباط بین فرکانس نسبی موج و فرکانس زاویه ای مطلق موج (ω) از رابطه پراکنشی موج بدست می آید.

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh kd} = \omega - \bar{k} \cdot \bar{U} \quad (1)$$

در این روابط s هم جهت با زاویه تابش موج (θ) و m عمود بر جهت s می باشد.

از طرف دیگر مدل WW3 یکی از مدل های عددی نسل سوم است که دارای بسته های مختلفی برای محاسبه جملات چشمه ورودی باد و استهلاك موج است و توسط سازمان ملی اقیانوسی و جوی آمریکا (NOAA) و مرکز ملی پیش بینی زیست محیطی (NCEP) توسعه یافته است (Tolman, 2009) و به دلیل امکان دسترسی آزاد، دقت در انجام

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{C_g \tan \phi \cos \theta}{R} \quad (10)$$

عبارات چشمه Sin و Sds 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 مؤثر است. لازم به ذکر است در روش WAM4 پارامتر بندی‌های 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, 2009) پارامتر بندی BJA دقیق‌تر از سایر موارد است و به‌عنوان پیش‌فرض در مدل WW3 انتخاب شده است. روش WAM3 بر مبنای مطالعات Zieger و همکاران در سال ۲۰۱۵ ارائه شده است و در این روش جملات چشمه مربوط به انرژی ورودی باد و استهلاك موج به‌صورت زیر مدل‌سازی می‌شوند:

$$S_{in}(k, \theta) = C_{in} \frac{\rho_a}{\rho_w} \max[0, (\frac{28u_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) - 1)] \sigma N(k, \theta) \quad (11)$$

$$u_* = u_{10} \sqrt{(0.8 + 0.065u_{10})10^{-3}} \quad (12)$$

$$S_{ds}(k, \theta) = C_{ds} \hat{\sigma} \frac{k}{\hat{\alpha}} \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^2 N(k, \theta). \hat{\sigma} = (\overline{\sigma^{-1}})^{-1}. \hat{\alpha} = E \hat{k}^2 g^{-2} \quad (13)$$

انرژی ورودی باد بر مبنای مطالعات Chalikov و Belevich در سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۵ فرمول بندی شده و عبارت استهلاك انرژی موج دارای دو بخش مربوط به فرکانس‌های پایین (رابطه ۱۵) و بالا (رابطه ۱۶) است که روابط کلی آن به‌صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$S_{in}(k, \theta) = \sigma \beta N(k, \theta) \quad (14)$$

$$S_{ds,low}(k, \theta) = -2 u_* h k^2 \varphi N(k, \theta) \quad (15)$$

$$S_{ds,high}(k, \theta) = -a_0 \left(\frac{u_*}{g} \right)^2 f^3 \alpha_n^B N(k, \theta) \quad (16)$$

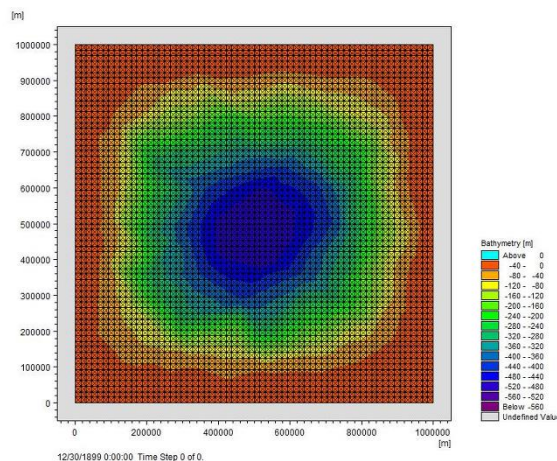
فرکانس بالای موج تعیین می‌شود، φ تابع تجربی (بیانگر مرحله توسعه میدان موج)، α_n تراز بدون بعد

در معادلات فوق R شعاع کره زمین و U_ϕ و U_λ مؤلفه‌های سرعت جریان هستند. در سمت راست معادله انتشار موج، عبارت S دربرگیرنده 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 (Sin)، جمله مربوط به اندرکنش چهارگانه موج-موج (Snl) و جمله مربوط به استهلاك ناشی از سفیدک رأس موج (Sds) است. در آخرین نسخه مدل فرآیندهای فیزیکی حاکم در آب کم‌عمق 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 غیرخطی اندرکنش موج-موج، (Snl) بیانگر نسل سوم بودن مدل عددی است (Hasselmann et al., 1985).

در روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳، C_{in} ضریب ثابت، u_* سرعت برشی باد، ρ_a و ρ_w چگالی هوا و آب، c سرعت فاز، u_{10} سرعت باد در تراز ۱۰ متری، θ و θ_w جهت میانگین موج و باد، C_{ds} ضریب ثابت، $\hat{\alpha}_{PM}$ مقدار $\hat{\alpha}$ در طیف PM، g شتاب ثقل و σ و k به ترتیب فرکانس زاویه‌ای و عدد موج هستند. در روش TC،

در روابط ۱۴، ۱۵ و ۱۶، β پارامتر بدون بعد اندرکنش باد-موج، h مقیاس اختلاط (که بر اساس بخش

به طور کلی داده های میدان ورودی در هر دو مدل موج به چهار گونه می تواند باشد، داده های میدان باد که مهم ترین نوع داده در پیش بینی موج و حل شبکه ی مورد نظر است، داده های میدان جریان، داده های میدان سطح آب و داده های میدان یخ (Rezaie and Sanayei, 2017). در این میان پدیده ی یخ زدگی در اکثر موارد وجود ندارد. میدان جریان در مواردی در نظر گرفته می شود که جریانی از آب به صورت یک جریان اضافه به دامنه حل وارد شود مانند خروجی رودخانه به دریا و یا شرایطی از این وضع که با توجه به دامنه ی حل، میدان جریان خاصی وجود نداشته و از آن صرف نظر شده است. در مورد تغییرات سطح آب نیز (جزر و مد) می توان به منظور افزایش دقت در ادامه کار به عنوان ورودی به مدل موج اضافه شود.



شکل ۱- نقشه عمق یابی و مثلث بندی در SW

موج WW3 به منظور پیش بینی موج، داده های پیش بینی مربوط به میدان باد یعنی سرعت و جهت باد است. این داده ها از طریق استفاده از مدل های پیش بینی باد قابل دستیابی می باشند. در پیش بینی میدان باد می توان از مدل های جهانی مانند GFS و یا ECMWF استفاده نمود. این مدل ها به ترتیب توسط مراکز هواشناسی آمریکا و مرکز ملی پیش بینی هواشناسی اروپا تهیه می شود که در این مقاله از میدان های یکنواخت استفاده شده است. در نسخه ی 3.14 از WW3 داده های مربوط به شرایط مرزی در حالتی کاربرد دارد که از شبکه ی حل

فیلپس 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 (Tolman, 2009).

۳. نتایج

همان طور که اشاره شد هدف اصلی این مقاله بررسی مدل WW3 و مقایسه پارامترهای خروجی آن با مدل SW در یک محیط 1000×1000 km با عمق 0.5 تا 500 متر است (شکل ۱). به منظور اجرای مدل های عددی امواج لازم است که داده های مختلفی در مدل بارگذاری شوند که مهم ترین آن ها داده های عمق سنجی، داده های مرزی و داده های میدان باد در مکان و زمان هستند.

در مدل موج WW3 به دو صورت امکان مشخص کردن ورودی میدان برای حل شبکه ی مورد نظر وجود دارد، استفاده از میدان های یکنواخت و استفاده از میدان های غیر یکنواخت. در اعمال میدان های یکنواخت، سرعت میدان و جهت آن برای کل شبکه تعیین شده و توسط آن مدل به حل معادلات انرژی می پردازد. در میدان های غیر یکنواخت (در حالت واقعی این نوع میدان ها وجود دارند) میدان مورد نظر باید به مدل موج WW3 داده شود و پارامترهای آن در کد مشخص گردد (Hasselmann et al., 1985). اصلی ترین داده ی مورد استفاده در مدل

