

## مدلسازی عددی روگذری موج از موج شکن سکویی مرکب

سیدمرتضی مرعشیان<sup>۱</sup>، مهدی عجمی<sup>۲\*</sup>، احمد رضایی مزیک<sup>۳</sup><sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود؛ morteza.marashian@shahroodut.ac.ir<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود؛ adjami@shahroodut.ac.ir<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ a.rezaemazyak@modares.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

موج شکن‌ها در طول تاریخچه ساخت خود د ستخوش تغییراتی شده‌اند. این تغییرات بسته به شرایط محیطی و کاربری، با هدف بهبود عملکرد آن‌ها بوده است. روگذری به عنوان یکی از پارامترهای هیدرولیکی مهم در عملکرد موج شکن‌ها همواره مورد ارزیابی و بهینه‌سازی قرار گرفته است. در این مطالعه به بررسی روگذری امواج از موج شکن سکویی مرکب به عنوان موج شکنی نوین، پرداخته شده 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، موج شکن 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 بررسی و مقایسه شده است. نتایج حاکی از کاهش به ترتیب ۸۴/۰۱ و ۶۱/۴۲ درصدی میزان روگذری در موج شکن سکویی مرکب، نسبت به موج شکن توده سنگی و کیسونی افقی دارد.

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

## Numerical Simulation of Wave Overtopping Over Composite Berm Breakwater

Seyed Morteza Marashian<sup>1</sup>, Mehdi Adjami<sup>2\*</sup>, Ahmad Rezaee Mazyak<sup>1</sup> MSc, Water and Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology; morteza.marashian@shahroodut.ac.ir<sup>2</sup> Assistant Professor, Water and Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology; adjami@shahroodut.ac.ir<sup>3</sup> Ph.D. student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, TMU; a.rezaemazyak@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 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.

یک بندر معمولاً از چندین قسمت مجزا تشکیل می‌شود. یکی از قسمت‌های مهم بندر، موج‌شکن است. به طور کلی، موج‌شکن سازه‌ای است که در برابر امواج سهمگین دریا مقاومت می‌کند و محلی آرام برای پهلوگیری، باراندازی و بارگیری شناورها ایجاد می‌نماید. این امر موجب گردیده است تا مدل‌سازی عددی و در نهایت مطالعات آزمایشگاهی، همواره مورد توجه محققین قرار گیرد. موج‌شکن‌ها در طول تاریخچه ساخت خود دستخوش تغییراتی شده‌اند. این تغییرات بسته به شرایط محیطی ساختگاه، معادن قرصه مصالح و کاربری خود باعث بوجود آوردن انواع موج‌شکن شده‌اند.

از جمله واکنش‌های هیدرودینامیکی مهم مربوط به موج‌شکن‌ها، می‌توان 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 می‌آورد. در سال‌های 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 موج‌شکن‌های 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 موج‌شکن‌های دارای آرمور سنگی یا آرمور بتنی از نوع کوب<sup>۱</sup> و تتراپاد<sup>۲</sup> را مورد ارزیابی قرار دادند [۴]. ون دیر میر و جانسن موج‌شکن‌های 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 در نظر نگرفته و دبی روگذری را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند [۶].

با پیشرفت قدرت محاسباتی رایانه‌ها در سال‌های اخیر مدل‌های عددی زیادی به منظور مدل‌سازی روگذری امواج توسعه و مورد استفاده محققین قرار گرفته‌اند. از اولین بررسی‌ها می‌توان 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 توسعه 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 موج‌شکن توده سنگی را معرفی کردند [۱۴]. مقیم و همکاران (۲۰۱۵)، شار مومنتوم موج ناشی از روگذری موج بر موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر را مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. زانوتیک و همکاران (۲۰۱۶)، به وسیله شبکه عصبی پیشرفته جهت پیش‌بینی 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 به وسیله مدل عددی FLOW-3D انجام شده است، نشان دهنده نتایج دقیقی از بالاروی موج در موج‌شکن سکویی است [۱۸]. پیلائی و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی روگذری موج از موج‌شکن سکویی پرداختند. این بررسی‌ها به صورت آزمایشگاهی و با هدف توسعه روابط در این زمینه صورت گرفت [۱۹]. تسای و همکاران (۲۰۱۸)، به مدل‌سازی عددی اندرکنش موج و موج‌شکن حفره‌دار پرداختند و هندسه جدیدی از حفره و موج‌شکن 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 صندوقه‌ای حفره‌دار به وسیله مدل عددی FLOW-3D پرداختند که نتیجه آن کاهش انعکاس و روگذری موج‌شکن صندوقه‌ای حفره‌دار نسبت به موج‌شکن صندوقه‌ای بود [۲۱]. ساسیکومار و همکاران (۲۰۱۹)، به وسیله REEF3D به مدل‌سازی عددی موج‌شکن سکویی در حالت شکل‌ناپذیر (پایدار استاتیکی) پرداختند و تاثیر هندسه سکو بر فشار

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 می‌آید.

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

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 ناور استوکس بصورت رابطه (۲) می‌باشد.

