



مرکز بررسی اطلاعات و پژوهش

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی





نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی  
**ICOPMAS 2010**  
 10-8 آذر ماه (تهران)



**مدلسازی عددی موج آبهای کم عمق در نواحی ساحلی دریای عمان (خلیج چابهار)**

مرضیه مرتضی پور ، کارشناس ارشد ، دانشگاه تربیت مدرس ، [mortezapour88@gmail.com](mailto:mortezapour88@gmail.com)

وحید چگینی ، دکترا ، موسسه ملی اقیانوس شناسی ، [vahid.chegini@gmail.com](mailto:vahid.chegini@gmail.com)

سیدعلی آرم سا ، دانشیار ، دانشگاه تربیت مدرس ، [sazarmsa@gmail.com](mailto:sazarmsa@gmail.com)

بهزاد لایقی ، کارشناس ارشد ، مرکز علوم جوی و اقیانوسی ، [layeghi2000@yahoo.com](mailto:layeghi2000@yahoo.com)

کلید واژه: مدل طیفی موج، خلیج چابهار، آبهای کم عمق

**مقدمه**

امواج سطحی ناشی از باد در آب عمیق را می توان به وسیله مدل‌های موج نسل سومی، بر اساس معادله تعادل عمل یا انرژی به خوبی پیش بینی کرد. برخی از این مدل‌ها برای نواحی فلات قاره با اضافه کردن اثرات کاهش ژرفا، انکسار و اصطکاک بستر توسعه داده شدند؛ هرچند این مدل‌ها به طور واقعی نمی توانند برای نواحی ساحلی در مقیاسهای افقی کمتر از 20-30 کیلومتر و عمق آب کمتر از 20-30 متر به علت محدودیت‌های اثرات آب کم عمق و همچنین تکنیک‌های عددی موجود در آنها به کار روند. به طور کلی، در نواحی کم عمق دو دو رویکرد موجود است: رویکرد اول، مدل‌های تجزیه کننده فاز است (phase-resolved) که از معادلات توازن جرم و تکانه استفاده می کنند [2]. حال آنکه دیگر مدل‌ها، از روش فاز میانگین (phase-averaged) به عبارت دیگر از معادله توازن عمل یا انرژی، به علاوه فرایندهای فیزیکی مورد نیاز و از تکنیک‌های عددی مناسب استفاده می کنند. این مدل‌ها بر اساس معادله تعادل انرژی، تغییرات طیف موج را در حوزه های زمانی و مکانی دوباره سازی می کنند که به دو صورت لاگرانژی و اویلری موجودند. در مدل‌های لاگرانژی امواج از آب عمیق به سمت ساحل انتشار و انرژی موج در طول شعاع امواج انتقال می یابد. در مدل‌های اویلری روند تکامل موج روی یک شبکه فرموله شده که از این تکنیک در مدل‌های موج آب عمیق و فلات قاره استفاده می شود. البته این مدل‌ها به علت اغماض از تفرق و همچنین استفاده از نظریه موج خطی برای انتشار امواج در آبهای ساحلی مناسب نیستند. با این ملاحظات، به نظر میرسد که یک مدل فاز میانگین اویلری نظیر SWAN در بسیاری از موقعیتهای میدانی واقعی در مقیاسهای کوچک نتایج قابل قبولی را ارائه دهد. در واقع، مدل SWAN می تواند علاوه بر اثراتی که در مدل‌های دیگر موج محاسبه می شود، انکسار، شکست امواج ناشی از عمق، برهمکنش‌های سه تایی موج-موج (triad wave-wave interactions) و بازتاب موج در مقابل موانع (نظیر خطوط ساحلی یا موج شکنها) را نیز محاسبه کند [1]. همچنین انتشار امواج در دستگاه مختصات دکارتی در منطقه نزدیک ساحل دقت بهتری را نسبت به استفاده از سیستم مختصاتی دستگاه کروی نتیجه می دهد و بکار بردن مدل‌های خاص آبهای کم عمق نظیر SWAN به عنوان مدل درونی (Nested) باعث اصلاح موثر در نتایج می شود.

