

مدلسازی عددی فشار وارد بر موج شکن سکویی مرکب و مقایسه آن با موج شکن کیسونی افقی با در نظر گیری اثر محیط متخلخل

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

۲. استادیار، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود

۳. دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

adjami@shahroodut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۳/۱ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۲۶

چکیده

توزیع فشار حاصل از اندرکنش موج و سازه بر موج شکن‌های کیسونی افقی، یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر طراحی این موج شکن است. با توجه به تاثیر قابل توجه این پارامتر، استفاده از موج شکن سکویی مرکب برای بهبود عملکرد و کاهش نیروهای وارد بر سازه بررسی شده قرار گرفته است. در این مطالعه به مدلسازی عددی فشار وارد بر موج شکن سکویی مرکب و مقایسه آن با موج شکن کیسونی افقی به وسیله مدل عددی FLOW-3D پرداخته شده است. موج شکن سکویی مرکب نسبت به موج شکن کیسونی افقی در P_1 (بیشینه فشار وارد بر کیسون در تراز آب) مقدار فشار بدست آمده کاهش ۵۲/۰۹٪، در P_2 (بیشینه فشار در تاج کیسون) مقدار فشار بدست آمده کاهش ۶۳/۰۷٪ و در P_3 (بیشینه فشار در پنجه کیسون) کاهش ۷۶/۰۹٪ و در P_{II} (فشار بالا برنده زیر کیسون) این مقدار فشار کاهش ۵۳/۹۲٪ را داشته است.

واژگان کلیدی: موج شکن سکویی مرکب، فشار، موج شکن سکویی، موج شکن کیسونی افقی، محیط متخلخل.

۱ - مقدمه و تاریخچه تحقیقات

موج شکن ها بخشی از سازه های دریایی هستند که برای تامین محوطه ای آرام جهت مانور، مهاربندی و پهلوگیری شناورها و انجام فعالیت های بندری احداث می شوند. تاکنون روش طراحی برای پاره ای از انواع موج شکن ها ارائه شده است. اما نکته مهم این است که روش های ارائه شده برای برخی از شکل های متفاوت موج شکن دارای عدم قطعیت ها و محدودیت هایی است. از این رو در این پژوهش سعی شده است روی عدم قطعیت های موجود تمرکز شود. موج شکن های مرکب که بخش از آن به صورت توده سنگی و بخش دیگر به صورت دیواره قائم طراحی می شود، شرایط بسیار پایداری را در شرایط حدی در آب عمیق فراهم می نمایند. عملکرد موج بر روی سازه های ساحلی ناشی از اثر متقابل موج ورودی، هندسه سازه ساحلی و مشخصات سازه ای آن در بسیاری از پژوهش های دهه های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این سالها پژوهشگران بسیاری روی توزیع فشار ناشی از امواج شکسته شده و نشکسته روی سازه های دریایی مطالعاتی را انجام داده اند. خرابی اخیر تعدادی از موج شکن ها در طول طوفان مانند موج شکن Sines در کشور پرتغال، موج شکن Bilbao در کشور اسپانیا، موج شکن Tripoli در کشور لیبی، موج شکن Canyon Diablo در کشور آمریکا و... نشان می دهد که روابط موجود برای طراحی سازه موج شکن کفایت نکرده و نیاز به مطالعه بیشتری در این زمینه است [1]. De Groot و همکاران، اهمیت بررسی فشار آب بر سازه در طراحی موج شکن به ویژه در تحلیل پایداری شیب سازه در قسمت پایینی (نزدیک کف) لایه فیلتر و همچنین اثر فشار بر پایداری هیدرولیکی لایه آرمور، بالاروی موج، سرریزی موج، عبور موج و بالا آمدن تراز سطح آب داخل سازه را مورد بررسی قرار دادند [2]. Van Gent، به ارزیابی اندرکنش موج شکن سکویی پرداخت. وی برای بررسی اندرکنش موج و موج شکن سکویی، از فشارسنج و اندازه گیری فشار درون سازه استفاده نمود [3]. با توسعه و پیشرفت محاسباتی رایانه ها، مدل های عددی زیادی برای مدلسازی و بررسی پدیده های هیدرولیکی موج شکن ها طی سال های اخیر توسعه داشته اند. Losada و همکاران، 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 روی موج شکن توده سنگی، پرداختند. نتایج حاکی از دقت قابل قبول مدل عددی نسبت به شرایط آزمایشگاهی دارد [4]. Troch و Vanneste، برای به دست آوردن چگونگی توزیع فشار منفذی داخل سازه یک مدل آزمایشگاهی برپا نمودند و بیان کردند که شکل یا نوع مصالح لایه آرمور تأثیری در مقدار فشار مرجع ندارد و مقدار دامنه تغییرات فشار مرجع در مرز لایه فیلتر و هسته به تیزی موج برخوردی و به ویژه به پرپود موج وابسته است [1]. Higuera و همکاران، به بررسی اندرکنش سه بعدی موج بر موج شکن توده سنگی با در نظرگیری محیط متخلخل پرداختند. این ارزیابی ها که بر اساس معادلات VARANS انجام شد، نشان دهنده هماهنگی مناسب امواج نامنظم و یکتا با نتایج آزمایشگاهی دارد [5]. مقیم، به بررسی دامنه تغییرات فشار ایجاد شده روی بدنه موج شکن توده سنگی با استفاده از مفهوم شار تکانه موج پرداخت. نتایج نشان دادند که ترم مربوط به فشار دینامیکی سهم بزرگی از مشارکت را در میزان بیشینه شار تکانه موج بی بعد شده دارا است [6]. امیرآبادی و همکاران در سال، 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 موج شکن صندوقه ای حفره دار نسبت به موج شکن صندوقه ای بود [7]. Larroque و همکاران، به اندازه گیری میدانی تأثیر امواج بر فشار وارد بر موج شکن کیسونی افقی پرداختند. این مطالعات توسط دو سنسور فشارسنج نصب شده در دیواره عمودی در خلیج Saint Jean de Luz فرانسه انجام شد [8]. یکی از رویکردهای نوین که در طراحی موج شکن های مرکب متصور است، استفاده از موج شکن توده سنگی سکویی در مقابل دیواره قائم است. با توجه به عدم قطعیت هایی که در طراحی این سازه مفهومی نوین وجود دارد، در این مطالعه به بررسی فشار وارد بر کیسون موج شکن سکویی مرکب^۱ در مقایسه موج شکن کیسونی افقی^۲ پرداخته شده است. موج شکن سکویی مرکب را می توان به صورت ترکیبی از موج شکن سکویی^۳ و موج شکن کیسونی^۴ در نظر گرفت. همچنین به کارگیری نام مرکب به دلیل وجود کیسون در موج شکن سکویی در نظر گرفته شده است. انواع سکو آثار متفاوتی بر تغییرات دامنه فشار بر کیسون موج شکن

۳. Berm Breakwater

۴. Caisson Breakwater

۱. Composite Berm Breakwater

۲. Horizontally Caisson Breakwater

حرکت یا قانون دوم نیوتون است. 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 لزجت، معادله ناویر استوکس بصورت رابطه (۲) است [10].

