بهبود شبیه‌سازی فرآیند شکست در مدل نسل سوم موج SWAN

سیدعلی سیدعلیپور[۱]، سیدمصطفی سیادت‌موسوی[۲*]، سیدمسعود محموداف[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران، sralipour1994@gmail.com
[۲] دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران، siadatmousavi@iust.ac.ir
[۳] استادیار، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی- تهران، m_mahmoudof@inio.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۸

کلمات کلیدی:
سوان
استهلاک
آب کم‌عمق
شکست امواج
ضریب شکست موج

چکیده

در این مطالعه الگوی شکست پیش‌فرض موجود در مدل عددی SWAN و الگوی شکست ارائه شده توسط Thornton و Guza در سال ۱۹۸۳ بررسی شده و نشان داده شد که با اصلاح ضرایب موجود در این الگو می‌توان بهبود زیادی در شبیه‌سازی امواج در آب کم عمق حاصل نمود. برای انجام این بررسی، امواجی در آزمایشگاه و در ۳ عمق، ۳ پریود و ۳ ارتفاع تولید گردید و با شبیه‌سازی آن‌ها در مدل عددی SWAN به مقایسه ارتفاعات موج تولید شده در آزمایشگاه و مدل پرداخته شد. برای انجام این مقایسه دو پارامتر اصلی موجود در الگوی شکست Thornton و Guza در حالات مختلف کالیبره شدند و نشان داده شد که هریک از این حالات چه میزان بهبود را در شبیه‌سازی امواج تولیدی در آزمایشگاه توسط مدل عددی SWAN حاصل می‌کند. در نهایت برای اصلاح این دو پارامتر، روابطی پیشنهاد گردید که با اعمال آن‌ها در مدل عددی SWAN عملکرد این مدل در محاسبه استهلاک ناشی از شکست بهبود قابل توجهی می‌یابد.

Improving the Simulation of Depth-induced Breaking in the Third-Generation Wave Model, SWAN

Seyed Ali Seyedalipur[1], Seyed Mostafa Siadatmousavi[2*], Seyed Masoud Mahmoudof[3]

[1] Student of Master in Civil Engineering, Iran University of Science and Technology; sralipour1994@gmail.com
[2] Associate professor of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology; siadatmousavi@iust.ac.ir
[3] Assistant professor of Civil Engineering, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Sciences; m_mahmoudof@inio.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 06 May. 2019
Accepted: 06 Apr. 2020

Keywords:
SWAN
Dissipation
Shallow Water
Wave Breaking
Breaker depth index

ABSTRACT

In this study, the default wave breaking term in the SWAN numerical model and the depth-induced breaking term presented by Thornton and Guza (1983) were investigated. It was shown that by modifying the coefficients in the Thornton and Guza pattern, the simulation of waves in shallow water can be improved. To evaluate the model performance, several waves were generated in 3 depths, periods and heights in the laboratory. The corresponding condition were simulated by the SWAN numerical model, and the wave heights generated in the laboratory were compared with the model results. Two main calibration parameters in the Thornton and Guza model were tuned in different scenarios, and the improvement of SWAN in simulating the waves was assessed in each scenario. Finally, some formula for calibration parameters were proposed to be implemented in the SWAN numerical model, which resulted in a significant improvement in the calculation of depth-induced breaking of random waves.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.3.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.53]

۱- مقدمه

۱-۱- مروری بر پیشینه تحقیق

فرآیندهای ساحلی شامل هیدرودینامیک ناحیه شکست و تغییرات مورفولوژی نواحی مجاور ساحل و پدیده‌هایی نظیر آب‌شستگی و رسوب‌گذاری به طور مستقیم تحت تأثیر امواجی است که به سواحل می‌رسند. بنابراین تخمین هرچه دقیق‌تر انرژی امواجی که به خط ساحلی می‌رسد، امری ضروری است که به شبیه‌سازی دقیق شکست امواج در آب کم‌عمق وابستگی زیادی دارد. با این حال فرآیندهای فیزیکی مرتبط با شکست موج ناشی از عمق در آب‌های کم‌عمق، هنوز به‌طور کامل درک نشده است[۱]. شکست موج ناشی از عمق معمولاً در مدل‌های باد-موج فرمول‌بندی می‌شود. پرکاربردترین روش برای محاسبه آن نیز توسط Batjess and Janssen (1978) (از این پس به اختصار با BJ (78) به این الگوی شکست اشاره خواهیم کرد) ارائه شده است. پس از آن‌ها، محققان روابط بسیاری را برای محاسبه استهلاک ناشی از شکست تولید نمودند. Apostos و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از مشاهدات میدانی، ۹ روش موجود را مورد ارزیابی قرار دادند[۲]. Salmon و همکاران در سال ۲۰۱۵ (از این پس به اختصار با SA (15) به این الگوی شکست اشاره خواهیم کرد) عملکرد ۱۲ روش مختلف محاسبه استهلاک ناشی از شکست موج را مورد بررسی قرار داده و محدودیت‌های آن‌ها را با استفاده از مشاهدات آزمایشگاهی و میدانی شناسایی کرده است[۱]. با توجه به این بررسی روش BJ (78) در طیف گسترده‌ای از موقعیت‌های مختلف عملکرد خوبی دارد، اما ارتفاع موج شاخص را در بسترهای افقی برای امواج دوراً دست‌بالا و برای امواج محلی، دست‌پایین تخمین می‌زند. این ارزیابی یافته‌های مطالعات پیشین نظیر Nelson (1987)، Katsardi (2007)، van der Westhuysen (2010) و Bottema and van Vledder (2009) را درباره ایراد روش BJ (78) تأیید می‌کند[۳-۶]. روش ارائه شده توسط Thornton and Guza (1983) (از این پس به اختصار با TG (83) به این الگوی شکست اشاره خواهیم کرد) در خارج از ناحیه شکست، میزان استهلاک ناشی از شکست را دست بالا تخمین زده و به همین خاطر ارتفاع موج را دست پایین تخمین می‌زند. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، Salmon et al. (2015) شاخص شکستی وابسته به شیب بستر محلی و عمق آب نرمال شده پیشنهاد کرد. روش SA (15) به‌طور قابل توجهی خطای مدل را در شبیه‌سازی ارتفاع موج‌ها بر روی بستر افقی کاهش می‌دهد، اما نسبت به BJ (78) عملکرد نسبتاً ضعیف‌تری در بسترهای شیب‌دار دارد. Lin and sheng در سال ۲۰۱۷ عملکرد شش روش پرکاربرد برای محاسبه استهلاک ناشی از شکست موج در عمق کم در مدل‌های طیفی موج را با استفاده از مشاهدات آزمایشگاهی و میدانی، که شامل ۸۸۲ مورد از ۱۴ منبع داده مشاهداتی است، مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه اصلاحیه‌ای بر رابطه‌ی SA (15) انجام می‌شود و ضریب شکست در این روش که تابعی خطی از شیب بستر است به صورت تابعی نمایی از آن اصلاح شده و عملکرد این اصلاحیه مورد بررسی قرار می‌گیرد[۷].

در مطالعه حاضر با توجه به عملکرد مناسب دو روش TG (83) و BJ (78) به بررسی و مقایسه این دو روش پرداخته شده و در نهایت بهینه‌سازی بر روی روش با عملکرد بهتر ضرایب پیش‌فرض برای داده‌های موجود، انجام گردید.

۲-۱- بررسی روابط موجود

دو روش کلی برای شبیه‌سازی امواج تصادفی در ناحیه ساحلی وجود دارد[۸]. در روش نخست فرض می شود که فراوانی امواج در تمامی اعماق از یک تابع چگالی احتمال تبعیت می‌کند و از آن در محاسبات انتقال موج برای به دست آوردن مشخصه‌های آماری موج استفاده نمود. اما در روش دوم فرض بر این است که فقط امواج دور از ساحل از یک تابع چگالی احتمال تبعیت کرده، و آن را با تعدادی از مؤلفه‌های موج تک‌رنگ[1] تقریب زده، و با محاسبه فرآیندهای انتقال هر موج تک‌رنگ، تابع چگالی احتمال محلی با اضافه کردن سایر مؤلفه‌های موج، تعیین می‌شود.