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial(v)}{\partial t} + u \frac{\partial(u)}{\partial x} + v \frac{\partial(u)}{\partial y} + w \frac{\partial(u)}{\partial z} \right) &= \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left( \frac{\partial(v)}{\partial t} + u \frac{\partial(v)}{\partial x} + v \frac{\partial(v)}{\partial y} + w \frac{\partial(v)}{\partial z} \right) &= \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left( \frac{\partial(w)}{\partial t} + u \frac{\partial(w)}{\partial x} + v \frac{\partial(w)}{\partial y} + w \frac{\partial(w)}{\partial z} \right) &= \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

در این معادله‌ها  $g_x$ ،  $g_y$  و  $g_z$  شتاب‌های واحد جرم در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  است،  $\mu$  ویسکوزیته سیال،  $\rho$  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  $k-\epsilon$ ،  $k-\epsilon$  استفاده می‌کند. ثوابتی که به طور تجربی در مدل‌های  $k-\epsilon$  استاندارد بدست آمده است، در مدل RNG به طور صریح استحصال می‌شود. اما به طور کلی مدل RNG کاربرد و وسیع‌تری نسبت به  $k-\epsilon$  دارد. همچنین مدل LES برای شبیه‌سازی گردابه‌های 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 جانسواپ استفاده شده است [۲۴].

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

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

در تحقیق حاضر به بررسی روگذری ناشی از امواج در موج‌شکن سکویی مرکب<sup>۳</sup> پرداخته شده است. موج‌شکن سکویی مرکب را می‌توان به صورت ترکیبی از موج‌شکن سکویی<sup>۴</sup> و موج‌شکن کیسونی<sup>۵</sup> 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 موج‌شکن سکویی، مدل موج‌شکن سکویی مرکب طراحی شده است. به کارگیری نام مرکب به دلیل وجود کیسون در موج‌شکن سکویی در نظر گرفته شده است. از اینرو در این مطالعه ابتدا مدل عددی به منظور شبیه‌سازی 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 حالت‌های مورد ارزیابی موج‌شکن سکویی مرکب به بررسی و تفسیر نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی پرداخته می‌شود. این بررسی‌ها شامل ارزیابی عملکرد موج‌شکن سکویی مرکب در کاهش میزان روگذری و الگوی میدان سرعت در حالت‌های مختلف می‌باشد.

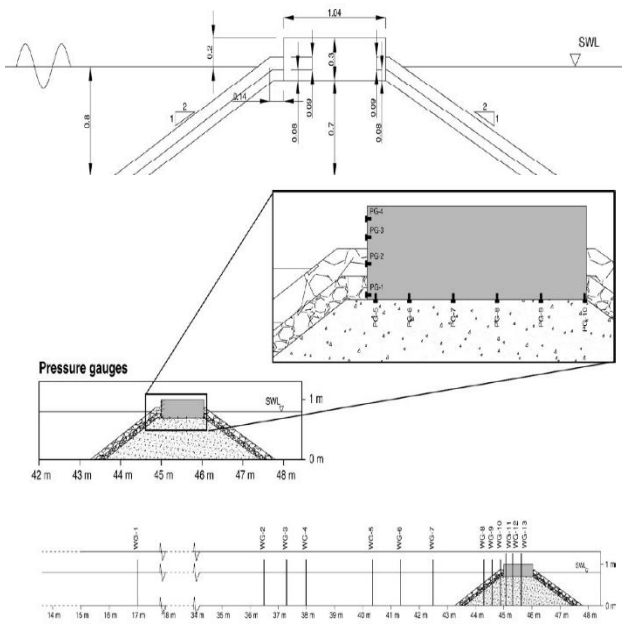
## ۲- انتخاب مدل عددی

در این مطالعه از نرم‌افزار FLOW-3D که نرم‌افزاری قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی مسائل پیچیده سیالاتی می‌باشد، استفاده شده است. این نرم‌افزار برای مطالعه در مورد رفتار یک، دو و سه بعدی دینامیکی سیالات در طیف کاربردی و وسیعی از جمله جریان‌های غیر ماندگار طراحی شده است [۲۳]. در این مطالعه برای شبیه‌سازی در محیط عددی از FLOW-3D ver.11.0.4 و پردازنده‌ای 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<sup>۶</sup> (VOF)، برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و کسر مساحت - حجم مانع<sup>۷</sup> (FAVOR) برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد.

### ۲-۱- معادلات حاکم

در نرم‌افزار 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



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 ویسکوزیته - آشفتگی فعال شده است. مدل آشفتگی 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 ۰/۵ و هسته ۰/۴۸ است. ضریب زبری ( $\beta$ ) هسته برابر ۲ و آرمور و فیلتر برابر ۳ است. ضرایب درگ خطی و غیر خطی A و B به دست 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 مرزها شرط مرزی دیوار انتخاب شده است. هندسه موج شکن توده سنگی 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

سازی کنند. 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 بدست آمده است.

$$I = Au + Bu^2 \quad (3)$$

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

$$A = \frac{180}{d_{pore}^2} \quad (4)$$

$$B = \frac{\beta}{d_{pore}} \quad (5)$$

که در این روابط،  $\beta$  ضریب نرمی یا زبری سنگ‌ها می باشد که از ۱/۸ تا ۴ بسته به نوع سنگ تغییر می کند 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 موج شکن توده سنگی لوسادا و همکاران (۲۰۰۸)، جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی FLOW-3D استفاده شده است. موج شکن توده سنگی بیان شده با عرض ۲ متر می باشد. سنگدانه‌های هسته، فیلتر و آرمور به ترتیب ۱، ۳/۵ و ۱۳/۵ سانتی متر هستند. این مدلسازی آزمایشگاهی در فلوم موجی به طول ۶۰ متر، عرض ۲ متر و ارتفاع ۲ متر بوسیله طیف جانسواپ دارای ارتفاع مشخصه موج ۰/۱۸ متر و پرپود 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.