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

در این معادله‌ها g_x ، g_y و g_z شتاب‌های 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 هستند. در FLOW-3D می‌توان از چندین مدل آشفتگی از جمله RNG، $k-\epsilon$ و LES بهره‌مند شد. مدل RNG از معادلاتی شبیه به $k-\epsilon$ 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 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 جانسوآپ استفاده شده است [11]. در موج‌شکن به دلیل بزرگ بودن خلل و فرج آن‌ها و به طور کلی در محیط‌های درشت‌دانه، جریان به صورت آشفتگی بوده و قانون داریسی در این محیط‌ها صدق نمی‌کند. با افزایش عدد رینولدز و کاهش فشار، رابطه داریسی از حالت خطی خارج می‌شود. بنابراین لازم است از روابطی استفاده شود که علاوه بر بیان ویژگی‌های فیزیکی این محیط‌ها بتواند هیدرولیک جریان آن‌ها را نیز شبیه‌سازی 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 ناویراستوکی بدست آمده است.

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

سکوپی مرکب دارد. در این مطالعه با مدل‌سازی موج‌شکن سکوپی مرکب و موج‌شکن کیسونی افقی تأثیرات انواع سکو در مدل سکوپی مرکب و مصالح آرمور در مدل کیسونی افقی با در نظر گیری محیط متخلخل مورد ارزیابی، تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. از اینرو ابتدا مدل عددی انتخاب خواهد شد و پس از بیان معادلات حاکم، با بیان مدل آزمایشگاهی برای واسنجی و درستی‌آزمایی مدل عددی، درستی عملکرد مدل عددی در مدل‌سازی فشار وارد بر کیسون بررسی خواهد شد. همچنین با معرفی حالت‌های موج‌شکن سکوپی مرکب به بررسی و تفسیر نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی پرداخته می‌شود.

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 هست، استفاده شده است. این نرم‌افزار برای مطالعه در مورد رفتار یک، دو و سه بعدی دینامیکی سیالات در طیف کاربردی وسیعی از جمله جریان‌های غیر ماندگار طراحی شده است [9]. در FLOW-3D از دو تکنیک برای شبیه‌سازی هندسی مرز سیال و مرز صلب استفاده شده است. حجم سیال (VOF)، برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و کسر مساحت - حجم مانع (FAVOR) برای شبیه‌سازی 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 است. همچنین معادلات حاکم بر جریان سیال، نشان دهنده قوانین فیزیکی بقا بصورت عبارت ریاضی هست. 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 است. 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 [10].

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

که در آن u و v و w مولفه‌های سرعت به ترتیب در جهت‌های x ، y و z هستند. یکی دیگر از این قوانین قانون اصل بقای اندازه

شکل ۱. نمایی از ابعاد مدل آزمایشگاهی Losada و همکاران به متر و موقعیت مدل آزمایشگاهی در فلوم، محل قرارگیری فشارسنج‌ها و موج‌نگارها

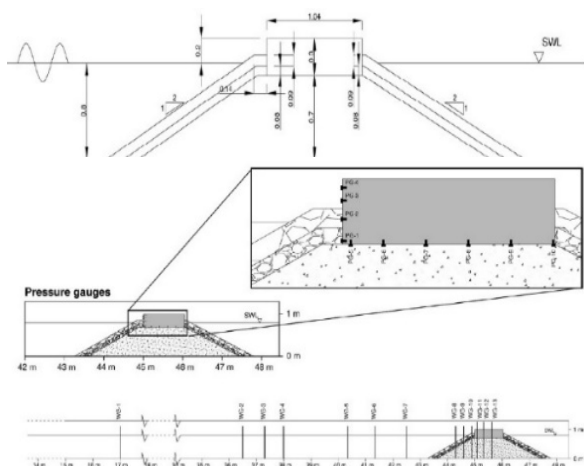


Fig. 1. An overview of the dimensions for the Losada et al. laboratory model to the meter and the position of the laboratory model in the flume, the location of the pressure gauges and wave gauges.

برای 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 موج‌شکن در تاج آن به صورت صلب است. ضریب تخلخل لایه آرمور و فیلتر ۰/۵ و هسته ۰/۴۸ است. ضریب زبری هسته برابر ۲ و آرمور و فیلتر برابر ۳ است. ضرایب درگ خطی و غیر خطی A و B به دست آمده از روابط ۱۰ و ۱۱ 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 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

9876	Armor [A]
22.22	Armor [B]
146938	Filter [A]
85.71	Filter [B]
1800000	Core [A]
200	Core [B]

Table 1. Linear and nonlinear drag coefficients for A and B for modeling.

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 [12]. در صورتی که اطلاعات اندکی از سنگ‌دانه‌ها در اختیار باشد روابط ۴ و ۵ برای محاسبه ضریب درگ خطی و غیر خطی به کار می‌روند.

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

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

که در این روابط، β ضریب نرمی یا زبری سنگ‌ها هست که از ۱/۸ تا ۱ بسته به نوع سنگ تغییر می‌کند [11].

۳-برپایی مدل عددی

در این بخش به معرفی مدل آزمایشگاهی پرداخته شده است. از نتایج مدل آزمایشگاه برای ارزیابی خروجی‌های مدل عددی استفاده شده 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 درستی‌آزمایی مدل عددی درستی نتایج شبیه‌سازی، ارزیابی خواهد شد.

۳-۱- معرفی مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه از نتایج مدل آزمایشگاهی موج‌شکن توده‌سنگی Losada و همکاران، برای واسنجی و درستی‌آزمایی مدل عددی استفاده شده است. موج‌شکن توده‌سنگی بیان شده با عرض ۲ متر است. 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 به وسیله طیف جانسوآپ دارای ارتفاع مشخصه موج ۰/۱۸ متر و پرپود پیک ۵ و ۶ ثانیه، انجام شده است [4]. شکل (۱) نشان دهنده مشخصات مدل آزمایشگاهی Losada و همکاران به همراه موقعیت اجرای مدل آزمایشگاهی، محل فشارسنج‌ها و موقعیت موج‌نگارها در فلوم موج است.

جدول ۲. میزان بهبود نتایج حساسیت سنجی مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی با در نظر گیری تعداد سلول محاسباتی و مدت زمان شبیه سازی عددی

Improvement results (percent)	Relative change (percent)	Duration of simulation (hour)	Number of mesh
500000→1000000 12.19	20.72	14	500000
	8.53	43	1000000
1000000→2000000 1.46	6.89	121	2000000

Table 2. Improvement of the sensitivity analysis of the numerical model compared to the experimental model by considering the number of mesh and the duration of numerical simulation.

۳-۴- واسنجی و درستی آزمای مدل عددی

با توجه به در اختیار بودن مشخصات موج، فشار و روگذری برای موج شکن توده سنگی Losada و همکاران با ارتفاع موج مشخصه H_s ۰/۱۸ متر و پریود پیک (Tp) ۶ ثانیه (طیف جانسوآپ)، در این بخش به واسنجی مدل عددی پرداخته شده است. شکل (۳ و ۴) به ترتیب تاریخچه زمانی تغییرات فشار در فشارسنج شماره ۱، ۲، ۶ و ۷ و روگذری بین نتایج مدل سازی عددی و آزمایشگاهی نشان داده شده است.