تا کنون از مدل‌های مختلفی برای پیش بینی شرایط موج در نواحی ساحلی دریای عمان استفاده شده است. از آن جمله مدل WAM که شامل برهمکنش‌های چهارتایی و سه تایی موج-موج، همچنین ترم‌های مربوط به سفیدک راس موج و پراکندگی اصطکاک بستر است را می توان نام برد که برای کاربردهای ساحلی مناسب نیستند. مدل موج طیفی نسل سومی SWAN برای فراهم کردن پیش بینی کامل موج جهت ایمنی ناوبری دریایی، مدیریت سواحل و سازه های ساحلی در نواحی کم عمق ساحلی توسعه داده شده است. در واقع مدل SWAN امواج ناشی از باد، اثرات ناشی از انکسار، برهمکنش‌های سه تایی موج-موج، شکست ناشی از عمق و انعکاس از موانع (نظیر خطوط ساحلی یا موج شکنها) به علاوه آنچه که در مدل‌های دیگر است را محاسبه می کند [1]. با استفاده از شرایط مرزی فراهم شده از شبیه سازی یک مدل درشت توسط خود SWAN حالت دریا برای نواحی آب کم عمق دریای عمان مدلسازی و با اندازه گیریهای میدان باد و داده های موج بویه سازمان بنادر و

Archive of SID در یانوردی مقایسه شده است. این شبیه سازی برای دوره زمانی 7 روزه از 9 تا 15 فوریه 2007 انجام شده است. مقاله حاضر نتایج این شبیه سازی را نشان می دهد.

### معدلات حاکم

در SWAN، مشخصه های موج در ترمهای دو بعدی طیف چگالی کنش (action density) موج حاکم، به وسیله معادله توازن عمل طیفی به صورت زیر توصیف می شوند:

$$\partial N / \partial t + \partial / \partial x C_x N + \partial / \partial y C_y N + \partial / \partial \sigma C_\sigma N + \partial / \partial \theta C_\theta N = S / \sigma \quad (1)$$

که در آن  $\sigma$  فرکانس نسبی (relative frequency)،  $\theta$  جهت موج و  $N$  چگالی کنش موج است که با چگالی انرژی بر فرکانس نسبی برابر است:

$$N(\sigma, \theta, x, y, t) = E(\sigma, \theta, x, y, t) / \sigma \quad (2)$$

جمله اول سمت چپ معادله (1)، آهنگ محلی تغییر چگالی عمل در زمان است. جملات دوم و سوم به ترتیب انتشار چگالی عمل را در فضای جغرافیایی با سرعتهای انتشار  $C_x$  و  $C_y$  در فضای  $x$  و  $y$  را نشان می دهند و جمله چهارم بیان کننده جابه جایی فرکانس نسبی به علت تغییرات در عمق و جریانات با سرعت انتشار  $C_\sigma$  در فضای  $\sigma$  است. جمله پنجم، انکسار ناشی از عمق و جریان در فضای  $\theta$  را با سرعت  $V_\theta$  در فضای  $\theta$  نشان می دهد [3]. در سمت راست معادله نیز جمله  $S = S(\sigma, \theta, x, y, t)$  شامل جملات چشمه و چاه است که نشان دهنده اثرات تولید، پراکندگی و برهمکنشهای غیر خطی موج-موج است [4]:

$$S = S_{\text{phil}} + S_{\text{in}} + S_{\text{nl4}} + S_{\text{nl3}} + S_{\text{ds}} + S_{\text{bf}} + S_{\text{br}} \quad (3)$$

شرح مختصری از فرمولبندی استفاده شده در ترمهای چشمه و چاه مدل SWAN در بخش بعدی آورده شده است. جزئیات بیشتر در راهنمای تکنیکی نرم افزار ارائه شده است.

### باد ورودی

انتقال انرژی باد به امواج بر اساس مکانیزم تشدید فیلیپس و همچنین مکانیزم بازخورد مایلز شرح داده شده است.

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

که  $A$  و  $B$  وابسته به فرکانس و جهت موج، و سرعت و جهت باد هستند.

### پراکندگی

جمله مربوط به پراکندگی انرژی موج با مجموع سه ترکیب مختلف نشان داده می شود: سفیدک راس موج  $S_{\text{ds,w}}$ ، اصطکاک کف  $S_{\text{ds,b}}$  و شکست ناشی از عمق  $S_{\text{ds,br}}$ . این اتلاف به علت شکست موج در آب عمیق بوجود می آید و تاثیر عمده آن بر روی مولفه ای با فرکانس بالا در طیف انرژی موج است. سفیدک راس موج عمدتاً توسط شیب موج کنترل می شود:

$$S_{\text{ds,w}}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} k / \tilde{k} E(\sigma, \theta) \quad (5)$$

که در آن  $\Gamma$  ضریب وابستگی شیب که این مقدار به تعیین و ترکیب باد ورودی مورد استفاده، وابسته است و  $k$  عدد موج و  $\tilde{\sigma}$  و  $\tilde{k}$  به ترتیب فرکانس میانگین و عدد موج میانگین هستند.