### ۳-۲- مدل‌سازی عددی

در این بخش به واسنجی و در ادامه جهت بررسی صحت عملکردی، به صحت‌سنجی مدل عددی پرداخته می‌شود. 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

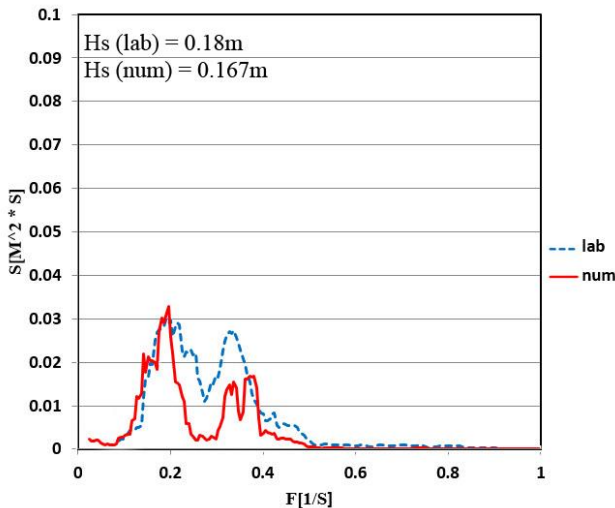
انتخاب مناسب تعداد سلول محاسباتی مناسب به افزایش دقت شبیه‌سازی عددی و کاهش زمان شبیه‌سازی کمک می‌کند. چنانچه که با کاهش تعداد سلول محاسباتی، به شبیه‌سازی صحیح نمی‌توان رسید و با افزایش تعداد سلول محاسباتی باعث طولانی شدن زمان حل عددی خواهد شد. نتایج تحلیل حساسیت برای سه شبکه محاسباتی شامل؛ ۲ میلیون مش (ابعاد مش در هر سه جهت تقریباً ۴/۵ سانتی متر)، ۱ میلیون مش (ابعاد مش در هر سه جهت تقریباً ۵/۵ سانتی متر) و ۵۰۰ هزار مش (ابعاد مش در هر سه جهت تقریباً 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 پرپود پیک (Tp) 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.

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

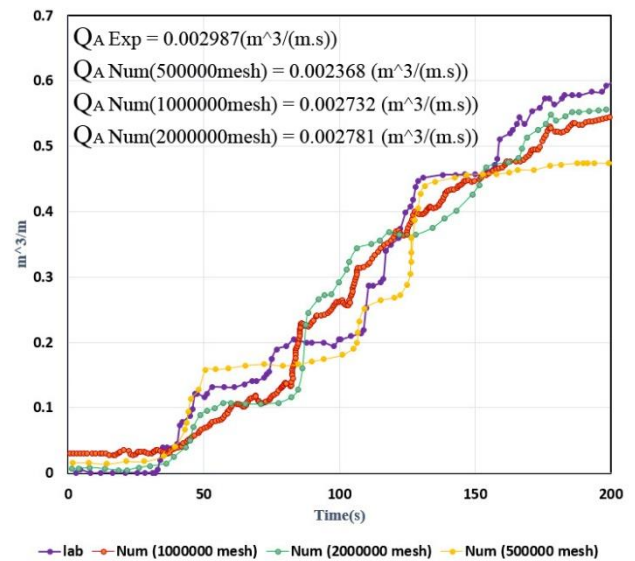
تعداد سلول محاسباتی	مدت زمان شبیه‌سازی [ساعت]	میزان تغییر نتایج [درصد]	میزان بهبود نتایج [درصد]
۵۰۰۰۰۰	۱۴	۲۰/۷۲	۵۰۰ هزار ← ۱ میلیون
۱۰۰۰۰۰۰	۴۳	۸/۵۳	۱۲/۱۹
۲۰۰۰۰۰۰	۱۲۱	۶/۸۹	۱ میلیون ← ۲ میلیون
			۱/۴۶

### ۳-۴- واسنجی و صحت‌سنجی

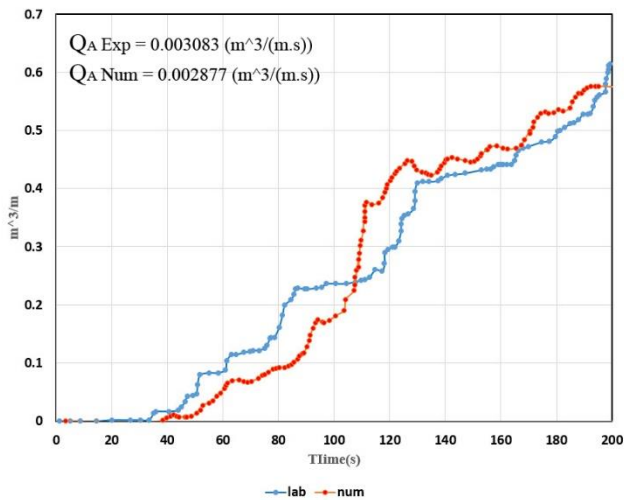
با توجه به در اختیار بودن مشخصات موج، فشار و روگذری برای موج‌شکن توده‌سنگی لوسادا و همکاران (۲۰۰۸) با ارتفاع موج مشخصه ( $H_s$ ) ۰/۱۸ متر و پرپود پیک (Tp) ۶ ثانیه (طیف جانسوآپ)، در این بخش به واسنجی مدل عددی پرداخته شده است. لازم به ذکر است جهت واسنجی طیف موج حاصل از نتایج تغییرات تراز آب مربوط به موج‌نگار 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؛ 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)



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



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 صحت‌سنجی 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.

