

ارزیابی مدل عددی SWAN برای پیش‌بینی مشخصات امواج در دریاچه اریه (Erie)

محمد هادی معینی، کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران *

امیر اعتماد شهیدی، دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران **

* تلفن: ۰۲۱-۸۸۵۵۲۵۶۶، نمابر: ۰۲۱-۸۸۷۱۴۳۳۰، پست الکترونیکی: mhmoeini@Civileng.iust.ac.ir

** تلفن: ۰۲۱-۷۷۲۴۰۳۹۸، نمابر: ۰۲۱-۷۷۲۴۰۳۹۸، پست الکترونیکی: etemad@iust.ac.ir

چکیده:

یکی از مهمترین عوامل در طراحی سازه های دریایی (اعم از ساحلی و فرا ساحلی)، مشخصات امواج ناشی از باد می باشد. لذا پیش بینی هرچه دقیق تر ارتفاع موج از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مقاله برای پیش بینی مشخصات امواج از مدل عددی SWAN استفاده شده است. برای برآورد میزان دقت مدل، اطلاعات میدانی دریاچه اریه (Erie) در سال ۲۰۰۲ مبنای مطالعه قرار گرفته است. در شبیه سازی صورت گرفته از شبکه های مستطیلی برای تعیین هندسه مسأله استفاده شده است. مدل SWAN در حالت نسل سوم و غیرایستا با گام زمانی ۱۰ دقیقه اجرا شده است. فرآیندهای رشد نمایی و خطی موج در اثر انرژی باد، ایجاد سفیدک در رأس موج، اصطکاک بستر، شکست موج ناشی از کاهش عمق و اندرکنش غیرخطی چهارگانه امواج در نظر گرفته شده اند. نتایج مطالعات نشان می دهد که خطای مدل عددی SWAN در مقایسه با داده های میدانی برای پیش بینی ارتفاع موج شاخص حدود ۲ درصد و برای پیش بینی پریرود قله طیف حدود ۱۸ درصد می باشد.

کلید واژه: دریاچه Erie، مدل SWAN، پیش بینی موج، موج شاخص، مدلسازی

۱- مقدمه

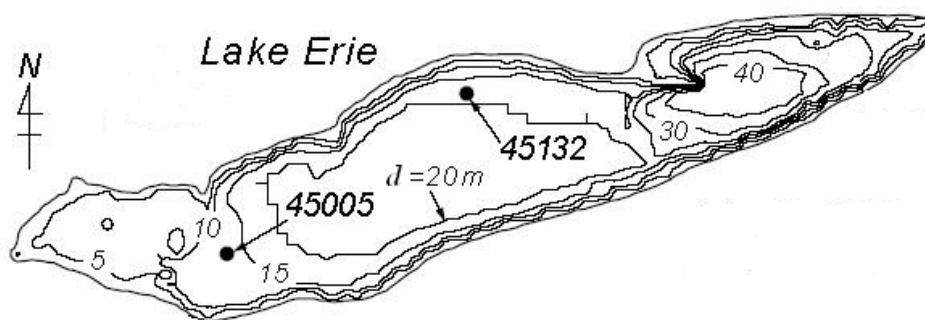
برنامه ریزی برای ایجاد و توسعه فعالیتها و پروژه های اقتصادی در حیطه کارهای دریایی با استفاده از آمار درازمدت شرایط محیطی از جمله امواج صورت می گیرد. بنابراین شناخت دقیق مشخصات امواج ناشی از باد به دلیل انرژی بالای آنها، برای طراحی سازه های ساحلی و فراساحلی مورد نیاز می باشد. برای تهیه مشخصات امواج جهت محاسبات مهندسی باید اطلاعات آماری کافی در طول یک دوره زمانی مناسب موجود باشد. با توجه به اینکه اطلاعات آماری درازمدت مربوط به مشخصات امواج در بسیاری از مناطق موجود نمی باشد، می بایست از یک روش مناسب برای تعیین مشخصات امواج استفاده شود. طبیعی است هر چه میزان دقت روش استفاده شده بیشتر باشد، طرح مورد نظر از قطعیت بیشتری برخوردار خواهد بود. امروزه با توسعه رایانه و بالا رفتن توان پردازنده ها، مدل های ریاضی (عددی) پیچیده ای برای پیش بینی مشخصات امواج ناشی از باد تهیه شده اند. این مدلها بر اساس ایده رشد طیفی موج بنا نهاده شده و فرآیندهای فیزیکی گسترده ای را در بر می گیرند. بنابراین برآورد میزان دقت این مدلها از طریق مقایسه با داده های میدانی مفید می باشد. یکی از مدل های طیفی - عددی موج در حال حاضر مدل عددی

