مدلسازی عددی روگذری موج از موجشکن سکویی مرکب

سیدمر تضی 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	چکیدہ
<i>تاریخچه مقاله:</i> تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴	موج شکنها در طول تاریخچه ساخت خود د ستخوش تغییراتی شدهاند. این تغییرات بسته به شرایط محیطی و کاربری، با هدف بهبود عملکرد آن ها بوده است. رو گذری به عنوان یکی از پارامتر های هیدرولیکی مهم در عملکرد موجشکنها همواره مورد ارزیابی و بهینهسازی قرار گرفته است. در این مطالعه به بررسی روگذری امواج از موجشکن سکویی مرکب به عنوان موجشکنی نوین، پرداخته شده
<i>کلمات کلیدی:</i> موج شکن سکویی مرکب موج شکن سکویی روگذری موج موج شکن توده سنگی موج شکن کیسونی افقی	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 مقایسه شده است. نتایج حاکی از کاهش به ترتیب ۲۰/۹۱ و ۲۶/۱۴ درصدی میزان روگذری در موج شکن

Numerical Simulation of Wave Overtopping Over Composite Berm Breakwater

Seyed Morteza Marashian¹, 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 breakwaters. The results show a decrease of 84.01% of the overtopping in the composite 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.

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 آز مایشـگاهی، همواره مورد تو جه محققین قرار گیرد. موجشکن ها در طول تاریخچه ساخت خود دسـتخوش تغییراتی شده اند. این تغییرات بسـته به شرایط محیطی ساختگاه، معادن قرضه مصالح و کاربری خود باعث بوجود آوردن انواع موجشکن شده اند.

از جمله واكنش هاى هيدروديناميكي مهم مربوط به موجشكنها، می توان به روگذری امواج اشاره کرد که در صورت بالا بودن میزان رو گذری، تخریب و محدودیت در بهرهبرداری از تاج موجشکن و کاهش آرامش در حو ضچه 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 محققين منجر به ارائه روابط نيمه تجربی جهت پیشبینی میزان متو سط 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 سینگی یا آرمور بتنی از نوع کوب و تتراپاد ۲ 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 رو گذری را کمتر از مقدار واقعی پیش بینی 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 رو گذری از معادلات غیرخطی آب کم عمق ارا ئه نمود ند. این در مورتی 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 ا ساس 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 FLOW-3D توده سنگی پرداختند که نتایج حاصل از مدل عددی TEOW-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 سیکویی شیکل پذیر 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 رو گذری مطالعاتی را انجام داد [۱۶]. قاسیمی و همکاران (۲۰۱۶)، بوسیله مدل عددی GW-3D به بررسی روگذری موج از موجشکن مدل عددی IV

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 آزمای شگاهی و با هدف تو سعه روابط در این زمینه صورت گرفت [۱۹]. تسای و همکاران (۲۰۱۸)، به مدلسازی عددی اندر کنش 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 موج شکن 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

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[†] 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 شكن سكويي، مدل موج شكن سكويي مركب طراحي 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 واسنجى و صحتسنجى مدل عددى صحت عملكرد مدل عددی در مدلسازی روگذری بررسی خواهد شد. همچنین با معرفی حالت های مورد ارزیابی موجشکن سکویی مرکب به بررسی و تفسیر نتایج بدســت آمده از مدلسـازی عددی پرداخته می شــود. 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 شبیه سازی 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 و سیعی از جمله جریان های غیر ماندگار طراحی شده است [۲۳]. FLOW-3D از جمله برای شبیه سازی در محیط عددی از FLOW-3D Intel® coreTM i7- یا مشخصات -i7 TroohQ @ 2.8GHz to 2.81GHz and 24GB RAM استفاده شده است.

در FLOW-3D از دو تکنیک برای شبیه سازی هندسی مرز سیال و مرز صلب استفاده شده است. حجم سیال^۶ (VOF)، برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می گیرد و کسر مساحت – حجم مانع^۷ (FAVOR) برای شیبیه 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 می باشد. همچنین معادلات حاکم بر جریان سیال، نشان دهنده قوانین فیزیکی بقا بصورت عبارت ریاضی می باشد. همچنین در ادامه با بیان معادلات حاکم بر حرکت سیال، مدل های آ شفتگی

به مدلسازی جریان در محیط متخلخل پرداخته می شود. یکی از این قوانین، معادله پیوستگی می باشد. معادله پیوستگی از قانون بقای جرم و با نوشتن معادلات تعادل جرم برای یک حجم از سیال و با فرض تراکم ناپذیری سیال در سه جهت x، y و z به صورت رابطه (۱) بدست می آید.

$$\frac{\partial_{(u)}}{\partial_{(x)}} + \frac{\partial_{(v)}}{\partial_{(y)}} + \frac{\partial_{(w)}}{\partial_{(z)}} = 0 \tag{1}$$

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.