شکل ۳. نتایج واسنجی تاریخچه زمانی تغییرات فشار در فشارسنج ۱، ۲، ۶ و ۷ (آبی - آزمایشگاهی، قرمز - مدل سازی عددی)

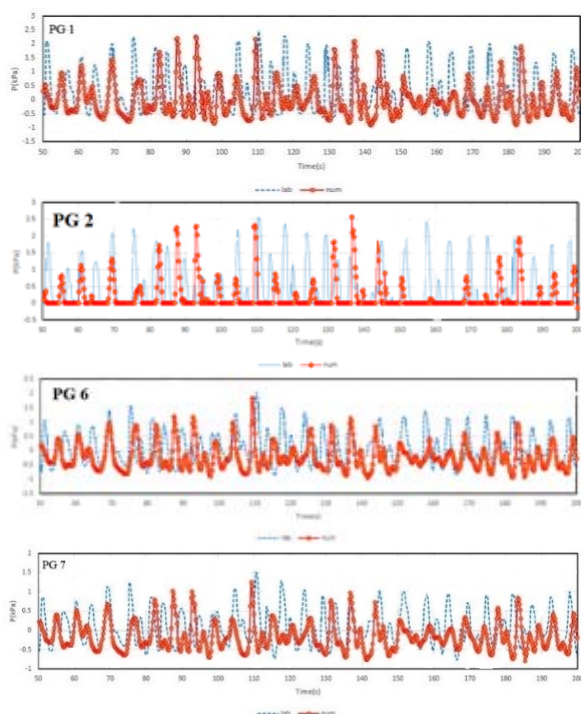


Fig. 3. Comparison of the time history for pressure changes in pressure gauge 1, 2, 6 and 7 (blue for laboratory modeling, red for numerical modeling).

۳-۲- مدل سازی عددی

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

۳-۳- حساسیت سنجی مدل عددی

انتخاب مناسب تعداد سلول محاسباتی مناسب به افزایش دقت شبیه سازی عددی و کاهش زمان شبیه سازی کمک می کند. چنانچه که با کاهش تعداد سلول محاسباتی، به شبیه سازی صحیح نمی توان 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 پریود پیک (Tp) ۶ ثانیه 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 بهبود نتایج را به همراه داشته است. این در صورتی است که زمان شبیه سازی مدل عددی به ۱۲۱ ساعت افزایش یافته است. با این تفاسیر در این مطالعه برای مدل سازی عددی از ۱ میلیون سلول محاسباتی استفاده خواهد شد.

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

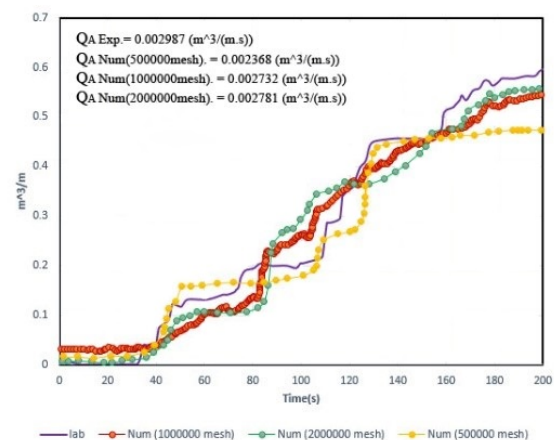


Fig. 2. Results of the sensitivity analysis of the numerical model relative to the number of mesh (overtopping).

شکل ۵. درستی آزمایی تاریخچه زمانی تغییرات روگذری (آبی - آزمایشگاهی، قرمز - مدلسازی عددی)

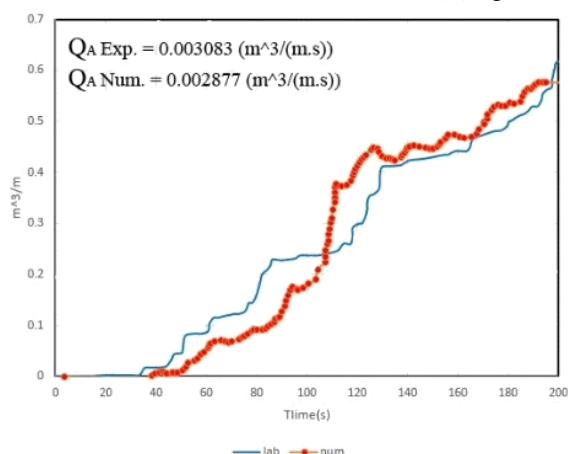


Fig. 5. Verification of the time history of overtopping variations (blue for laboratory modeling, red for numerical modeling).

۴- موج شکن سکویی مرکب

به منظور درک مناسب از ساختار و اجزای تشکیل دهنده موج شکن سکویی مرکب، نمایی شماتیک از موج شکن سکویی مرکب در شکل (۶) آورده شده است. موج شکن سکویی مرکب از آنجایی که یک مدل مفهومی نوین به حساب می آید، برای طراحی سکوی جلوی کیسون رابطه ای 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 [13].

شکل ۶. نمایی از مقطع موج شکن سکویی مرکب همراه با اجزای تشکیل دهنده آن (آرمور، فیلتر و کیسون)

Composite Berm Breakwater

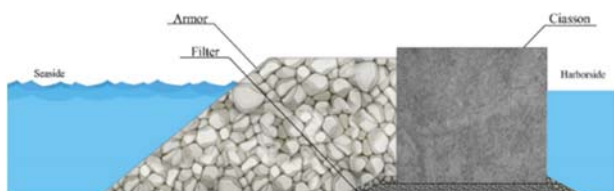


Fig. 6. A cross component section view of the composite berm breakwater with its parts (Armor, Filter and Caisson).

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

شکل ۴. واسنجی تاریخچه زمانی تغییرات روگذری (آبی - آزمایشگاهی، قرمز - مدلسازی عددی)

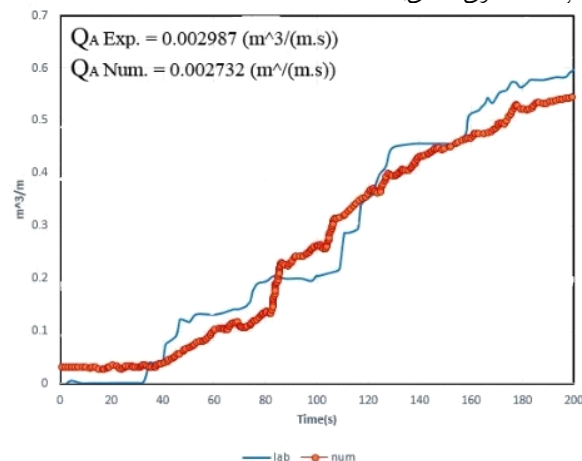


Fig. 4. Calibration of the time history for overtopping changes (blue for laboratory modeling, red for numerical modeling).

همچنین مقدار درصد خطای نسبی مدل عددی با توجه به نتایج بدست آمده در واسنجی به صورت میانگین خطای نسبی در فشار و روگذری امواج برابر ۸/۵۲ درصد است. مقادیر درصد خطای نسبی مدل عددی به درصد در جدول (۳) آورده شده است که این میزان خطا در مدلسازی عددی قابل قبول است.

جدول ۳. مقدار درصد خطای نسبی مدل عددی

Results	Relative error (percent)
6.60	Pressure gauge 1
7.63	Pressure gauge 2
8.53	Pressure gauge 6
11.34	Pressure gauge 7
8.53	Overtopping
8.52	Average numerical modeling error

Table 3. The value of the relative error percentage for the numerical model.

