

# مطالعه عددی و آزمایشگاهی اندرکنش موج با محیط متخلخل موج شکن سکویی چندلایه

مجید احسانی<sup>۱</sup>، محمدنوید مقیم<sup>۲\*</sup>، مهدی شفیعی فر<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

\*moghim@iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

## چکیده

شناخت فیزیک و سازوکار عملکرد موج شکن های توده سنگی تحت اثر برخورد امواج تابشی، به دلیل پیچیدگی های فراوان اندرکنش موج و سازه متخلخل، نیازمند مطالعات پایه و اساسی است. بدین منظور در پژوهش حاضر، با انجام مدل سازی عددی و در نظر گرفتن مشاهده های آزمایشگاهی، به مطالعه و فهم بهتر جریان های ایجاد شده در بیرون و داخل سازه موج شکن سکویی چندلایه در اثر اندرکنش امواج با سازه متخلخل پرداخته می شود. برای انجام درستی آزمایشی نتایج حاصل از مدل سازی عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی سازه موج شکن سکویی چندلایه، جریان بیرون سازه و داخل محیط متخلخل به ترتیب توسط نوسانات سطح آب جلوی سازه و دامنه تغییرات فشار مقایسه می شوند. در این پژوهش با مطالعه تغییرات فشار داخل سازه در اثر پر و خالی شدن محیط متخلخل و همچنین بررسی الگوی جریان خروجی از داخل موج شکن توده سنگی در زمان وقوع بیشینه پایین روی موج مشخص شد که نیروی ناشی از گرادیان فشار مثبت که به سمت خارج سازه جهت دهی شده و همچنین نیروی عمودی ناشی از جریان تراوشی ایجاد شده از داخل به خارج سازه در طول جریان پایین رونده موج بر روی شیب سازه، به صورت هم زمان اتفاق افتاده و بیشترین تأثیر را بر ناپایداری سازه دارد.

**واژگان کلیدی:** موج شکن سکویی چندلایه، شبیه سازی عددی، مدل سازی آزمایشگاهی، پایین روی موج، محیط متخلخل.

## ۱- مقدمه

برخورد و حرکت موج روی موج شکن های توده سنگی منجر به ایجاد پدیده های فیزیکی بسیار پیچیده شامل شکست موج، اندرکنش موج با سازه متخلخل و ایجاد جریان در داخل محیط متخلخل می شود. شناخت جریان های ایجاد شده به ویژه در داخل محیط متخلخل موج شکن سکویی چندلایه حائز اهمیت زیادی است. جریان ناشی از امواج برخوردی روی لایه آرمور، باعث

ایجاد نیروهای هیدرودینامیکی متغیر با زمان و مکان بر سنگ‌دانه‌ها می‌شود. آسیب در لایه آموور زمانی اتفاق می‌افتد که نیروی امواج به اندازه کافی برای حباب‌جایی واحدهای سنگی بزرگ باشد، به گونه‌ای که لایه آموور نتواند نقش حفاظتی خود برای سازه موج‌شکن را به صورت کامل انجام دهد.

یکی از اولین پژوهش‌ها در زمینه اندازه‌گیری فشار داخل سازه توسط امرچی و پارتسکی [1] انجام شده است. آن‌ها در مطالعه آزمایشگاهی خود بر روی موج‌شکن توده‌سنگی سنتی، تأثیر ارتفاع موج و پریرود موج روی فشار داخل سازه را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که با افزایش ارتفاع موج و پریرود موج، فشار داخل سازه افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این در بخش دیگری از این مطالعه به بررسی توزیع مکانی فشار در داخل هسته موج‌شکن پرداختند و بیان کردند که فشار در داخل سازه به صورت نمایی در راستای حرکت موج به داخل سازه کاهش می‌یابد. دی‌گروت و همکاران [2] به مطالعه نوسانات تراز سطح آب در داخل و خارج سازه پرداختند و اهمیت بررسی فشار داخل سازه موج‌شکن متخلخل در تحلیل پایداری لایه آموور را بیان کردند. آن‌ها در مطالعه خود تأثیر اختلاف تراز سطح آب در داخل و خارج سازه و در نتیجه ایجاد جریان خارج‌شونده از داخل به خارج سازه در حین پایین‌روی موج و چگونگی اثر جریان خارج‌شونده روی ناپایداری سنگ‌دانه‌های لایه آموور را بررسی کردند. مقیم و تورام [3] آزمایش‌هایی با هدف اندازه‌گیری و مقایسه نیروی ناشی از موج بر قطعات سنگی مصنوعی در ترازهای مختلف روی سازه، قبل و بعد از تغییر شکل موج‌شکن سکویی همگن شکل‌پذیر انجام دادند. آن‌ها با بررسی نیروهای اندازه‌گیری شده نشان دادند، بیشترین مقدار نیرو موازی شیب سازه توده‌سنگی در نواحی اطراف سطح ایستابی بوده و از طرف دیگر نیروی ایجاد شده در این ناحیه قبل از تغییر شکل سازه به مراتب بیشتر از مقدار نیروی ایجاد شده بعد از تغییر شکل سازه است. همچنین با بررسی هم‌زمان تغییرات مقدار و جهت نیروهای وارد شده بر سنگ‌دانه‌های مصنوعی در موقعیت‌های متفاوت در طول شیب سازه نشان دادند، بیشترین مقدار نیروی وارد شده مربوط به موقعیتی کمی بالاتر از تراز سطح ایستابی و در جهت موازی شیب و به سمت بالای شیب است.