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

در این معادلهها g_x , g_y و g_z شتابهای واحد جرم در جهتهای x y و z است، μ وی سکوزیته سیال، ρ چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و P فشار سیال بر حسب پاسکال میباشند. RNG می FLOW-3D میتوان از چندین مدل آ شفتگی از جمله RNG $x - \varepsilon$ $k - \varepsilon$ الOW-3D میتوان از چندین مدل آ شفتگی از جمله $x - \varepsilon$ ، $x - \varepsilon$ $k - \varepsilon$ اید LES میتوان از چندین مدل $k - \varepsilon$ از معادلاتی شبیه به $k - \varepsilon$ $k - \varepsilon$ استفاده میکند. ثوابتی که به طور تجربی در مدل های $k - \varepsilon$ استاندارد بدست آمده است، در مدل RNG به طور صریح s - x استاندارد بدست آمده است، در مدل RNG به طور صریح z - x استاندارد بدست آمده است، در مدل SUG به طور صریح z - z استاندارد بدست آمده است، در مدل RNG به طور صریح z - z استاندارد بدست آمده است، در مدل RNG به طور صریح z - z استاندارد بد ست آمده است، در مدل RNG به طور صریح z - z استاندارد بد ست آمده است، در مدل SUG به طور صریح z - z استاندارد بد ست آمده است، در مدل SUG به صور می می ازی نامنظم وجود دارد. در این مطالعه از شـرط 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 نمی کند. با افزایش عدد رینولدز و کاهش فشار، رابطه دار سی از حالت خطی خارج می شود. بنابراین لازم است از روابطی استفاده شود که علاوه بر تبیین خصو صیات فیزیکی این محیطها بتواند هیدرولیک جریان آنها را نیز شبیه



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 وی سکوزینه – آ شفتگی فعال شده است. مدل آ شفتگی RNG در نظر گرفته شده است. لایه آرمور، فیلتر و هسته به صورت متخلخل و کیسون موج شکن در تاج آن به صورت صلب می باشد. ضریب تخلخل لایه آرمور و فیلتر ۵/۰ و هسته ۸/۰ است. ضریب زبری (β) هسته برابر ۲ و آرمور و فیلتر برابر ۳ است. ضرایب درگ خطی و غیر خطی A و B بهدست آ مده از روابط (۴) و (۵) در 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

٩٨٧۶	آرمور [A]
22/22	آرمور [B]
148928	فيلتر[A]
$A \Delta / Y I$	فيلتر [B]
١٨٠٠٠٠	هسته[A]
۲۰۰	هسته[B]

سازی کند. در این مطالعه از فرم دو جملهای بین گراد یان هیدرولیکی و سرعت استفاده شده است که معادله فور شهایمر (۳) نیز معروف است و با استفاده از معادلات ناویرا ستوکی بد ست آمده است.

$$I = Au + Bu^2 \tag{(Y)}$$

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.

$$A = \frac{180}{d_{pore}2} \tag{(f)}$$

$$B = \frac{\beta}{d_{pore}} \tag{(a)}$$

که در این روابط، β ضریب نرمی یا زبری سنگها می باشد که از ۱/۸ تا ۴ بســته به نوع ســنگ تغییر می کند و d_{pore} قطر اســمی 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 شبیه سازی، ارزیابی خواهد شد.

۱-۳- معرفی مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه از نتایج مدل آزمایشیگاهی موجشیکن تودهسینگی لوسادا و همکاران (۲۰۰۸)، جهت واسینجی و صحتسینجی 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، ۵/۳ و ۱۳/۵ سانتیمتر هستند. این مدلسازی آزمایشگاهی در فلوم موجی به طول ۶۰ متر، عرض ۲ متر و ارتفاع ۲ متر بو سیله طیف جانسوآپ دارای ارتفاع مشخصه موج ۱۸/۸ متر و پریود پیک ۵ و ۶ ثانیه، انجام شده است [۹]. شکل ۱ نشان دهنده مشخصات مدل آزمایشگاهی محل فشارسنجها و موقعیت موجنگارها در فلوم موج است.