برای محاسبه انتقال موج می‌توان از تعادل شار انرژی استفاده نمود. در حالت یک‌بعدی (کانتورهای عمق موازی ساحل) این معادله به صورت زیر قابل نوشتن است[۸]:

$$\frac{d(EC_g)}{dx} = -D \qquad (۱)$$

که در آن x فاصله از ساحل، E انرژی موج، C_g سرعت گروهی امواج و D اتلاف انرژی متوسط‌گیری شده در زمان در اثر شکست امواج و اصطکاک بستر است. لازم به ذکر است کلیه روابط در سیستم SI بیان شده است. چون اثر اصطکاک در کف فرآیندی آرام است، در مقابل شکست موج که فرآیندی سریع است، قابل چشم‌پوشی خواهد بود. در این شرایط، اتلاف انرژی در هر جبهه موج را می‌توان با شرایط پرش هیدرولیکی مطابقت داده و اتلاف انرژی را از رابطه زیر محاسبه نمود[۸]:

$$D = \frac{\rho g h H^3}{T(4h^2 - H^2)} Q_b \qquad (۲)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.3.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.53]

که در آن g شتاب گرانش و ρ چگالی سیال است. H و T به ترتیب ارتفاع و پریود موج بوده و Q_b کسری از امواج است که دچار شکست و استهلاک می‌گردند.

برای محاسبه کسری از امواج که شکسته شده‌اند می‌توان فرض نمود ارتفاعات موج در ناحیه شکست با توزیع رایلی مشخص شده‌اند و این توزیع برای امواج شکنا و ناشکنا معتبر است. سپس اگر نسبت ارتفاع موج H_i به عمق آب h از برخی مقادیر تعیین شده (ضریب شکست) فراتر رود، موج می‌شکند. بنابراین برای یک عمق ثابت آب (h)، یک ارتفاع موج حدی H_{ib} وجود دارد که همه امواجی که ارتفاعی بیش از آن داشته باشند، می‌شکنند. به این ترتیب مقدار Q_b با انتگرال‌گیری روی همه امواج برای $H_i > H_{ib}$ به دست می‌آید[۸]:

$$Q_b = \exp[-(\frac{H_i}{H_{ib}})^2] \qquad (۳)$$

ارتفاع موج H_{ib} نیز به طورکلی از کالیبراسیون مدل موج تصادفی با داده‌های اندازه‌گیری تعیین می‌شود. راه‌کار دیگر این است که امواج به صورت منفرد مدل شده، و اگر موج منفرد شکسته نشده باشد، $Q_b=0$ بوده و اگر شکسته شده باشد، $Q_b=1$ اعمال گردد [۸].

یکی از بروزترین مدل‌های نسل سوم که برای آب‌های کم‌عمق توسعه یافته، مدل عددی SWAN است. شبیه‌سازی امواج در مدل SWAN، براساس حل معادله‌ی تعادل عملگر طیفی انجام می‌شود. این مدل ابزار مناسبی به منظور مطالعه، شناخت و پیش‌بینی رفتار و مشخصات امواج در محدوده‌ی کم عمق ساحلی، دریاچه‌ها و مصب رودخانه‌ها به شمار می‌رود. بخش عمده‌ای از مبانی تئوری و عملی این مدل در مطالعات Young و .Booij et al ارائه شده است[۹, ۱۰]. این مدل معادله پایداری چگالی کنش[۲] را به صورت عددی و به شکل زیر حل می‌کند.

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial C_x N}{\partial x}+\frac{\partial C_y N}{\partial y}+\frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma}+\frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta}=\frac{S_{tot}}{\sigma} \qquad (۴)$$

که در آن $N=E/\sigma$، چگالی کنش بوده و E چگالی انرژی وابسته به فرکانس نسبی σ و جهت متوسط θ است. به علاوه c_x، c_y، c_θ و c_σ به ترتیب نشان‌دهنده سرعت‌های گروهی موج در جهت‌های x، y، θ و σ هستند. S_{tot} در سمت راست معادله مربوط به جمع مقادیر چشمه و چاه است که به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl4} + S_{ds} + S_{nl3} + S_{bot} + S_{db} \qquad (۵)$$

که S_{in} عبارت مربوط به امواج تولیدشده در اثر انتقال انرژی باد به موج؛ S_{nl4} عبارت مربوط به تغییرات انرژی بین فرکانس‌های مختلف ناشی از اندرکنش‌های چهارتایی امواج؛ S_{ds} عبارت مربوط به استهلاک ناشی از سفیدک تاج موج؛ ؛ S_{nl3} استهلاک ناشی از اندرکنش سه‌تایی امواج؛ S_{bot} عبارت مربوط به استهلاک ناشی از اصطکاک بستر؛ S_{db} عبارت مربوط به استهلاک ناشی از شکست موج است. همان‌طور که گفته شد، در فرآیندهای کوتاه‌مدت (فرآیندهایی نظیر شکست موج که در یک بازه زمانی بسیار کوتاه، انرژی زیادی مستهلک می‌گردد) فقط عبارت استهلاک ناشی از شکست موج غالب است؛ زیرا در آب کم‌عمق دیگر فرصتی برای انتقال انرژی از باد به موج و اصطکاک بستر وجود ندارد.

برای محاسبه عبارت استهلاک ناشی از شکست در نزدیکی ساحل در مدل SWAN (Simulating WAve Nearshore)[۱۰] به طور پیش‌فرض از الگوی BJ78 استفاده می‌شود [۱۱]. در این الگو ابتدا میزان انرژی یک موج شکسته شده محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از تابع توزیع احتمال بریده شده با یک حد بالا، میزان احتمال وقوع امواج شکسته شده در یک عمق خاص در آن ضرب می‌گردد. برای این منظور فرض شده در مدل کف‌آلودگی[۳] آب به طور ناگهانی از عمق y_2 به عمق y_1 رسیده است. با توجه به بقای جرم و ممنتوم، میزان استهلاک انرژی در واحد عرض از رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود[۱۲]:

$$D' = \frac{1}{3}\rho g H^3 (\frac{g}{H})^{1/2} \qquad (۶)$$

حال به منظور به دست آوردن میزان استهلاک انرژی در واحد سطح، این مقدار بر طول موج متناظر با فرکانس f تقسیم می‌شود[۱۲].

$$D = \frac{D'}{L} = \frac{fD'}{c} = \frac{fD'}{(gh)^{1/2}} \sim \frac{1}{4} f\rho g \frac{H^3}{h} \qquad (۷)$$

در رابطه فوق c سرعت موج و f فرکانس متناظر است. با اعمال ضریب واسنجی α، شکل نهایی رابطه‌ی استهلاک یک تک موج، به شکل زیر درخواهد آمد[۱۲].

$$D = \frac{1}{4}\alpha f\rho g \frac{H^3}{h} \qquad (۸)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۳) خواهیم داشت[۱۲]:

$$\frac{1-Q_b}{1+Q_b} = -\frac{H_{rms}^2}{H_{\max}^2} \qquad (۹)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.3.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.53]

در این رابطه H_{max} ارتفاع حداکثر موج در هر عمق مشخصی است. این متغیر با توجه به ضریب شکست موج از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید[۱۳]:

$$H_{\max} = \gamma_b h \qquad (۱۰)$$

h عمق کلی آب است که شامل عمق متوسط آب (d) و میزان بالاروی متوسط سطح ($\bar{\eta}$) خواهد بود، یعنی[۱۲]:

$$h = d + \bar{\eta} \qquad (۱۱)$$

بنابراین رابطه‌ی کلی میزان استهلاک قطار موج در اثر شکست برابر است با[۱۲]:

$$D_{total} = \frac{1}{4}\alpha Q_b f \rho g \frac{H^3}{h} \qquad (۱۲)$$

در این روش ضریب شکست γ_b متغیر تعیین کننده‌ای است که به صورت پیش‌فرض برابر با ۰/۷۸ پیشنهاد شده است[۱۲].