ونست [4] در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، چگونگی توزیع فشار در داخل موج‌شکن توده‌سنگی سنتی و نرخ میرایی فشار داخل هسته

را بررسی کرد. وی بیان کرد که شکل یا نوع سنگ‌دانه‌های لایه آموور تأثیری در مقدار فشار داخل سازه ندارد. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش پریرود موج در یک عمق آب و ارتفاع موج ثابت، نرخ میرایی فشار داخل هسته سازه روند صعودی پیدا می‌کند. ونست [4] در بخش دیگری از مطالعه خود، به مدل‌سازی عددی اندرکنش موج منظم با موج‌شکن توده‌سنگی سنتی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخت. وی به منظور اطمینان از درستی مدل عددی، تغییرات تراز سطح آب بیرون سازه و تغییرات فشار در داخل سازه حاصل از مدل‌سازی عددی را با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مقایسه کرد. ونست با مقایسه نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی بیان کرد که استفاده از مدل عددی توسعه داده شده هم برای بررسی نوسانات سطح آب در جلوی سازه و هم برای نشان دادن تغییرات فشار در داخل سازه مناسب است. جنسن و همکاران [5-6] به بررسی آزمایشگاهی نیروهای ناشی از فشار و تنش‌های برشی ایجاد شده روی سنگ‌دانه‌های لایه آموور در سازه توده‌سنگی سنتی پرداختند. آن‌ها مطالعه خود را برای دو نوع شکست مختلف موج شامل شکست چرخان و لغزان انجام دادند و تغییرات فشار در داخل سازه و تغییرات واکنش‌های هیدرولیکی شامل بالاروی موج و پایین‌روی موج را برای هر نوع شکست موج ارائه کردند. همچنین بیان شد که بیشترین نیروی ناشی از گرادیان فشار به سمت خارج سازه و بیشترین نیروهای ناشی از تنش‌های رینولدزی، در زمان و مکان وقوع بیشینه پایین‌روی موج روی لایه آموور رخ داده است. بدین ترتیب بیشینه تراز پایین‌روی موج به عنوان مستعدترین مکان برای خروج سنگ‌دانه‌ها و آسیب سازه معرفی می‌شود.

بررسی پیشینه مطالعاتی اندرکنش امواج برخوردی با سازه موج‌شکن، حاکی از آن است که دو دسته سازوکار متفاوت جریان یکی در داخل محیط متخلخل موج‌شکن توده‌سنگی و دیگری بر روی قطعات سنگی لایه آموور سازه وجود دارد، که گاهی می‌تواند منجر به تولید نیروهای مخرب و ایجاد ناپایداری در سازه شوند. علاوه بر این، تاکنون مطالعات محدودی روی موج‌شکن‌های سکویی چندلایه انجام شده، به گونه‌ای که اطلاعات و تحقیقات بسیار اندکی روی سازوکار ناپایداری در این نوع سازه وجود دارد. به تازگی، احسانی و همکاران [7] مطالعه جامعی روی تأثیر پارامترهای مختلف محیطی و هندسی روی پایداری این نوع سازه