مشاهده عملکرد روش‌های مختلف و تفاوت نتایج حاصله از هر روش، در شکل ۲ و ۳ مقایسه ارتفاع موج پیش‌بینی شده به ترتیب برای اعماق کم (۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ متری) و عمق‌های بسیار زیاد (۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ متری) با استفاده از هر دو مدل برای دوره زمانی محدودی ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در اعماق کم (۵ تا ۵۵ متری آب) نتایج دو مدل تطابق خوبی دارد، همچنین مطابق شکل ۲، مدل SW بطور کلی زودتر به حالت پایدار می‌رسد، لیکن در مدل WW3 مدت زمان بیشتری نیاز است که ارتفاع موج پایدار بدست آید. بطور مثال در عمق ۳۵ متری آب، مشاهده می‌شود که مدل SW در ساعت دوم وزش باد به حالت پایدار رسیده ولی مدل WW3 در ساعت نهم وزش باد به این مهم دست یافته است. با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق بررسی مدل جدید WW3 بوده است و در واقع از مدل SW مایک به منظور نوعی صحت-سنجی نیز استفاده شده است، بنابراین برابری تقریبی نتایج حاصل از WW3 با مدل SW به خصوص در آب‌های با عمق کمتر از ۵۰ متر، به نوبه خود نشان از صحت نتایج مدل WW3 می‌باشد. در مورد مدل SW نیز از آنجا که یک شرایط ساده دریایی مطابق آنچه در فایل کمکی و آموزشی نرم افزار مایک ارائه شده، در نظر گرفته شده است نتایج قابل استناد و صحیح می‌باشد

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در آب‌های بسیار عمیق اقیانوس مدل SW ارتفاع موج بیشتری نسبت به مدل WW3 پیش‌بینی می‌کند. در مدل WW3 به منظور بررسی نقاط خاص در دامنه‌ی حل می‌توان برای نقاط از پیش تعیین شده، خروجی جدولی شامل داده‌های با فرمت ASCII فراهم آورد. پس از اجرای این برنامه امکان گرفتن خروجی توسط نرم‌افزار از نقاط تعریف شده فراهم

چندبخشی استفاده گردد که نرم‌افزار این کار را به صورت خودکار انجام می‌دهد. در این حالت نرم‌افزار پس از حل یک بخش از ناحیه حل داده‌های خروجی را در مرزها به عنوان ورودی و شرایط مرزی بخش‌های دیگر به فرمت مناسب آماده کرده و به بخش‌های دیگر تخصیص می‌دهد (Tolman, 2009). برای داده‌های مرزی از این حالت نرم‌افزار استفاده شده است.