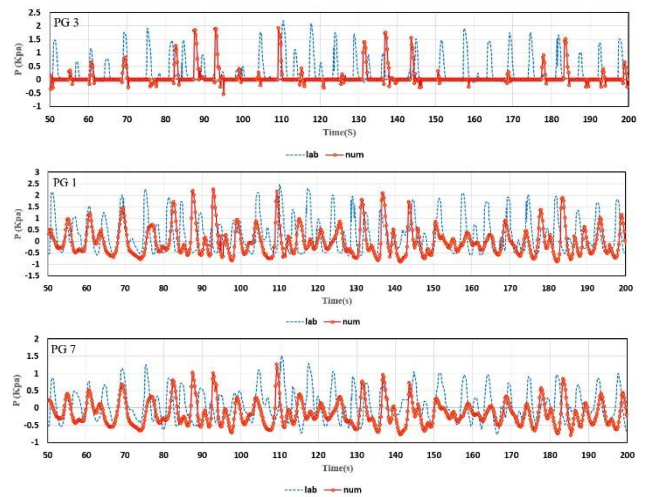
جدول ۳: مقدار درصد خطای نسبی مدل عددی

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

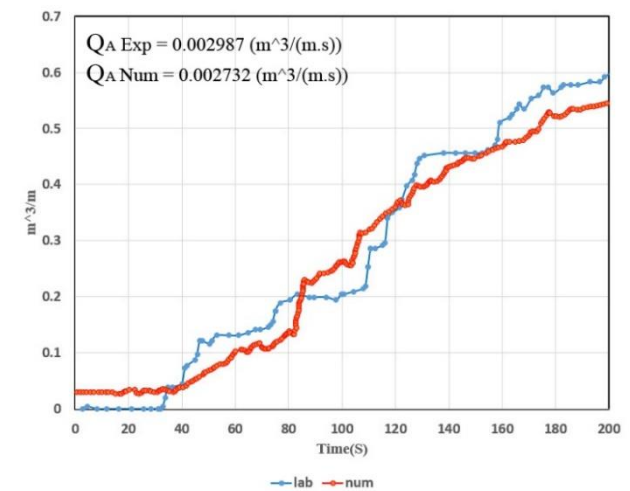
بررسی نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی FLOW-3D نشان می‌دهد که نتایج مدل عددی در مدل‌سازی فشار وارد بر کیسون، روگذری امواج قابل قبول است.

#### 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 می‌آید، برای طراحی سکوی جلوی کیسون رابطه‌ای وجود ندارد. به این ترتیب برای طراحی سکوی موج‌شکن سکویی مرکب در سه حالت، از توصیه‌های مطرح شده در PIANC استفاده شده است [۲۶].



شکل ۴ - مقایسه تاریخچه زمانی نتایج تغییرات فشار در فشارسنج ۱، ۳ 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 (Hs) ۱۸ سانتی‌متر و پرپود پیک (Tp) ۵ ثانیه انجام شده است و نتایج روگذری آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

شده که امکان مدلسازی تخریب و تغییر شکل در مدل عددی FLOW-3D فراهم نشود و مدل سازی موج شکن سکویی مرکب شکل پذیر امکان پذیر نباشد. محققین بسیاری 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  $D_{15}$  و  $D_{85}$  (به ترتیب قطری که توسط ۱۵ و ۸۵ درصد سنگ‌ها) را مورد بررسی قرار داده است که در طراحی موج شکن 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 نیم رخ تعادلی در نظر گرفته شده است، در حالی که موج شکن سکویی مرکب به صورت شکل ناپذیر طراحی شده است [۲۹]. همچنین سیگوردارسن و همکاران (۲۰۰۹)،  $3/5$  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 می‌شود [۳۰].

$$Rec/D_{n50} = 0.0000027(H_0T_0)^3 + 0.000009(H_0T_0)^2 + 0.11(H_0T_0) - 0.8 \quad (6)$$

در این رابطه  $D_{n50}$ : قطر اسمی سنگ لایه آرمور،  $H_0T_0$ : پارامتر بی بعد شده (اثر پرپود میانگین موج) و محدوده اعتبار رابطه فوق برای  $20 < H_0T_0 < 30$  است.

#### ۲-۴- قطر اسمی سنگ لایه آرمور

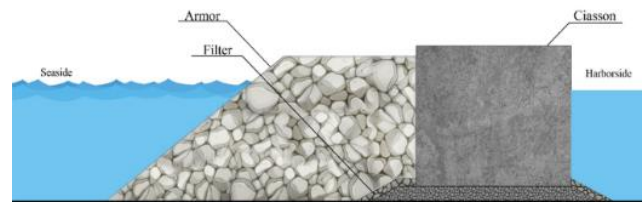
یکی دیگر از مهم ترین پارامترها در بررسی پایداری موج شکن های سکویی، قطر اسمی سنگ های لایه آرمور ( $D_{n50}$ ) است. از جمله پارامترهای بی بعد طراحی و تعیین وزن سنگ به کار برده شده در سکو، شامل عدد پایداری ( $N_s$ ) است که با توجه به شرایط محیطی، اجرایی و اهمیت پروژه تعیین می گردد [۲۶]. جدول ۴ مقادیر عدد 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	$2/8 >$
معمولی	$2/8 - 3$
کم اهمیت	$3/4 - 3$
موقت	$4 >$

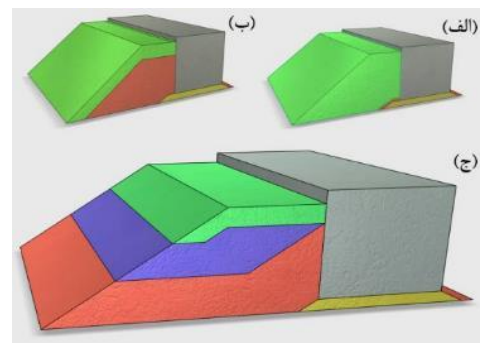
در نهایت با توجه به نوع موج شکن (شکل پذیر یا شکل ناپذیر) و اهمیت پروژه، عدد پایداری به وسیله رابطه (۷) و (۸) تعیین می گردد.