مدل‌سازی آزمایشگاهی موج‌شکن سکویی چندلایه در دانشگاه NTNU، در یک کلنال موج با طول ۳۳ متر، عرض ۱ متر و عمق ۱/۸ متر انجام شده است. امواج تابیده شده به موج‌شکن از نوع امواج منظم بودند. در این مطالعه، از سه حسگر مقاومتی در جلوی سازه برای اندازه‌گیری نوسانات تراز سطح آب و تعیین ارتفاع موج برخوردی به سازه استفاده شده است. همچنین اندازه‌گیری تغییرات فشار در داخل محیط متخلخل موج‌شکن، به وسیله سه فشارسنج صورت گرفته است. شکل (۱) نمایی از مقطع مدل آزمایشگاهی و لایه‌های مختلف تشکیل‌دهنده موج‌شکن سکویی چندلایه و همچنین موقعیت فشارسنج‌ها و چگونگی چپش حسگرها را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که در این پژوهش، برای تفکیک امواج تابشی و بازتابی از روش پیشنهادی منسارد و فونک [8] براساس رابطه زیر استفاده شده است.

$$X_{12} = L/10, L/6 \leq X_{13} \leq L/3, X_{13} \neq L/5, 3L/10 \quad (1)$$

در رابطه (۱)  $X_{12}$  فاصله حسگر اول (سمت موج‌ساز) تا حسگر میانی،  $X_{13}$  فاصله حسگر اول تا حسگر سوم (سمت سازه)،  $L_p$  طول موج و متناظر با دوره اوج موج ( $T_p$ ) است.

مشخصات مصالح لایه‌های مختلف موج‌شکن سکویی چندلایه در جدول (۱) ارائه شده است. شایان ذکر است که مقدار متوسط قطر سنگ‌دانه‌ها در لایه‌های مختلف سنگی موج‌شکن سکویی چندلایه ارائه شده است. در تمامی آزمایش‌ها، عمق آب ثابت و برابر ۰/۷۸۵ متر بود. همچنین مختصات محل قرارگیری فشارسنج‌ها برای  $PG_1$  (۰/۲۵، ۰/۴۱)،  $PG_2$  (۰/۵، ۰/۷۶) و  $PG_3$  (۰/۵، ۱/۲۱) است. در این پژوهش، به منظور درستی آزمایشی مدل عددی، از نتایج آزمایشگاهی تغییرات تراز سطح آب و تغییرات فشار اندازه‌گیری شده در داخل سازه استفاده خواهد شد.

انجام دادند. با این وجود، لزوم شناخت جریان‌های ایجاد شده در اثر امواج برخوردی به موج‌شکن سکویی چندلایه و از طرف دیگر نیاز به فهم بهتر حرکت موج در داخل و خارج سازه به نظر می‌رسد. در این مطالعه، جریان ایجاد شده روی لایه آرمور موج‌شکن و چگونگی تأثیر آن روی پایداری سازه و همچنین جریان ایجاد شده در داخل محیط متخلخل موج‌شکن در حین پر و خالی شدن آن در طول وقوع جریان بالارونده و پایین‌رونده بر روی سازه بررسی می‌شوند. برای این منظور از مشاهده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی برای پاسخ‌گویی به اهداف مدنظر استفاده شده است. علاوه بر این در این پژوهش، برای درستی آزمایشی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، از نتایج مدل آزمایشگاهی موج‌شکن سکویی چندلایه شامل نوسانات تراز سطح آزاد آب در بیرون سازه و دامنه تغییرات فشار در داخل موج‌شکن استفاده شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

انجام مطالعه آزمایشگاهی برای شناخت بهتر پدیده‌های بوجود آمده در اثر اندرکنش امواج تابشی با موج‌شکن‌های سکویی چندلایه ضروری به نظر می‌رسد. از طرف دیگر نیاز به فهم بهتر جریان در داخل سازه متخلخل، محدودیت‌های اندازه‌گیری موجود در آزمایشگاه، پیشرفت‌های قابل توجه روش‌های عددی و امکان استفاده آسان و سریع از رایانه‌ها از جمله نکاتی هستند که لزوم و اهمیت استفاده از مدل‌سازی عددی در زمینه اندرکنش امواج و موج‌شکن توده‌سنگی را تبیین می‌کنند. در همین راستا در پژوهش حاضر به منظور مطالعه سازوکار جریان داخل و خارج موج‌شکن سکویی چندلایه، مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی انجام می‌شود. بنابراین، نخست، مدل آزمایشگاهی اجرا شده در آزمایشگاه بیان شده و سپس مدل‌سازی عددی تشریح می‌شود. شایان ذکر است که در این پژوهش از نرم‌افزار Flow-3D برای شبیه‌سازی و حل عددی معادلات حاکم بر جریان استفاده می‌شود.