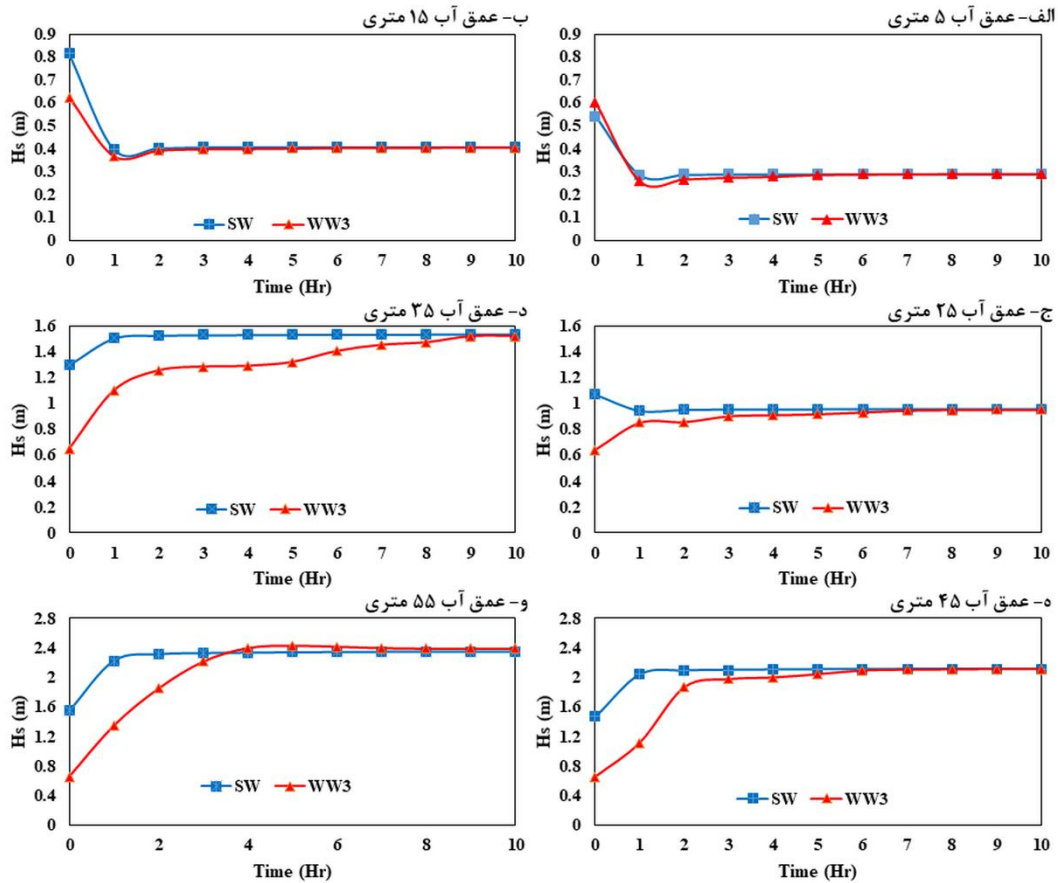
گام زمانی حل نیز در انجام حل عددی بسیار پراهمیت است. انتخاب بهترین گام زمانی با توجه به شبکه‌ی حل و همچنین مدل آشفتگی (توربلانسی) استفاده شده می‌تواند از واگرایی حل و یا گزارش پیش‌بینی غلط حل جلوگیری نماید. در حل انجام شده با توجه به بررسی‌های انجام شده در زمینه استقلال گام زمانی از حل، بیشترین گام زمانی حل قابل انتخاب برای نرم‌افزار ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است مدت زمان حل نیز با توجه به داده‌های ورودی باد که در ادامه توضیح داده خواهد شد، ۲۴ ساعت مشخص و انتخاب می‌شود.

در این مطالعه، فایل عمق سنجی باد به صورت دستی تهیه شده و عمق نقاط از ۰/۵ متر از کنار ساحل تا ۵۰۰ متر در مرکز داده شده است. 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٪ خطای میدان باد می‌تواند منجر به ۱۰ تا ۲۰٪ خطا در مدل‌سازی ارتفاع موج شود (Cavaleri, 1994). در این مطالعه سرعت باد در تمامی گره‌ها به صورت ثابت ۱۵ m/s وارد شده است. همچنین با استفاده از زبان برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB داده‌های ASCII خروجی مدل موج WW3 به صورت تصاویر گرافیکی میدانی و طیفی فراهم شده است.