Composite Berm Breakwater



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 شکل ناپذیر (پایدار استاتیکی) شامل؛ حالت اول (Type1) - موج شکن 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 توصیه های طراحی مطرح شده در تحقیقات سیگوردارسن و همکاران (۲۰۰۹) استفاده شده است [۲۷]. در موج شکن سکویی مرکب بخش های 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 موج شکن سکویی مرکب (الف - حالت اول، ب - حالت دوم، ج - حالت سوم)

#### ۱-۴- عرض سکو

از نکات حائز اهمیت در مدلسازی سنگدانه های موج شکن، مدل سازی قفل و بست<sup>۸</sup> بین سنگدانه ها می باشد. که تاثیر بسزایی در تشکیل مقطع تغییر شکل یافته در اثر امواج دارد. این امر باعث

جدول ۶ - ضرایب درگ بدست آمده برای موج‌شکن سکویی مرکب

حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	ضرایب درگ
۹۸۸۷	۹۸۸۷	۹۸۸۷	آرمور-کلاس I [A]
۲۲/۲۲	۲۲/۲۲	۲۲/۲۲	آرمور-کلاس I [B]
۱۸۰۰۰	*	*	کلاس II [A]
۳۰	*	*	کلاس II [B]
۱۴۶۹۳۹	۱۴۶۹۳۹	۱۴۶۹۳۹	فیلتر-کلاس III [A]
۸۶	۸۶	۸۶	فیلتر-کلاس III [B]
۱۸۰۰۰۰۰	۱۸۰۰۰۰۰	۱۸۰۰۰۰۰	زیرسازی کیسون [A]
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	زیرسازی کیسون [B]

همچنین لازم به ذکر است که موج‌شکن‌های کیسونی افقی<sup>۹</sup> از نظر چینش مصالح جلوی کیسون به موج‌شکن‌های 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 موج‌شکن 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 مدل‌سازی محیط متخلخل مدل عددی موج‌شکن 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 می‌باشد. 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 پارامترهای هندسی مورد استفاده در مدل‌سازی عددی موج‌شکن کیسونی افقی

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

$$H_0 = N_s = H_s / \Delta D_{n50} \quad (7)$$

$$\Delta = \rho_s / \rho_w - 1 \quad (8)$$

در رابطه (۷) و (۸)  $D_{n50}$ : قطر اسمی سنگ،  $N_s$ : عدد پایداری،  $H_s$ : ارتفاع مشخصه موج،  $\rho_s$ : چگالی سنگدانه،  $\rho_w$ : 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 می‌شود. بزرگترین کلاس سنگ (کلاس I برابر قطر اسمی سنگ آرمور) در قسمت بالای سکوی موج‌شکن و در برخی مواقع در شیب جلوی سکو که نقش مهمی در تقویت سازه دارد، قرار داده می‌شود. سنگ‌های با قطر اسمی کمتر (کلاس II و III) در لای‌های درونی موج‌شکن قرار داده می‌شوند. قطر اسمی کلاس II، ۰/۸ برابر قطر اسمی متوسط کلاس I در نظر گرفته می‌شود. سنگ کلاس III، تقریباً ۰/۱۵ تا ۰/۴ برابر سنگ کلاس I می‌باشد. کلاس III به عنوان فیلتر در موج‌شکن استفاده می‌شود [۲۷]. در جدول ۵ مقادیر هندسی محاسبه شده برای سه حالت موج‌شکن سکویی مرکب آورده شده است.

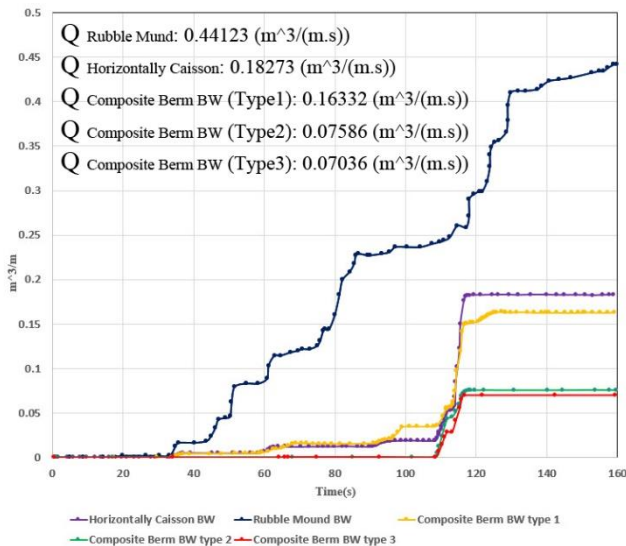
جدول ۵ - مقادیر هندسی محاسبه شده برای موج‌شکن سکویی مرکب