### ۲-۱- مدل آزمایشگاهی

شکل ۱. مقطع موج شکن سکویی چندلایه به همراه موقعیت فشارسنج‌ها و حسگرهای اندازه‌گیری نوسانات سطح آب

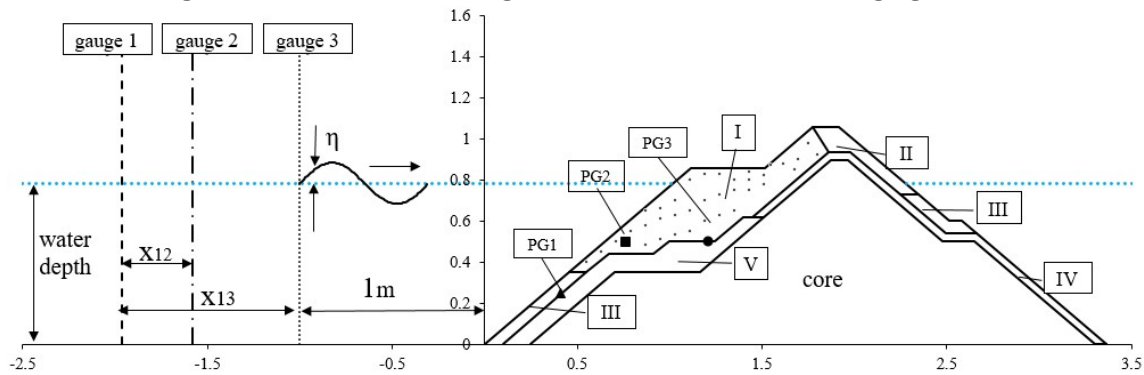


Fig. 1. Cross section of multi-layer berm breakwater set-up with the location of the wave gauges and pressure transducers

جدول ۱. مشخصات مصالح تشکیل‌دهنده لایه‌های مختلف سنگی موج شکن سکویی چندلایه

Core	Stone class IV	Stone class III	Stone class II	Stone class I	Properties
		0.02	0.025	0.03	Nominal diameter (m)
0.0036	0.004	0.012-0.029	0.029-0.058	0.058-0.087	Stone mass (kg)
		2700	2700	2700	Mass density ( $kg/m^3$ )
		1.5	1.2	1.1	Stone gradation ( $f_g = \frac{D_{n85}}{D_{n15}}$ )

Table 1. Material characteristics for different stone classes of multi-layer berm breakwater

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left( \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right) \quad (2)$$

که در آن چگالی سیال،  $u$  سرعت در جهت محور  $x$  فشار  $p$  و لزجت سینماتیکی است. نرم‌افزار Flow-3D امکان بهره‌گیری از شش مدل آشفتگی شامل صفر معادله‌ای طول اختلاط پراوتل، یک معادله‌ای، دو معادله‌ای  $k-\epsilon$ ،  $k-\omega$  و RNG مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ دارد. لیانگ و همکاران [10]، مالیکی و همکاران [11] و دنتاله و همکاران [12] از جمله پژوهشگرانی هستند که بر پایه نتایج تحقیقات خود استفاده از مدل آشفتگی RNG در زمینه اندرکنش موج-سازه متخلخل را پیشنهاد کرده‌اند. با استناد به این پژوهش‌ها، برای مدل‌سازی عددی موج شکن سکویی چندلایه در این پژوهش از مدل آشفتگی RNG استفاده می‌شود.

یکی از مهمترین بخش‌ها در مدل‌سازی عددی موج شکن‌های توده‌سنگی، دقت در مدل‌سازی محیط متخلخل است. در موج شکن‌های توده‌سنگی به دلیل بزرگ بودن خلل و فرج بین سنگ‌دانه‌ها، محیط متخلخل درشت‌دانه بوده و جریان به صورت آشفته خواهد بود. از این رو لازم است از روابطی استفاده

## ۲-۲- مدل عددی و معادلات حاکم

نرم‌افزار Flow-3D، نرم‌افزاری قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط Science, Inc انجام شده است [9]. در این نرم‌افزار از دو روش حجم سیال (VOF<sup>1</sup>) و کسر مساحت - حجم مانع (FAVOR<sup>2</sup>) برای شبیه‌سازی هندسی مرز سیالات و مرزهای صلب استفاده می‌شود. روش حجم سیال برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش کسر مساحت - حجم مانع برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد [9]. در نرم‌افزار Flow-3D، قوانین حاکم بر جریان سیال تراکم‌ناپذیر و لزج توسط یک معادله پیوستگی و سه معادله اندازه حرکت در جهت محورهای سه‌گانه مختصات، معادلات ناویر-استوکس، به صورت زیر بیان می‌شوند [9].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

