مدلسازی عددی روگذری موج از موج‌شکن سکویی مرکب

سیدمرتضی مرعشیان[۱] ، مهدی عجمی[۲*]، احمد رضایی مزیک[۳]

[۱] کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود؛ morteza.marashian@shahroodut.ac.ir
[۲] استادیار، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود؛ adjami@shahroodut.ac.ir
[۳] دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ a.rezaeemazyak@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴

کلمات کلیدی:
موج شکن سکویی مرکب
موج شکن سکویی
روگذری موج
موج شکن توده سنگی
موج شکن کیسونی افقی

چکیده

موج شکن‌ها در طول تاریخچه ساخت خود د ستخوش تغییراتی شده‌اند. این تغییرات ب سته به شرایط محیطی و کاربری، با هدف بهبود عملکرد آن ها بوده اســـت. رو گذری به عنوان یکی از پارامتر های هیدرولیکی مهم در عملکرد موج‌شـــکن‌ها همواره مورد ارزیابی و بهینه‌ســـازی قرار گرفته اســـت. در این مطالعه به بررســی روگذری امواج از موج‌شـکن سـکویی مرکب به عنوان موج‌شـکنی نوین، پرداخته شـده است. مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D انجام گرفته است. جهت اطمینان از عملکرد مدل عددی نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی موجود، مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفته است. پس از اطمینان از عملکرد مدل عددی، موج‌شکن سکویی مرکب در سه حالت طراحی شده است. نتایج میزان روگذری امواج از موج شکن سکویی مرکب با موج شکن توده سنگی و کیسونی افقی برر سی و مقای سه شـده اسـت. نتایج حاکی از کاهش به ترتیب ۸۴/۰۱ و ۶۱/۴۲ درصـدی میزان روگذری در موج شـکن سکویی مرکب، نسبت به موج شکن توده سنگی و کیسونی افقی دارد.

Numerical Simulation of Wave Overtopping Over Composite Berm Breakwater

Seyed Morteza Marashian[1], Mehdi Adjami[2*], Ahmad Rezaee Mazyak

[1] *MSc, Water and Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology;* morteza.marashian@shahroodut.ac.ir
[2] *Assistant Professor, Water and Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology;* adjami@shahroodut.ac.ir
[3] *Ph.D. student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, TMU;* a.rezaeemazyak@modares.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 30 Nov. 2018
Accepted: 14 May 2019

Keywords:
Composite Berm Breakwater
Berm Breakwater
Wave Overtopping
Rubble Mound Breakwater
Horizontally Caisson Breakwater

ABSTRACT

Breakwaters have changed a lot during their design history. Overtopping is an important parameter that its evaluation and reduction has always been noticed. In this study, the wave overtopping of composite berm breakwater as a new conceptual structure has been investigated numerical modeling was performed using FLOW-3D software. Then, based on a laboratory model conducted by Losada et al, calibration and verification was done for our numerical model. After numerical model performance confidence, composite berm breakwater was designed in three types. The wave overtopping of the composite berm breakwater was analysed and compared with rubble mound and horizontally caisson breakwaters. The results show a decrease of 84.01% of the overtopping in the composit berm breakwater compared to the rubble mound breakwater. Also, the overtopping in the composite berm breakwater had a 61.42% reduction compared to the horizontal caisson breakwater.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]

۱ - مقدمه

یک بندر معمولا از چندین قسمت مجزا تشکیل می شود. یکی از قسمت های مهم بندر، موج‌شکن است. به طور کلی، موج‌شکن سازه‌ای است که در برابر امواج سهمگین دریا مقاومت می کند و محلی آرام برای پهلوگیری، باراندازی و بارگیری شناورها ایجاد می نماید. این امر موجب گردیده است تا مدل سازی عددی و در نهایت مطالعات آزمایشگاهی، همواره مورد توجه محققین قرار گیرد. موج‌شکن ها در طول تاریخچه ساخت خود دستخوش تغییراتی شده اند. این تغییرات بسته به شرایط محیطی ساختگاه، معادن قرضه مصالح و کاربری خود باعث بوجود آوردن انواع موج‌شکن شده اند.

از جمله واکنش های هیدرودینامیکی مهم مربوط به موج‌شکن‌ها، می توان به روگذری امواج اشاره کرد که در صورت بالا بودن میزان روگذری، تخریب و محدودیت در بهره‌برداری از تاج موج‌شکن و کاهش آرامش در حوضچه را به همراه می آورد. در سال های اخیر تحقیقات گسترده این در زمینه کاهش روگذری شده است. این تحقیقات شامل بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. محققین تاثیر عوامل متعددی از قبیل تغییر در هندسه موج‌شکن، استفاده از بلوک‌های تاج و تغییر در شکل و اندازه آرمور را بررسی کرده‌اند. مطالعات صورت گرفته توسط محققین منجر به ارائه روابط نیمه تجربی جهت پیش‌بینی میزان متوسط روگذری، به صورت تابعی از شرایط محیطی و ویژگی‌های موج‌شکن شده است. برخی از این روابط را شامل روابط Owen برای موج‌شکن های نفوذناپذیر با وجه صاف یا زبر و شیب مستقیم یا سکویی مطالعاتی انجام داد [۲،۱]. بردبری و آلساپ موج‌شکن نفوذناپذیر با آرمور سنگی و دیوار محافظ تاج مورد بررسی قرار دادند [۳]. امینیتی و فرانسو در مورد موج‌شکن های دارای آرمور سنگی یا آرمور بتنی از نوع کوب[1] و تتراپاد[2] را مورد ارزیابی قرار دادند [۴]. ون دیر میر و جانسن موج‌شکن های نفوذناپذیر با وجه صاف یا زبر و شیب مستقیم و سکویی را مورد بررسی قرار دادند [۵]. البته برخی از این روابط پیچیدگی شکست امواج در آب کم عمق را درنظر نگرفته و دبی روگذری را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می کنند [۶].

با پیشرفت قدرت محاسباتی رایانه‌ها در سال‌های اخیر مدل‌های عددی زیادی به منظور مدلسازی روگذری امواج توسعه و مورد استفاده محققین قرار گرفته اند. از اولین بررسی ها می توان کوبایاشی و ورجانتو (۱۹۸۹) اشاره کرد که با مدلسازی عددی روگذری امواج منظم از سازه‌های ساحلی نفوذناپذیر پرداختند [۷]. هو و همکاران (۲۰۰۰)، یک مدل دو بعدی عددی را برای محاسبه روگذری از معادلات غیرخطی آب کم عمق ارائه نمودند. این در صورتی است که مطالعه آن‌ها تنها برای امواج منظم معتبر است [۸].

لوسادا و همکاران (۲۰۰۸) در دانشگاه کانتابریا با استفاده از کد COBRAS-UC که بر اساس معادلات VARANS تو سعه یافته است، به بررسی روگذری ناشی از امواج منظم و نامنظم بر روی موج‌شکن توده‌سنگی، پرداختند. نتایج حاکی از دقت قابل قبول مدل عددی نسبت به شرایط آزمایشگاهی دارد [۹]. دنتال و همکاران (۲۰۰۹)، به بررسی روگذری امواج نامنظم از موج‌شکن توده سنگی پرداختند که نتایج حاصل از مدل عددی FLOW-3D حاکی از دقت مناسب نسبت به روابط آزمایشگاهی دارد [۱۰]. دا و همکاران (۲۰۱۰)، تاثیر روگذری موج روی موج‌شکن‌های موازی ساحل بررسی کردند [۱۱]. یگانه بختیاری و همکاران (۲۰۱۰)، با بررسی جریان ماندگار و آشفتگی موجود در جریان جلوی موج‌شکن قائم به مطالعه روگذری پرداختند [۱۲].

اندرسن و همکاران (۲۰۱۱)، در مقیاس کوچک و بزرگ به آزمایش بر روی موج‌شکن توده‌سنگی جهت تعیین روگذری پرداختند [۱۳]. ویکینانزا و همکاران (۲۰۱۴)، به منظور تبدیل انرژی روگذری موج، مدل جدیدی از موج شکن توده سنگی را معرفی کردند [۱۴]. مقیم و همکاران (۲۰۱۵)، شار مومنتوم موج ناشی از روگذری موج بر موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر را مورد مطالعه قراردادند [۱۵]. زانوتیگ و همکاران (۲۰۱۶)، به وسیله شبکه عصبی پیشرفته جهت پیش بینی مقادیر حدی و مقادیر قابل قبول برای دبی روگذری مطالعاتی را انجام داد [۱۶]. قاسمی و همکاران (۲۰۱۶)، بوسیله مدل عددی FLOW-3D به بررسی روگذری موج از موج‌شکن توده‌سنگی با در نظرگیری محیط متخلخل کرد [۱۷].

میلانیان و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی تاثیر پارامترهای هیدرولیکی و سازه‌ای در بالاروی موج بر روی موج‌شکن سکویی پرداختند. این شبیه‌سازی که به‌وسیله مدل عددی FLOW-3D انجام شده است، نشان دهنده نتایج دقیقی از بالاروی موج در موج‌شکن سکویی است[۱۸]. پیلایی و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی روگذری موج از موج‌شکن سکویی پرداختند. این بررسی ها به صورت آزمایشگاهی و با هدف توسعه روابط در این زمینه صورت گرفت [۱۹]. تسای و همکاران (۲۰۱۸)، به مدلسازی عددی اندرکنش موج و موج شکن حفره‌دار پرداختند و هند سه جدیدی از حفره و موج شکن کیسونی را مدلسازی و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند [۲۰]. امیرآبادی و همکاران در سال (۲۰۱۸)، به بررسی عددی اندرکنش موج نامنظم و سازه موج‌شکن صندوقه ای حفره دار به وسیله مدل عددی FLOW-3D پرداختند که نتیجه آن کاهش انعکاس و روگذری موج‌شکن صندوقه ای حفره‌دار نسبت به موج‌شکن صندوقه ای بود [۲۱]. ساسیکومار و همکاران (۲۰۱۹)، به‌وسیله REEF3D به مدلسازی عددی موج‌شکن سکویی در حالت شکل‌ناپذیر (پایدار استاتیکی) پرداختند و تاثیر هندسه سکو بر فشار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]

درون محیط متخلخل و سرعت جریان را مورد بررسی قراردادند [۲۲].