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- حساسیت سنجی

انتخاب مناسب تعداد سلول محاسباتي مناسب به افزايش دقت شبیهسازی عددی و کاهش زمان شبیهسازی کمک میکند. چنانچه که با کاهش تعداد سلول محاسباتی، به شبیهسازی صحیح نمی توان ر سید 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 بد ست آمده از تحلیل حسا سیت برای روگذری با مشخصات، ارتفاع مشخصه موج (Hs) ۰/۱۸ متر و پريود پيک (Tp) ۶ ثانيه در شکل ۲ آمده است. در جدول ۲ مشاهده می شود 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.



---- lab ---- Num (1000000 mesh) ---- Num (2000000 mesh) ---- Num (500000 mesh)

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					
ميزان بهبود نتايج	ميزان تغيير	مدت زمان شبيه-	تعداد سلول		
[درصد]	نتايج [درصد]	سازی [ساعت]	محاسباتي		
۵۰۰ هزار←۱میلیون	۲۰/۷۲	١۴	۵۰۰۰۰		
۱۲/۱۹	۸/۵۳	۴۳	1		
۱میلیون←۲میلیون	-				
۱/۴۶	۶/۸۹	171	7		
	-				

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(Hs) ۸/۱۸ متر و پریود پیک(Tp) 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؛ فشار سنج ۳، ف شار خارج از محیط متخلخل – ف شار سنج ۱ و ۷، ف شار درون محیط متخل خل) و رو گذری 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)





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 ۲. مقدار درصد خطای نسبی مدل عددی			
خطای نسبی مدلسازی [درصد]	نتايج بررسي		
۱۲/۳۸	فشارسنج ۳		
۶/۶ •	فشارسنج ۱		
11/84	فشارسنج ۷		
٨/۵٣	روگذری (واسنجی)		
8/8N	روگذری (صحتسنجی)		
٩/١٠	میانگین خطای مدلسازی عددی		

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].



شکل ۴ – مقایسه تاریخچه زمانی نتایج تغییرات فشار در فشارسنج۳، ۱ و ۷ (آبی – آزمایشگاهی، قرمز – مدلسازی عددی)





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

Composite Berm Breakwater



شکل ۲ – 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) – موجشـکن سـکویی مرکب با سـکوی 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 تو صیههای طراحی مطرح شده در تحقیقات سیگوردار سن 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 بخش های ندارد.



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

۱-۴- عرض سکو

از نکات حائز اهمیت در مدلسازی سنگدانههای موجشکن، مدل سازی قفل و بست^۸ بین سنگدانهها میبا شد. 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 مدا سازی موج شکن سکویی مرکب شـکلیذیر امکان پذیر نباشـد. محققین بسـیاری در رابطه با عرض فرسایش یافتهی سکو تحقیق کردهاند که این روابط بر مبنای شکل پذیری سازه توسعه یافتهاند. به عنوان مثال در رابطه ارائه شده توسط هال و کاو (۱۹۹۱)، تاثیر D₁₅ و D₈₅ (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 شکل گیری 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 سـكو پيشـنهاد كردند [٢٧]. در اين مطالعه عرض فر سایش یافته سکو (Rec) به و سیله رابطه (۶) مربوط به توروم و همکاران (۱۹۹۸)، محاسبه می شود [۳۰].

 $\begin{aligned} Rec/D_{n50} &= 0.0000027(H_0T_0)^3 + 0.000009(H_0T_0)^2 \\ &+ 0.11(H_0T_0) - 0.8 \end{aligned} \tag{6}$

در این رابطه D_{n50} : قطر اسـمی سـنگ لایه آرمور، H_0T_0 : پارامتر بی بعد شــده (اثر پریود میانگین موج) و محدوده اعتبار رابطه فوق برای ۲۰–۳۰ $H_0T_0 >$ ست.