SWAN بوده که برای مناطق ساحلی تهیه شده و می‌تواند در شرایط آزمایشگاهی و اقیانوسی نیز استفاده شود [۱].

Weiqli Lin و دیگران (مرجع [۲]) مدل SWAN را برای شبیه‌سازی امواج در خور Chesapeake به کار برده‌اند. نتایج آنان نشان می‌دهد که SWAN ارتفاع موج شاخص را بیشتر و پریود قله طیف را کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی می‌کند. در شبیه‌سازی آنان تمام ارتفاع امواج زیر ۱ متر بوده است. همچنین مدل SWAN برای شبیه‌سازی امواج ناشی از طوفان در سواحل تایوان استفاده شده است [۳]. در این مقاله سعی شده است تا میزان دقت مدل عددی SWAN از طریق مقایسه نتایج آن با داده‌های میدانی، سنجیده شود. برای این کار از مشخصات امواج در دریاچه Erie استفاده شده است. برای برآورد میزان دقت مدل پارامترهای ارتفاع موج شاخص و پریود قله طیف مد نظر قرار گرفته و پارامتر انحراف و شاخص پراکندگی جهت مقایسه با داده‌های میدانی به کار گرفته شده‌اند.

۲- اطلاعات میدانی

در این مطالعه از اطلاعات هواشناسی و ثبت امواج دریاچه Erie استفاده شده است. این دریاچه یکی از دریاچه‌های مجموعه دریاچه‌های کبیر می‌باشد. طول دریاچه در جهت شرق - غرب حدود ۴۰۰ کیلومتر بین $79^{\circ} 00' W$ و $83^{\circ} 30' W$ طول جغرافیایی و عرض آن در جهت شمال - جنوب حدود ۱۰۰ کیلومتر بین $41^{\circ} 30' N$ و $44^{\circ} 00' N$ عرض جغرافیایی می‌باشد. عمق متوسط این دریاچه ۱۹ متر بوده و عمیق‌ترین قسمت آن دارای ۵۸ متر عمق می‌باشد. از اطلاعات ثبت شده توسط دو بویه در این مقاله استفاده شده است. بویه اول با شناسه 45005 در محلی با طول جغرافیایی $82^{\circ} 25' W$ و عرض جغرافیایی $41^{\circ} 40' N$ و عمق ۱۴/۶ متر و بویه دوم با شناسه 45132 در محلی با طول جغرافیایی $81^{\circ} 13' W$ و عرض جغرافیایی $42^{\circ} 27' N$ و عمق ۲۲ متر واقع شده است. در شکل ۱ دریاچه Erie و محل دو بویه مزبور نشان داده شده است. در هر دو بویه بادسنج در ارتفاع ۵ متر بالای سطح متوسط آب قرار دارد. اطلاعات استفاده شده شامل سرعت و جهت باد، ارتفاع و پریود موج بوده که به صورت ساعتی اندازه گیری شده‌اند. از داده‌های ثبت شده در سال ۲۰۰۲ میلادی برای برآورد میزان دقت مدل SWAN استفاده شده است.