Thornton و Guza در سال ۱۹۸۳ با حذف محدودیت روش BJ (78)، رابطه استهلاک کلی موج را بدون درنظر گرفتن حد بالای شکست ارائه نمودند و در عوض یک ضریب وزنی کوچکتر یا مساوی ۱ معرفی کردند که در جمله استهلاک انرژی مدل کف‌آلودگی ضرب می‌شود (از این پس به اختصار با TG (83) به این الگوی شکست اشاره خواهیم کرد)[۱۳]، یعنی:

$$\rho_b(H) = W(H)P(H) \qquad (۱۳)$$

که در آن W(H) ضریب وزنی است که به دلیل شکست موج با یک ارتفاع مشخص در تابع توزیع احتمال رایلی امواج ناشکنا P(H) ضرب می‌شود و تابع توزیع احتمال اصلاح شده برای امواج شکسته شده، P_b (H) را ارائه می‌نماید. آن‌ها رابطه‌ی زیر را برای این ضریب وزنی پیشنهاد دادند:

$$W(H) = \left(\frac{H_{rms}}{\gamma_b d}\right)^n \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{H}{\gamma_b d}\right)^2\right)\right] \le 1 \qquad (۱۴)$$

که مقدار $n = 4$ بر اساس داده‌های میدانی پیشنهاد شده است. در نهایت رابطه‌ی میزان استهلاک انرژی ناشی از شکست در واحد سطح برابر خواهد بود با:

$$D_b = \frac{3\sqrt{\pi}}{16}\rho g \frac{B^3 f}{\gamma_b^4 h^5} H_{rms}^7 \qquad (۱۵)$$

رابطه فوق ۲ پارامتر مهم B و γ_b دارد. مقدار γ_b بر اساس داده‌های میدانی، ثابت و برابر با ۰/۴۲ پیشنهاد شد. همچنین B ضریب واسنجی است که برای محاسبه آن مقادیر مختلفی در مدل مورد استفاده قرار گرفت و در مقایسه با داده‌های میدانی برداشت شده در ۶ روز، که محدوده نسبتاً وسیعی از شرایط مختلف امواج را ارائه می‌داد، و نیز داده‌های آزمایشگاهی، ضرایب بهینه B برای داده‌های میدانی و آزمایشگاهی به طور جداگانه به ترتیب ۱/۵۴ و ۰/۸ به دست آمد. این پارامتر در واقع در صد کف‌آلودگی را در جلوی موج نشان می‌دهد که مقیاسی از شدت شکست موج است، و انتظار می‌رود به مشخصه‌های شکست موج وابسته باشد. حساسیت مدل به انتخاب B، برای داده‌های میدانی نشان داد که تغییرات در حدود ٪۲۵± برای مقدار B بهینه، منجر به افزایش خطای کمتر از ٪۱۰ در مدل می‌گردد.

در مطالعه‌ی حاضر علاوه بر کالیبراسیون مدل TG (83) بر اساس مقدار B، پیشنهاداتی برای انتخاب γ_b نیز ارائه می‌گردد، زیرا چنان‌چه در بخش‌های بعدی نشان داده می شود مقدار پیشنهادی پیش‌فرض مدل با مقادیر معمول γ_b که از کارهای آزمایشگاهی و میدانی دیگر به دست آمده تفاوت زیادی دارد.

۳-۱- بررسی پارامتر ضریب شکست موج (γ_b)

یک روش ساده برای برآورد موقعیت خط شکست[۴]، محاسبه نسبت ارتفاع موج به عمق آب در جایی است که موج می‌شکند (ضریب شکست موج γ_b). براساس مطالعات محققان مختلف، ضریب شکست موج عمدتاً تابعی از دو پارامتر تیزی موج آب عمیق[۵] و شیب متوسط ناحیه ساحلی[۶] است [۱۷-۱۴].

Rattanapitikon و Shibayama، بسیاری از روابط موجود برای محاسبه ضریب شکست موج را مقایسه نمودند و نشان دادند که این روابط به طور قابل توجهی متفاوت از هم عمل کرده و زمانی که مقادیر شیب بستر از یک بازه معمول خارج می‌گردد، عدم قطعیت‌های بزرگی دارند (یعنی $m < 0.02$ یا m>0.1)[۱۸]. از آنجایی که این روابط نیمه‌تجربی‌اند و اغلب بر اساس یک مجموعه داده محدود تولید شده‌اند، ممکن است دقت آن‌ها در یک مجموعه داده بزرگ چندان مناسب نباشد.

Camenen and Larson شش رابطه پیشنهادی از جمله روابط Smith and Kraus [19] برای محاسبه γ_b را با مجموعه داده‌های آزمایشگاهی گسترده و از مراجع مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار دادند و بر اساس آن یک رابطه نیمه‌تجربی جدید ارائه کردند که شیب ساحل و تیزی موج در آب عمیق را در بر می‌گیرد و رفتاری بهبودیافته و در تطابق بهتر با داده‌ها را نشان می‌دهد. این شش رابطه عبارتند از:

Weggel [17]:

$$\gamma_b = b(m) - a(m)\frac{H_b}{L_\infty} \qquad (۱۶)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.3.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.53]

$$a(m) = 43.75[1-\exp(-19m)]$$
$$b(m) = \frac{1.56}{1-\exp(-19.5m)}$$

Battjes [20]:

$$\gamma_b = 1.062 + 0.137\log(\xi_\infty) \quad (۱۷)$$

Ostendorf and Madsen [21]:

$$\gamma_b = 0.14\frac{L_b}{h_b}\tanh([0.8+5\min(m,0.1)]\frac{2\pi h_b}{L_b}) + 0.137\log(\xi_\infty) \quad (۱۸)$$

Singamsetti and Wind [22]:

$$\gamma_b = 0.937 m^{0.155}\lambda_\infty^{-0.13} \quad (۱۹)$$

Smith and Kraus [19]:

$$\gamma_b = \frac{1.12}{1+\exp(-60m)} - 5.0[1+\exp(-43m)]\lambda_\infty \quad (۲۰)$$

رابطه ارائه شده توسط Goda [15] که توسط Rattanapitikon and Shibayama [18] اصلاح گردید نیز به صورت زیر است:

$$\gamma_b = 0.17\frac{L_\infty}{h_b}\{1+\exp[\frac{\pi h_b}{L_\infty}(16.21m^2 - 7.07m - 1.55)]\} \quad (۲۱)$$

توجه شود که روابط (۱۶)، (۱۸) و (۲۱)، ضمنی و روابط (۱۷)، (۱۹) و (۲۰)، صریح هستند و مقدار نسبت ارتفاع موج مشخصه به عمق را ارائه می‌کنند. Camenen and Larson[۸] با بررسی روابط فوق و مقایسه نقاط قوت و ضعف آن‌ها، رابطه‌ی جدیدی ارائه کردند که در آن ضریب شکست موج را به صورت تابعی از تیزی موج در آب عمیق ($\lambda_\infty = H_\infty/L_\infty$، یعنی ارتفاع مشخصه در آب عمیق H_∞ به طول موج در آب عمیق L_∞) و تابعی از شیب بستر تخمین زدند و با ۶ رابطه مذکور و مجموعه وسیع داده‌هایشان، مقایسه کردند. آن‌ها در رابطه جدیدی که برای γ_b ارائه دادند، بهترین رفتار ممکن را با توجه به وابستگی آن به شیب متوسط m و تیزی موج آب عمیق (λ_∞) به دست آوردند دهد. این رابطه جدید بر پایه نتایج Miche [15] و مشابه به نتایج رابطه[۲۱] Ostendorf and Madsen است، اما به جای نسبت h_b/L_b ، از تیزی موج در آب عمیق استفاده می‌کند تا محاسبه مستقیم شاخص عمق شکست را ممکن سازد. در این رابطه با استفاده از تئوری موج خطی $L_\infty = (gT_w^2)/2\pi$ خواهد بود و مقدار ضریب شکست از رابطه‌های زیر تعیین می‌شود[۸]:

$$\gamma_b = \frac{0.284}{\sqrt{\lambda_\infty}}\tanh[f_*(m,\lambda_\infty)\pi\sqrt{\lambda_\infty}] \quad (۲۲)$$

$$f_*(m,\lambda_\infty) = A_1 + A_2\sin[\frac{\pi}{2}\left(\frac{m}{m_{max}}\right)^\alpha] \quad (۲۳)$$