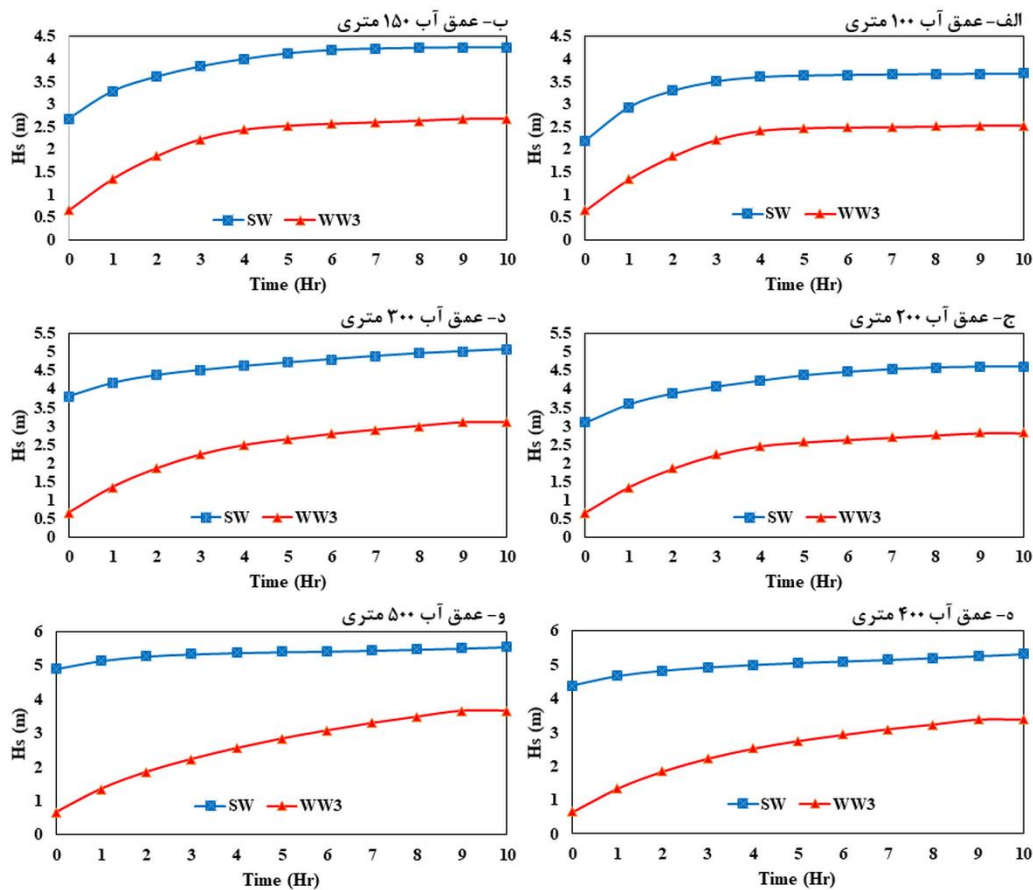
مدل‌سازی عددی امواج با استفاده از سرعت باد ثابت در مدل عددی WW3 و SW انجام شد. به منظور

و برای هر زمان خاص داده های خروجی در آن نقطه تعیین می گردد که می تواند در بررسی دقیق داده های مربوط به نقاط مورد نظر بسیار مفید واقع گردد.

می گردد و جداول مربوط به پارامترهای خاص موج مانند طول موج، ارتفاع شاخص موج، جهت میانگین، فرکانس و ... به صورت ASCII به نمایش در خواهد آمد. این خروجی برای هر نقطه به صورت زمانی بوده



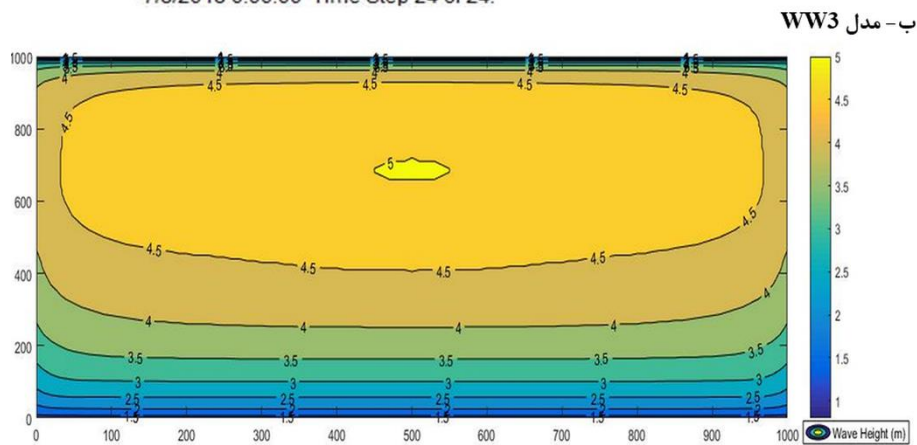
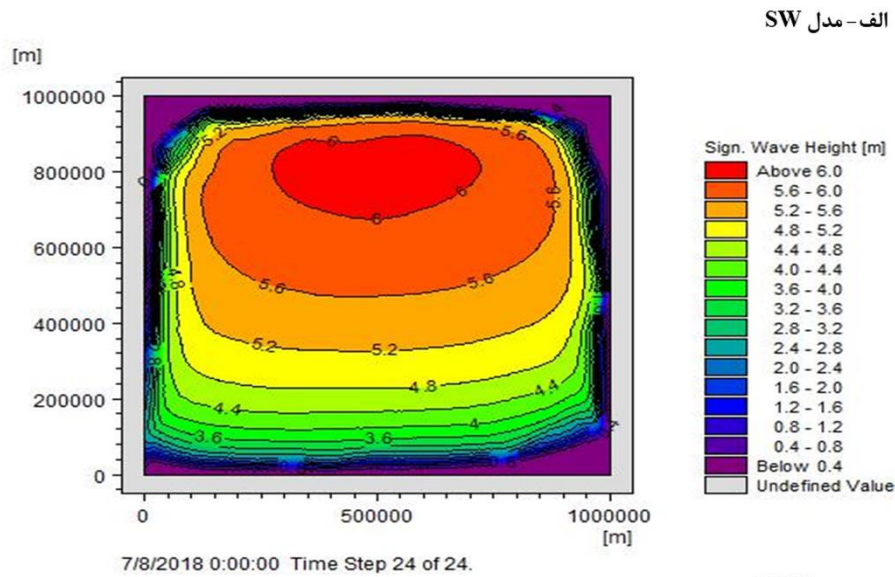
شکل ۲- مقایسه پیش بینی ارتفاع مشخصه موج برحسب زمان در اعماق کم برای مدل های SW و WW3