درستی آزمایی مدل عددی نوعی تایید توانایی مدل عددی در مدلسازی پدیده های مورد نظر است. برای اطمینان از اینکه مدل عددی در شرایط متفاوت نیز به درستی رفتار می کند، با ثابت نگه داشتن همه پارامترها، درستی آزمایی مدل عددی برای اطلاعات ارتفاع موج مشخصه (H_s) ۱۸ سانتی متر و پریود پیک (T_p) ۵ ثانیه انجام شده است و نتایج روگذری آن در شکل (۵) نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده کارایی و دقت قابل قبول مدل عددی FLOW-3D است.

به صورت شکل‌ناپذیر طراحی شده است [16]. همچنین Sigurdarson و همکاران، ۳/۵ برابر ارتفاع موج مشخصه را به عنوان عرض سکو پیشنهاد کردند [14]. در این مطالعه عرض فرسایش یافته سکو (Rec) به وسیله رابطه (۶) مربوط به Tørum و همکاران، محاسبه می‌شود [17].

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

در این رابطه D_{n50} : قطر اسمی سنگ لایه آرمور، H_0T_0 : پارامتر بی بعد شده (اثر پررود میانگین موج) و محدوده اعتبار رابطه فوق برای $20 < H_0T_0 < 30$ است. لازم به ذکر است تعریف H_0T_0 در رابطه (۷) آمده است.

$$H_0T_0 = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} * \sqrt{\frac{g}{D_{n50}}} T_z \quad (7)$$

در این رابطه Δ : چگالی نسبی قطعه آرمور ($\rho_a / \rho - 1$) که ρ_a : جرم مخصوص قطعه آرمور و ρ : جرم مخصوص آب دریا است. همچنین g شتاب گرانش زمین و T_z : پررود زیرو آپ کروسینگ (Zero Up Crossing) است. جدول (۴) مقادیر هندسی محاسبه شده برای سه حالت موج‌شکن سکویی مرکب را نشان می‌دهد.

جدول ۴. مقادیر هندسی محاسبه شده برای موج‌شکن سکویی مرکب

Type3	Type2	Type1	composite beam breakwater
1 : 1.25	1 : 1.25	1 : 1.25	Slope of the berm
0.135	0.135	0.135	Berm level (m)
0.2	0.2	0.2	Crest level (m)
1.04	1.04	1.04	Crest width (m)
0.135	0.135	0.135	Armor – class I Dn50 (m)
0.10	-	-	Class II Dn50 (m)
0.035	0.035	0.035	Filter – class III Dn50 (m)
0.01	0.01	0.01	Substructure materials Dn50 (m)
0.55	0.55	0.55	Berm width

Table 4. Geometric values calculated for composite beam breakwater.

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 است. 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 از روابط ۴ و ۵ برای مدلسازی محیط

چندلایه (ایسلندی) است. شکل (۷) نشان‌دهنده 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 نشان‌دهنده مصالح زیرسازی کیسون است. همچنین کیسون با رنگ خاکستری متمایز شده است. لازم به ذکر است به منظور طراحی حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب، از توصیه‌های طراحی مطرح شده در پژوهش‌های Sigurdarson و همکاران (۲۰۰۹) استفاده شده است [14]. در موج‌شکن سکویی مرکب بخش‌های شیب بالای سکو، شیب مغزه، تراز تاج مغزه، عرض تاج مغزه و وجه رو به بندر موج‌شکن سکویی مرکب حذف شده‌اند و نیاز به طراحی ندارد.

شکل ۷. نمایی از سه حالت موج‌شکن سکویی مرکب (الف- حالت اول، ب- حالت دوم، ج- حالت سوم)

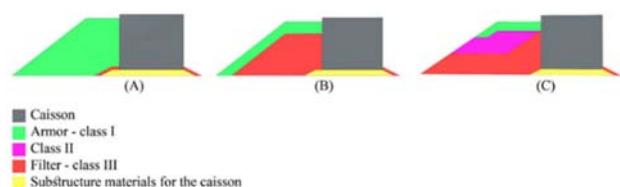


Fig. 7. A view of the three types of the composite berm breakwater (A-first type, B-second type, C-third type).

۴-۱- عرض سکو

از نکات حائز اهمیت در مدلسازی سنگدانه‌های موج‌شکن، مدلسازی قفل و بست ۱ بین سنگدانه‌ها است. که تاثیر زیادی 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 مدلسازی موج‌شکن سکویی مرکب شکل‌پذیر امکان‌پذیر نباشد. پژوهشگران بسیاری در رابطه با عرض فرسایش یافته‌ی سکو پژوهش کرده‌اند که این روابط بر مبنای شکل‌پذیری سازه توسعه یافته‌اند. به عنوان نمونه در رابطه ارائه شده توسط Hall و Kao، تاثیر D_{15} و D_{85} (به ترتیب قطری که ۱۵ و ۸۵ درصد سنگ‌ها) را بررسی کرده است که در طراحی موج‌شکن سکویی مرکب تمامی سنگ‌های آرمور و فیلتر برابر با یک D_{n50} در نظر گرفته می‌شوند [15]. در رابطه مقیم و همکاران اثر تعداد امواج برخوردی در شکل‌گیری نیم‌رخ تعادلی در نظر گرفته شده است، در حالی که موج‌شکن سکویی مرکب

جدول ۵. مقادیر فشار بدست آمده از رابطه گودا (موج شکن کیسونی افقی)

P_u [Kpa]	P_3 [Kpa]	P_2 [Kpa]	P_1 [Kpa]
2.75	2.8	1.68	3.11

Table 5. Pressure values obtained from the Goda equation (horizontally caisson breakwater).

لازمه بررسی رفتار موج شکن کیسونی افقی 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 موج شکن کیسونی 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) است. در این مدلسازی از موج نامنظم با ارتفاع موج مشخصه ۰/۱۸ متر و پریود پیک ۵ ثانیه استفاده شده است. همچنین درصد تخلخل لایه آرمور و فیلتر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. جدول (۶) مقادیر پارامترهای هندسی مورد استفاده در مدلسازی عددی موج شکن کیسونی افقی را بیان می کند.

جدول ۶. مقادیر پارامترهای هندسی مورد استفاده در مدلسازی عددی موج-

شکن کیسونی افقی	
1 : 1.25	Slop of armor
0.2	Level of armor relative to surface water (m)
0.2	Level of crest breakwater relative to surface water (m)
1.04	Crest width of breakwater (m)
0.135	Armor Dn50 (m)
0.035	Filter Dn50 (m)
0.01	Substructure materials Dn50 (m)

Table 6. The values of geometric parameters used in the numerical modeling of horizontally caisson breakwater.

۳-۴- برنامه آزمایش ها

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 فشار وارد بر کیسون موج شکن سکویی مرکب با موج شکن 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 است. همچنین علاوه بر بررسی دامنه تغییرات فشار وارد بر کیسون سه حالت موج شکن سکویی مرکب؛ با محاسبه فشار

متخلخل برای سه حالت موج شکن سکویی مرکب محاسبه شده است.

۴-۲- مدلسازی عددی موج شکن کیسونی افقی

به منظور ارزیابی و بررسی کامل تر موج شکن سکویی مرکب اقدام به مدلسازی عددی موج شکن کیسونی افقی شده است. همچنین لازم به ذکر است که موج شکن کیسونی افقی از نظر چینش مصالح جلوی کیسون به موج شکن های سکویی مرکب شباهت دارند. شکل (۸) نمایی از موج شکن کیسونی افقی و موج شکن سکویی مرکب را نشان می دهد.