که در این رابطه m_{max} شیب ساحل، و A_1، A_2 و α پارامترهایی هستند که از برازش بر داده‌های میدانی به دست آمده‌اند و روابط زیر برای آن‌ها پیشنهاد شده است[۸]:

$$m_{max} = 0.010 + 1.6\lambda_\infty \quad (۲۴)$$

$$\text{if} \quad m \le m_{max} \quad \alpha = 1+14\lambda_\infty$$
$$\text{if} \quad m > m_{max} \quad \alpha = -(1+20\lambda_\infty) \quad (۲۵)$$

$$A_1 = 0.87$$
$$A_2 = 0.32 + 14\lambda_\infty \quad (۲۶)$$

روابط فوق به همراه رابطه Smith and Kraus [19] که بهترین رفتار را در بین ۶ رابطه‌ی (۱۶) تا (۲۱) برای شیب‌های متوسط نشان می‌دهد در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت. مطالعه حاضر ضرایب رابطه استهلاک ناشی از شکست TG (83) را به گونه‌ای تعیین می‌کند که مدل برای داده‌های مختلف بهینه رفتار نماید.

۲- مواد و روش‌ها

برای بهینه نمودن ضرایب در رابطه استهلاک ناشی از شکست TG (83)، ابتدا در آزمایشگاه با انجام ۲۷ آزمایش، امواجی با ارتفاع موج شاخص (H_{m0}) و پریود پیک (T_p) در عمق‌های مختلف آب در فلومی با شیب ثابت تولید گردید. سپس در ۶ ایستگاه که با فواصل مشخص از هم روی شیب قرار داده شدند، نوسانات موج اندازه‌گیری شده و از مقادیر به دست آمده برای ارتفاع موج، استهلاک ناشی از شکست موج در مدل تخمین زده شد.

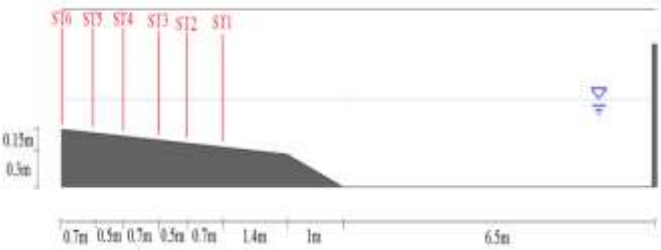
۲-۱- آزمایشات

به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی از کانال دوبعدی موج مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی دانشگاه تهران استفاده شد. این کانال موج به طول ۲۴ متر، عرض ۱ وعمق عملیاتی ۱/۱ متر دارای موج‌ساز پیستونی است که بر روی موج ساز مجهز به سامانه‌ی فعال جذب امواج بازتابی از سازه، به منظور اجتناب از بازتاب مجدد امواج بازتابی به درون کانال است. جداره‌های کانال از شیشه‌ی لمینیت و بستر آن از جنس ملات نرم و مقاوم در برابر نفوذ رطوبت است. در انتهای کانال از مصالح سنگ شکسته به عنوان جاذب غیرفعال موج استفاده شده است. عمق آب در فاصله‌ی ۶/۵ متری از مولد موج، توسط دو شیب ثابت (۳:۱۰ و ۱:۳۰) در مجموع به میزان ۴۵ سانتی‌متر از عمق آب کاسته شده است. نوسانات تراز سطح آب

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.3.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.53]

در ۶ ایستگاه مستقر بر روی شیب ملایم توسط دستگاه‌های فشارسنج مقاومتی با دقت ۰/۱٪ دامنه‌ی کامل (۱۰۰ میلی بار) و با سرعت داده‌برداری ۵۰ هرتز انجام شده است (شکل ۱).

مشاهدات آزمایشگاهی شامل تغییرات مشخصات امواج نامنظم تولیدی با سه ارتفاع مشخصه‌ی اسمی و سه دوره-ی تناوب در سه عمق مختلف آب بر روی سطح شیب‌دار ملایم بوده است. مشخصات امواج مورد نظر در جدول ۱ نشان داده شده است. امواج نامنظم بر اساس طیف JONSWAP و بر اساس ضرایب توصیه شده توسط Kahma and Calkoen [16] تولید شدند. از آنجایی امواج بلند با دوره‌ی تناوب بین ۱۰ تا ۱۲ ثانیه در این مطالعه هدف قرار داشتند، لذا با در نظر گرفتن عدد معمول ۲۵، به عنوان مقیاس متوسط طولی شبیه‌سازی فیزیکی، امواج شبیه‌سازی دارای دوره‌های تناوب ۲، ۲/۲۵ و ۲/۵ هستند. ابتدا داده‌های فشار دینامیکی به روش اصلاح کاهش عمق و با استفاده از تئوری خطی موج به داده‌های تراز تبدیل شد. در این مطالعه به منظور تخمین اثر انعکاس امواج، از گروه‌های سه‌تایی حسگر و روش Mansard and Funke [17] استفاده شده است. ضرایب انعکاس به دست آمده بر روی شیب بین (۱۱-۱۶)٪ متغیر بوده که انتظار می‌رود اثر چندان زیادی بر روی نتایج ایجاد نکند. درصد انعکاس و برگشت امواج از انتهای کانال کمتر از ۷ درصد بوده و به همین خاطر از آن نیز صرف‌نظر شده است.



شکل ۱: موقعیت قرارگیری حسگرهای موج بر روی بستر شیبدار در کانال موج دو بعدی

با توجه به عمق اولیه تولید امواج (۵۵، ۶۰ و ۶۵ سانتیمتر)، شیب اجرا شده در کانال موج و همچنین ارتفاع مشخصه‌ی اسمی امواج تولیدی (۶، ۹ و ۱۲ سانتیمتر)، انتظار می‌رود طیف وسیعی از شدت شکست‌های متفاوت امواج در ۶ ایستگاه بر روی شیب ثبت شود. به منظور خلاصه‌سازی به هر آزمایش یک کد تعلق گرفته که به عنوان نمونه شماره‌ی مربوط به هر آزمایش در خصوص موج با ارتفاع H_{m0}=6 cm در جدول ۱ نشان داده شده است. برای آزمایش‌های به عمل آمده با ارتفاع موج ۹ و ۱۲ سانتی‌متری، برای عمق و دوره‌ی تناوب غالب مشابه با جدول ۱ به ترتیب اعداد ۹ و ۱۸ به کد آزمایش برای ارتفاع موج ۶ سانتی‌متری اضافه شده است (برای مثال کد ۱۳ مربوط به آزمایش با مشخصات H_{m0}=9cm, Tp=2.25s, dep0=55cm خواهد بود).

جدول ۱: کد آزمایش با توجه به دوره‌ی تناوب غالب و عمق برای H_{m0}=6 cm

T_p(sec) / dep₀ (cm)	۲	۲/۲۵	۲/۵۰
۵۵	۱	۴	۷
۶۰	۲	۵	۸
۶۵	۳	۶	۹

حداقل سرعت داده‌برداری بر اساس محدوده‌ی فرکانسی امواج مورد مطالعه تعیین می‌شود. به طور معمول فرکانس مطلوب داده‌برداری باید به نحوی باشد که در یک دوره‌ی تناوب نظیر فرکانس ۳ برابر فرکانس غالب، حداقل ۸ داده برداشت شود [۱۹]. بنابراین در مطالعه‌ی حاضر با درنظر گرفتن کوچک‌ترین دوره‌ی تناوب که برابر با ۲ ثانیه باشد حداقل سرعت داده‌برداری باید 12 Hz باشد. اما سامانه‌ی ثبت داده[۷] مورد استفاده دارای سرعت ثابت داده‌برداری 50 Hz بوده که بیش از حداقل سرعت داده‌برداری مورد نیاز بوده است.