شکل ۳- مقایسه پیش‌بینی ارتفاع مشخصه موج برحسب زمان در آب‌های عمیق اقیانوس برای مدل‌های SW و WW3

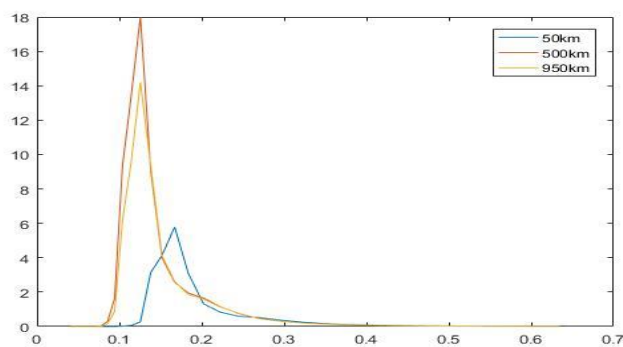
هم‌زمان و ذخیره کردن آن‌ها داشت. از جمله کنترل‌هایی که بر روی نمایش داده‌ها می‌توان داشت شامل نمایش داده‌ها به صورت برداری، کانتور و یا میدانی است. در ادامه چندین تصویر گرافیکی در سری‌های زمانی متوالی به منظور نشان دادن نحوه عملکرد خروجی‌های گرافیکی مدل موج WW3 در شکل ۴ به نمایش درآمده است.

همچنین در ادامه به منظور به دست آوردن خروجی‌های گرافیکی، برنامه‌هایی به زبان MATLAB نوشته شده تا بتوان کنترل بیشتری بر نحوه نمایش داده‌ها داشت. در ادامه‌ی حل مدل موج WW3 این برنامه‌ها فراخوانی شده و اجرا می‌شوند. با اجرای برنامه‌های نوشته شده در این زبان می‌توان کنترل کاملی بر روی نحوه نمایش داده‌ها، رنگ‌بندی، تعداد داده‌های به نمایش درآمده به صورت



شکل ۴- خروجی گرافیکی ارتفاع مشخصه موج، الف- مدل SW، ب- مدل WW3

از دیگر پارامترهای خروجی قابل استحصال از مدل موج WW3 می توان به داده های طیف موج اشاره کرد که در شکل ۵ چنی نمونه از آن به نمایش درآمده است.



شکل ۵- خروجی طیف انرژی موج در WW3

مترتفاوت بسیار اندکی با یکدیگر دارند و تقریباً تطابق خوبی دارند. اما در آب های بسیار عمیق اقیانوسی، عمدتاً مدل SW مقادیر بیشتری برای ارتفاع موج و پرپود موج و طیف موج پیش بینی می کنند. همچنین

۴. بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه از آخرین نسخه مدل SW و WW3 برای پیش بینی امواج استفاده شده است. نتایج حاصل از این روش ها در آب های تا عمق حدودی ۵۰