شکل ۸. الف) موج شکن سکویی مرکب، ب) موج شکن کیسونی افقی



Fig. 8. A. Composite berm breakwater – B. Horizontally caisson breakwater.

همین موضوع سبب شده است تا مدلسازی عددی موج شکن کیسونی افقی، با هدف مقایسه با موج شکن سکویی مرکب انجام شود. این بررسی شامل فشار وارد بر کیسون در موج شکن سکویی مرکب با موج شکن کیسونی افقی است. طبق آیین نامه مهندسی سواحل ارتش آمریکا^۱ به منظور محاسبه فشار وارد بر کیسون موج شکن های کیسونی افقی؛ Tanimoto و همکاران، مطالعات آزمایشگاهی بر تاثیر قرارگیری آرمور در جلوی کیسون انجام دادند [18, 19]. نتیجه این تحقیقات ارائه ضرایب اصلاح رابطه تعمیم یافته Goda و همکاران بوده است [20]. در رابطه Goda و همکاران با فرض توزیع خطی فشار موج با حداکثر مقدار P_1 ؛ در تراز آب ساکن (کیلوپاسکال)، فشار صفر در ارتفاع η^* ؛ بالای تراز آب ساکن (متر)، مقدار فشار P_2 ؛ در تاج کیسون (کیلوپاسکال)، مقدار فشار P_3 ؛ در پنجه جلوی کیسون (کیلوپاسکال) و P_u فشار بالابرنده؛ زیر کیسون (کیلوپاسکال) است. در جدول (۵) فشارهای وارد بر کیسون موج شکن کیسونی افقی، محاسبه شده توسط روابط گودا برای موج شکن کیسونی افقی آورده شده است. تمامی مقادیر فشارهای ذکر شده به کیلوپاسکال است.

شکل ۹. مقایسه نتایج فشار حداکثری حالت اول موج شکن سکویی مرکب با موج شکن کیسونی افقی (P_u و P_3 , P_2 , P_1)

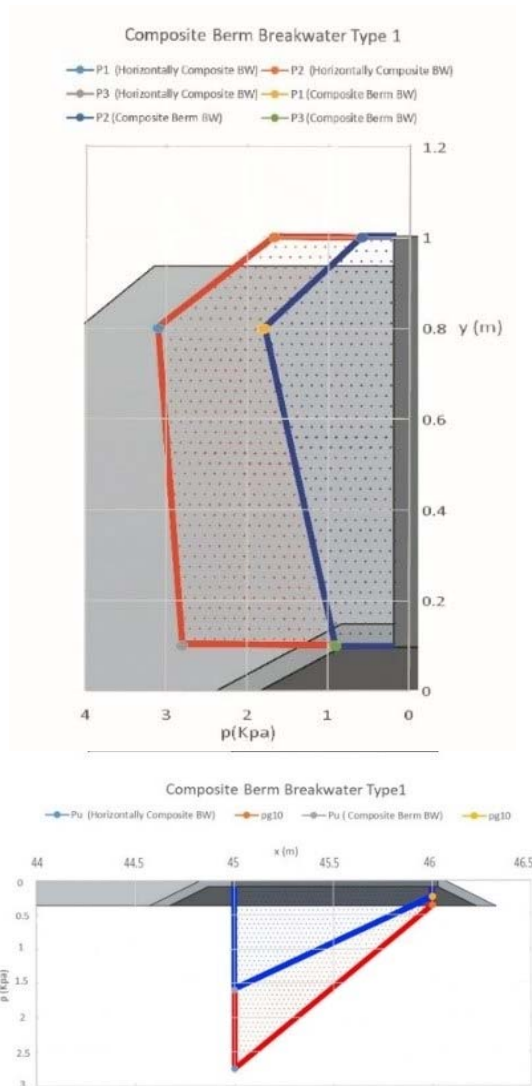


Fig. 9. Comparison of the first type of the composite berm breakwater with horizontally caisson breakwater (P_1 , P_2 , P_3 and P_u).

با بررسی میدان سرعت جریان در لحظه وقوع فشار حداکثری در تاج کیسون مشخص می‌شود که در این لحظه موج، دچار شکست شده و فشار ضربه ناشی از شکست موج، باعث افزایش مقدار فشار در تاج کیسون شده است. کمترین مقدار فشار بالابرنده در موج شکن سکویی مرکب، مربوط به حالت دوم موج شکن سکویی مرکب است. نتایج به صورت خلاصه در جدول (۸) آورده شده است.

وارد بر موج شکن کیسونی افقی به وسیله رابطه گودا جدول (۵)، عملکرد موج شکن سکویی مرکب جداول (۷، ۸ و ۹) با موج شکن کیسون افقی ارزیابی و مقایسه شده است.

۵- ارزیابی و تحلیل نتایج فشار در موج شکن سکویی مرکب

نتایج مقادیر فشار حداکثری اندازه گیری شده (P_2 , P_1), بر کیسون، در سه حالت موج شکن سکویی مرکب (P_u و P_3) نسبت به نتایج فشار حداکثری بدست آمده از رابطه گودا و همکاران برای موج شکن کیسونی افقی (نمودار قرمز) در شکل های (۹، ۱۰-الف، ۱۰-ب و ۱۱) آورده شده است. فشار سنج شماره ۱۰ نشان دهنده آخرین فشار سنج زیر کیسون، در مدل موج شکن سکویی مرکب است.

۵-۱- موج شکن سکویی حالت اول

در موج شکن سکویی مرکب حالت اول نسبت به موج شکن کیسونی افقی؛ در P_1 (حداکثر فشار وارد بر کیسون در تراز آب) مقدار فشار بدست آمده کاهش ۴۲/۴٪، در P_2 (حداکثر فشار در تاج کیسون) مقدار فشار بدست آمده کاهش ۶۴٪ و در P_3 (حداکثر فشار در پنجه کیسون) کاهش ۶۷٪ و در P_u (فشار بالا برنده زیر کیسون) این مقدار فشار کاهش ۴۲/۱۸٪ را داشته است. نتایج بیان شده به صورت خلاصه در جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۷. میزان فشار حداکثری (P_1 , P_2 , P_3 و P_u) موج شکن سکویی حالت اول و درصد کاهش آن نسبت به موج شکن کیسونی افقی

P_u	P_3	P_2	P_1	Pressure (kPa)
1.59	0.91	0.59	1.79	Composite berm breakwater – Type 1
42.18	64	64	42.4	Decrease pressure (percent)

Table 7. Maximum Pressure (P_1 , P_2 , P_3 and P_u) of the first type of the composite berm breakwater and its percentage decrease in compare to the horizontally caisson breakwater.