داده‌های نوسانات تراز سطح آب به مدت ۹۰۰ ثانیه به ثبت رسیده که تحلیل‌های مورد نظر بر روی ۸۴۰ ثانیه‌ی میانی انجام شده است. لازم به ذکر است که در آزمایش با کد ۲۲، به اشتباه ۳۰۰ ثانیه داده‌برداری انجام شد و به همین خاطر برای حفظ دقت و حداقل نمودن خطاها، از این آزمایش در مقایسه مدل با اندازه‌گیری‌ها استفاده نگردید.

۲-۲- شرح مدل‌سازی

با توجه به شرایط موج و فلوم در آزمایشگاه، مدل SWAN در شرایط پایا و یک‌بعدی برای هریک از این آزمایشات با استفاده از طیف به دست آمده از آنالیز طیفی در مرز باز آب عمیق، اجرا گردید. گام مکانی برای این اجرا ۰/۱ متر بوده است. در آزمایشگاه سرعت باد وجود نداشت و در مدل نیز مقدار صفر برای این پارامتر و نیز استهلاک ناشی از سفیدک تاج موج لحاظ گردید. با توجه به کوتاه بودن فاصله انتشار موج، سایر پدیده‌ها نظیر اصطکاک بستر، اندرکنش‌ها و ... نقش ناچیزی داشته و بنابراین با مقادیر پیش‌فرض خود در مدل اجرا شدند.

برای تعیین دقت مدل، مقادیر مجموع قدرمطلق اختلاف ارتفاع موج به دست آمده از مدل SWAN و حسگرهای اندازه‌گیری در هر یک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.3.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.53]

از ۶ ایستگاه محاسبه شد. انتظار می‌رود در حالت ایده‌آل این عدد صفر شود.

$$Err = \sum_{ST1}^{ST6} \left| Hs_{model} - Hs_{laboratory} \right| \quad (۲۷)$$

۳- بحث و بررسی نتایج

مدل SWAN برای بررسی امواج در نواحی کم‌عمق سواحل دارای دو جزء تشکیل‌دهنده اصلی معادله شار انرژی و ترم‌های استهلاک است. مهم‌ترین ترم استهلاک که می‌تواند در فواصل زمانی کوتاه اثرگذار باشد، ترم استهلاک ناشی از شکست است. همانطور که در بخش مقدمه عنوان شد، الگوی پیش‌فرض مدل، الگوی BJ (78) است که دارای فرضیات غیرواقعی است. به همین دلیل انتظار می‌رود الگوی TG (83)، توانایی بیش‌تری در مدل‌سازی آنچه که در طبیعت رخ می‌دهد داشته باشد. در این بخش ابتدا نتایج دو الگوی یاد شده با مقادیر پیش‌فرض مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس پارامترهای کالیبراسیون الگوی TG (83) بهینه‌سازی خواهد شد.

۳-۱- مقایسه الگوها با استفاده از مقادیر پیش‌فرض

برای مشاهده عملکرد بهبودیافته مدل اجرا شده با الگوی TG (83) در مقایسه با الگوی شکست پیش‌فرض مدل، ابتدا مدل با مقادیر پیش‌فرض این دو الگو برای ۲۶ تست انجام شده در آزمایشگاه، اجرا گردید. نتایج این مقایسه در شکل ۲ آورده شده است.

شکل ۲: مقادیر خطای به دست آمده برای هریک از ۲۶ آزمایش با ۲ الگوی شکست مختلف موجود در مدل SWAN

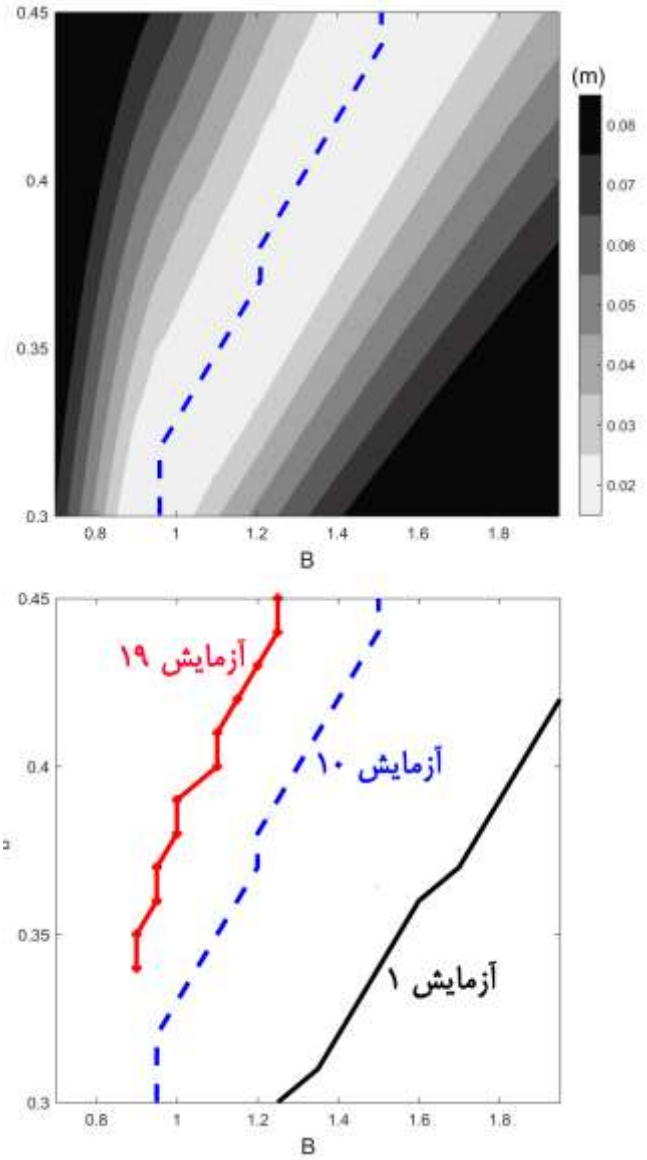
همانطور که در نمودار فوق مشاهده می‌شود، مقادیر ارتفاع موج حاصل از مدل با به کارگیری الگوی شکست TG (83) نسبت به الگوی BJ (78)، در بسیاری از آزمایشات بهبود قابل توجهی داشته است.

۳-۲- بهینه‌سازی ضرایب در الگوی TG (83)

۳-۲-۱ رویکرد اول، بهینه‌سازی همزمان ضرایب

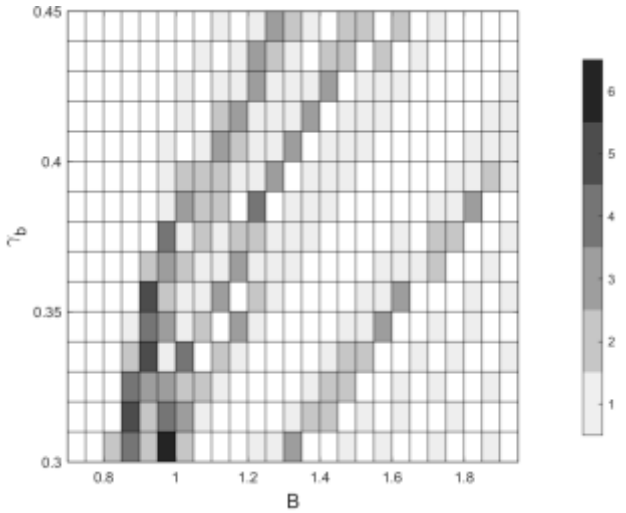
در این الگو دو پارامتر اصلی B و γ_b وجود دارد که مقادیر $B = 1$ و $\gamma_b = 0.42$ برای آن‌ها پیشنهاد شده است. در مقاله حاضر ابتدا پارامتر B از ۰/۷ تا ۱/۹۵ با دقت ۰/۰۵ و پارامتر γ_b از ۰/۳ تا ۰/۴۵ با دقت ۰/۰۱ تغییر داده شد و پارامتر خطای معرفی شده در بخش مواد و روش‌ها، برای کلیه آزمایشات محاسبه گردید. برای مثال در شکل ۳، پارامتر خطا به ازای مقادیر مختلف B و γ_b برای آزمایش شماره ۱۰ نمایش داده شده است. به نظر می‌رسد خطا در راستای یک منحنی شبیه به خط راست حداقل شده است. این منحنی‌ها استخراج گردید (شکل ۳ را ببینید). مشاهده می‌شود که نقاط بهینه به گونه‌ای هستند که مقادیر B و γ_b می‌توانند با هم افزایش و یا کاهش یابند. همچنین به ازای γ_b ثابت، مقدار B با افزایش ارتفاع موج کاهش می‌یابد. بررسی سایر منحنی‌های استخراج شده نشان می‌دهد که حساسیت منحنی‌های بهینه به عمق نیز در مرحله‌ی بعدی اهمیت قرار دارد اما وابستگی به نسبت کم‌تری به پریود موج نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.3.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.53]