۲-۴- 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

عدد پايدارى	اهميت پروژه
۲/٨>	مهم
$\gamma/\lambda-\pi$	معمولى
r/r-r	کم اھمیت
k >	موقت

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

جدول ۶ – ضرایب درگ بدست آمده برای موجشکن سکویی مرکب

حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	ضرایب درگ
٩٨٨٧	٩٨٨٧	٩٨٨٧	آرمور-كلاسI [A]
22/22	22/22	22/22	آرمور-كلاسI [B]
۱۲۰۰۰	*	*	کلاسII [A]
٣٠	*	*	کلاسIB] II]
148989	148989	148989	فيلتر-كلاسIII [A]
٨۶	٨۶	٨۶	فيلتر-كلاسIII [B]
۱۸۰۰۰۰	۱۸۰۰۰۰	۱۸۰۰۰۰	زیرسازی کیسون [A]
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	زیرسازی کیسون [B]

همچنین لازم به ذکر است که موج شکنهای کیسونی افقی^۹ از نظر چینش مصالح جلوی کیسون به موج شکن های سکویی مرکب شباهت دارند. شکل ۹ نمایی از موج شکن کیسونی افقی و موج شکن سکویی مرکب را نشان می دهد.



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

همین موضوع سبب شده است تا مدلسازی عددی موج شکن کیسونی افقی، با هدف مقایسه با موج شکن سکویی مرکب نیز انجام شود. لازمه بررسی رفتار این دو موج شکن وجود شرایط هندسی و محیطی مشابه است. لازم به ذکر است ضرایب درگ A و B برای سنگ آرمور، سنگدانه فیلتر و مصالح زیر سازی کیسون در مدل سازی محیط متخلخل مدل عددی موج شکن کی سونی افقی با توجه به یکسان بودن قطر اسمی سنگ آرمور، فیلتر و مصالح زیرسازی کیسون با حالت اول و دوم موج شکن سکویی مرکب مطابق جدول ۵ می با شد. در این مدلسازی از موج نامنظم با ارتفاع موج مشخصه ۱۸/۸ متر و پریود پیک ۵ ثانیه استفاده شده است. همچنین در صد تخلخل لایه آرمور و فیلتر ۵/۰ در نظر گرفته شده است. جدول ۲ مقادیر پارامترهای هندسی مورد استفاده در مدلسازی عددی موج شکن کیسونی افقی را بیان میکند.

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

	پارامتر های هندسی
۱ : ۱/۲۵	شيب مصالح آرمور
٠/٢	تراز مصالح آرمور نسبت به سطح ایستابی [m]
• / ٢	تراز تاج موجشكن نسبت به سطح ايستابي [m]
۱/۰۴	عرض تاج موجشکن [m]
٠/١٣۵	قطر اسمی سنگ آرمور [m]
۰/۰۳۵	قطر اسمی سنگدانه فیلتر [m]
• / • ١	قطر اسمی زیرسازی کیسون [m]

$$H_0 = N_s = H_s / \Delta D_{n50} \tag{Y}$$

$$\Delta = \rho_s / \rho_w - 1 \tag{(A)}$$

جدول ۵ - مقادیر هندسی محاسبه شده برای موجشکن سکویی مرکب

حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	موجشکن سکویی مرکب
۱ : ۱/۲۵	۱ : ۱/۲۵	۱ : ۱/۲۵	شيب پايين سكو
۰/۱۳۵	•/180	۰/۱۳۵	تراز سکو [m]
۰/۲	۰/۲	۰/۲	تراز تاج [m]
۱/۰۴	1/•4	۱/۰۴	عرض تاج [m]
•/١٣۵	•/١٣۵	۰/۱۳۵	Dn50 آرمور و کلاس I [m]
•/\•	*	*	Dn50 کلاس II]
۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	Dn50 فيلتر و كلاس III [m]
• / • ١	• / • ١	• / • 1	Dn50 زیرسازی کیسون [m]
·/۵۵	•/۵۵	•/۵۵	عرض سکو [m]

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 ۵/۰ و برای مصالح زیر سازی کیسون برابر ۲ و برای میباشد. ضریب زبری برای مصالح زیر سازی 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.