شکل ۱: دریاچه Erie، خطوط تراز بستر و محل دو بویه

۳- مدل عددی SWAN

مدل عددی SWAN یک مدل طیفی موج است که برای محاسبه امواج ناشی از باد در سال ۱۹۹۹ در دانشگاه فنی دلفت هلند توسعه یافته است. این مدل بر اساس طیف جهتی چگالی کنش $N(\sigma, \theta)$ تهیه شده است [۱]. چگالی کنش از تقسیم چگالی انرژی $E(\sigma, \theta)$ بر بسامد نسبی بدست می آید:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (۱)$$

متغیرهای مستقل عبارتند از: بسامد نسبی σ (که در دستگاه مختصات متحرک با سرعت جریان مشاهده می شود) و جهت موج: θ (جهت عمود بر تاج موج در هر مؤلفه طیف). در SWAN تغییر شکل طیف موج بر اساس معادله تعادل کنش طیف در دستگاه مختصات کارتزین به صورت زیر توصیف می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (۲)$$

اولین جمله در سمت چپ این معادله نرخ کلی تغییرات چگالی کنش در زمان را نشان می دهد. جملات دوم و سوم بیانگر انتشار کنش موج در فضای جغرافیایی (با سرعتهای انتشار C_x در جهت x و C_y در جهت y) می باشند. جمله چهارم، انتقال بسامد نسبی را در اثر تغییرات عمق و جریان (با سرعت انتشار C_σ در فضای σ) نشان می دهد. جمله پنجم نیز بیانگر پیچش ناشی از تغییرات عمق و جریان با سرعت انتشار C_θ در فضای θ می باشد.

جمله S در سمت راست معادله (۲)، جمله مربوط به عناصر افزاینده و کاهنده انرژی بوده که نشان دهنده اثرات تولیدموج، استهلاک و اندرکنش غیر خطی می باشد. این جمله شامل رشد خطی و نمایی موج در اثر انرژی باد، استهلاک انرژی در اثر ایجاد سفیدک در رأس موج، اصطکاک بستر و شکست ناشی از کاهش عمق و انتقال انرژی در مقطع طیف در اثر اندرکنش غیرخطی چهارگانه و سه گانه امواج می باشد.

انتگرال گیری از معادله تعادل کنش موج در مدل SWAN، با استفاده از روش تفاضل محدود در پنج بعد زمان، فضای جغرافیایی (x و y) و فضای طیفی (σ و θ) انجام می‌شود. معادلات نیز به صورت عددی و با فرآیند سعی و خطا حل می‌گردند. می‌توان برای جزئیات بیشتر به راهنمای استفاده از مدل SWAN مراجعه نمود [۴].

۳-۱- شبیه‌سازی با SWAN

در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته از سری سوم SWAN نسخه 40.41 (Cycle III version 40.41) استفاده شده است. مدل در حالت نسل سوم و به صورت غیرایستای زمانی (استفاده از سری زمانی برای باد) و در مختصات کارتزین اجرا شده است. برای انرژی ورودی باد از مجموع رشد نمایی از مرجع [۵] و رشد خطی از مرجع [۶] استفاده شده است. برای اندرکنش غیرخطی امواج، اندرکنش چهارگانه فعال شده و مشاهده شد که فعال نمودن اندرکنش سه‌گانه به دلیل کم‌عمق نبودن محل اندازه‌گیری‌ها تغییری در نتایج ایجاد نمی‌کند. پدیده‌های ایجاد سفیدک در رأس موج، اصطکاک بستر و شکست موج ناشی از کاهش عمق نیز در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.