حاضر نشان داد که این مدل توانایی حل معادلات انرژی را برای ناحیه موردنظر و ارائه‌ی خروجی در مورد وضعیت موج در آب‌های عمیق و در ساعات آتی را با تقریب نسبتاً خوبی دارا می‌باشد. البته ذکر این نکته ضروری است که هدف اصلی این تحقیق بررسی مدل جدید WW3 بوده‌است و در واقع از مدل SW3 میک به منظور نوعی صحت‌سنجی نیز استفاده شده‌است، فلذا به بررسی قابلیت‌های مختلف نرم‌افزار میک و ماژول‌های گوناگون آن در این مقاله پرداخته نشده‌است. پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی به این مهم پرداخته شود.

تشکر و قدردانی:

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/394097/98 اعلام می‌دارند.

منابع

- Bauer, E., Hasselmann, S., Hasselmann, K. and Graber, H.C., 1992. Validation and assimilation of Seasat altimeter wave heights using the WAM wave model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97(C8), pp.12671-12682.
- Booij, N., Haagsma, I.J.G., Holthuijsen, L.H., Kieftenburg, A.T.M.M., Ris, R.C., Van Der Westhuysen, A.J. and Zijlema, M., 2004. SWAN cycle III version 40.41 user manual. Delft University of Technology, 115.
- Cavaleri, L., 1994. Wave models and input wind. *Wave Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, pp.259-378.
- Chalikov, D., 1995. The parameterization of the wave boundary layer. *Journal of Physical Oceanography*, 25(6), pp.1333-1349.
- Chalikov, D.V. and Belevich, M.Y., 1993. One-dimensional theory of the wave boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 63(1-2), pp.65-96.
- Dezvarreh, R., Bargi, K. and Moradi, Y., 2012. Assessment of Wave Diffraction behind the Breakwater Using Mild Slope and Boussinesq Theories. *Analysis*, 5(300), pp.1-5.
- Gelci, R., H. Cazalé, J. Vassal (1957) Sea state

ماژول SW در MIKE21 به دلیل استفاده از محیط کاربردوست در ویندوز نسبت به مدل WW3 ساده‌تر است اما برخلاف آن کنترل کمتری بر پارامترهای مدل به کاربر داده می‌شود. در استفاده از مدل موج WW3 می‌توان شرایط اولیه را در صورت عدم وجود به‌طور آرام تقریب زد و یا با استفاده از سرعت اولیه باد مقدار اولیه موج را پیش‌بینی کرد. از دیگر امکانات موجود در این مدل موج، دریافت داده‌های موج در زمان‌های مشخص به‌عنوان خروجی و ذخیره‌ی آن است. این داده‌ها می‌توانند به‌عنوان شرایط اولیه در حل با گام‌های زمانی بعدی در نظر گرفته شود. شرایط اولیه بکار گرفته‌شده در این پژوهش بر اساس روش سوم بوده و خروجی‌های پیش‌بینی موج در زمان‌های خاص به‌عنوان ورودی در حل گام‌های زمانی بعد مورد استفاده قرار گرفته است اما در نرم‌افزار MIKE این قابلیت وجود ندارد. داده‌های ارتفاع مشخصه‌ی موج حاصل از دو مدل موج در پیش‌بینی نقاط بیشینه موج نزدیک ساحل بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و تنها اختلاف زمانی در آن مشاهده می‌شود. در مدل WW3 پس از انجام حل با توجه به شرایط مرزی و داده‌های ورودی میدان باد، جهت استحصال خروجی‌های متنی و گرافیکی نیاز است چندین برنامه بکار گرفته شود. به‌منظور به دست آوردن خروجی‌های گرافیکی نیاز است با استفاده از نرم‌افزار Grads (یا یک زبان برنامه‌نویسی) و نوشتن کدهای خاص در این برنامه خروجی‌های مدل موج WW3 را به گراف‌ها و نمودار موردنظر تبدیل نموده و به نمایش درآورد. این در صورتی است که مدل MIKE تمامی خروجی‌ها را به‌صورت گراف و بدون نیاز به برنامه‌ای دیگر ارائه می‌دهد.