شکل ۳: مقدار خطای محاسبه شده برای مقادیر مختلف B و γ_b برای آزمایش ۱۰ (بالا)، و منحنی استخراج شده برای یافتن ترکیبات بهینه ضرایب برای سه آزمایش که فقط ارتفاع موج در آن تغییر کرده است (پایین)

برای انتخاب مقادیر بهینه برای B و γ_b به طوری که برای همه آزمایش‌ها مناسب باشد، منحنی‌های خطای کمینه استخراج شد. سپس فضای B-γ_b به خانه‌های به اندازه‌ی ۰/۰۵ در راستای B و ۰/۰۱ در راستای γ_b تفکیک شد و بررسی گردید در کدام خانه بیش‌ترین تجمع خطوط بهینه رخ می‌دهد. با توجه به شکل ۴ به نظر می‌رسد مقادیر $B = 1$ و $\gamma_b = 0.31$ برای اکثر آزمایشات مناسب خواهد بود.



شکل ۴: تعداد تکرار مقادیر B و γ_b برای کلیه آزمایشات انجام شده

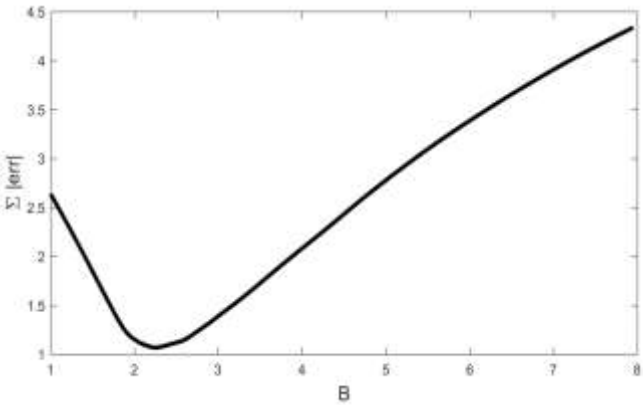
۳-۲-۲ رویکرد دوم، بهینه‌سازی ضریب B و استفاده از روابط ارائه شده برای γ_b

با توجه به نتایج ارائه شده در بخش ۳-۲-۱ مشخص گردید مقادیر بهینه B و γ_b می‌توانند به طور همزمان افزایش و یا کاهش یابند و عملکرد مدل تغییری ننماید. از طرفی مقدار γ_b پیشنهاد شده در مدل ۰/۴۲ است؛ لیکن این مقدار در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بسیار کوچک است. به عنوان مثال در جدول ۲ مقادیر γ_b بر اساس فرمول ۲۰ فرمول ۲۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است روابط فوق بر اساس H_s بوده است و در جدول ۲ بر اساس رابطه $H_s \approx \sqrt{2}\ H_{rms}$ به مقدار بر اساس ارتفاع موج H_{rms} تبدیل شده تا با مقادیر مورد استفاده در مدل SWAN سازگار گردد. مشاهده می‌گردد که با توجه به شیب حدود ۳ درصد، و سایر شرایط آزمایشات، مقدار γ_b در شرایط مختلف از ۰/۶۰۰۷ تا۰/۶۶۴۳ تغییر می‌کند که خیلی بزرگ‌تر از ۰/۴۲ مورد استفاده در مدل است. در این بخش، با توجه به نزدیکی مقادیر پیش‌بینی دو فرمول ارائه شده γ_b، فرمول (۲۲) به دلیل جامع‌تر بودن داده‌های مورد استفاده برای کالیبراسیون آن، مورد استفاده قرار گرفته و سپس مقدار B متناظر برای عملکرد مناسب مدل تخمین زده می شود. مقدار بهینه سازی شده B و نیز خطای حاصل برای هر آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

در صورتی که هدف یافتن مقداری ثابت برای B باشد که برای همه آزمایشات اعمال شود، خطا به ازای همه مقادیر B محاسبه شده و با هم جمع می‌شود. همانطور که در شکل زیر مشاهده می‌شود، مقدار ۲/۲۵ عدد مناسبی برای B خواهد بود. لازم به ذکر است افزایش مقدار B نسبت به مقدار پیش‌فرض مدل که برابر یک است دور از انتظار نیست زیرا همان‌طور که توضیح داده شد مقدار γ_b در مدل افزایش یافته و در شکل ۳ نیز نشان داده شد که با افزایش هر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.3.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.53]

یک از دو پارامتر کالیبرا سیون، مقدار بهینه پارامتر دیگر نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۵: مقدار پارامتر خطای تجمعی همه ۲۶ آزمایش بر اساس مقادیر B

۳-۲-۳ رویکرد سوم، بهینه سازی ضریب B به طور متغیر با استفاده از روابط ارائه شده برای γ_b

اگرچه اســـتفاده از مقدار ثابت پیشـــنهادی در بخش ۳-۲-۲ یک رویکرد ســـاده برای اســـتفاده از مدل اســـت، لیکن مقایســـه مقدار پیشنهادی با مقادیر بهینه ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که برای برخی آزمایشات مقادیری بسیار متفاوت از مقدار پیشنهادی لازم اســـت تا مدل به درســـتی کار کند. بنابراین در این بخش بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌ی زیر برازش داده شد:

$$B = 1.25 + 1.35\left(\frac{L}{h}\right)\exp\left(-8.3\max\left(0, \frac{H_s}{h} - 0.05\right)\right) \qquad (۲۸)$$

که در آن L طول موج و h عمق آب است. بخش نمایی در رابطه‌ی فوق برای لحاظ کردن اثر افزایش ارتفاع موج بر کاهش مقدار B مورد نیاز (شـــکل ۳)، و بخش توانی برای کاهش اثر زوال در آب عمیق تعبیه شده است. این رابطه در ترکیب با مقدار γ_b به دست آمده از رابطه (۲۲) در کد مدل SWAN اعمال شده و پارامتر خطا محاســـبه گردید. جدول ۳ مقدار خطا را برای هر یک از ۲۶ آزمایش ارائه می‌کند.

لازم به ذکر است برای اجرای این فرمول در کد، لازم است زیربرنامه swancom2.ftn برای اعمال فرمول (۲۸) در سابروتین SSURF تغییر نماید. این ســـابروتین در ویرایش رســـمی، اطلاعات عمق را دریافت نمی‌کند ولی برای اعمال فرمول یاد شده باید عمق گره‌ها را نیز دریافت کند که از طریق زیربرنامه‌ی swancom1.ftn و متغیر متغیر DEP2 باید اطلاعات عمق برای ســـابروتین SSURF ارســـال گردد.