برای نواحی فلات قاره با بستر شنی، مکانیزم غالب اصطکاک کف است که معمولاً به صورت زیر بیان می شود:

$$S_{ds,b} = -C_b (\sigma^2 / g^2 \sinh^2 kd) E(\sigma, \theta) \quad (6)$$

که در آن  $C_b$  ضریب اصطکاک کف است.

وقتی امواج به طرف ساحل منتشر می شوند، کم عمقی باعث افزایش ارتفاع موج می شود. وقتی نسبت ارتفاع موج به عمق آب متجاوز از یک مقدار حدی شود، امواج شروع به شکستن و سپس از دست دادن سریع انرژی می کنند. در آبهای بی نهایت کم عمق (ناحیه شکست موج)، این فرایند بر دیگر فرایندها غالب می شود:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = (D_{tot} / E_{tot}) E(\sigma, \theta) \quad (7)$$

که  $E_{tot}$  انرژی کل موج و  $D_{tot} < 0$  آهنگ پخش انرژی کل به علت شکست موج است.

### بر همکنشهای غیر خطی موج-موج

در آب عمیق، برهمکنشهای چهارگانه موج-موج مهمترین عامل تحول طیف موج است. این عامل، انرژی موج را از فرکانس چکادی طیف به فرکانسهای پایین تر (به صورت جابجایی محل چکاد طیف به مقادیر پایین تر) منتقل می کند. این نوع اندرکنش زمانی صورت می گیرد که چهار مولفه موج شرایط تشدید (رزونانس) را به شکل زیر محقق سازند:

$$K_1 + K_2 = K_3 + K_4 \quad (8)$$

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_3 + \sigma_4$$

در آب بسیار کم عمق  $kh \ll 1$  (محدوده شکست امواج)، امواج غالباً دچار پراکنش نمی شوند. به عبارت دیگر سرعت فاز موج از رابطه پراکنش به دست نمی آید و به عمق وابسته است ( $C = \sqrt{gh}$ ). در این شرایط اندرکنش غیرخطی نزدیک به تشدید بین سه مولفه موج رخ می دهد و باعث تحول سریع در طیف موج می شود. اندرکنش سه تایی بین امواج با مشخصه های فرکانسی و عدد موج به صورت زیر اتفاق می افتد:

$$f_1 \pm f_2 = f_3 \quad (9)$$

$$k_1 \pm k_2 = k_3$$

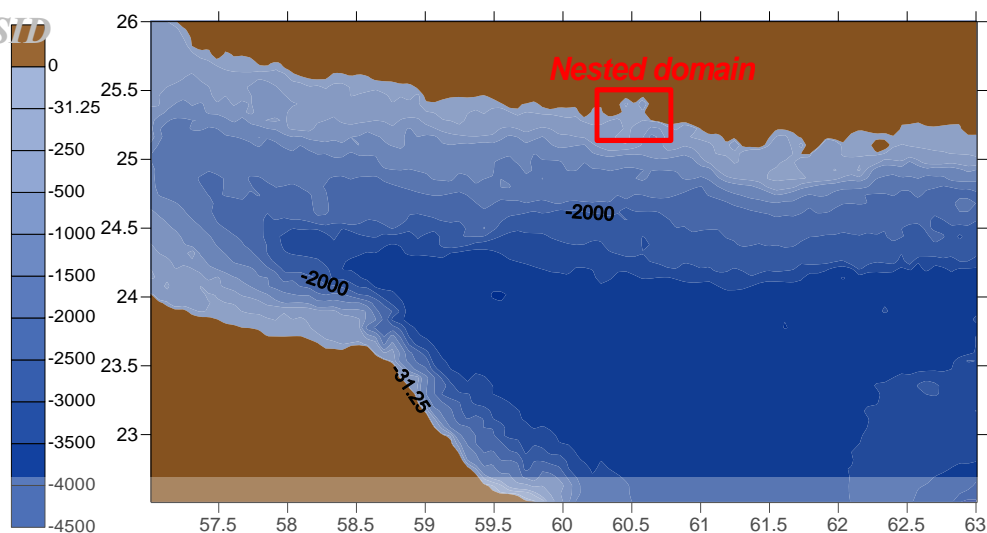
که در آن  $f$  و  $k$  مشخصه عددی فرکانس و بردار عدد موج هستند و هر یک از مولفه های امواج  $(f_1, k_1)$  و  $(f_2, k_2)$  شرایط خطی پراکنش را ارضاء می کنند.