شکل ۱۰-ب. مقادیر و بردارهای سرعت جریان در حالت دوم موج شکن سکویی (فشار ضربه ناشی از شکست موج)

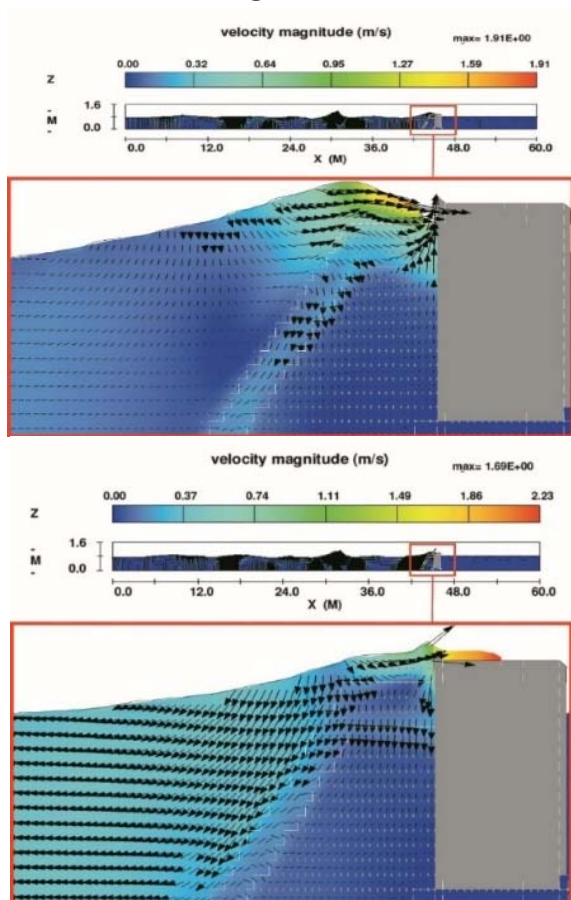


Fig. 10. b. Flow velocity rate and vectors in the second type of the composite berm breakwater (the impact pressure caused by the wave breaking).

۵-۳- موج شکن سکویی حالت سوم

در موج شکن سکویی مرکب حالت سوم نسبت به موج شکن کیسونی افقی در P_1 (بیشینه فشار وارد بر کیسون در تراز آب) مقدار فشار بدست آمده کاهش ۵۲/۰۹٪، در P_2 (بیشینه فشار در تاج کیسون) مقدار فشار بدست آمده کاهش ۶۳/۰۷٪ و در P_3 (بیشینه فشار در پنجه کیسون) کاهش ۷۶/۰۹٪ و در P_u (فشار بالا برنده زیر کیسون) این مقدار فشار کاهش ۵۳/۹۲٪ را داشته است. مقادیر بدست آمده از بیشینه فشار در تاج کیسون (P_2) برای حالت سوم موج شکن سکویی مرکب، نسبت به حالت دوم کاهش ۲۳/۴۵٪ و نسبت به حالت اول افزایش ۵/۰۸٪ را نشان می‌دهد. با توجه به سرعت ۲/۵۶ (m/s) جریان هنگام برخورد موج دلیل افزایش مقادیر فشار نسبت به حالت اول، برخورد موج شکسته شده با دیواره کیسون است که با وجود

جدول ۸. میزان فشار حداکثری (P_1 ، P_2 ، P_3 و P_u) موج شکن سکویی حالت دوم و درصد کاهش آن نسبت به موج شکن کیسونی افقی

P_u	P_3	P_2	P_1	Pressure (kPa)
0.759	0.818	0.81	1.60	Composite berm breakwater – Type 2
72.4	71.07	51.78	44.55	Decrease pressure (percent)

Table 8. Maximum Pressure (P_1 , P_2 , P_3 and P_u) of the second type of the composite berm breakwater and its percentage decrease in compare to the horizontally caisson breakwater.

شکل ۱۰-الف. مقایسه نتایج فشار حداکثری حالت دوم موج شکن سکویی مرکب با موج شکن کیسونی افقی (P_1 ، P_2 ، P_3 و P_u)

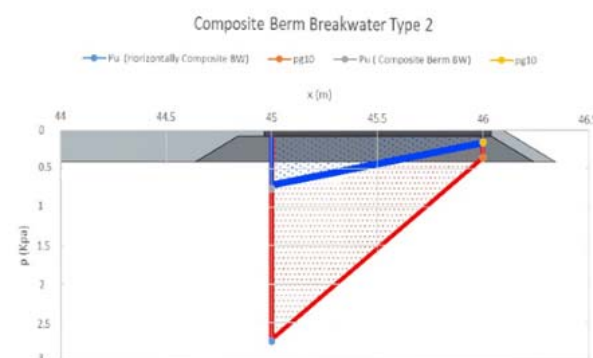
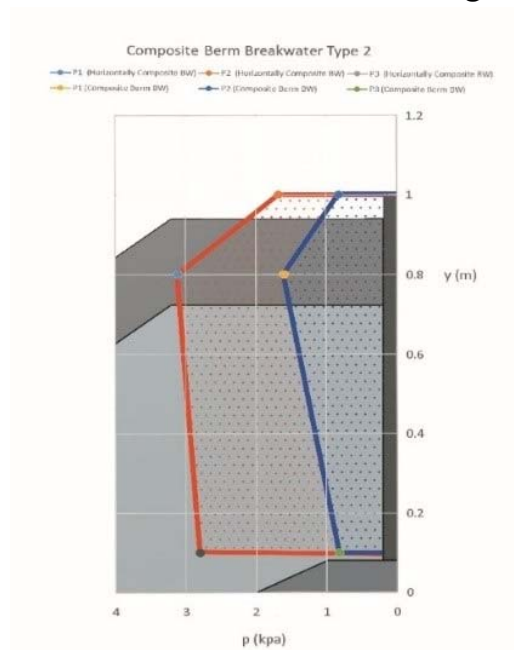


Fig. 10. a. Comparison of the second type of the composite berm breakwater with horizontally caisson breakwater (P_1 , P_2 , P_3 and P_u).

به منظور مقایسه مناسب‌تر بین سه حالت موج‌شکن سکویی مرکب، نتایج فشار حداکثری (P_u و P_3, P_2, P_1) در شکل (۱۲) آورده شده است. همچنین شکل (۱۳) مقایسه نتایج فشار حداکثری (P_u و P_3, P_2, P_1) در سه حالت موج‌شکن سکویی مرکب را به صورت نمودار میله‌ای نشان می‌دهد.

شکل ۱۲. مقایسه نتایج فشار حداکثری حالت اول، دوم و سوم موج‌شکن سکویی مرکب (P_u و P_3, P_2, P_1)

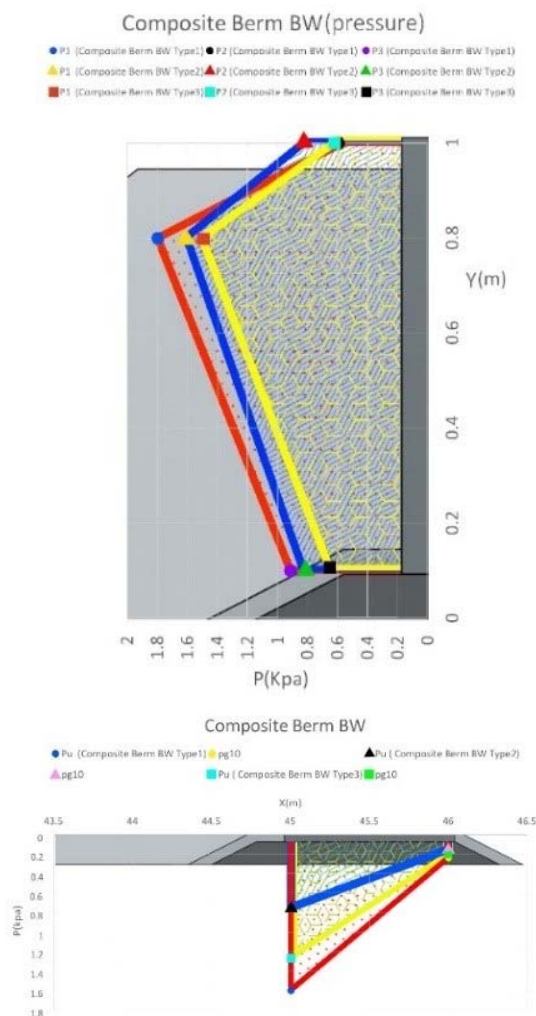


Fig. 12. Comparison of the pressure results for the first, second and third type of the composite berm breakwater (P_1, P_2, P_3 and P_u).