جدول ۲: مقادیر γ_b به دست آمده از روابط ۲۰ و ۲۲، مقدار بهینه‌سازی شده برای B در صورت استفاده از رابطه‌ی ۲۲ در مدل، و میزان خطای هر آزمایش

کد آزمایش	γ_b از فرمول ۱۹	γ_b از فرمول ۲۲	مقدار بهینه B	خطا (متر)
۱	۰/۶۴۷۱	۰/۶۳۰۱	۳/۴۰	۰/۰۱۶۳
۲	۰/۶۴۶۷	۰/۶۲۹۹	۵/۰۵	۰/۰۲۳۳
۳	۰/۶۴۶۴	۰/۶۲۹۷	۷/۹۰	۰/۰۱۸۶
۴	۰/۶۵۷۲	۰/۶۳۵۲	۳/۶۰	۰/۰۱۵۶
۵	۰/۶۵۷۲	۰/۶۳۵۰	۴/۶۰	۰/۰۲۱۴
۶	۰/۶۵۶۸	۰/۶۳۴۹	۷/۵۰	۰/۰۱۸۹
۷	۰/۶۶۵۰	۰/۶۳۸۵	۳/۵۵	۰/۰۱۴۹
۸	۰/۶۶۴۶	۰/۶۳۸۳	۴/۲۰	۰/۰۱۸۳
۹	۰/۶۶۴۳	۰/۶۳۸۲	۶/۹۵	۰/۰۱۷۱
۱۰	۰/۶۲۴۶	۰/۶۱۷۵	۲/۳۰	۰/۰۱۴۶
۱۱	۰/۶۲۴۰	۰/۶۱۷۱	۲/۶۵	۰/۰۲۸۴
۱۲	۰/۶۲۳۶	۰/۶۱۶۸	۳/۸۰	۰/۰۲۵۸
۱۳	۰/۶۴۰۳	۰/۶۲۶۵	۲/۳۰	۰/۰۱۹۵
۱۴	۰/۶۳۹۷	۰/۶۲۶۱	۲/۶۰	۰/۰۲۲۹
۱۵	۰/۶۳۹۲	۰/۶۲۵۹	۳/۵۵	۰/۰۲۳۷
۱۶	۰/۶۵۱۴	۰/۶۳۲۳	۲/۳۵	۰/۰۱۱۱
۱۷	۰/۶۵۰۹	۰/۶۳۲۰	۲/۶۰	۰/۰۱۹۵
۱۸	۰/۶۵۰۴	۰/۶۳۱۸	۳/۳۰	۰/۰۲۰۵
۱۹	۰/۶۰۲۲	۰/۶۰۳۷	۱/۹۰	۰/۰۱۰۰
۲۰	۰/۶۰۱۴	۰/۶۰۳۲	۱/۹۵	۰/۰۱۷۵
۲۱	۰/۶۰۰۷	۰/۶۰۲۸	۲/۲۵	۰/۰۲۷۵
۲۳	۰/۶۲۲۳	۰/۶۱۶۱	۱/۹۵	۰/۰۱۶۱
۲۴	۰/۶۲۱۶	۰/۶۱۵۷	۲/۱۵	۰/۰۲۳۶
۲۵	۰/۶۳۷۹	۰/۶۲۵۱	۱/۹۰	۰/۰۰۶۹
۲۶	۰/۶۳۷۱	۰/۶۲۴۷	۲/۰۰	۰/۰۱۵۰
۲۷	۰/۶۳۶۵	۰/۶۲۴۴	۲/۱۰	۰/۰۲۰۸

۳-۲-۳ مقایسه مقادیر پیشنهادی برای ضرایب کالیبراسیون

در این بخش بهبود به دســـت آمده از رویکردهای مختلف در مدل برای آزمایشات انجام شده مورد بررسی قرار داده می‌شود. برای این موضوع پنج سناریو مورد بررسی قرار می‌گیرد که شرایط پارامترهای کالیبراسیون در آن‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است.

نتایج استفاده از این ۵ سناریو برای ۲۶ آزمایش در شکل ۶ نمایش داده شده است. بدیهی است سناریوی سوم که ضرایب برای هر آزمایش بهینه شـــده اســـت به عنوان کران دقت مدل در نظر گرفته شود. به نظر می‌رسد سناریوی ۵ دارای دقت قابل قبولی است و با توجه به حذف نیاز به بهینه‌ســـازی ضـــرایب، یک گزینه‌ی مطلوب به شمار می‌آید.

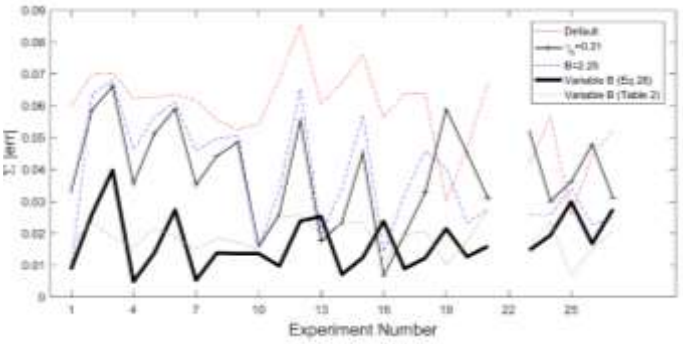
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.3.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.53]

جدول ۳: مقدار پارامتر خطا محاسبه شده برای مقدار B به دست آمده از رابطه (۲۸) و γ_b محاسبه شده از رابطه (۲۲)

کد آزمایش	B	γ_b از فرمول ۲۲	$\sum\|error\|$ (m)
۱	متغیر	۰/۶۳۰۱	۰/۰۱
۲	متغیر	۰/۶۲۹۹	۰/۰۳۳۱
۳	متغیر	۰/۶۲۹۷	۰/۰۴۸۱
۴	متغیر	۰/۶۳۵۲	۰/۰۰۸۷
۵	متغیر	۰/۶۳۵۰	۰/۰۱۷۱
۶	متغیر	۰/۶۳۴۹	۰/۰۳۱۱
۷	متغیر	۰/۶۳۸۵	۰/۰۳۶۹
۸	متغیر	۰/۶۳۸۳	۰/۰۲۲۷
۹	متغیر	۰/۶۳۸۲	۰/۰۱۵۶
۱۰	متغیر	۰/۶۱۷۵	۰/۰۲۷۲
۱۱	متغیر	۰/۶۱۷۱	۰/۰۲۷۹
۱۲	متغیر	۰/۶۱۶۸	۰/۰۴۷۲
۱۳	متغیر	۰/۶۲۶۵	۰/۰۲۸۲
۱۴	متغیر	۰/۶۲۶۱	۰/۰۱۴۵
۱۵	متغیر	۰/۶۲۵۹	۰/۰۲۵۴
۱۶	متغیر	۰/۶۳۲۳	۰/۰۱۵۹
۱۷	متغیر	۰/۶۳۲۰	۰/۰۰۸۲
۱۸	متغیر	۰/۶۳۱۸	۰/۰۱۱۹
۱۹	متغیر	۰/۶۰۳۷	۰/۰۳۱۷
۲۰	متغیر	۰/۶۰۳۲	۰/۰۲۱۵
۲۱	متغیر	۰/۶۰۲۸	۰/۰۳۱۱
۲۳	متغیر	۰/۶۱۶۱	۰/۰۱۴۸
۲۴	متغیر	۰/۶۱۵۷	۰/۰۱۳۰
۲۵	متغیر	۰/۶۲۵۱	۰/۰۳۲۸
۲۶	متغیر	۰/۶۲۴۷	۰/۰۱۵۸
۲۷	متغیر	۰/۶۲۴۴	۰/۰۱۲۵

جدول ۴: سناریوهای مختلف درنظرگیری الگوی TG (83) در اجرای مدل SWAN

شماره سناریو	γ_b	B	ملاحظات
۱	۰/۴۲	۱	پیش‌فرض مدل برای الگوی TG (83)
۲	۰/۳۳	۱	پیشنهادی بخش ۳-۲-۱
۳	فرمول (۲۲)	متغیر بر اساس جدول ۳	پیشنهادی بخش ۳-۲-۲
۴	فرمول (۲۲)	۲/۲۵	پیشنهادی بخش ۳-۲-۲
۵	فرمول (۲۲)	فرمول (۲۸)	پیشنهادی بخش ۳-۲-۳ با کدنویسی در مدل SWAN



شکل ۶: مقادیر خطاها برای کلیه آزمایشات در ۵ حالت مختلف معرفی شده در جدول (۴) برای ضرایب موجود در الگوی TG (83)

همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، نمودار قرمزرنگ که مقادیر پیش‌فرض مدل را درنظر می‌گیرد، تقریباً در بیشتر موارد بدترین عملکرد را دارد. پس از آن بهترین مقدار ثابت برای ضرایب قرار می‌گیرد که همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، هم در سناریو ۲ و هم در سناریو ۴ عملکرد بهتری نسبت به ضرایب پیش‌فرض مدل دارد؛ اما همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، این دو سناریو تقریباً خطاهای یکسانی به دست می‌دهند. سپس مقادیر به دست آمده از فرمول برازش شده برای B و γ_b محاسبه شده از فرمول (۲۲) و نیز فرمول (۲۸) قرار دارند که دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر حالات قبلی هستند.