۳-۴- برنامه آزمایشها

با توجه به سه هندسه متفاوت از موج شکن سکویی مرکب اقدام به مدلسازی عددی موج شکن سکویی مرکب شده است. به منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد هیدرولیکی موج شکن 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 ۸/۰ متر و مدت زمان شبیه سازی ۱۶۰ ثانیه می باشد. همچنین در شکل ۱۰ نمایی شرماتیک از تمامی موج شکنهای 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 باشـــد. برای مشخص شدن اینکه موج شکن سکویی مرکب چه مقدار در کاهش روگذری نا شی از امواج موثر است، در این بخش به ارزیابی عملکرد موج شکن سکویی مرکب در رابطه با روگذری امواج پرداخته خواهد شد. در شکل ۱۱ موج شکن سکویی مرکب در سه حالت با موج شکن تودهسنگی و کیسون افقی مقایسه شده است.





در شکل ۱۱ مشاهده می شود که روگذری برای موج شکن توده سنگی 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 موج شکن سکویی مرکب در ثانیه ۱۰۹ شروع روگذری را نشان می دهد و روگذری در طول مدلسازی، مربوط به موجی با ارتفاع حداکثری می باشد.

۱-۵-بررسی میدان سرعت

در ادامه به بررسی و تحلیل مکانیسم روگذری در حالت اول، دوم و سوم موجشکن سکویی مرکب پرداخته می شود. 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) ۱/۹۸ برای ثانیه ۱۱۰ و (m/s) برای ثانیه ۱۱۵ است. نتایج به دست آمده، مقادیری تقریبا مشابه به هم را نشان می دهد. سکوی همگن با وجود تاثیر آن در کاهش مقادیر روگذری و سرعت جریان، به علت نفوذ بیشتر جریان در داخل محیط و سوم پر می شود. این موضوع سبب شده است که در حالت اول موجشکن سکویی مرکب مقادیر روگذری کاهش داشته باشد ولی نوع روگذری (آب سبز^{۱۱}) تغییر نکند. با توجه به آب سبز بودن روگذری، حالت اول موجشکن سکویی مرکب در زمانهای ۱۰۱ و ۱۱۵ ثانیه،



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 لایه یآرمور 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^{۱۱} موج است و مربوط به هنگامی است که امواج روی دیواره کیسون در تاج می-شکنند. 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^{۱۲} 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) 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) (m/s) 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 سرمت جریان عبوری از روی کیسون ((m/s) ۲/۶۹ – حالت دوم و 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.



شکل ۱۵ - مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه ۱۱۰ ثانیه (حالت



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 ۱۱۰۰، 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 ۵H_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 سکوی موجشکن سکویی مرکب، در ثانیه ۱۱۰ از روی کیسون موج-شکن سکویی مرکب عبور کرده است و سبب ایجاد روگذری شده شکن سکویی مرکب عبور کرده است و سبب ایجاد روگذری شده است. موج بعدی با ارتفاع ۲/۰ 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.



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)) 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 سوم موجشکن داشته است. نتایج میزان نرخ روگذری به ((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

	•/•• ٣٧۵		موجشكن تودەسنگى [m³/(m.s)]
حالت سوم ۰/۰۰۰۴۳۹۷	حالت دوم ۰/۰۰۰۴۷۴۱	حالت اول ۰/۰۰۱۰۲	موجشکن سکویی مرکب [m³/(m.s)]
٨۴/٠١	۸۲/۷۶	७४/९•	کاهش میزان نرخ روگذری [درصد]

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. 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 shoreparallel 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. Pillai, K., Etemad-Shahidi, A., & Lemckert, C. 19. (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. جدول ۹ - درصد کاهش میزان نرخ روگذری امواج در هر ثانیه برای موجشکن سکویی مرکب نسبت به موجشکن کیسونی افقی

	•/••114		موجشكن كيسونى افقى [m³/(m.s)]
حالت سوم ۰.۰۰۴۳۹۷	حالت دوم ۴۷۴۱.۰۰۰	حالت اول	موجشکن سکویی مرکب [m³/(m.s)]
<u>/.</u> ۶۱/۴۲	·/ Δλ/۴۱	1.1.107	کاهش میزان نرخ روگذری [درصد]

در نتیجه با بررسی انجام شده، حالت سوم موج شکن سکویی مرکب (ایسلندی) با کمترین میزان روگذری، در زمینه کاهش روگذری امواج مناسب ترین عملکرد را داشته است و استفاده از این حالت سوم موج شکن 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.

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. 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.