هوادهی^۱ بالا با افزایش آنی مدت بارگذاری همراه است. کاهش فشار وارد بر کیسون باعث کاهش ضخامت دیواره‌های بتنی کیسون و در ادامه کاهش هزینه‌های ساخت موج‌شکن خواهد شد. سکوی چند لایه (ایسلندی) موج‌شکن سکویی حالت سوم، باعث کاهش فشار وارد بر کیسون شده است. در جدول (۹) نتایج بیان شده به صورت مختصر آورده شده است.

جدول ۹. میزان فشار حداکثری (P_u و P_3, P_2, P_1) موج‌شکن سکویی حالت سوم و درصد کاهش آن نسبت به موج‌شکن کیسونی افقی

P_u	P_3	P_2	P_1	Pressure (kPa)
1.26	0.64	0.62	1.49	Composite berm breakwater – Type 3
53.92	76.09	63.07	52.09	Decrease pressure (percent)

Table 9. Maximum Pressure (P_1, P_2, P_3 and P_u) of the third type of the composite berm breakwater and its percentage decrease in compare to the horizontally caisson breakwater.

شکل ۱۱. مقایسه نتایج فشار حداکثری حالت سوم موج‌شکن سکویی مرکب با موج‌شکن کیسونی افقی (P_u و P_3, P_2, P_1)

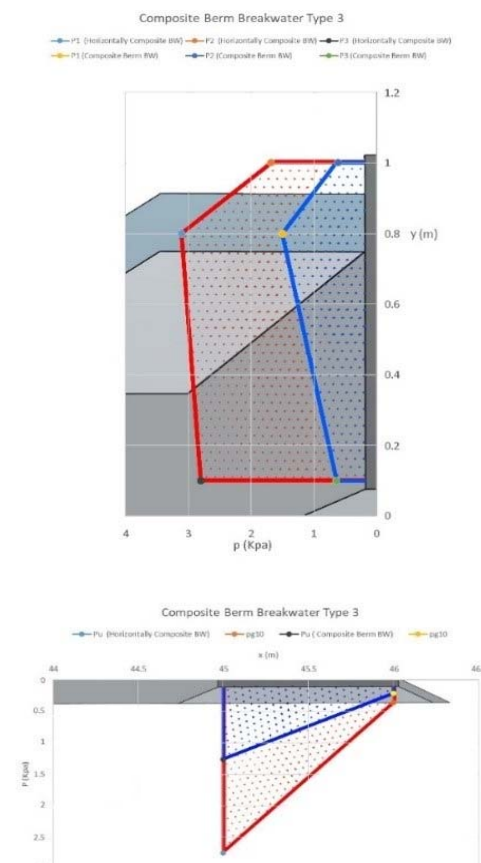


Fig. 11. Comparison of the third type of the composite berm breakwater with horizontally caisson breakwater (P_1, P_2, P_3 and P_u).

شکل ۱۳. نتایج تفکیک فشار حداکثری وارد بر کیسون در مدل عددی

موج شکن سکویی مرکب

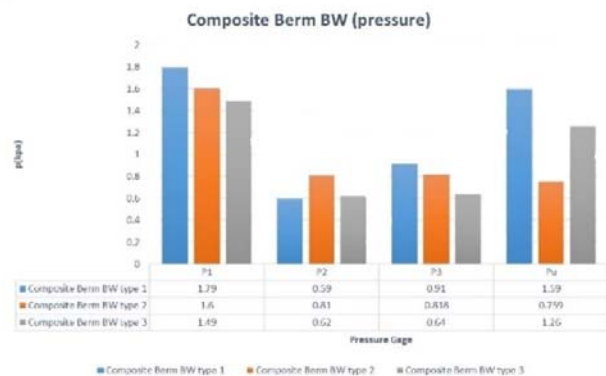


Fig. 13. Pressure results in the numerical model for the composite berm breakwater (bar graph).

در جدول (۱۰) میزان کاهش یا افزایش فشار حداکثری وارد بر کیسون موج شکن سکویی مرکب در سه حالت آن به درصد مشخص شده است. مقادیر مثبت بیانگر افزایش و مقادیر منفی بیانگر کاهش درصد فشار وارد بر کیسون موج شکن است. لازم به ذکر است حالت دوم و سوم نسبت به حالت اول ارزیابی شدند. بیشترین فشار وارد بر کیسون در موج شکن سکویی مرکب و موج شکن کیسونی افقی مربوط به فشار در تراز سطح آب (P_1) است که در حالت سوم موج شکن سکویی، این فشار بیشترین کاهش را داشته است. حالت سوم موج شکن سکویی مرکب در کاهش بیشینه فشار در تاج کیسون (P_2)، نسبت به حالت دوم عملکرد مناسب تری داشته است و نسبت به حالت اول عملکردی مشابه داشته است. همچنین حالت سوم موج شکن سکویی مرکب در زمینه کاهش فشار وارد بر پنجه کیسون (P_3)، نسبت به حالت اول و دوم مناسب ترین عملکرد را دارد. در زمینه فشار بالابرنده زیر کیسون (P_u)، حالت سوم موج شکن سکویی مرکب نیز نسبت به حالت اول کاهش مناسبی را داشته است.

جدول ۱۰. درصد کاهش و افزایش نتایج مقادیر فشار حداکثری اندازه گیری شده (P_u ، P_3 ، P_2 ، P_1) بر کیسون، در موج شکن سکویی مرکب (حالت دوم و سوم نسبت به حالت اول)

Composite berm breakwater	P_1 (percent)	P_2 (percent)	P_3 (percent)	P_u (percent)
Type 2	-10.6	+37.28	-10.10	-52.26
Type 3	-16.75	+5.08	-29.67	-20.75

Table 10. Decrease and increase in the results of maximum pressure values measured (P_1 , P_2 , P_3 and P_u) on the caisson for the composite berm breakwater (second and third types compared to the first type).