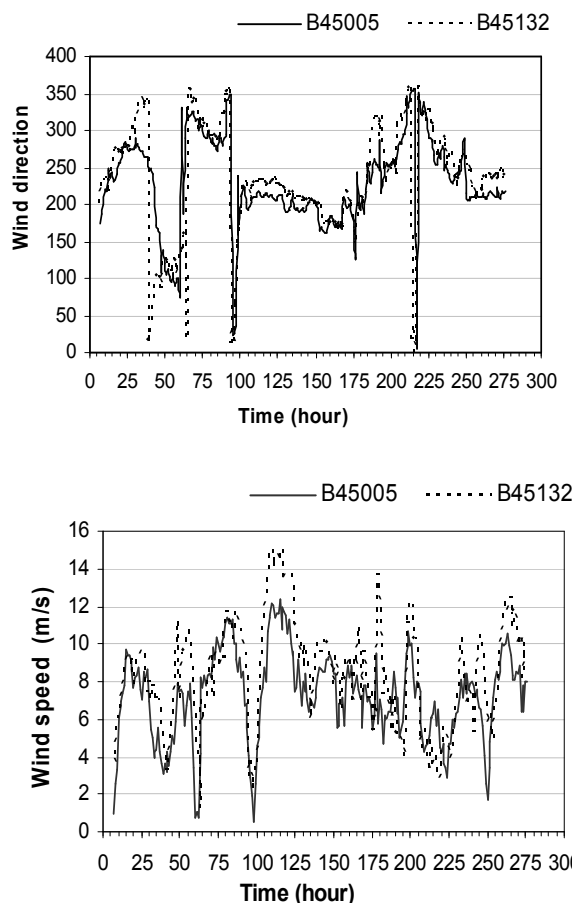
از آنجاییکه SWAN از سرعت باد در تراز ۱۰ متری استفاده می‌کند و سرعت‌های اندازه‌گیری شده در تراز ۵ متری می‌باشند، از رابطه زیر برای اصلاح سرعتها در ورودی SWAN استفاده شده است [۷]:

$$U_{10} = U_z \left(\frac{10}{z} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3)$$

سرعتها به صورت متغیر مکانی و متغیر زمانی به مدل داده شده‌اند. گام زمانی محاسبات ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شده و فضای طیفی به صورت ۴۰ قطعه بسامدی و ۳۶ قطعه جهتی گسسته سازی شده است. فضای جهتی تمام ۳۶۰ درجه را پوشش داده و فضای بسامدی بین ۰/۰۵ و ۱ هرتز در نظر گرفته شده است. این بدان معنی است که حداقل پریود موج مدل شده ۱ ثانیه و حداکثر ۲۰ ثانیه می‌باشد که به خوبی محدوده پریود امواج سطحی دریاچه Erie را پوشش می‌دهد. در شبیه‌سازی انجام شده از رایانه‌ای با پردازنده ۲/۴ گیگاهرتز استفاده شده و زمان اجرای برنامه برای ۱۲ ساعت شبیه‌سازی، حدود ۸ دقیقه می‌باشد.

۴- نتایج و بحث:

برای نشان دادن سری زمانی مشخصات موج اندازه‌گیری شده و مدل شده یک دوره زمانی ۲۷۰ ساعته انتخاب شده است. این دوره از ساعت ۲۱ روز سوم نوامبر ۲۰۰۲ تا ساعت ۲ روز پانزدهم نوامبر ۲۰۰۲ می‌باشد. شکل ۲ تغییرات سرعت و جهت باد را برای این دوره و در هر دو بویه نشان می‌دهد. در جدول ۱ نیز مشخصات داده‌های باد ثبت شده در این رکورد برای هر دو بویه ارائه شده است.



شکل ۲: تغییرات سرعت و جهت باد در هر دو بویه

جدول ۱: مشخصات آماری داده‌های باد ثبت شده در هر دو بویه

بویه	سرعت باد				جهت باد			
	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف از معیار	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف از معیار
45005	0.5	12.2	7.2	2.39	5	357	230.4	60.9
45132	1.3	15.1	8.1	2.94	0	360	230.4	77.0

در شکل ۳ مقادیر ارتفاع موج شاخص (H_s) و پریود قله طیف (T_p) برای داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط SWAN در هر دو بویه رسم شده است. لازم به ذکر است که جهت warm up شدن مدل از نتایج ۴ ساعت اولیه شبیه‌سازی صرف‌نظر شده است.