در تحقیق حاضر به بررسی روگذری ناشی از امواج در موج‌شکن سکویی مرکب[۳] پرداخته شده است. موج شکن سکویی مرکب را می‌توان به صورت ترکیبی از موج‌شکن سکویی[۴] و موج‌شکن کیسونی[۵] در نظر گرفت. به این صورت که با حذف بخش انتهایی سکو و قرار دادن کیسون بتنی به جای قسمت تاج، مغزه و وجه رو به بندر موج شکن سکویی، مدل موج شکن سکویی مرکب طراحی شده است. به کارگیری نام مرکب به دلیل وجود کیسون در موج شکن سکویی در نظر گرفته شده است. از اینرو در این مطالعه ابتدا مدل عددی به منظور شبیه سازی روگذری امواج انتخاب خواهد شد. پس از بیان معادلات حاکم، با بیان مدل آزمایشگاهی جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی صحت عملکرد مدل عددی در مدلسازی روگذری بررسی خواهد شد. همچنین با معرفی حالت های مورد ارزیابی موج‌شکن سکویی مرکب به بررسی و تفسیر نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی پرداخته می شود. این بررسی‌ها شامل ارزیابی عملکرد موج‌شکن سکویی مرکب در کاهش میزان روگذری و الگوی میدان سرعت در حالت‌های مختلف می باشد.

۲- انتخاب مدل عددی

در این مطالعه از نرم افزار FLOW-3D که نرم‌افزاری قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی مسائل پیچیده سیالاتی می باشد، استفاده شده است. این نرم‌افزار برای مطالعه در مورد رفتار یک، دو و سه بعدی دینامیکی سیالات در طیف کاربردی وسیعی از جمله جریان های غیر ماندگار طراحی شده است [۲۳]. در این مطالعه برای شبیه سازی در محیط عددی از FLOW-3D ver.11.0.4 و پردازنده ای با مشخصات Intel® core™ i7-7700HQ @ 2.8GHz to 2.81GHz and 24GB RAM استفاده شده است.

در FLOW-3D از دو تکنیک برای شبیه‌سازی هندسی مرز سیال و مرز صلب استفاده شده است. حجم سیال[۶] (VOF)، برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و کسر مساحت – حجم مانع[۷] (FAVOR) برای شبیه سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد.

۲-۱- معادلات حاکم

در نرم افزار FLOW-3D، روش حل معادلات بر اساس روش حجم محدود می‌باشد. همچنین معادلات حاکم بر جریان سیال، نشان دهنده قوانین فیزیکی بقا بصورت عبارت ریاضی می‌باشد. همچنین در ادامه با بیان معادلات حاکم بر حرکت سیال، مدل‌های آشفتگی به مدلسازی جریان در محیط متخلخل پرداخته می‌شود. یکی از این قوانین، معادله پیوستگی می‌باشد. معادله پیوستگی از قانون بقای جرم و با نوشتن معادلات تعادل جرم برای یک حجم از سیال و با فرض تراکم‌ناپذیری سیال در سه جهت x، y و z به صورت رابطه (۱) بدست می آید.

$$\frac{\partial_{(u)}}{\partial_{(x)}}+\frac{\partial_{(v)}}{\partial_{(y)}}+\frac{\partial_{(w)}}{\partial_{(z)}}=0 \qquad (۱)$$

که در آن u، v و w مولفه‌های سرعت به ترتیب در جهت‌های x، y و z هستند. یکی دیگر از این قوانین قانون اصل بقای اندازه حرکت یا قانون دوم نیوتون می‌باشد. این قانون بیان می‌کند که نرخ تغییر اندازه حرکت با برآیند نیروهای وارد بر سیال برابر است. با در نظر گرفتن جریان غیر قابل تراکم و ثابت فرض کردن ضریب ویسکوزیته، معادله ناویر استوکس بصورت رابطه (۲) می باشد.

$$\begin{aligned}
&\rho\left(\frac{\partial_{(v)}}{\partial_t}+u\frac{\partial_{(u)}}{\partial_x}+v\frac{\partial_{(u)}}{\partial_y}+w\frac{\partial_{(u)}}{\partial_z}\right)\\
&\qquad=\frac{\partial P}{\partial x}+\rho g_x+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)\\
&\rho\left(\frac{\partial_{(v)}}{\partial_{(t)}}+u\frac{\partial_{(v)}}{\partial_{(x)}}+v\frac{\partial_{(v)}}{\partial_{(y)}}+w\frac{\partial_{(v)}}{\partial_{(z)}}\right)\\
&\qquad=\frac{\partial P}{\partial y}+\rho g_y+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)\\
&\rho\left(\frac{\partial_{(w)}}{\partial_{(t)}}+u\frac{\partial_{(w)}}{\partial_{(x)}}+v\frac{\partial_{(w)}}{\partial_{(y)}}+w\frac{\partial_{(w)}}{\partial_{(z)}}\right)\\
&\qquad=\frac{\partial P}{\partial z}+\rho g_z+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)
\end{aligned} \qquad (۲)$$

در این معادله‌ها g_x، g_y و g_z شتاب‌های واحد جرم در جهت‌های x، y و z است، μ ویسکوزیته سیال، ρ چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و P فشار سیال بر حسب پاسکال می‌باشند. در FLOW-3D می‌توان از چندین مدل آشفتگی از جمله RNG ، $k-\varepsilon$ و LES بهره‌مند شد. مدل RNG از معادلاتی شبیه به $k-\varepsilon$ استفاده می‌کند. ثوابتی که به طور تجربی در مدل‌های $k-\varepsilon$ استاندارد بدست آمده است، در مدل RNG به طور صریح استحصال می شود. اما به طور کلی مدل RNG کاربرد و سیع‌تری نسبت به $k-\varepsilon$ دارد. همچنین مدل LES برای شبیه‌سازی گردابه های بزرگ بیشتر کاربرد دارد. همچنین در مدل عددی FLOW-3D امکان تعریف شرایط مرزی به صورت موج منظم و نامنظم وجود دارد. در این مطالعه از شرط مرزی ورودی موج نامنظم، طیف جانسوآپ استفاده شده است [۲۴].

در موج‌شکن به دلیل بزرگ بودن خلل و فرج آن‌ها و به طور کلی در محیط‌های درشت‌دانه، جریان به صورت آشفته بوده و قانون دارسی در این محیط‌ها صدق نمی‌کند. با افزایش عدد رینولدز و کاهش فشار، رابطه دارسی از حالت خطی خارج می شود. بنابراین لازم است از روابطی استفاده شود که علاوه بر تبیین خصوصیات فیزیکی این محیط‌ها بتواند هیدرولیک جریان آن‌ها را نیز شبیه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]

سازی کند. در این مطالعه از فرم دو جمله‌ای بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت استفاده شده است که معادله فورشهایمر (۳) نیز معروف است و با استفاده از معادلات ناویر استوکی بدست آمده است.

$$I = Au + Bu^2 \qquad (۳)$$

که در آن I گرادیان هیدرولیکی، , سرعت جریان، A و B ضرایب ثابت هستند که A به مشخصات فیزیکی مصالح، میزان گرانروی و دانسیته سیال و B به مشخصات فیزیکی مصالح و شرایط هیدرولیکی در محیط متخلخل بستگی دارد [۲۵]. در صورتی که اطلاعات اندکی از سنگ‌دانه ها در اختیار باشد روابط (۴) و (۵) برای محاسبه ضریب درگ خطی و غیر خطی به کار می روند.

$$A = \frac{180}{d_{pore}2} \qquad (۴)$$

$$B = \frac{\beta}{d_{pore}} \qquad (۵)$$

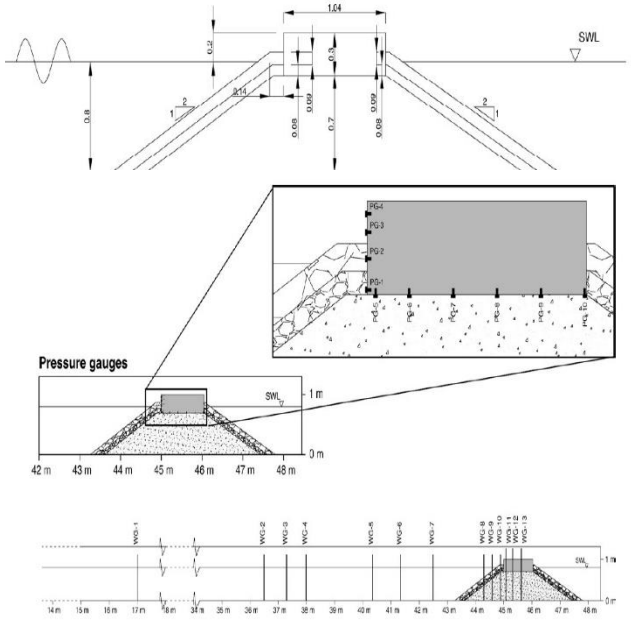
که در این روابط، β ضریب نرمی یا زبری سنگ‌ها می باشد که از ۱/۸ تا ۴ بسته به نوع سنگ تغییر می‌کند و d_{pore} قطر اسمی سنگ‌دانه است [۲۴].