شود که علاوه بر تبیین ویژگی‌های فیزیکی این‌گونه محیط‌های متخلخل، توانایی شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در این محیط را نیز داشته باشد. یکی از معادلات پرکاربرد در زمینه جریان داخل محیط متخلخل، معادله فورشایمر [13] است که در مطالعه حاضر از آن استفاده می‌شود. فورشایمر [13] رابطه زیر را برای جریان در داخل محیط متخلخل درشت‌دانه ارائه کرد.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) = A|u_D|\mu \frac{(1-n)^2}{n^3} + B|u_D|^2 \rho \frac{(1-n)}{n^3} \quad (3)$$

که در آن  $A$  ضریب درگ خطی،  $B$  ضریب درگ غیرخطی،  $n$  ضریب تخلخل و  $ud$  سرعت ظاهری جریان است. توصیه راهنمای نرم‌افزار Flow-3D بر این است که ضریب درگ خطی از  $A = a/d_{pore}^2$  و ضریب درگ غیرخطی از  $B = \beta/d_{pore}$  محاسبه شود، به گونه‌ای که  $\alpha$  برابر با مقدار  $180^\circ$  و برای ضریب  $\beta$  که به عنوان نماینده نرمی یا زبری سنگ‌ها تعریف می‌شود، مقداری برابر  $1/8$  تا  $4$  براساس زبری سنگ پیشنهاد می‌شود [9].

در مدل‌سازی حاضر، جریان به صورت تک فاز و سیال تراکم-ناپذیر و لزج تعریف شده است. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، نرم‌افزار Flow-3D برای تشخیص سطح آب، از روش حجم سیال (VOF) استفاده می‌کند [9]. برای ساخت هندسه مدل، ابتدا بدنه صلب موج‌شکن سکویی چندلایه در نرم‌افزار اتوکد شامل لایه‌های مربوط به کلاس‌های مختلف سنگ ساخته شد، سپس هندسه سازه به صورت یک جسم صلب با فرمت \*.stl برای نرم‌افزار Flow-3D تعریف می‌شود. در این مدل‌سازی، در مرز ورودی از شرط مرزی موج منظم، در مرز پایین از شرط مرزی دیوار و در سایر مرزها از شرط تقارن استفاده شده است.

## ۳-۲-۳-۲-۳ - درستی آزمایشی مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی

در بخش حاضر، مدل‌سازی عددی موج‌شکن سکویی چندلایه تحت اثر امواج منظم مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی موج‌شکن سکویی چندلایه اعتبارسنجی می‌شود. رایانه مورد استفاده برای انجام این مدل‌سازی با پردازنده ۵ هسته‌ای با فرکانس ۳/۴۳ گیگاهرتز، حافظه‌ی دسترسی ۸ گیگابایت و حافظه داخلی ۱ ترابایت بوده

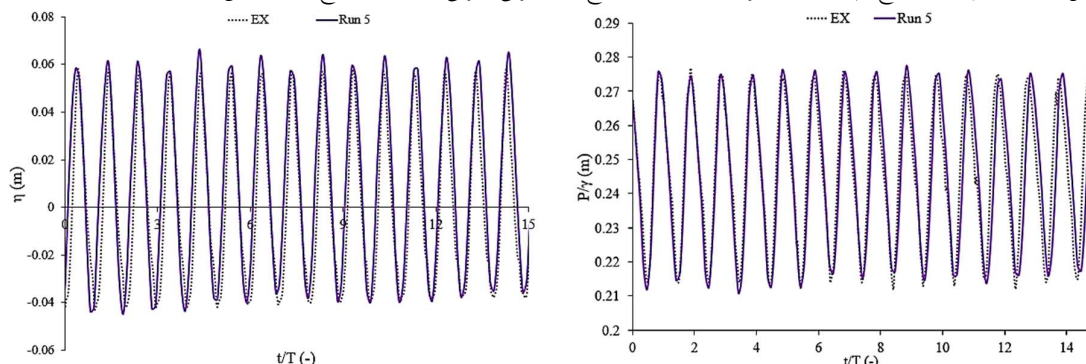
است.