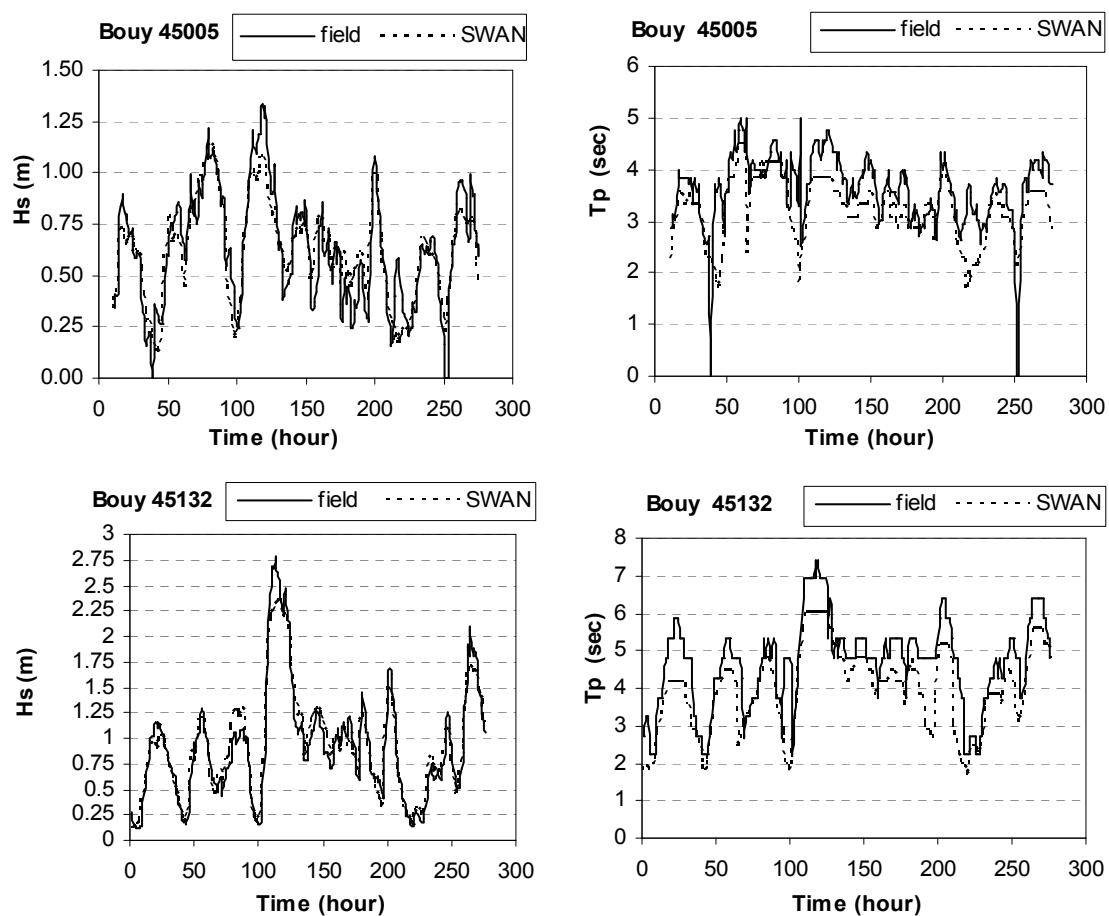
همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود طی این رکورد جهت باد متغیر بوده و از الگوی ثابتی پیروی نکرده است. با توجه به شکل می‌توان گفت بیشتر بادهای از سمت غرب و شمال غربی دریاچه وزیده‌اند. سرعت باد نیز تغییرات بسیاری داشته است. بنابراین می‌توان حساسیت مدل SWAN را نسبت به تغییرات سرعت و جهت باد برآورد نمود. با توجه به شکل ۳ می‌توان دید که SWAN، H_s را بسیار

خوب پیش‌بینی می‌کند، اما مقادیر پیش‌بینی شده برای T_p نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده کمی پایین‌دست می‌باشند. شکل ۴ نمودار پراکندگی H_s و T_p را نشان می‌دهد. برای برآورد یک تخمین کلی از کارایی مدل، از پارامتر انحراف و شاخص پراکندگی برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل‌شده استفاده شده که به صورت زیر حساب می‌شوند:

$$Bias = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (S_i - O_i) \quad (۴)$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i} \quad (۵)$$

در روابط فوق $Bias$ پارامتر انحراف، SI شاخص پراکندگی، N تعداد کل داده‌ها، O_i داده‌های اندازه‌گیری شده و S_i مقادیر بدست آمده از مدل SWAN می‌باشند. جدول ۲ خلاصه تحلیل آماری خطای پیش‌بینی مشخصات موج در دوره زمانی مورد نظر را نشان می‌دهد.