۳- برپایی مدل عددی

در این بخش به معرفی مدل آزمایشگاهی پرداخته شده است. از نتایج مدل آزمایشگاه جهت ارزیابی خروجی های مدل عددی استفاده گردیده است. از اینرو با انجام تحلیل حساسیت مدل عددی، ابتدا تعداد سلول محاسباتی و مدل آشفتگی مناسب انتخاب شده و در ادامه با واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی درستی نتایج شبیه‌سازی، ارزیابی خواهد شد.

۳-۱- معرفی مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه از نتایج مدل آزمایشگاهی موج‌شکن توده‌سنگی لوسادا و همکاران (۲۰۰۸)، جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی FLOW-3D استفاده شده است. موج شکن توده‌سنگی بیان شده با عرض ۲ متر می‌باشد. سنگدانه‌های هسته، فیلتر و آرمور به ترتیب ۱، ۳/۵ و ۱۳/۵ سانتی‌متر هستند. این مدلسازی آزمایشگاهی در فلوم موجی به طول ۶۰ متر، عرض ۲ متر و ارتفاع ۲ متر بوسیله طیف جانسوآپ دارای ارتفاع مشخصه موج ۰/۱۸ متر و پریود پیک ۵ و ۶ ثانیه، انجام شده است [۹]. شکل ۱ نشان دهنده مشخصات مدل آزمایشگاهی لوسادا و همکاران (۲۰۰۸) به همراه موقعیت اجرای مدل آزمایشگاهی، محل فشارسنج‌ها و موقعیت موج‌نگارها در فلوم موج است.



شکل ۱ – نمایی از ابعاد مدل آزمایشگاهی Losada و همکاران (۲۰۰۸) به متر و موقعیت مدل آزمایشگاهی در فلوم، محل قرارگیری فشارسنج‌ها و موج‌نگارها [۹]

جهت مدلسازی عددی، از مدل یک فازی و سیال تراکم ناپذیر استفاده شده است. همچنین در بخش معرفی فیزیک مدلسازی، گرانش و ویسکوزینه – آشفتگی فعال شده است. مدل آشفتگی RNG در نظر گرفته شده است. لایه آرمور، فیلتر و هسته به صورت متخلخل و کیسون موج‌شکن در تاج آن به صورت صلب می باشد. ضریب تخلخل لایه آرمور و فیلتر ۰/۵ و هسته ۰/۴۸ است. ضریب زبری (β) هسته برابر ۲ و آرمور و فیلتر برابر ۳ است. ضرایب درگ خطی و غیر خطی A و B به‌دست آمده از روابط (۴) و (۵) در جدول ۱ آمده است. مدلسازی توسط یک بلوک مش که شروط مرزی آن شامل؛ شرط مرزی موج در ورودی بلوک، شرط مرزی خروجی در انتهای بلوک، شرط مرزی تقارن در بالای بلوک و در سایر مرز ها شرط مرزی دیوار انتخاب شده است. هندسه موج‌شکن توده‌سنگی در اتوکد طراحی و با پسوند STL به نرم افزار معرفی شده است.

جدول ۱ – ضرایب درگ خطی و غیر خطی A و B جهت مدلسازی

آرمور[A]	۹۸۷۶
آرمور[B]	۲۲/۲۲
فیلتر[A]	۱۴۶۹۳۸
فیلتر[B]	۸۵/۷۱
هسته[A]	۱۸۰۰۰۰۰
هسته[B]	۲۰۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

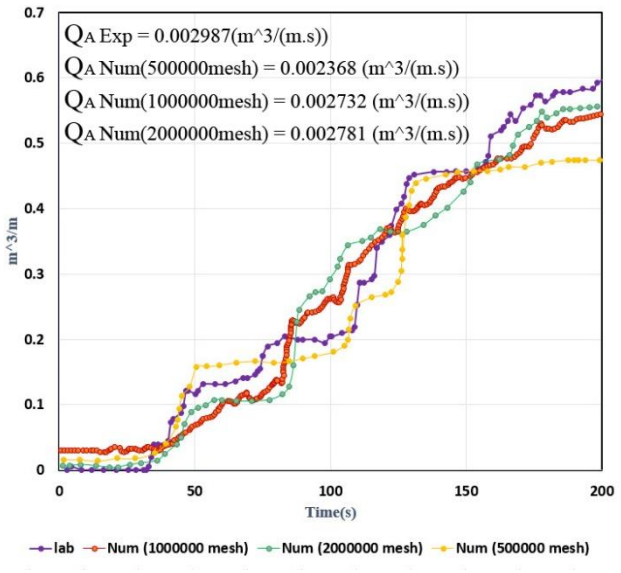
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]

۲-۳- مدلسازی عددی

در این بخش به واسنجی و در ادامه جهت بررسی صحت عملکردی، به صحت‌سنجی مدل عددی پرداخته می شود. برای تعیین عدم وابستگی نتایج مدلسازی به شبکه محاسباتی، ابتدا با تحلیل حساسیت مدل عددی، تعداد سلول محاسباتی در محیط متخلخل تعیین شده است.

۳-۳- حساسیت‌سنجی

انتخاب مناسب تعداد سلول محاسباتی مناسب به افزایش دقت شبیه‌سازی عددی و کاهش زمان شبیه‌سازی کمک می‌کند. چنانچه که با کاهش تعداد سلول محاسباتی، به شبیه‌سازی صحیح نمی‌توان رسید و با افزایش تعداد سلول محاسباتی باعث طولانی شدن زمان حل عددی خواهد شد. نتایج تحلیل حساسیت برای سه شبکه محاسباتی شامل؛ ۲ میلیون مش (ابعاد مش در هر سه جهت تقریبا ۴/۵ سانتی متر)، ۱ میلیون مش (ابعاد مش در هر سه جهت تقریبا ۵/۵ سانتی متر) و ۵۰۰ هزار مش (ابعاد مش در هر سه جهت تقریبا ۷ سانتی متر) انجام شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل حساسیت برای روگذری با مشخصات، ارتفاع مشخصه موج (H_S) ۰/۱۸ متر و پریود پیک (T_P) ۶ ثانیه در شکل ۲ آمده است. در جدول ۲ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سلول محاسباتی از ۱ به ۲ میلیون عدد، ۱/۴۶ درصد تغییر نتایج را به همراه داشته است. این در صورتی است که زمان شبیه‌سازی مدل عددی به ۱۲۱ ساعت افزایش یافته است. با این تفاسیر در این مطالعه برای مدلسازی عددی از ۱ میلیون سلول محاسباتی استفاده خواهد شد.



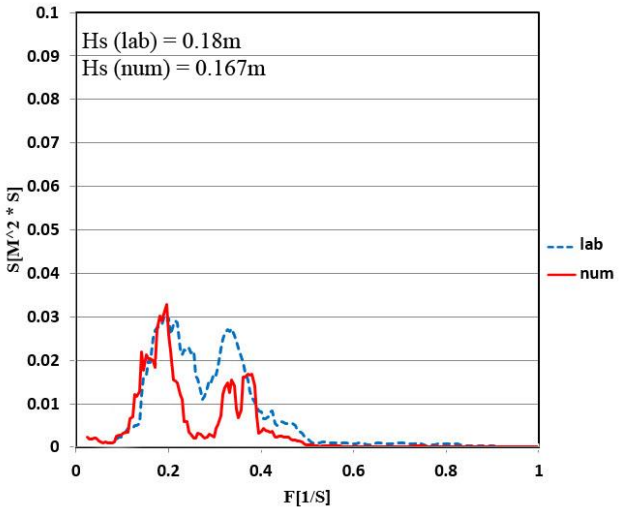
شکل ۲ – نتایج تحلیل حساسیت مدل عددی نسبت به تعداد سلول محاسباتی (روگذری)

جدول ۲ - میزان بهبود نتایج حساسیت‌سنجی مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی با درنظرگیری تعداد سلول محاسباتی و مدت زمان شبیه‌سازی عددی

تعداد سلول محاسباتی	مدت زمان شبیه-سازی [ساعت]	میزان تغییر نتایج [درصد]	میزان بهبود نتایج [درصد]
۵۰۰۰۰۰	۱۴	۲۰/۷۲	۵۰۰ هزار←۱میلیون ۱۲/۱۹
۱۰۰۰۰۰۰	۴۳	۸/۵۳	
۲۰۰۰۰۰۰	۱۲۱	۶/۸۹	۱میلیون←۲میلیون ۱/۴۶

۴-۳- واسنجی و صحت‌سنجی

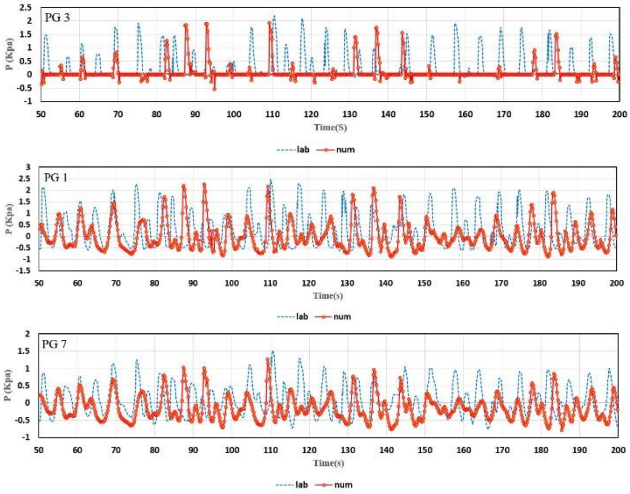
با توجه به در اختیار بودن مشخصات موج، فشار و روگذری برای موج‌شکن توده‌سنگی لوسادا و همکاران (۲۰۰۸) با ارتفاع موج مشخصه(H_S) ۰/۱۸ متر و پریود پیک(T_P) ۶ ثانیه (طیف جانسوآپ)، در این بخش به واسنجی مدل عددی پرداخته شده است. لازم به ذکر است جهت واسنجی طیف موج حاصل از نتایج تغییرات تراز آب مربوط به موجنگار ۸ استفاده شده است. شکل ۳، شکل ۴ و شکل ۵ به ترتیب مقایسه طیف موج ، تاریخچه زمانی تغییرات فشار در فشار سنج شماره ۳، ۱ و ۷ (به ترتیب؛ فشارسنج ۳، فشار خارج از محیط متخلخل – فشار سنج ۱ و ۷، فشار درون محیط متخلخل) و روگذری بین نتایج مدلسازی عددی و آزمایشگاهی نشان داده شده است.