در آبهای خیلی کم عمق، برهمکنشهای سه گانه موج-موج-انرژی را از فرکانسهای پایین تر به فرکانسهای بالاتر انتقال می دهد که اغلب به هارمونیکهای بالاتر می انجامد.

### کاربرد مدل

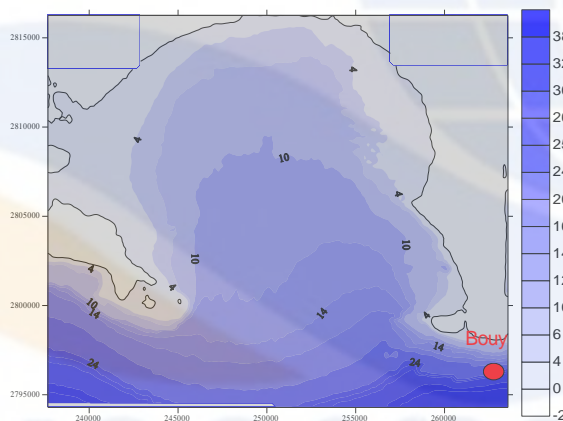
ناحیه مورد مطالعه تقریباً بین عرضهای جغرافیایی  $26^\circ N - 22.5^\circ N$  و  $57^\circ E - 63^\circ E$  واقع شده است. جایی که بویه سازمان بنادر و دریانوردی در میان آن قرار گرفته و از داده های این بویه جهت مقایسه نتایج استفاده شده است.

این ناحیه به عنوان حوزه محاسباتی برای شبکه بندی درشت (coarse) انتخاب شده است (شکل 1). SWAN گزینه ای برای محاسباتی که به صورت لانه ای (nested) انجام می شود را داراست. در چنین اجراهای لانه ای، کاربر می تواند مرزهای فضایی مورد نیاز را از اجراهای قبلی SWAN یا WAM وارد مدل کند [5].



شکل 1) حوزه محاسباتی با شبکه بندی درشت دریای عمان

در مطالعه حاضر، طیف امواج در مرزها با استفاده از شرایط مرزی فراهم شده توسط یک اجرای اولیه مدل SWAN در دوره زمانی 7 روزه از 9 الی 15 فوریه 2007 انجام شده است. در گام اول اجرا، از یک شبکه درشت منظم با فواصل  $\Delta x = \Delta y = 2700 \text{ m}$  جهت فراهم کردن شرایط مرزی دقیق تر برای شبکه لانه ای نهایی استفاده شده است. گسسته سازی در فضای طیفی به صورت 24 بازه 15 درجه ای و 28 بازه فرکانسی از 0/04 Hz تا 1 Hz با گام زمانی 20 دقیقه در نظر گرفته شده است. اندازه شبکه لانه ای  $25 * 21 \text{ km}$  با دقت مکانی 200 و با گام زمانی 100 ثانیه در نظر گرفته شده است (شکل 2).



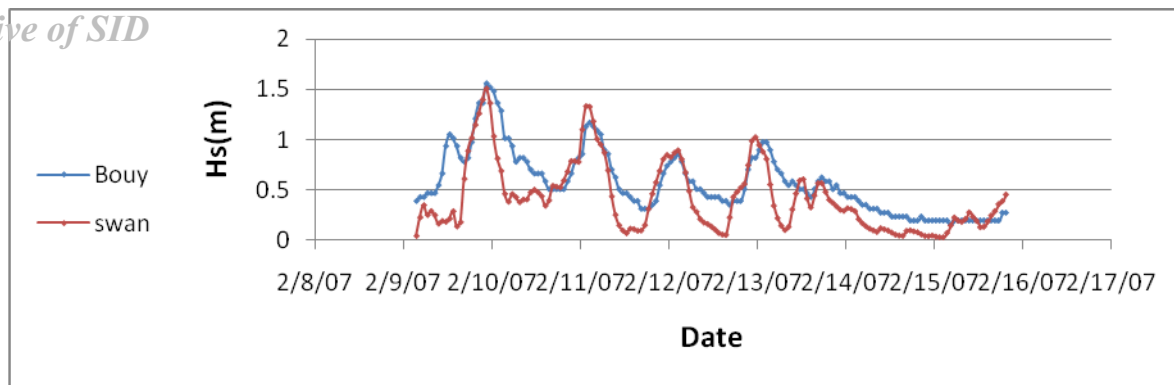
شکل 2) محل بویه و حوزه محاسباتی لانه ای خلیج چابهار