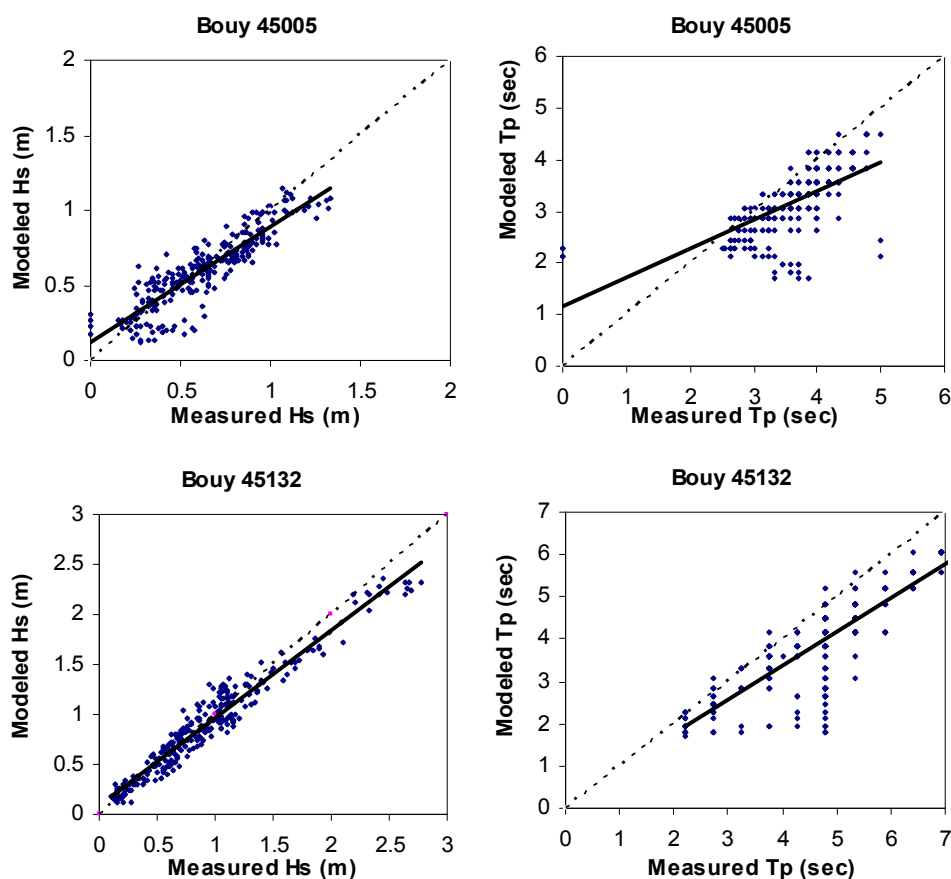
شکل ۳: مقادیر ارتفاع موج شاخص و پریود قله طیف برای داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط SWAN در

هر دو بویه

جدول ۲: خلاصه تحلیل آماری مشخصات امواج در دوره زمانی مدل شده

bouy	Hs (m)			Tp (sec)		
	Ave.	Bias	SI	Ave.	Bias	SI
45005	0.63	0.00	19.64	3.63	-0.39	18.81
45132	0.73	0.01	12.53	4.20	-0.66	20.96
Average	0.68	0.01	16.09	3.91	-0.53	19.89