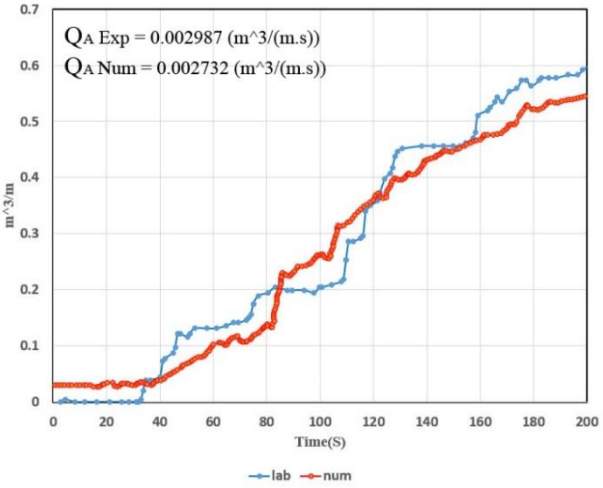
شکل ۳ – مقایسه طیف موج بدست آمده از موجنگار ۸ (آبی – آزمایشگاهی، قرمز – مدلسازی عددی)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]

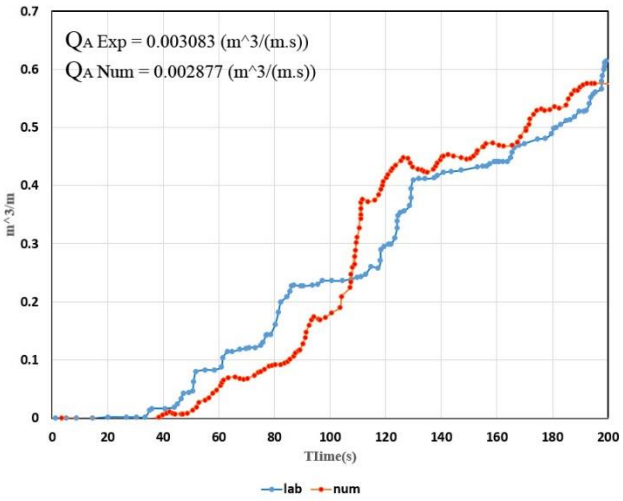


شکل ۴ – مقایسه تاریخچه زمانی نتایج تغییرات فشار در فشارسنج ۳، ۱ و ۷ (آبی – آزمایشگاهی، قرمز – مدلسازی عددی)



شکل ۵ – واسنجی تاریخچه زمانی تغییرات روگذری (آبی – آزمایشگاهی، قرمز – مدلسازی عددی)

صحت‌سنجی مدل عددی نوعی تایید توانایی مدل عددی در مدلسازی پدیده‌های مورد نظر می‌باشد. برای اطمینان از اینکه مدل عددی در شرایط متفاوت نیز به درستی رفتار می‌کند، با ثابت نگه داشتن همه پارامترها، صحت‌سنجی مدل عددی برای اطلاعات ارتفاع موج مشخصه (H_S) ۱۸ سانتی‌متر و پریود پیک (T_P) ۵ ثانیه انجام شده است و نتایج روگذری آن در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ – صحت‌سنجی تاریخچه زمانی تغییرات روگذری (آبی – آزمایشگاهی، قرمز – مدلسازی عددی)

مقدار درصد خطای نسبی مدل عددی با توجه به نتایج بدست آمده در واسنجی و صحت سنجی شامل؛ حداکثر تغییرات مثبت فشار و روگذری امواج در جدول ۳ آورده شده است که این میزان خطا به صورت میانگین در مدلسازی عددی برابر ۹/۱۰ درصد می‌باشد.

جدول ۳ : مقدار درصد خطای نسبی مدل عددی

نتایج بررسی	خطای نسبی مدلسازی [درصد]
فشارسنج ۳	۱۲/۳۸
فشارسنج ۱	۶/۶۰
فشارسنج ۷	۱۱/۳۴
روگذری (واسنجی)	۸/۵۳
روگذری (صحت‌سنجی)	۶/۶۸
میانگین خطای مدلسازی عددی	۹/۱۰

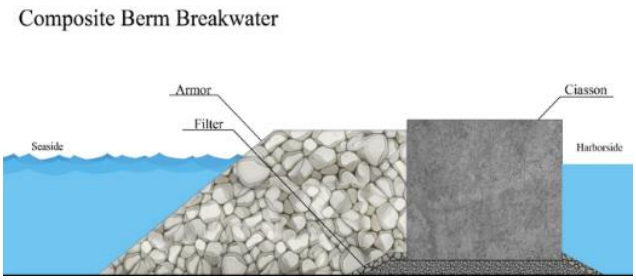
بررسی نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی FLOW-3D، نشان می‌دهد که نتایج مدل عددی در مدلسازی فشار وارد بر کیسون، روگذری امواج قابل قبول است.

۴- موج‌شکن سکویی مرکب

به منظور درک مناسب از ساختار و اجزای تشکیل دهنده موج‌شکن سکویی مرکب، نمایی شماتیک از موج‌شکن سکویی مرکب در شکل ۷ آورده شده است. موج‌شکن سکویی مرکب از آنجایی که یک موج‌شکن نوین به حساب می آید، برای طراحی سکوی جلوی کیسون رابطه‌ای وجود ندارد. به این ترتیب برای طراحی سکوی موج شکن سکویی مرکب در سه حالت، از توصیه های مطرح شده در PIANC استفاده شده است [۲۶].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]

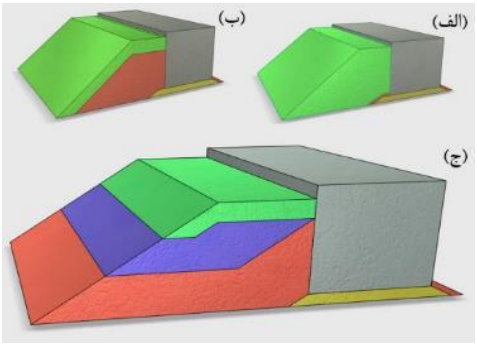


شکل ۷ - نمایی از مقطع موج شکن سکویی مرکب همراه با اجزای تشکیل دهنده آن (آرمور، فیلتر و کیسون)

در این مطالعه موج شکن سکویی مرکب در سه حالت شکل‌ناپذیر (پایدار استاتیکی) شامل؛

حالت اول (Type1) – موج‌شکن سکویی مرکب با سکوی تمام آرمور، حالت دوم (Type2) – موج شکن سکویی مرکب با سکوی متشکل از فیلتر و لایه آرمور و حالت سوم (Type3) – موج شکن سکویی مرکب با سکوی چندلایه (ایسلندی) می باشد.

شکل ۸ نشان دهنده سه حالت موج شکن سکویی مرکب است. با این توضیح که رنگ سبز بیانگر آرمور- سنگ کلاس I، رنگ بنفش بیانگر سنگ کلاس II، رنگ قرمز بیانگر فیلتر- سنگ کلاس III و رنگ زرد نشان دهنده مصالح زیرسازی کیسون است. همچنین کیسون با رنگ خاکستری متمایز شده است. لازم به ذکر است به منظور طراحی حالت سوم موج شکن سکویی مرکب، از توصیه‌های طراحی مطرح شده در تحقیقات سیگوردارسن و همکاران (۲۰۰۹) استفاده شده است [۲۷]. در موج شکن سکویی مرکب بخش‌های شیب بالای سکو، شیب مغزه، تراز تاج مغزه، عرض تاج مغزه و وجه رو به بندر موج شکن سکویی مرکب حذف شده اند و نیاز به طراحی ندارد.



شکل ۸ – نمایی از سه حالت موج‌شکن سکویی مرکب (الف- حالت اول، ب- حالت دوم، ج-حالت سوم)

۴-۱- عرض سکو

از نکات حائز اهمیت در مدلسازی سنگدانه‌های موج‌شکن، مدل سازی قفل و بست[8] بین سنگدانه‌ها می‌باشد. که تاثیر بسزایی در تشکیل مقطع تغییر شکل یافته در اثر امواج دارد. این امر باعث شده که امکان مدلسازی تخریب و تغییر شکل در مدل عددی FLOW-3D فراهم نشود و مدل سازی موج شکن سکویی مرکب شکل‌پذیر امکان پذیر نباشد. محققین بسیاری در رابطه با عرض فرسایش یافته‌ی سکو تحقیق کرده‌اند که این روابط بر مبنای شکل‌پذیری سازه توسعه یافته‌اند. به عنوان مثال در رابطه ارائه شده توسط هال و کاو (۱۹۹۱)، تاثیر D_{15} و D_{85} (به ترتیب قطری که ۱۵ و ۸۵ درصد سنگ‌ها) را مورد بررسی قرار داده است که در طراحی موج‌شکن سکویی مرکب تمامی سنگ‌های آرمور و فیلتر برابر با یک D_{n50} در نظر گرفته می‌شوند [۲۸]. در رابطه مقیم و همکاران (۱۳۸۷) اثر تعداد امواج برخوردی در شکل‌گیری نیم‌رخ تعادلی در نظر گرفته شده است، در حالی که موج‌شکن سکویی مرکب به صورت شکل‌ناپذیر طراحی شده است [۲۹]. همچنین سیگوردارسن و همکاران (۲۰۰۹)، ۳/۵ برابر ارتفاع موج مشخصه را به عنوان عرض سکو پیشنهاد کردند [۲۷]. در این مطالعه عرض فرسایش یافته سکو (Rec) به وسیله رابطه (۶) مربوط به توروم و همکاران (۱۹۹۸)، محاسبه می شود [۳۰].

$$Rec/D_{n50} = 0.0000027(H_0T_0)^3 + 0.000009(H_0T_0)^2 + 0.11(H_0T_0) - 0.8 \quad (۶)$$

در این رابطه D_{n50} : قطر اسمی سنگ لایه آرمور، H_0T_0 : پارامتر بی بعد شده (اثر پریود میانگین موج) و محدوده اعتبار رابطه فوق برای $H_0T_0 >$ ۳۰-۲۰ است.