میدان های باد در ارتفاع 10 متری از سطح دریا برای شبکه درشت بر اساس داده های مدل هواشناسی ECMWF (مرکز ملی تحقیقات جوی در اروپا) با گام زمانی 6 ساعته و برای شبکه لانه ای از داده های بویه سازمان بنادر و دریانوردی با گام زمانی 1 ساعته استفاده شده است. موقعیت بویه در شکل 2 نشان داده شده است.

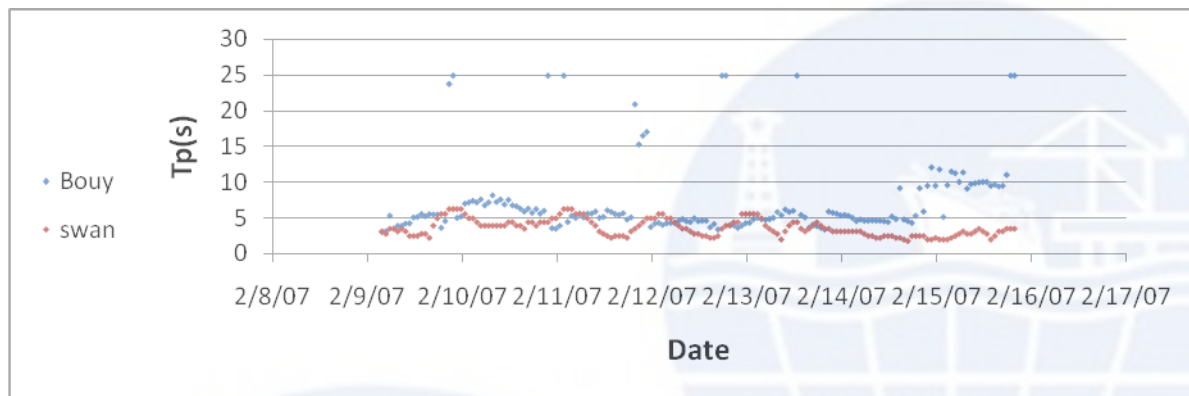
در محاسبات فرایندهای فیزیکی جملات چشمه و چاه در سمت راست معادله 1، گزینه های زیر انتخاب شده اند:

برای باد ورودی و سفیدک راس موج از توضیحات Komen و همکاران (1984)، برای بر همکنشهای چهارتایی موج-موج از بیان Hasselmann و همکاران (1985) و برای اصطکاک بستر از توضیحات Hasselmann و همکاران (1973) استفاده گردید. همچنین بر همکنشهای سه تایی موج-موج Eldeberky (1996) و شکست موج ناشی از عمق مدل Battjes و Janssen (1995) انتخاب گردیدند. و محاسبات در مد 2D و به صورت non-stationary اجرا شدند.

شکل های 3 و 4 مقایسه بین ارتفاع موج عمده  $H_s$  و پیروید موج میانگین  $T_m$  با داده های میدانی در موقعیت بویه (60/65 E, 25/267N) در دوره زمانی 9 الی 15 فوریه 2007 را نشان می دهد.



شکل 3) سری زمانی ارتفاع موج عمده حاصل از SWAN در مقایسه با داده های بویه



شکل 4) سری زمانی ارتفاع موج عمده حاصل از SWAN در مقایسه با داده های بویه

به منظور محاسبه میزان خطا در پیش بینی ارتفاع و پرپود موج، از پارامتر انحراف (Bias) و شاخص پراکندگی (SI) ، ضریب همبستگی (R) و جذر متوسط مربع خطاها (RMSE) استفاده شده است. این پارامترها مطابق روابط زیر محاسبه شده است:

$$\text{Bias} = \bar{y} - \bar{x} \quad (10)$$

$$\text{SI} = (\sqrt{1/N} [\sum [(y_i - \bar{y}) - (x_i - \bar{x})]^2] / \bar{x}) \quad (11)$$