با توجه به منفی بودن پارامتر انحراف در جدول ۲ برای T_p مشاهده می شود که به طور میانگین SWAN پریود قله طیف را پایین دست پیش بینی می کند. در ضمن حداکثر ارتفاع موج شاخص مدل شده کمتر از مقدار اندازه گیری شده می باشد. دلیل این پدیده می تواند وزش تندبادهای ناگهانی باشد زیرا در شبیه سازی از متوسط باد ۱ ساعته استفاده شده است. همچنین می توان دید که در بویه 45005 در مواردی بویه مقادیر صفر ثبت نموده است. با توجه به اینکه قبل و بعد از این لحظات، این بویه مقادیر غیر صفر ثبت نموده و در همان لحظات نیز بویه 45132 مقادیر غیر صفر ثبت نموده است، به نظر می رسد این مقادیر غیر واقعی باشند. بنابراین مجدداً خطای مدل با حذف مقادیر صفر ثبت شده، محاسبه شده است و نتایج مربوطه در جدول ۳ ارائه شده اند.



شکل ۴: نمودار پراکندگی H_s و T_p برای مقادیر اندازه گیری شده و مدل شده

جدول ۳: خلاصه تحلیل آماری برای دوره زمانی مدل شده با حذف مقادیر صفر

bouy	Hs (m)			Tp (sec)		
	Ave.	Bias	SI	Ave.	Bias	SI
45005	0.64	0.00	18.84	3.68	-0.43	17.15
45132	0.73	0.01	12.53	4.20	-0.66	20.96
Average	0.69	0.01	15.69	3.94	-0.55	19.06

مشاهده می‌شود با حذف مقادیر صفر مقدار متوسط پارامتر انحراف برای H_s تغییری نکرده و برای T_p از -0.53 به -0.55 افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل این است که در موارد حذف شده مقادیر مدل شده بیش از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. این در حالیست که مقدار متوسط شاخص پراکندگی برای H_s از 16.09 درصد به 15.69 و برای T_p از 19.89 به 19.06 درصد کاهش یافته و در مجموع نتایج بهتری گرفته شده است.

۵- خلاصه و نتیجه گیری

مشخصات امواج اندازه‌گیری شده توسط دو بویه در دریاچه Erie با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی SWAN مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که مدل SWAN ارتفاع موج شاخص را به خوبی پیش‌بینی کرده و پریرود قله طیف را کمی پایین‌دست پیش‌بینی می‌کند. همچنین این مدل حداکثر ارتفاع موج شاخص را کمی پایین‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌کند. برای دوره زمانی مدل شده متوسط خطای پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص 16.09 درصد و متوسط خطای پیش‌بینی پریرود قله طیف 19.89 درصد می‌باشد. همچنین مشاهده شد که در برخی ساعات یکی از بویه‌ها مقدار صفر ثبت کرده است. با حذف مقادیر صفر متوسط خطای پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص از 16.09 درصد به 15.69 و متوسط خطای پیش‌بینی پریرود قله طیف از 19.89 به 19.06 درصد کاهش یافت. بنابراین در بررسی عملکرد بویه‌ها این پدیده بهتر است مد نظر قرار گیرد.

۶- مراجع:

- 1-Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. Journal of Geophysical Research 104, 7649-7666.
- 2- Lin W., Sanford L. P., Suttles S. E., 2002. Wave measurement and modeling in Chesapeake Bay, Continental Shelf Research. 22, 2673-2686
- 3-Ou S. H., Liau J. M., Hsu T. W., Tzang S. Y., 2002. Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan, Ocean Engineering, 29, 947-971
- 4- Booij N., Haagsma IJ. G., Holthuijsen L.H., Kieftenburg A.T.M.M., Ris R.C., Van der Westhuysen, A.J., Zijlema M., 2004. SWAN User Manual (Cycle III version 40.41). Delft University of Technology, Delft.
- 5- Komen G.J., Hasselmann S., and Hasselmann K., 1984. On the existence of a fully developed windsea spectrum, J. Phys. Oceanography., 14, 1271-1285
- 6- Cavaleri L., and Malanotte-Rizzoli P., 1981. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. J. Geophysical Res., 86, No. C11, 10,961-10,973
- 7-Shore Protection Manual. (1984). 4th ed., 2vol., U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.