۴-۲- قطر اسمی سنگ لایه آرمور

یکی دیگر از مهم‌ترین پارامترها در بررسی پایداری موج‌شکن‌های سکویی، قطر اسمی سنگ‌های لایه آرمور (D_{n50}) است. از جمله پارامترهای بی بعد طراحی و تعیین وزن سنگ به کار برده شده در سکو، شامل عدد پایداری (N_s) است که با توجه به شرایط محیطی، اجرایی و اهمیت پروژه تعیین می گردد [۲۶]. جدول ۴ مقادیر عدد پایداری بر اساس اهمیت پروژه را بیان می کند. در این مطالعه عدد پایداری برابر یک است.

جدول ۴ – مقادیر عدد پایداری بر اساس اهمیت پروژه

اهمیت پروژه	عدد پایداری
مهم	۲/۸>
معمولی	۳ – ۲/۸
کم اهمیت	۳/۴ – ۳
موقت	۴>

در نهایت با توجه به نوع موج‌شکن (شکل‌پذیر یا شکل‌ناپذیر) و اهمیت پروژه، عدد پایداری به وسیله رابطه (۷) و (۸) تعیین می‌گردد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]

$$H_0=N_s=H_s/\Delta D_{n50} \quad (۷)$$

$$\Delta=\rho_s/\rho_w-1 \quad (۸)$$

در رابطه (۷) و (۸) D_{n50} : قطر اسمی سنگ، N_s: عدد پایداری، H_s : ارتفاع مشخصه موج، ρ_s : چگالی سنگدانه، ρ_w: چگالی آب می‌باشد. همچنین در حالت چندلایه (ایسلندی) از چند نوع سنگ تشکیل شده است که به هر نوع سنگ با اندازه مشخص، عنوان کلاس سنگ اطلاق می شود. بزرگترین کلاس سنگ (کلاسI برابر قطر اسمی سنگ آرمور) در قسمت بالای سکوی موج شکن و در برخی مواقع در شیب جلوی سکو که نقش مهمی در تقویت سازه دارد، قرار داده می شود. سنگ‌های با قطر اسمی کمتر (کلاس II وIII) در لای های درونی موج‌شکن قرار داده می‌شوند. قطر اسمی کلاس II، ۰/۸ برابر قطر اسمی متوسط کلاس I در نظر گرفته می‌شود. سنگ کلاس III ، تقریبا ۰/۱۵ تا ۰/۴ برابر سنگ کلاس I می‌باشد. کلاس III به عنوان فیلتر در موج شکن استفاده می شود [۲۷]. در جدول ۵ مقادیر هندسی محاسبه شده برای سه حالت موج‌شکن سکویی مرکب آورده شده است.

جدول ۵ - مقادیر هندسی محاسبه شده برای موج‌شکن سکویی مرکب

موج‌شکن سکویی مرکب	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
شیب پایین سکو	۱ : ۱/۲۵	۱ : ۱/۲۵	۱ : ۱/۲۵
تراز سکو [m]	۰/۱۳۵	۰/۱۳۵	۰/۱۳۵
تراز تاج [m]	۰/۲	۰/۲	۰/۲
عرض تاج [m]	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۴
Dn50 آرمور و کلاس I [m]	۰/۱۳۵	۰/۱۳۵	۰/۱۳۵
Dn50 کلاس II [m]	*	*	۰/۱۰
Dn50 فیلتر و کلاس III [m]	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵
Dn50 زیرسازی کیسون [m]	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
عرض سکو [m]	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵

همچنین ضرایب تخلخل برای سه حالت موج شکن سکویی مرکب در تمامی لایه ها (آرمور – سنگ کلاس I، سنگ کلاس II، فیلتر – سنگ کلاس III) برابر ۰/۵ و برای مصالح زیرسازی کیسون ۰/۴۸ می‌باشد. ضریب زبری برای مصالح زیرسازی کیسون برابر ۲ و برای آرمور- سنگ کلاس I، فیلتر - سنگ کلاس III و سنگ کلاس II برابر ۳ در نظر گرفته شده است. ضرایب درگ خطی و غیر خطی A و B محاسبه شده از روابط (۴) و (۵) جهت مدلسازی محیط متخلخل برای سه حالت موج شکن سکویی مرکب در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶ – ضرایب درگ بدست آمده برای موج‌شکن سکویی مرکب

ضرایب درگ	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
آرمور-کلاسI [A]	۹۸۸۷	۹۸۸۷	۹۸۸۷
آرمور-کلاسI [B]	۲۲/۲۲	۲۲/۲۲	۲۲/۲۲
کلاسII [A]	*	*	۱۸۰۰۰
کلاسII [B]	*	*	۳۰
فیلتر-کلاسIII [A]	۱۴۶۹۳۹	۱۴۶۹۳۹	۱۴۶۹۳۹
فیلتر-کلاسIII [B]	۸۶	۸۶	۸۶
زیرسازی کیسون [A]	۱۸۰۰۰۰۰	۱۸۰۰۰۰۰	۱۸۰۰۰۰۰
زیرسازی کیسون [B]	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰

همچنین لازم به ذکر است که موج‌شکن‌های کیسونی افقی[9] از نظر چینش مصالح جلوی کیسون به موج‌شکن های سکویی مرکب شباهت دارند. شکل ۹ نمایی از موج‌شکن کیسونی افقی و موج‌شکن سکویی مرکب را نشان می‌دهد.



شکل ۹ – الف) موج‌شکن کیسونی افقی، ب)موج‌شکن سکویی مرکب

همین موضوع سبب شده است تا مدلسازی عددی موج‌شکن کیسونی افقی، با هدف مقایسه با موج شکن سکویی مرکب نیز انجام شود. لازمه بررسی رفتار این دو موج‌شکن وجود شرایط هندسی و محیطی مشابه است. لازم به ذکر است ضرایب درگ A و B برای سنگ آرمور، سنگدانه فیلتر و مصالح زیرسازی کیسون در مدل سازی محیط متخلخل مدل عددی موج شکن کیسونی افقی با توجه به یکسان بودن قطر اسمی سنگ آرمور، فیلتر و مصالح زیرسازی کیسون با حالت اول و دوم موج‌شکن سکویی مرکب مطابق جدول ۵ می باشد. در این مدلسازی از موج نامنظم با ارتفاع موج مشخصه ۰/۱۸ متر و پریود پیک ۵ ثانیه استفاده شده است. همچنین در صد تخلخل لایه آرمور و فیلتر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. جدول ۷ مقادیر پارامترهای هندسی مورد استفاده در مدلسازی عددی موج‌شکن کیسونی افقی را بیان می‌کند.

جدول ۷ - مقادیر پارامتر های هندسی مورد استفاده در مدلسازی عددی موج‌شکن کیسونی افقی

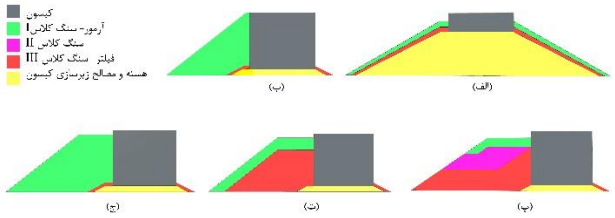
پارامتر های هندسی	
شیب مصالح آرمور	۱ : ۱/۲۵
تراز مصالح آرمور نسبت به سطح ایستابی [m]	۰/۲
تراز تاج موج‌شکن نسبت به سطح ایستابی [m]	۰/۲
عرض تاج موج‌شکن [m]	۱/۰۴
قطر اسمی سنگ آرمور [m]	۰/۱۳۵
قطر اسمی سنگدانه فیلتر [m]	۰/۰۳۵
قطر اسمی زیرسازی کیسون [m]	۰/۰۱

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]

۳-۴- برنامه آزمایش‌ها

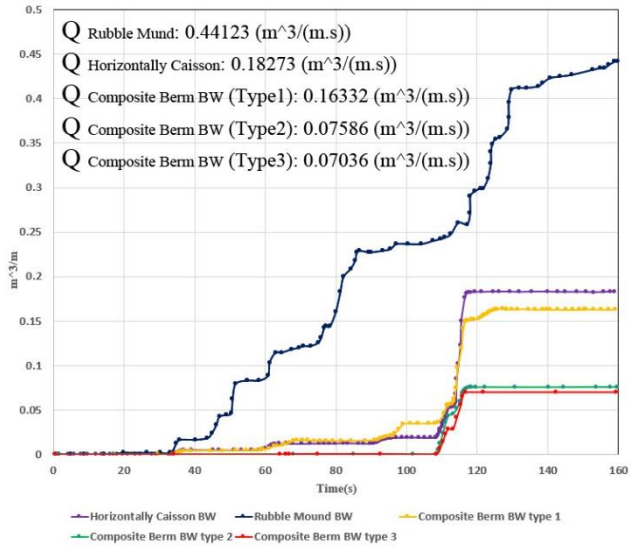
با توجه به سه هندسه متفاوت از موج شکن سکویی مرکب اقدام به مدلسازی عددی موج‌شکن سکویی مرکب شده است. به منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد هیدرولیکی موج‌شکن سکویی مرکب با موج شکن توده سنگی و کیسونی افقی از شرایط محیطی یکسان (ارتفاع موج مشخصه ۱۸ و پریود پیک ۵ ثانیه) شده است. همچنین عمق پای سازه ۰/۸ متر و مدت زمان شبیه سازی ۱۶۰ ثانیه می باشد. همچنین در شکل ۱۰ نمایی شماتیک از تمامی موج‌شکن‌های مدلسازی شده در این مطالعه آورده شده است.