تعیین مناسب‌ترین شبکه‌بندی یکی از مهمترین گام‌ها در مطالعات عددی است، چرا که انتخاب بهینه تعداد سلول محاسباتی، علاوه بر اینکه افزایش دقت شبیه‌سازی عددی را در پی دارد، منتج به کاهش زمان شبیه‌سازی و کاهش حجم محاسبات خواهد شد. در مدل‌سازی عددی حاضر، مشابه با مطالعه ونست و تراچ [14]، شبکه‌بندی در یک بلوک و در سراسر میدان حل به صورت یکنواخت متشکل از سلول‌های مستطیلی در نظر گرفته شده است. برای تعیین اندازه سلول بهینه در مدل عددی حاضر، شش مدل با اندازه سلول‌های مختلف مطابق جدول (۲) ساخته شد و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. مقایسه مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی در خارج و داخل محیط متخلخل موج‌شکن برای تغییرات تراز سطح آب خارج سازه و دامنه تغییرات فشار در داخل سازه انجام شد. به منظور تعیین شبکه‌بندی مناسب، موج منظم با ارتفاع موج  $0/09$  متر، دوره موج  $1/7$  ثانیه و عمق آب  $0/785$  متر به نرم‌افزار معرفی شده است. در مدل‌سازی عددی حاضر لایه‌های مختلف موج‌شکن سکویی چندلایه به صورت محیط متخلخل با ضریب تخلخل برابر با  $0/45$  در نظر گرفته شدند. برای تعیین مناسب‌ترین ضریب درگ غیرخطی ( $\beta$ ) در معادله فورشایمر اجراهای مختلفی انجام شد و در پایان ضریب  $\beta$  برابر با  $3$  برای انجام مدل‌سازی عددی استفاده شد. شایان ذکر است که در مقاله حاضر، نتایج آزمایشگاهی مربوط به فشارسنج  $PG_2$  برای درستی-آزمایی مدل عددی استفاده می‌شود. یکی از دلایل اصلی برای استفاده از نتایج این فشارسنج به محل قرارگیری آن در لایه آرمر شد. هرچه محل اثر ثبت فشار در اعماق بیشتری از محیط متخلخل باشد، به مقدار خطاهای ناشی از تقریب محیط متخلخل با رابطه فورشایمر افزوده می‌شود و علاوه بر این مقدار دامنه تغییرات فشار کوچکتر خواهد شد. همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، در اجرای شماره ۵ با تعداد  $750000$  سلول، نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی برای تغییرات تراز سطح آب خارج سازه و دامنه تغییرات فشار در داخل سازه دارای هماهنگی بسیار مناسبی هستند.

جدول ۲. مشخصات شبکه بندی انجام شده در مدل سازی عددی

Run No.	Number of cells	Dimension of cells (m)	Simulation time (s)	Volume of calculation (GB)
Run 1	100000	0.08	229	7.9
Run 2	250000	0.058	843	18.2
Run 3	450000	0.048	1584	31.5
Run 4	600000	0.044	2313	41.2
Run 5	750000	0.04	3829	49.5
Run 6	900000	0.038	5089	60.1

Table 2. Numerical model meshing characteristics

شکل ۲. مقایسه نوسانات سطح آب و دامنه تغییرات فشار در فشارسنج PG<sub>2</sub> برای اجرای شماره ۵ با نتایج آزمایشگاهی ( $H=0.09\text{ m}$ ,  $T=1.7\text{ s}$ )Fig. 2. The comparison of water level fluctuations and pressure amplitude of PG<sub>2</sub> for Run 5 with the experimental results ( $H=0.09\text{ m}$ ,  $T=1.7\text{ s}$ )

مدل عددی نسبت به نتایج مدل آزمایشگاهی نشان می دهد که بیشترین خطا مربوط به نتایج فشارسنج PG<sub>3</sub> است. همچنین، دامنه تغییرات فشار برای فشارسنج PG<sub>3</sub>، کوچکتر از دو فشارسنج دیگر بدست آمده است که البته در هماهنگی با نتایج آزمایشگاهی است. به نظر می رسد موقعیت قرارگیری فشارسنج PG<sub>3</sub> که در عمق محیط متخلخل قرار دارد و از طرفی در مرز بین دو کلاس سنگ با قطر مشخصه بسیار متفاوت (کلاس سنگ I و کلاس سنگ V) جانمایی شده، دلیل اصلی خطای بیشتر در این فشارسنج است. در مجموع با مقایسه نتایج مدل سازی عددی حاصل از ۳ فشارسنج در داخل محیط متخلخل سازه و یک حسگر نوسانات سطح آب در جلوی سازه با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی، از مدل عددی اطمینان حاصل شد.