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه از مدل عددی FLOW-3D به منظور مدلسازی موج شکن سکویی مرکب استفاده شد. نتایج قابل قبول در واسنجی و درستی آزمایی مدل عددی و همچنین توانایی مدل عددی در شبیه سازی مدل موج شکن سکویی مرکب نشان دهنده کارایی مدل عددی FLOW-3D است. استفاده از کیسون در موج شکن سکویی مرکب در مقایسه با موج شکن سکویی باعث کاهش حجم مصالح سنگی مصرفی می شود. از طرفی با کاهش فشار حداکثری وارد بر کیسون به وسیله سکوی موج شکن سکویی مرکب، امکان ساخت کیسون با دیواره های نازک تر فراهم می شود که همین مساله باعث کاهش هزینه های ساخت و اجرای موج شکن می شود. استفاده بیشتر از مصالح آرمور در موج شکن، باعث افزایش هزینه های اجرای موج شکن خواهد شد. حالت اول موج شکن سکویی مرکب، از سکوی همگن (تمام آرمور) ساخته شده است در صورتی که استفاده از سه کلاس سنگ با قطر اسمی متفاوت در موج شکن سکویی مرکب (ایسلندی)، باعث کاهش هزینه های تامین مصالح می شود. به طوری که می توان از مصالح معادن قرضه، به شیوه مناسب تری بهره برد. در حالت دوم موج شکن سکویی مرکب، شکست موج روی سکو به طوری که شیرجه شکست ۱ در محدوده کیسون صورت گیرد باعث افزایش فشار وارد بر کیسون موج شکن سکویی مرکب شده است. در مجموع با توجه به نتایج بیان شده در زمینه فشار حداکثری وارد بر کیسون، موج شکن سکویی مرکب در مقایسه با موج شکن کیسونی افقی عملکرد بسیار مناسبی دارد. موج شکن سکویی مرکب نسبت به موج شکن کیسونی افقی در P_1 (بیشینه فشار وارد بر کیسون در تراز آب) مقدار فشار بدست آمده کاهش ۵۲/۰۹٪، در P_2 (بیشینه فشار در تاج کیسون) مقدار فشار بدست آمده کاهش ۶۳/۰۷٪ و در P_3 (حداکثر فشار در پنجه کیسون) کاهش ۷۶/۰۹٪ و در P_u (فشار بالا برنده زیر کیسون) این مقدار فشار کاهش ۵۳/۹۲٪ را داشته است. در موج شکن سکویی مرکب، تاثیر سه سکوی همگن (تمام آرمور)، سکوی متشکل از آرمور-فیلتر و سکوی چندلایه (ایسلندی) در فشار وارد بر کیسون موج شکن سکویی مرکب مورد ارزیابی قرار گرفت که با توجه به نتایج ارائه شده، حالت سوم موج شکن سکویی مرکب (ایسلندی) توصیه می شود.

منابع

- using steady and unsteady flow through rockfill dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, **129**(6), 448-454.
- [13] PIANC, W. "State-of-the-Art of Designing and Constructing Berm Breakwaters". *Report of working group*, 40, 2003.
- [14] 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)* (pp. 53-64).
- [15] Hall, K. and Kao, S. 1991 "A Study of the Stability of Dynamically Stable Breakwaters", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, pp.916-925.
- [16] 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), 706-721.
- [17] 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* (Vol. 99, pp. 331-341).
- [18] US Army, *Coastal Engineering Manual*, 2003.
- [19] Tanimoto, K., Moto, K., Ishizuka, S., & Goda, Y. 1976. An investigation on design wave force formulae of composite-type breakwaters. In *Proc. 23rd Japanese Conf. Coastal Eng* (pp. 11-16).
- [20] Goda, Y. 1975. New wave pressure formulae for composite breakwaters. In *Coastal Engineering 1974* (pp. 1702-1720).
- [1] Vanneste, D. F., & Troch, P. 2010. Experimental research on pore pressure attenuation in rubble-mound breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings*, **(32)**, 30-30.
- [2] De Groot, M. B., Yamazaki, H., Van Gent, M. R. A., & Kheyruri, Z. 1995. Pore pressures in rubble mound breakwaters. In *Coastal Engineering 1994* (pp. 1727-1738).
- [3] Van Gent, M. R. 1995. Wave interaction with berm breakwaters. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, **121**(5), 229-238.
- [4] 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), 47-62.
- [5] Higuera, P., Lara, J. L., & Losada, I. J. 2014 "Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM®. Part I: Formulation and validation". *Coastal Engineering*, **83**, 243-258.
- [6] Moghim, M. N. 2015. Estimation of Pressure Variation on Rubble-Mound Breakwaters Using Wave Momentum Flux Parameter. *Journal of Oceanography*, **6**(23), 27-37.
- [7] 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) :69-79. (In Persian)
- [8] Larroque, B., Arnould, P., Luthon, F., Poncet, P. A., Rahali, A., & Abadie, S. 2018. In-situ measurements of wave impact pressure on a composite breakwater: preliminary results. *Journal of Coastal Research*, **85**, 1086-1090.
- [9] Hirt, C. W., & Nicholas, B. Flow-3D User's Manual. Flow Science Inc, 1998.
- [10] 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)
- [11] F. Science, *FLOW-3D Documentation*, 2012.
- [12] Samani, H. M., Samani, J. M., & Shaiannejad, M. 2003. Reservoir routing

Numerical modeling of pressure on composite berm breakwater and its comparison with Horizontally Caisson breakwater considering the effect of porous medium

S.M. Marashian¹, M. Adjami^{2*}, A. Rezaee Mazyak³

1- MSc, Water and Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology

2- Assistant Professor, Water and Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology

3- Ph.D. student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, TMU

Abstract:

Coastal areas of each country are among the most valuable national resources. Proximity to Seas and oceans not only provides unparalleled privileges for easy and inexpensive transportation, but also provides grounds for economical, commercial and military activities. Breakwaters have changed a lot during their design history. In check the pressure on caisson of composite berm breakwater is important according to its impact on the design of this breakwater as well as its effect on hydraulic reactions. When composite berm breakwater is investigated against Wave Interaction, knowing the created water pressure in berm of breakwater due to Wave Interaction is important because of its effect on many reaction parameters of the porous structure, including wave run-up and wave overtopping. The pressure distribution resulting from the wave interaction in the horizontally caisson breakwater is one of the important parameters in the design of this breakwater. Due to the significant impact of this parameter, the use of composite berm breakwater has been investigated to improve the performance and reduce the forces applied to the structure. In this study, numerical modeling of pressure on composite berm breakwater and its comparison with horizontally caisson breakwater has been investigated by numerical model of FLOW-3D. Also, the use of the composite name is due to the presence of caisson in the berm breakwater. The use of caisson in composite berm breakwater, in contrast to berm breakwater, reduces the volume of consumable materials. On the other hand, by reducing the pressure on the caisson in the composite berm breakwater, it will be possible to build a caisson with thinner walls, which reduces the cost of building breakwater. The results of the laboratory model have been used to evaluate the outputs of the numerical model. Therefore, by analyzing the sensitivity of the numerical model, the number of suitable mesh is selected and then by calibrating and verifying the numerical model the accuracy of simulation results will be evaluated. To ensure the function of the numerical model, its results was calibrated and verified with existing laboratory data. In general, according to the results presented in the context of the pressure applied to caisson, the composite berm breakwater has a very good performance compare to the horizontally caisson breakwater. The greatest amount of pressure on the crest of composite berm breakwater (P2) is related to composite berm breakwater type2. By examining velocity magnitude at the moment of maximum pressure occurrence in the caisson crest, it is determined that at this moment the wave is broken and the impact pressure caused by the wave break increased the pressure in the caisson crest. In the second type of the composite berm breakwater, when the wave breakdown on the berm and the breaker plunge happens in the caisson proximity, it will increase the pressure on the caisson of the composite berm breakwater. In composite berm breakwater, compared with the horizontally caisson breakwater at P1 (the maximum pressure applied to the caisson at the surface of the water), the amount of achieved pressure showed the reduction of 52.09% and at P2 (maximum pressure in the caisson crest), the achieved pressure showed 63/07 % decrease. Also in P3 (maximum pressure in caisson toe), the pressure was reduced by 76.09%, and in Pu (uplift pressure under caisson), this value indicates a decrease of 53.92%.

Keywords: Composite Berm Breakwater, Pressure, Berm Breakwater, Horizontally Caisson Breakwater, Porous Medium.