شکل ۱۰- نمایی شماتیک از موج‌شکن‌های مدلسازی شده ((الف- موج-شکن توده‌سنگی) (ب- موج‌شکن کیسونی افقی) (پ- حالت سوم موج-شکن سکویی مرکب) (ت- حالت دوم موج‌شکن سکویی مرکب) (ج- حالت اول موج‌شکن سکویی مرکب))

۵- تحلیل نتایج مدلسازی موج‌شکن سکویی مرکب

روگذری امواج در نتیجه بالاروی امواج بر شیب جلویی موج شکن و عبور آب از روی تاج آن اتفاق می‌افتد. روگذری در واحد طول سازه رخ می‌دهد و واحد روگذری امواج ($m^3/(m.s)$) می باشد. برای مشخص شدن اینکه موج شکن سکویی مرکب چه مقدار در کاهش روگذری نا شی از امواج موثر ا ست، در این بخش به ارزیابی عملکرد موج شکن سکویی مرکب در رابطه با روگذری امواج پرداخته خواهد شد. در شکل ۱۱ موج‌شکن سکویی مرکب در سه حالت با موج‌شکن توده‌سنگی و کیسون افقی مقایسه شده است.



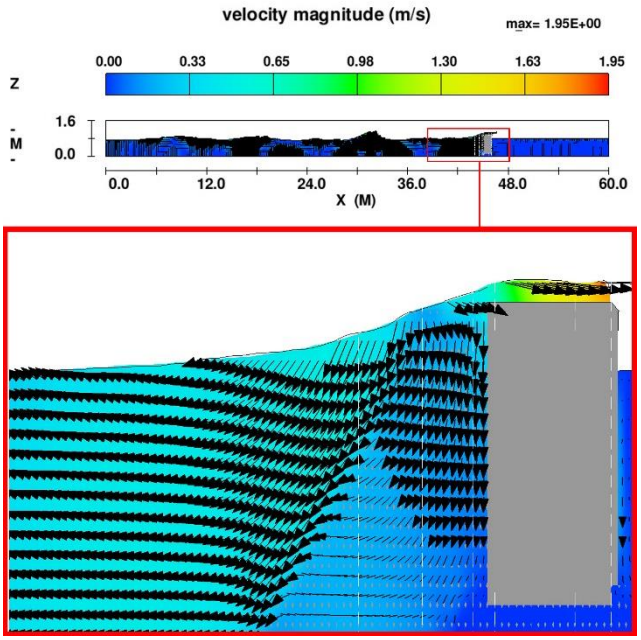
شکل ۱۱ - مقایسه روگذری ناشی از امواج در طول مدلسازی برای سه حالت موج‌شکن سکویی با موج‌شکن کیسونی افقی و توده‌سنگی

در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که روگذری برای موج‌شکن توده‌سنگی به صورت پلکانی در حال افزایش است، به طوری که شروع روگذری از ثانیه ۳۶ آغاز شده است. این در حالی است که نمودار روگذری حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب در ثانیه ۱۰۹ شروع روگذری را نشان می‌دهد و روگذری در طول مدلسازی، مربوط به موجی با ارتفاع حداکثری می‌باشد.

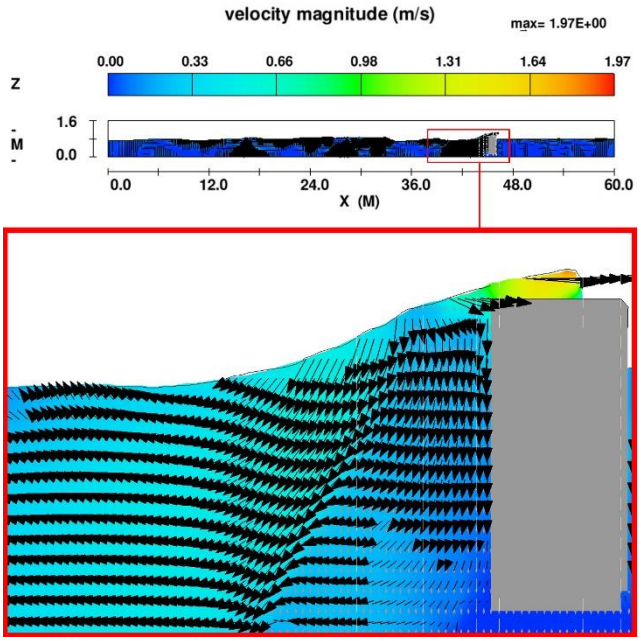
۵-۱-بررسی میدان سرعت

در ادامه به بررسی و تحلیل مکانیسم روگذری در حالت اول، دوم و سوم موج‌شکن سکویی مرکب پرداخته می‌شود. شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نشان دهنده مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه به ترتیب ۱۱۰ و ۱۱۵ ثانیه برای حالت اول موج‌شکن سکویی مرکب است. مقادیر حداکثری میدان سرعت جریان در حالت اول موج‌شکن سکویی مرکب، برابر (m/s) ۱/۹۵ برای ثانیه ۱۱۰ و (m/s) ۱/۹۷ برای ثانیه ۱۱۵ است. نتایج به‌دست آمده، مقادیری تقریبا مشابه به هم را نشان می‌دهد. سکوی همگن با وجود تاثیر آن در کاهش مقادیر روگذری و سرعت جریان، به علت نفوذ بیشتر جریان در داخل محیط متخلخل در پی بالاروی موج؛ با سرعت بیشتری نسبت به حالت دوم و سوم پر می‌شود. این موضوع سبب شده است که در حالت اول موج‌شکن سکویی مرکب مقادیر روگذری کاهش داشته باشد ولی نوع روگذری (آب سبز[۱۰]) تغییر نکند. با توجه به آب سبز بودن روگذری، حالت اول موج‌شکن سکویی مرکب در زمان‌های ۱۱۰ و ۱۱۵ ثانیه، عملکرد مشابه‌ای را داشته است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]

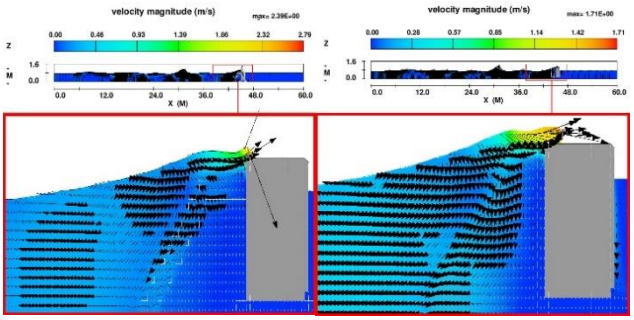


شکل ۱۲ - مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه ۱۱۰ ثانیه (حالت اول – موج‌شکن سکویی مرکب)



شکل ۱۳ - مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه ۱۱۵ ثانیه (حالت اول – موج‌شکن سکویی مرکب)

در حالت دوم موج‌شکن سکویی مرکب بخش اعظم سکو را مصالح فیلتر تشکیل داده است و بر روی فیلتر لایه‌ی آرمور قرار گرفته است. استفاده حداکثری از مصالح ریزدانه باعث شده است که سرعت جریان در محیط متخلخل سکو کاهش پیدا کند. در نتیجه هنگام بالاروی موج، باعث کاهش نفوذ جریان در داخل محیط متخلخل شود. در این شرایط بالاروی موج از سکوی حالت دوم، رخ خواهد داد. با افزایش سرعت موج و رسیدن تاج موج به بالای سکو، موج دچار شکست می‌شود. از این رو روگذری در حالت دوم موج‌شکن سکویی مرکب در زمان‌های ۱۱۰ و ۱۱۵ ثانیه، ناشی از پاشش[11] موج است و مربوط به هنگامی است که امواج روی دیواره کیسون در تاج می‌شکنند. این پاشش توسط اصابت شیرجه موج در حال شکست با کیسون بوجود آمده است. پاشش موج در مدت زمان کوتاه باعث بارگذاری به مراتب بیشتر نسبت به آب سبز می‌شود. همچنین تخلیه آب روگذری از نوع پاشش، همراه با هوادهی[12] بسیار است. با بررسی شکل ۱۴ (مقادیر سرعت جریان در حالت اول موج‌شکن سکویی مرکب و حالت دوم موج‌شکن سکویی مرکب) در لحظه رسیدن تاج موج به کیسون، مشخص می‌شود که با تغییر مکانیسم روگذری، از آب سبز به پاشش سرعت جریان (m/s) ۰/۶۸ افزایش پیدا کرده است.