در پایان می‌توان بیان کرد که به‌منظور پیش‌بینی موج و بررسی میدان‌های باد و اثرات دریا نیاز است از مدل‌های پیش‌بینی موج استفاده شود. از بهترین این مدل‌ها که به‌صورت دسترس‌ی آزاد نیز باشد، می‌توان به مدل نسل سوم WW3 اشاره کرد. که مطالعه

forecasting at Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center. In Symposium on the 50th Anniversary of Operational Numerical Weather Prediction.

Zareii, V. (2017). 'Investigating the Hydrodynamic Status of Mahshahr Export Port by Using MIKE21 Software', *Journal of Marine Science and Technology*, (), pp. -. doi: 10.22113/jmst.2017.44305.

Zieger, S., Babanin, A.V., Rogers, W.E. and Young, I.R., 2015. Observation-based source terms in the third-generation wave model WAVEWATCH. *Ocean Modelling*, 96, pp.2-25.

forecasting. The spectral method (In French), *Bulletin d'information du Comité d'Océanographie et d'Etude des Côtes*, Vol. 9 (1957), pp. 416-435.

Group, T.W., 1988. The WAM model—A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12), pp.1775-1810.

Jafarian, F., Mohebolhojat, A., 1384. The feasibility of short-wave forecasting in the Caspian Sea with the WAM numerical model. *Journal of the Earth and Space Physics (JESP)*, 31(2), pp. 103-131.

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, pp.67-82.

MIKE21 Spectral Wave Module, User guide, DHI software, 2003.

Hasselmann, S. and Hasselmann, K., 1985. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *Journal of Physical Oceanography*, 15(11), pp.1369-1377.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.H. and 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(11), pp.1378-1391.

Rezaie Mazyak, A., Sanayei, M., (2017). Pattern of Wave Height Changes Around of Pontoon's Floating Breakwater. *Journal of Marine Science and Technology*, 16(1): 29-45. doi: 10.22113/jmst.2017.50586

Robert Montagne, The swell forecasting service in Morocco (In French), 1922, *Annales Hydrographiques*, pp. 157-186.

Saedi, D., Zamani AR., Sedaghat, A., 1393. Short-term prediction of wave characteristics in the Oman Sea, the Persian Gulf and part of the Indian Ocean using the numerical model of Iran's waters. ICOPMAS.

Tolman, H.L., 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14. Technical note, MMAB Contribution, 276, p.220.

Wittmann, P.A. and Clancy, M., 2004, June. Thirty years of operational ocean wave

Determination of wind-induced wave characteristics by numerical model WaveWatch-III and compare its results with Mike21- SW

Reza Dezvareh^{*}; Parisa Mohammadi; Mohammad Hajitabar

Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, IRAN

(DOI): [10.22113/jmst.2019.142502.2186](https://doi.org/10.22113/jmst.2019.142502.2186)

Abstract

Wind-induced waves due to their high energy are one of the most important hydrodynamic phenomena in the sea, which are of particular importance in marine engineering. Considering the importance of prediction of wind-induced waveforms, in this study, the efficiency of the third-wave waveguide model in wave prediction (WaveWatch-III) has been investigated and the results of this model have been compared with the wave height obtained from the SW module software MIKE Is. In other words, in this paper, the prediction of wave characteristics is provided by the WW3 and SW models. To better compare the results of these two models, the environment and wind speed are considered to be the same. The results show that the WW3 conforms well to the results of the SW model, which will decrease with increasing water depth and distance from the coast, so that in deep water (approximate depth of water 500 m) and at intervals Offshore (50 km off the coast), the SW model provides more and more conservative data for wave characteristics. Also, the results of this study showed that the WW3 model would take more time to reach a steady state.

Keywords: Wind-induced waves, Wave prediction, Third-generation WW3 model, Commercial software MIKE21.

List of figures

Figure (1). Hydrography and triangular mesh in SW

Figure (2). Comparison of prediction of the significant wave height in shallow water for SW and WW3 models

Figure (3). Comparison of prediction of the significant wave height in deep water for SW and WW3 models

Figure (4). Graphical output of significant wave height: A- SW, B- WW3

Figure (5). Wave energy spectrum in WW3

^{*} Corresponding author, E-mail: rdezvareh@nit.ac.ir