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

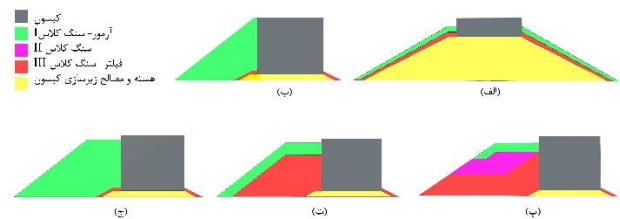
همچنین ضرایب تخلخل برای سه حالت موج‌شکن سکویی مرکب در تمامی لایه‌ها (آرمور - سنگ کلاس I، سنگ کلاس II، فیلتر - سنگ کلاس III) برابر ۰/۵ و برای مصالح زیرسازی کیسون ۰/۴۸ می‌باشد. ضریب زبری برای مصالح زیرسازی کیسون برابر ۲ و برای آرمور - سنگ کلاس I، فیلتر - سنگ کلاس III و سنگ کلاس II برابر ۳ در نظر گرفته 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 موج‌شکن سکویی مرکب در جدول ۶ آورده شده است.

### ۴-۳- 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 ۰/۸ متر و مدت زمان شبیه سازی ۱۶۰ ثانیه می باشد. همچنین در شکل ۱۰ نمایی شماتیک از تمامی موج شکن‌های مدلسازی شده در این مطالعه آورده شده است.



شکل ۱۱ - مقایسه روگذری ناشی از امواج در طول مدلسازی برای سه حالت موج شکن سکویی با موج شکن کیسونی افقی و توده سنگی



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

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.

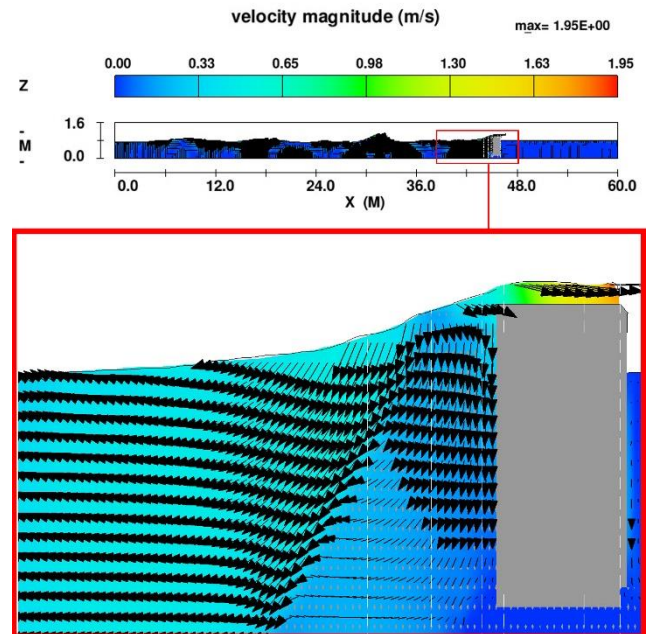
### ۵- تحلیل نتایج مدلسازی موج شکن سکویی مرکب

روگذری امواج در نتیجه بالاروی امواج بر شیب جلویی موج شکن و عبور آب از روی تاج آن اتفاق می افتد. روگذری در واحد طول سازه رخ می دهد و واحد روگذری امواج ( $m^3/(m.s)$ ) می باشد. برای مشخص شدن اینکه موج شکن سکویی مرکب چه مقدار در کاهش روگذری ناشی 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 توده سنگی و کیسون افقی مقایسه شده است.

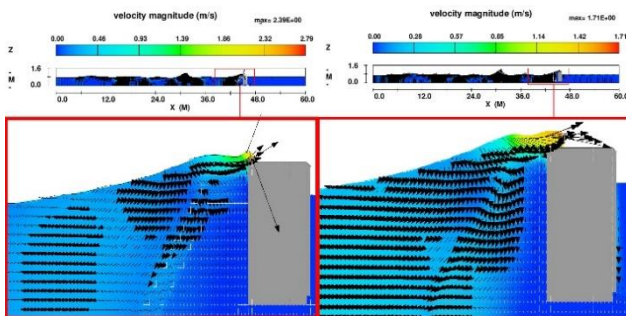
### ۵-۱- بررسی میدان سرعت

در ادامه به بررسی و تحلیل مکانیسم روگذری در حالت اول، دوم و سوم موج شکن 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 موج شکن سکویی مرکب است. مقادیر حداکثری میدان سرعت جریان در حالت اول موج شکن سکویی مرکب، برابر  $1/95 (m/s)$  برای ثانیه ۱۱۰ و  $1/97 (m/s)$  برای ثانیه ۱۱۵ است. نتایج به دست آمده، مقادیری تقریباً 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 متخلخل در پی بالاروی موج؛ با سرعت بیشتری نسبت به حالت دوم و سوم پر می شود. این موضوع سبب شده است که در حالت اول موج شکن سکویی مرکب مقادیر روگذری کاهش داشته باشد ولی نوع روگذری (آب سبز<sup>۱</sup>) تغییر نکند. با توجه به آب سبز بودن روگذری، حالت اول موج شکن سکویی مرکب در زمان های ۱۱۰ و ۱۱۵ ثانیه، عملکرد مشابهی را داشته است.

شکست می‌شود. از این رو روگذری در حالت دوم موج‌شکن سکویی مرکب در زمان‌های ۱۱۰ و ۱۱۵ ثانیه، ناشی از پاشش<sup>۱۱</sup> 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<sup>۱۲</sup> 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  $0.168$  (m/s) افزایش پیدا کرده است.