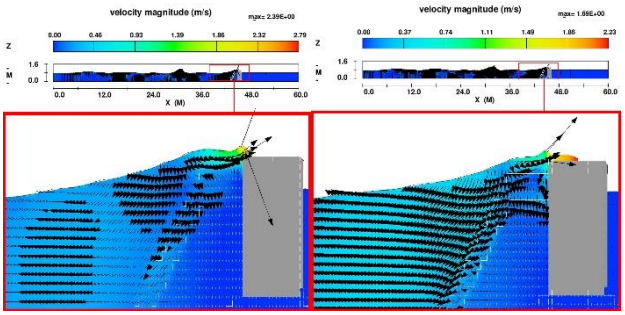


شکل ۱۴ – مقایسه مقادیر سرعت سرعت جریان در دو مکانیسم روگذری آب سبز و پاشش (حالت اول موج‌شکن سکویی مرکب (سمت راست) – حالت دوم موج‌شکن سکویی مرکب (سمت چپ))

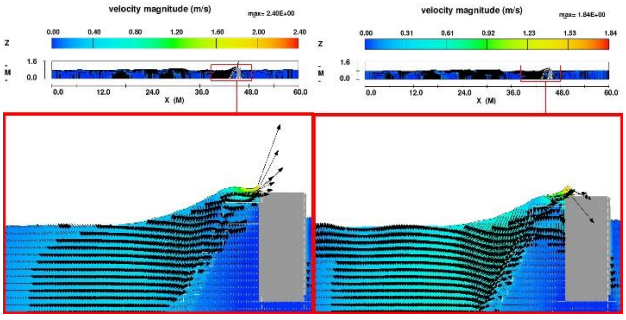
با مقایسه مقادیر سرعت جریان در ثانیه ۱۱۰ برخورد موج با کیسون؛ (m/s) ۲/۳۹ برای حالت دوم و (m/s) ۱/۶۵ برای حالت سوم تاثیر سکوی متشکل از فیلتر - آرمو و سکوی چندلایه (ایسلندی) در افزایش و کاهش مقادیر سرعت جریان در لحظه شکست موج مشخص می‌شود. لازم به ذکر است پس از شکست موج، مقادیر سرعت جریان عبوری از روی کیسون ((m/s) ۱/۶۹ – حالت دوم و (m/s) ۱/۷۶ – حالت سوم) و میزان روگذری در حالت دوم و سوم کاهش قابل توجهی داشته است. شکل ۱۵ و شکل ۱۶ نشان دهنده مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه به ترتیب ۱۱۰ و ۱۱۵ ثانیه برای حالت دوم موج‌شکن سکویی مرکب است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]

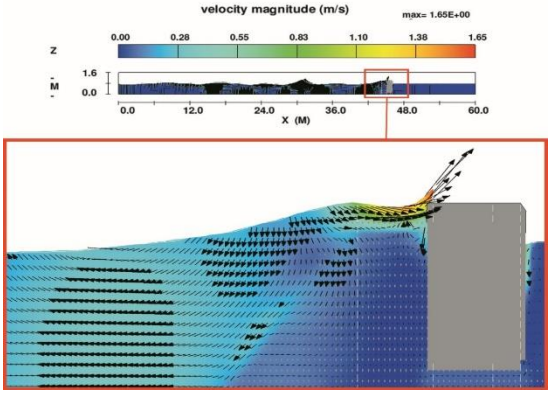


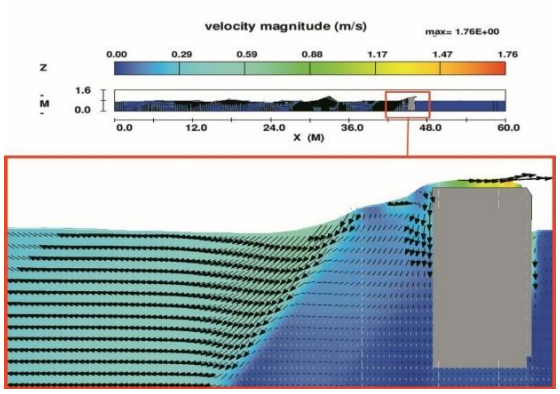
شکل ۱۵ - مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه ۱۱۰ ثانیه (حالت دوم – موج‌شکن سکویی مرکب)



شکل ۱۶ - مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه ۱۱۵ ثانیه (حالت دوم – موج‌شکن سکویی مرکب)

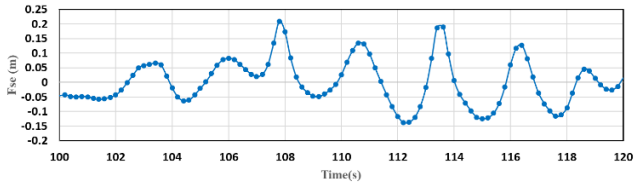
حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب (ایسلندی)، بیشترین تاثیر را در کاهش روگذری داشته است. بررسی میدان سرعت جریان در حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب نشان می‌دهد که موج بر روی سکو دچار شکست شده است. روگذری در حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب، ناشی از پاشش موج است. در بازه زمانی ۱۰۰ تا ۱۲۰ ثانیه دو مرتبه روگذری در حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب رخ داده است. شکل ۱۷ مقادیر و بردارهای سرعت جریان در ثانیه ۱۱۰، برای موج‌شکن سکویی مرکب در حالت سوم را نشان می‌دهد.





شکل ۱۷ - مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه ۱۱۰ ثانیه (حالت سوم – موج‌شکن سکویی مرکب)

برای بررسی بیشتر این موضوع، از یک موج‌نگار در پای سازه (به فاصله $5H_S$) استفاده شده است و به صورت سری زمانی تغییرات سطح تراز آب را نشان می‌دهد. در شکل ۱۸ می‌توان تغییرات سطح تراز آب در بازه زمانی ۱۰۰ و ۱۲۰ ثانیه، در حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب مشاهده کرد.

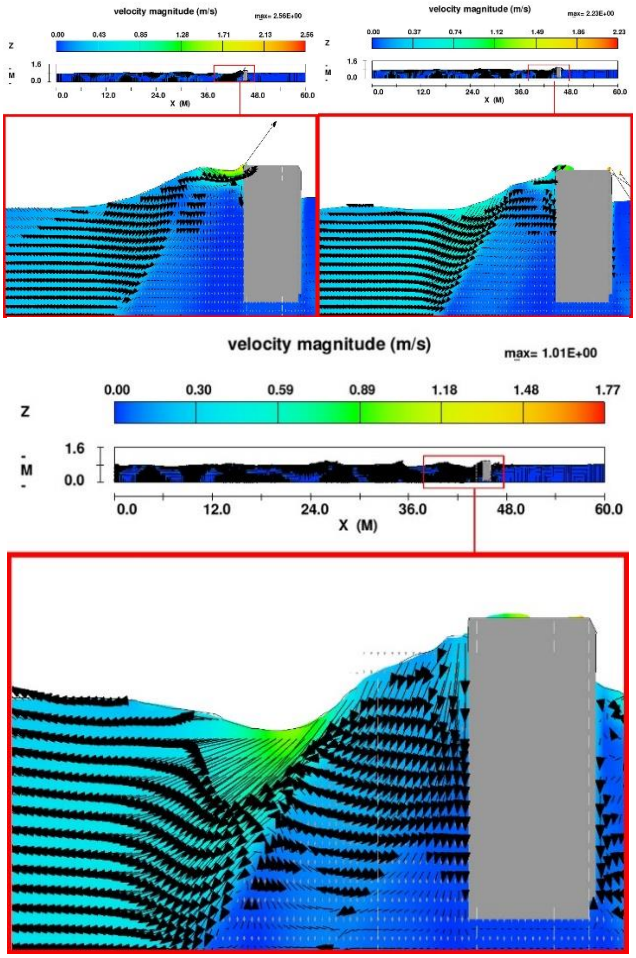


شکل ۱۸ – تغییرات سطح تراز آب حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب در بازه زمانی ۱۰۰ تا ۱۲۰ ثانیه

در حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب، با بررسی شکل ۱۸ قبل از وقوع روگذری در لحظه ۱۱۰ ثانیه، می‌توان دریافت که قبل از وقوع روگذری در ثانیه ۱۰۸، بلندترین موج در طول مدلسازی، با ارتفاع ۰/۲۱ متر به موج‌شکن برخورد کرده است. این موج با بالاروی از سکوی موج‌شکن سکویی مرکب، در ثانیه ۱۱۰ از روی کیسون موج-شکن سکویی مرکب عبور کرده است و سبب ایجاد روگذری شده است. موج بعدی با ارتفاع ۰/۲ متر در لحظه ۱۳/۵ ثانیه، به سکوی موج‌شکن سکویی مرکب برخورد کرده و با بالاروی در لحظه ۱۱۵ ثانیه موجب ایجاد روگذری دوم شده است. شکل ۱۹ مقادیر و بردارهای سرعت جریان در ثانیه ۱۱۵، برای موج‌شکن سکویی مرکب در حالت سوم را نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]



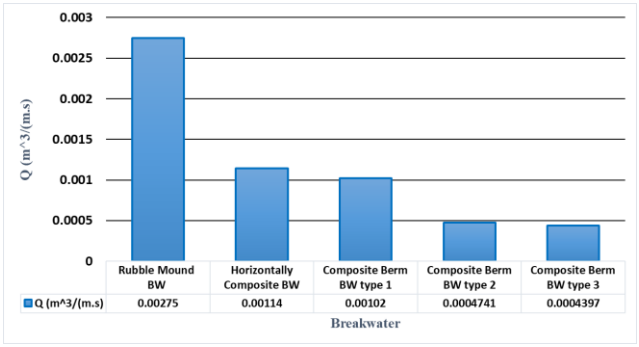
شکل ۱۹ - مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه ۱۱۵ ثانیه (حالت سوم – موجشکن سکویی مرکب)

با ارزیابی مقادیر سرعت میدان جریان در ثانیه ۱۱۵ حالت سوم موج-شکن سکویی مرکب، مشاهده می‌شود که موج برخوردی پس از شکست به دیواره کیسون می‌رسد. دراین حالت که توده سیال با هوادهی بسیار همراه است، کیسون موجشکن سکویی مرکب با افزایش بارگذاری به صورت کوتاه مواجه می‌شود. در ادامه با برخورد موج شکسته شده با دیواره کیسون موجشکن سکویی مرکب، جریان بلوکه می‌شود و بخشی از آن به بالای کیسون می‌رسد. لازم به ذکر است در زمان رسیدن سیال به بالای موجشکن، از کمترین مقدار سرعت جریان در تمامی موارد مورد بررسی ((m/s) ۱/۰۱) برخوردار است.