### ۳- نتایج و بحث

در بخش حاضر، جریان های بوجود آمده در داخل و خارج سازه توده سنگی در اثر اندرکنش موج برخوردی با سازه موج شکن سکویی چندلایه و اثر آن بر ناپایداری سنگ دانه ها تشریح می شود و در پایان چگونگی جابه جایی سنگ دانه ها در لایه آر مور مطالعه خواهد شد.

مقایسه نتایج نوسانات سطح آب جلوی سازه و دامنه تغییرات فشار داخل سازه در اجراهای شماره ۵ و ۶ نشان می دهد که با افزایش تعداد سلول محاسباتی، تغییر بسیار ناچیزی در برابری نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی ایجاد شده است. این در حالی است که با افزایش سلول محاسباتی از ۷۵۰۰۰۰ سلول در اجرای شماره ۵ به ۹۰۰۰۰۰ سلول اجرای شماره ۶، زمان اجرای شبیه سازی و همچنین حجم محاسبات افزایش قابل توجهی داشته است. مقایسه اجراهای شماره ۵ و ۶ نشان می دهد، با افزایش سلول محاسباتی به میزان ۱۵۰۰۰۰ سلول، ۲۵٪ زمان اجرای شبیه سازی بیشتر شده و از طرفی کم و بیش ۱۸٪ حجم محاسبات افزایش یافته است. در مدل سازی عددی، زمان اجرای محاسبات و حجم محاسبات به عنوان هزینه مطالعه شناخته می شوند. با توجه به این نکته و مقایسه نتایج مدل سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی، همان گونه که پیش از این ذکر شد تعداد و اندازه سلول های محاسباتی بکار رفته در اجرای شماره ۵، به عنوان گزینه قابل قبول در مدل سازی عددی حاضر در نظر گرفته شد. شکل (۳) مقایسه نتایج تغییرات زمانی فشار در فشارسنج های PG<sub>1</sub> و PG<sub>3</sub>، بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی برای اجرای شماره ۶ نشان می دهد. مقایسه نتایج دامنه تغییرات فشار

شکل ۳. مقایسه نوسانات سطح آب خارج سازه و دامنه تغییرات فشار در فشارسنجهای PG<sub>1</sub> (شکل سمت چپ) و PG<sub>3</sub> (شکل سمت راست) برای اجرای شماره ۵، در مدل عددی و آزمایشگاهی ( $H=0.09\text{ m}, T=1.7\text{ s}$ )

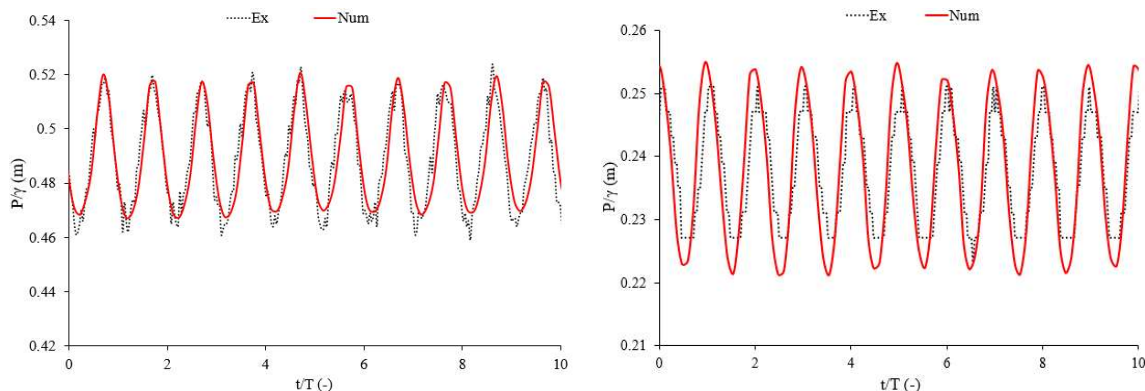


Fig 3. The comparison made between SWL outside the structure and pressure amplitude variation in PG<sub>1</sub> (left) and PG<sub>3</sub> (right) for the 5th running test in both experimental and numerical modelling ( $H=0.09\text{ m}, T=1.7\text{ s}$ )