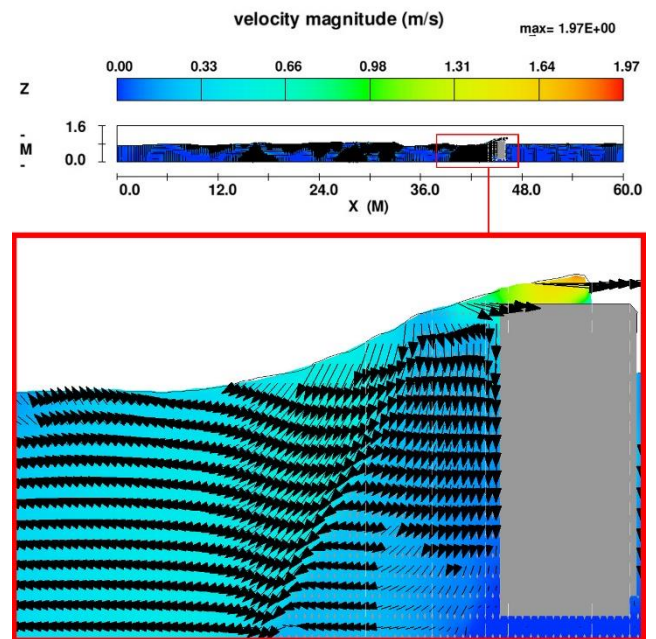


شکل ۱۲ - مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه ۱۱۰ ثانیه (حالت اول - موج‌شکن سکویی مرکب)



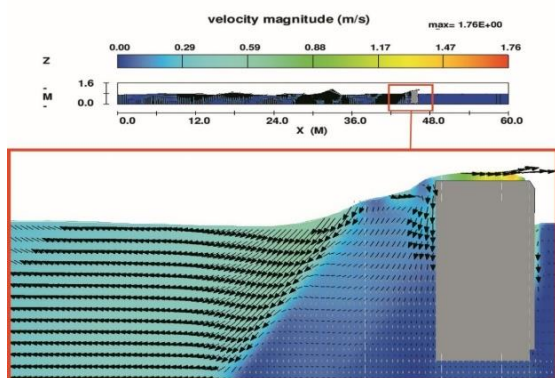
شکل ۱۴ - مقایسه مقادیر سرعت جریان در دو مکانیسم روگذری آب سبز و پاشش (حالت اول موج‌شکن سکویی مرکب (سمت راست) - حالت دوم موج‌شکن سکویی مرکب (سمت چپ))

با مقایسه مقادیر سرعت جریان در ثانیه ۱۱۰ برخورد موج با کیسون؛  $2.39$  (m/s) برای حالت دوم و  $1.65$  (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 ( $1.69$  (m/s) - حالت دوم و  $1.76$  (m/s) - 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.



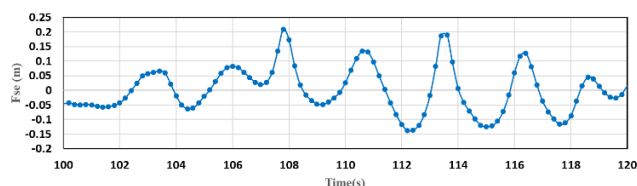
شکل ۱۳ - مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه ۱۱۵ ثانیه (حالت اول - موج‌شکن سکویی مرکب)

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



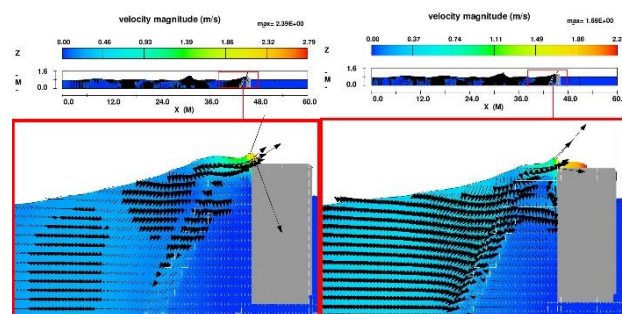
شکل ۱۷ - مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه ۱۱۰ ثانیه ( حالت سوم - موج شکن سکویی مرکب)

برای بررسی بیشتر این موضوع، از یک موج‌نگار در پای سازه (به فاصله  $\Delta H_s$ ) 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 موج شکن سکویی مرکب مشاهده کرد.

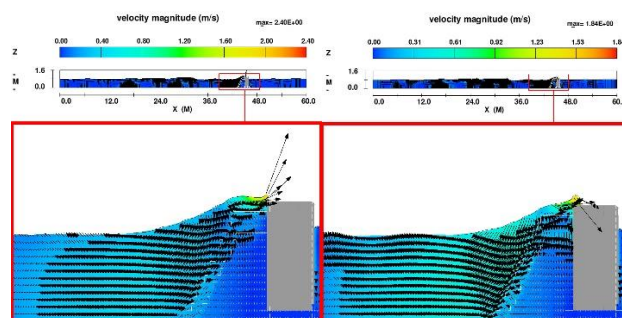


شکل ۱۸ - تغییرات سطح تراز آب حالت سوم موج شکن سکویی مرکب در بازه زمانی ۱۰۰ تا ۱۲۰ ثانیه

در حالت سوم موج شکن 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 موج شکن برخورد کرده است. این موج با بالاروی از سکوی موج شکن 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 موج شکن 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 موج شکن سکویی مرکب در حالت سوم را نشان می‌دهد.