۶- نتیجه گیری

در زمینه کاهش میزان روگذری امواج، مدل موجشکن سکویی مرکب نسبت به موجشکن توده‌سنگی و کیسونی افقی عملکرد مطلوبی را داشته است. کاهش روگذری باعث کاهش تخریب سازه، تامین ایمنی تاسیسات روی تاج موجشکن و کاهش هزینه‌های حفاظت از سازه خواهد شد. با کاهش روگذری امواج در موجشکن سکویی مرکب امکان ایجاد تاسیسات مهم بر روی تاج موج شکن فراهم می شود.

شکل ۲۰ میزان نرخ میانگین روگذری برای هر سه حالت موجشکن سکویی نسبت به موجشکن توده‌سنگی و کیسونی افقی بیان شده است.



شکل ۲۰ - میزان نرخ میانگین روگذری برای سه حالت موجشکن سکویی نسبت به موجشکن کیسونی افقی و توده‌سنگی

بیشترین نرخ روگذری برای موجشکن توده‌سنگی و کمترین نرخ برای حالت سوم موجشکن سکویی مرکب می باشد. درصد کاهش میزان نرخ روگذری برای حالت اول موجشکن سکویی مرکب نسبت موج-شکن توده‌سنگی کاهش ۶۲/۹۰ ٪، برای حالت دوم موجشکن سکویی مرکب نسبت به موجشکن توده‌سنگی کاهش ۸۲/۷۶ ٪ و برای حالت سوم موجشکن سکویی مرکب نسبت به موجشکن توده‌سنگی کاهش ۸۴/۰۱ ٪ داشته است. نتایج میزان نرخ روگذری به ($m^3/(m.s)$) در جدول ۸ آورده شده اند.

جدول ۸ - درصد کاهش میزان نرخ روگذری امواج در هر ثانیه برای موجشکن سکویی مرکب نسبت به موجشکن توده‌سنگی

موجشکن توده‌سنگی [$m^3/(m.s)$]		۰/۰۰۲۷۵	
موجشکن سکویی مرکب [$m^3/(m.s)$]	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
	۰/۰۰۱۰۲	۰/۰۰۰۴۷۴۱	۰/۰۰۰۴۳۹۷
کاهش میزان نرخ روگذری [درصد]	۶۲/۹۰	۸۲/۷۶	۸۴/۰۱

همچنین در تحلیل میزان نرخ روگذری برای حالت اول موجشکن سکویی مرکب نسبت موجشکن کیسونی افقی کاهش ۱۰/۵۲ ٪ ، برای حالت دوم موجشکن سکویی مرکب نسبت به موجشکن کیسونی افقی کاهش ۵۸/۴۱ ٪ و برای حالت سوم موجشکن سکویی مرکب نسبت به موجشکن کیسونی افقی کاهش ۶۱/۴۲ ٪ داشته است. نتایج بیان شده به اختصار در جدول ۹ آورده شده اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]

جدول ۹ - درصد کاهش میزان نرخ روگذری امواج در هر ثانیه برای موج‌شکن سکویی مرکب نسبت به موج‌شکن کیسونی افقی

موج‌شکن کیسونی افقی [$m^3/(m.s)$]	۰/۰۰۱۱۴		
موج‌شکن سکویی مرکب [$m^3/(m.s)$]	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
	۰/۰۰۱۰۲	۰/۰۰۰۴۷۴۱	۰/۰۰۰۴۳۹۷
کاهش میزان نرخ روگذری [درصد]	٪ ۱۰/۵۲	٪ ۵۸/۴۱	٪ ۶۱/۴۲

در نتیجه با بررسی انجام شده، حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب (ایسلندی) با کمترین میزان روگذری، در زمینه کاهش روگذری امواج مناسب‌ترین عملکرد را داشته است و استفاده از این حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب (ایسلندی) توصیه می شود.

کلید واژگان

1- Cube
2- Tetrapod
3- Composite Berm Breakwater
4- Berm Breakwater
5- Caisson Breakwater
6- Volume of Fluid
7- Fractional Area/Volume Obstacle Representation
8- Interlocking
9- Horizontally Caisson Breakwater
10- Green Water
11- Splash
12- Aeration

۷- مراجع

1. Owen, M. W. (1980). *Design of seawalls allowing for wave overtopping*. Report Ex, 924, 39.
2. Owen, M. W. (1980), *The hydroulic design of seawall profiles*, proc. Conf. On Shoreline Protection, ICE, London, UK: p.185-192.
3. Bradbury, A. P., & Allsop, N. W. H. (1988). P5. *Hydraulic effects of breakwater crown walls*. In Design of breakwaters (p. 385-396). Thomas Telford Publishing.
4. Aminti, P., & Franco, L. (1989). *Wave overtopping on rubble mound breakwaters*. In Coastal Engineering 1988 (p. 770-781).
5. van der Meer, J. W. (1995). *Wave run-up and wave overtopping at dikes*. Wave forces on inclined and vertical structures, ASCE.
6. Goda, Y. (2000). *Random seas and design on marine structures*. Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 15.
7. Kobayashi, N., & Wurjanto, A. (1989). *Wave overtopping on coastal structures*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 115(2), p. 235-251.
8. Hu, K., Mingham, C. G., & Causon, D. M. (2000). *Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the non-linear shallow water equations*. Coastal engineering, 41(4), p. 433-465.
9. Losada, I. J., Lara, J. L., Guanche, R., & Gonzalez-Ondina, J. M. (2008). *Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters*. Coastal engineering, 55(1), p. 47-62.
10. Dentale, F., Donnarumma, G., & Pugliese Carratelli, E. (2013, September). *Rubble mound breakwater: run-up, reflection and overtopping by numerical 3D simulation*. In ICE Conference (pp. 120-130).
11. Du, Y., Pan, S., & Chen, Y. (2010). *Modelling the effect of wave overtopping on nearshore hydrodynamics and morphodynamics around shore-parallel breakwaters*. Coastal Engineering, 57(9), p. 812-826.
12. Yeganeh-Bakhtiary, A., Hajivalie, F., & Hashemi-Javan, A. (2010). *Steady streaming and flow turbulence in front of vertical breakwater with wave overtopping*. Applied Ocean Research, 32(1), p. 91-102. (In Persian)
13. Andersen, T. L., Burcharth, H. F., & Gironella, X. (2011). *Comparison of new large and small scale overtopping tests for rubble mound breakwaters*. Coastal Engineering, 58(4), p. 351-373.
14. Vicinanza, D., Contestabile, P., Nørgaard, J. Q. H., & Andersen, T. L. (2014). *Innovative rubble mound breakwaters for overtopping wave energy conversion*. Coastal Engineering, 88, p. 154-170.
15. Moghim, M. N., Boroujeni, R. F., & Tabari, M. M. R. (2015). *Wave overtopping on reshaping berm breakwaters based on wave momentum flux*. Applied Ocean Research, 53, p. 23-30. (In Persian)
16. Zanuttigh, B., Formentin, S. M., & van der Meer, J. W. (2016). *Prediction of extreme and tolerable wave overtopping discharges through an advanced neural network*. Ocean Engineering, 127, p. 7-22.
17. Ghasemi, A. Shafee Far, M and Panahi, R. (2016). *Numerical Simulation of Wave Overtopping From Armour Breakwater by Considering Porous Effect*, Jurnal of Marin Engineering, vol. 11, no. 22. (In Persian)
18. Milanian, F., Niri, M. Z., & Najafi-Jilani, A. (2017). *Effect of hydraulic and structural parameters on the wave run-up over the berm breakwaters*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 9(3), p. 282-291.
19. Pillai, K., Etemad-Shahidi, A., & Lemckert, C. (2017). *Wave overtopping at berm breakwaters: Experimental study and development of prediction formula*. Coastal Engineering, 130, p. 85-102.
20. Tsai, C. P., Ko, C. H., & Chen, Y. C. (2018). *Investigation on performance of a modified breakwater-integrated OWC wave energy converter*. Sustainability, *10*(3), 643.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]

21. Amirabadi R, Rezaee mazyak A, Ghasemi A. (2018). *Numerical Modeling Investigation of Irregular Wave Interaction with Perforated Caisson Breakwater*, Journal Of Marine Engineering, 14 (27), p. 69-79. (In Persian)
22. Sasikumar, A., Kamath, A., Musch, O., Bihs, H., & Arntsen, Ø. A. (2019). *Numerical Modeling of Berm Breakwater Optimization With Varying Berm Geometry Using REEF3D*. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 141(1), 011801.
23. Hirt, C. W., & Nicholas, B. (1998). Flow-3D User's Manual. Flow Science Inc.
24. F. Science, *FLOW-3D Documentation*, (2012).
25. Samani, H. M., Samani, J. M., & Shaiannejad, M. (2003). *Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dams*. Journal of Hydraulic Engineering, 129(6), p. 448-454.
26. PIANC, W. (2003). *State-of-the-Art of Designing and Constructing Berm Breakwaters*. Report of working group, 40.
27. Sigurdarson, S., Van Der Meer, J. W., Burcharth, H. F., & Sørensen, J. D. (2009). *Optimum safety levels and design rules for the Icelandic-type berm breakwater*. In Coastal Structures 2007: (In 2 Volumes) (p. 53-64).
28. Hall, K. and Kao, S. (1991). *A Study of the Stability of Dynamically Stable Breakwaters*, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 18, p.916-925.
29. Moghim, M. N., Shafieefar, M., Tørum, A., & Chegini, V. (2011). *A new formula for the sea state and structural parameters influencing the stability of homogeneous reshaping berm breakwaters*. Coastal Engineering, 58(8), p. 706-721.
30. Torum, A., Krogh, S. R., Bjordal, S., Fjeld, S., Archetti, R., & Jacobsen, A. (1999). *Design criteria and design procedures for berm breakwaters.* In Proc., Coastal Structures' 99 (p. 331-341). Rotterdam, The Netherlands: Balkema.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.11.9]