۴-نتیجه‌گیری

مدل SWAN برای بررسی امواج در نواحی کم عمق سواحل دارای دو جزء اصلی تشکیل‌دهنده معادله شار انرژی و ترم‌های استهلاک است. مهم‌ترین ترم استهلاک در کوتاه‌مدت، ترم استهلاک ناشی از شکست است که برای درنظرگیری آن در این مدل الگوهایی قرار داده‌شده است. از آنجایی که الگوی پیش‌فرض این مدل یک حد بالا را برای تابع توزیع احتمال شکست درنظر می‌گیرد، الگوی ارائه شده توسط Thornton و Guza که این محدودیت را ندارد، الگوی مناسب‌تری محسوب می‌شود. در این الگو دو پارامتر اصلی γ_b و B وجود دارد که به ترتیب مقادیر پیش‌فرض ۰/۴۲ و ۱ در مدل به آن‌ها اختصاص داده شده است. در این مطالعه برای داده‌هایی که به طور آزمایشگاهی در ۲۶ آزمایش مختلف و در ۶ ایستگاه برای شرایط مختلف عمق، پریود و ارتفاع موج برداشت شد، این دو پارامتر، در حالات مختلف کالیبره شدند و برای هریک از این حالات مدل عددی نیز اجرا گردید. سپس مقادیر ارتفاع موج شاخص به دست آمده از مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای موج با تعریف یک پارامتر خطا مقایسه شد.

مقادیر پیش‌فرض مدل برای الگوی TG (83)، خطای زیادی در اکثر آزمایشات داشت. حالت ایده‌آل که در آن این پارامتر کمترین مقدار را دارا بوده است نیز مربوط به سناریوی سوم بود که طی آن

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.3.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.53]

ضرایب برای هر آزمایش جداگانه بهینه سازی شده است. طبق این مطالعه اعمال رابطه (۲۸) برای محاسبه B و رابطه (۲۲) برای محاسبه γ_b در کد مدل SWAN برای الگوی TG (83)، منجر به تولید یک الگوی مطلوب برای محاسبه استهلاک ناشی از شکست می‌گردد.

۵ - تشکر و قدردانی

این مطالعه بخشی از نتایج طرح شماره ۹۶۰۱۲۱۲۴ است که توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور مورد حمایت قرار گرفته است. لذا نگارندگان، مراتب سپاسگزاری و قدردانی خود را از این نهاد به عمل می‌آورند.

۶ – کلید واژگان

1- Monochromatic Wave
2- Action density
3- Bore
4- Breaker Line
5- Offshore Wave Steepness
6- Mean Beach Slope
7- Logger

۷ – مراجع

1. Salmon, J. E., et al. "Scaling depth-induced wave-breaking in two-dimensional spectral wave models." *Ocean Modelling* 87 (2015): 30-47.
2. Apotsos, Alex, et al. "Testing and calibrating parametric wave transformation models on natural beaches." *Coastal Engineering* 55.3 (2008): 224-235.
3. Bottema, Marcel, and Gerbrant Ph van Vledder. "A ten-year data set for fetch-and depth-limited wave growth." *Coastal Engineering* 56.7 (2009): 703-725.
4. Katsardi, V. "Surface Water Waves in Intermediate and Shallow Water Depths (Ph. D. thesis)." *Imperial College, London, 270p* (2007).
5. Nelson, Raymond Charles. "Design wave heights on very mild slopes—an experimental study." *Transactions of the Institution of Engineers, Australia. Civil engineering* 29.3 (1987): 157-161.
6. van der Westhuysen, André J. "Modeling of depth-induced wave breaking under finite depth wave growth conditions." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 115.C1 (2010).
7. Lin, Shangfei, and Jinyu Sheng. "Assessing the performance of wave breaking parameterizations in shallow waters in spectral wave models." *Ocean Modelling* 120 (2017): 41-59.
8. Camenen, B. and M. Larson, *Predictive formulas for breaker depth index and breaker type*. Journal of Coastal Research, 2007: p. 1028-1041.
9. Young, I.R., *Wind generated ocean waves*. Vol. 2. 1999: Elsevier.
10. Booij, N., R.C .Ris, and L.H. Holthuijsen, *A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation.* Journal of geophysical research: Oceans, 1999. 104(C4): p. 7649-7666.
11. Battjes, Jurjen A., and J. P. F. M. Janssen. "Energy loss and set-up due to breaking of random waves." *Coastal Engineering 1978*. 1978. 569-587.
12. Battjes, J.A. and J. Janssen, *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*, in *Coastal Engineering 1978*. 1978. p. 569-587.
13. Thornton, E.B. and R. Guza, *Transformation of wave height distribution.* Journal of Geophysical Research: Oceans, 1983. 88(C10): p. 5925-5938.
14. Horikawa, K., *Nearshore dynamics and coastal processes: Theory, measurement, and predictive models*. 1988: University of Tokyo press.
15. Goda, Yoshimi. "A synthesis of breaker indices." *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. Vol. 1970. No. 180. Japan Society of Civil Engineers, 1970.
16. Van Rijn, L.C., *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans*. Vol. 12. 1990: Aqua Publications Amsterdam.
17. Weggel, R.J., *Maximum breaker height.* Journal of Waterways, Harbors & Coast Eng Div, 1972. 98(9384 Proceeding).
18. Rattanapitikon, Winyu, and Tomoya Shibayama. "Verification and modification of breaker height formulas." *Coastal engineering journal* 42.04 (2000): 389-406.
19. Smith, E.R. and N.C. Kraus, *Laboratory study on macro-features of wave breaking over bars and artificial reefs*. 1990, Coastal Engineering Research Center Vicksburg Ms.
20. Battjes, Jg A. "Surf similarity." *Coastal Engineering 1974*. 1975. 466-480.
21. Ostendorf, D.W. and O.S. Madsen, *An analysis of longshore currents and associated sediment transport in the surf zone.* 1979.
22. Singamsetti, S. and H. Wind, *Characteristics of breaking and shoaling periodic waves normally incident on to plane beaches of constant slope.*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.3.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.53]

Report M1371, Delft Hydraulic Laboratory, Delft, The Netherlands, 1980: p. 142.

23. Miche, R., Mouvements ondulatoires de l'oce´an pour une eauprofonde constante et de´croissante. Annales des Ponts et Chausse´es, (mai–juin) 25–28, (juillet–aouˆt), 1944, 131–164, 270–292, 369–406
24. Kahma, K. K. and C. J.Calkoen. *Reconciling Discrepancies in the Observed Growth of Wind-generated Waves*, Journal of Physical Oceanography, 22.12 (1992): 1389-1405.
25. Mansard, E. P., and E. R. Funke. "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method." Coastal Engineering Proceedings 1, no. 17 (1980).
26. Baldock, T. E., and D. A. Huntley. "Long–wave forcing by the breaking of random gravity waves on a beach." Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 458, no. 2025 (2002): 2177-2201.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.3.2]

[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.53]