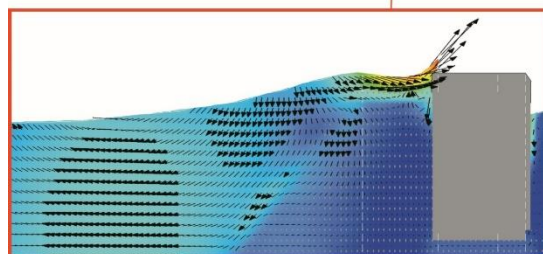
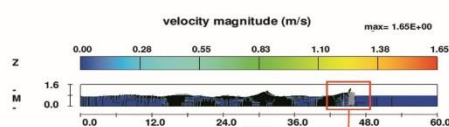


شکل ۱۵ - مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه ۱۱۰ ثانیه ( حالت دوم - موج شکن سکویی مرکب)

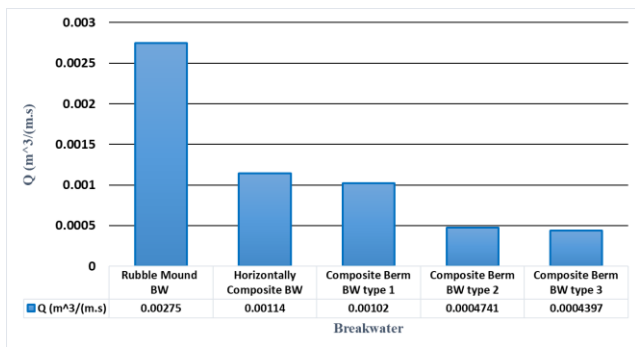


شکل ۱۶ - مقادیر و بردارهای سرعت جریان در لحظه ۱۱۵ ثانیه ( حالت دوم - موج شکن سکویی مرکب)

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



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



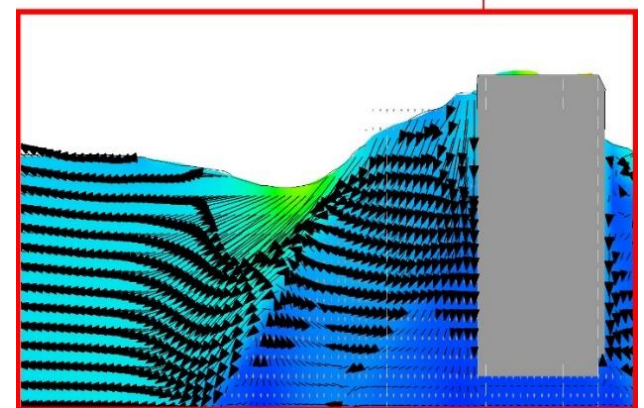
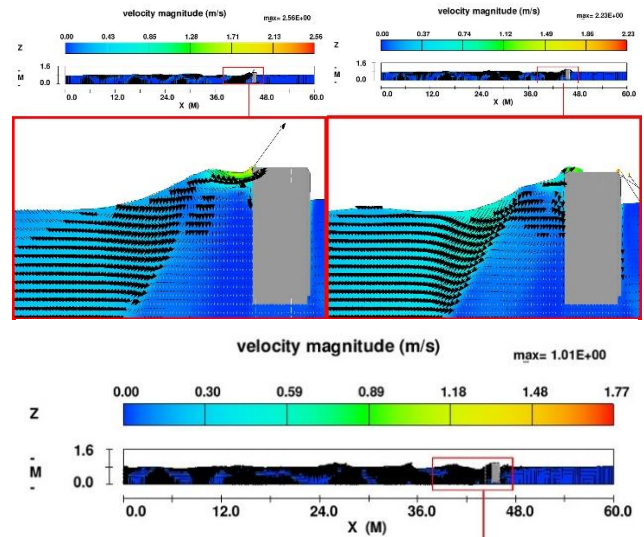
شکل ۲۰ - میزان نرخ میانگین روگذری برای سه حالت موج‌شکن سکویی نسبت به موج‌شکن کیسونی افقی و توده‌سنگی

بیشترین نرخ روگذری برای موج‌شکن توده‌سنگی و کمترین نرخ برای حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب می‌باشد. درصد کاهش میزان نرخ روگذری برای حالت اول موج‌شکن سکویی مرکب نسبت به موج‌شکن 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		موج‌شکن سکویی مرکب	
[ m³/(m.s) ]		[ m³/(m.s) ]	
۰/۰۰۲۷۵	۰/۰۰۰۴۳۹۷	۰/۰۰۰۴۷۴۱	۰/۰۰۱۰۲
حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	حالت سوم
کاهش میزان نرخ روگذری [درصد]	کاهش میزان نرخ روگذری [درصد]	کاهش میزان نرخ روگذری [درصد]	کاهش میزان نرخ روگذری [درصد]
۸۴/۰۱	۸۲/۷۶	۶۲/۹۰	۱۰/۵۲

همچنین در تحلیل میزان نرخ روگذری برای حالت اول موج‌شکن سکویی مرکب نسبت به 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.



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 موج‌شکن سکویی مرکب، مشاهده می‌شود که موج برخوردی پس از شکست به دیواره کیسون می‌رسد. در این 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  $(1/0.1 (m/s))$  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 موج‌شکن فراهم می‌شود.

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.

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

موج شکن کیسونی افقی [ m <sup>3</sup> /(m.s)]		
۰/۰۰۱۱۴		
موج شکن سکویی مرکب [ m <sup>3</sup> /(m.s)]		
حالت سوم	حالت دوم	حالت اول
۰/۰۰۰۴۳۹۷	۰/۰۰۰۴۷۴۱	۰/۰۰۱۰۲
کاهش میزان نرخ روگذری [درصد]		
% ۶۱/۴۲	% ۵۸/۴۱	% ۱۰/۵۲

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 hydraulic 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.