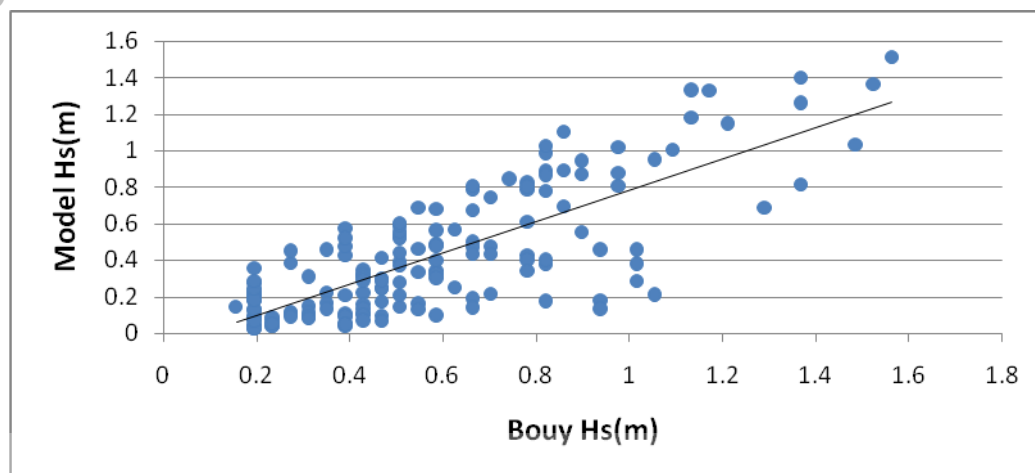
$$\text{RMSE} = \sqrt{1/N (\sum (x_i - y_i)^2)} \quad (12)$$

$$\text{R} = \sum (y_i - \bar{y}) (x_i - \bar{x}) / \sqrt{\sum [(y_i - \bar{y})^2 (x_i - \bar{x})^2]} \quad (13)$$

مقادیر محاسبه شده پارامترهای خطا در جدول (1) مشاهده می شود.

جدول 1) مقادیر پارامترهای مختلف خطا در پیش بینی ارتفاع و پرپود موج

پارامترهای خطا	Bias	SI(%)	R	RMSE
مقدار خطای حاصل از مدل در پیش بینی ارتفاع موج	-0/15	29/8	0/79	0/26
مقدار خطای حاصل از مدل در پیش بینی پرپود موج	-0/37	35/5	0/54	0/41



شکل 5) نمودار پراکندگی ارتفاع موج حاصل از مدلسازی و داده های بویه

### نتیجه گیری

مقایسه ها نشان می دهند که به طور کلی توانایی مدل در تخمین ارتفاع و پریود امواج منطقه خوب بوده و تطابق کیفی مناسبی بین روند تغییرات مشخصه های امواج به دست آمده از مدل و مشخصه های اندازه گیری شده توسط بویه برقرار است. البته به لحاظ کمی، خطای نتایج حاصل از مدل نسبت به نتایج اندازه گیری در حد 20 تا 30 درصد است. این خطاها احتمالاً به دلیل خطای موجود در داده های ورودی مدل نظیر؛ باد و عمق، پایین بودن دقت تفکیک مکانی به کار برده شده (در این تحقیق داده های باد بر روی شبکه با تفکیک مکانی 1.5 درجه به مدل وارد گردیده اند) و خطای موجود در داده های اندازه گیری شده است. بنابراین ضروری است تا حساسیت مدل به هریک از این پارامترها در تحقیقات تکمیلی مشخص و در جهت بهبود دقت نتایج تلاش شود. ضمناً، در صورت استفاده از کامپیوترهای سریع تر که موجب کاهش زمان محاسبه شده و امکان کاهش گام زمانی و تعداد گره های محاسباتی در شبکه لانه ای را فراهم می نمایند، دقت محاسبات و نتایج افزایش می یابد.

### مراجع

- [1]- Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. .A third-generation wave model for coastal regions: 1. model description and validation. J. of Geoph. Research, vol. 104, pp. 7649-7666, April 1999.
- [2]- Dodd, N. .A numerical model of wave run-up, overtopping and regeneration., ASCE, J. of Waterw. Ports, Coast. And Ocean Eng., 124(2), 73-81, 1998
- [3]- Whitam, G.B., .Linear and Non Linear Waves., John Wiley New York, 1974
- [4]- Komen, G.J., cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K. and Hasselmann, S. and Janssen, P.A.E.M., .Dynamics and modelling of Ocean Waves., Cambridge University Press, NY, 1994
- [5]- Banner, M.L. and Young, I.R. .Modelling spectral dissipation in the evolution of wind waves. Part I., J. of Physical Oceanography, 24, No.7, 1550-1571, 1994