نتایج تغییرات مکانی فشار حاصل از مدل عددی بررسی و تحلیل می‌شود. آرایش موقعیت‌های ثبت فشار در دو تراز متفاوت و در راستای افقی X، در شکل (۴) نشان داده شده است. شایان ذکر است که در شکل (۴)، هر یک از موقعیت‌های ثبت فشار به صورت  $P_{ij}$  در نظر گرفته شدند، به شکلی که در آن  $i$  نماینده شماره راستای مدنظر برای ثبت فشار و  $j$  نماینده شماره مکانی مدنظر در هر راستا برای ثبت فشار تعریف شده‌اند. موقعیت مختصاتی مربوط به هر یک از نقاط در نظر گرفته شده برای ثبت فشار، در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

### ۳-۱- بررسی تغییرات مکانی فشار داخل سازه متخلخل توده‌سنگی

زمانی که پاسخ سازه در برابر برخورد موج مورد مطالعه قرار می‌گیرد، داشتن اطلاعات در مورد تغییرات مکانی فشار داخل سازه و چگونگی میرا شدن موج داخل محیط متخلخل سازه توده‌سنگی حائز اهمیت است. در این پژوهش، به منظور مطالعه جریان در داخل محیط متخلخل موج‌شکن توده‌سنگی چندلایه، از نتایج مدل عددی استفاده شده است. بدین منظور در ادامه،

شکل ۴. آرایش موقعیت‌های مکانی ثبت فشار در دو تراز متفاوت در راستای X

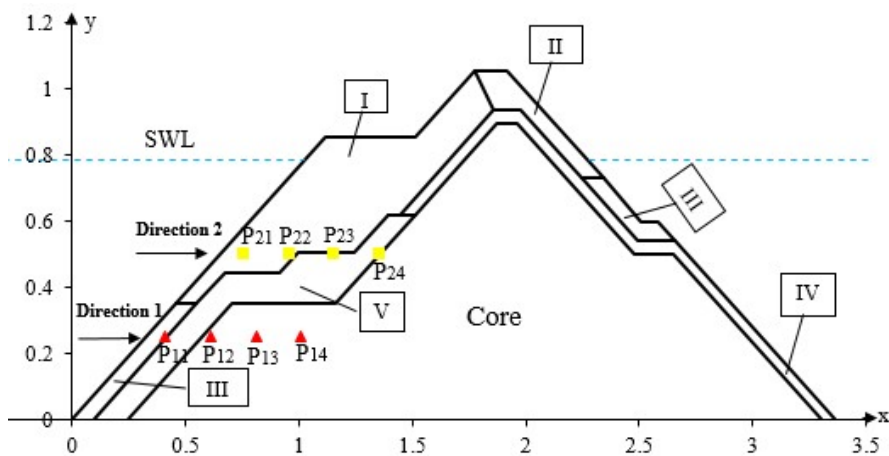


Fig. 4. The spatial arrangement of pressure recording in two different elevations aligned in the x-direction

جدول ۳. مختصات مربوط به ثبت فشار در داخل سازه

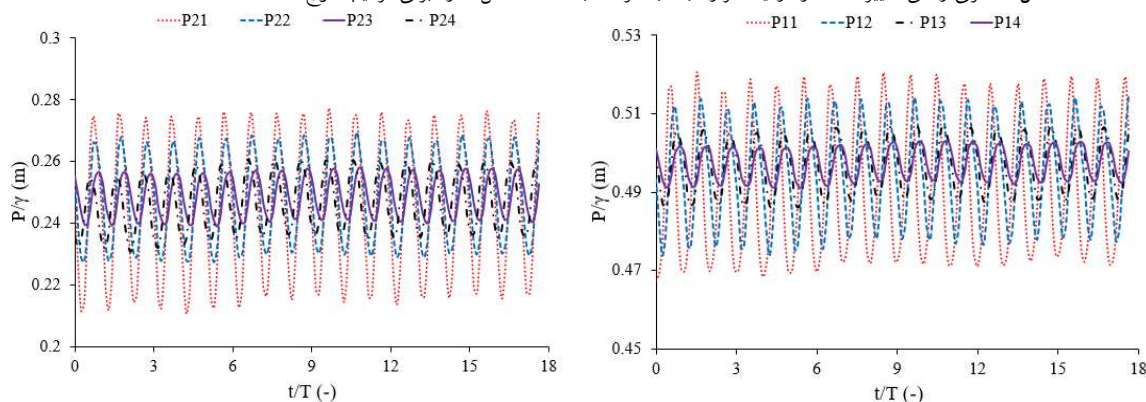
P <sub>24</sub>	P <sub>23</sub>	P <sub>22</sub>	P <sub>21</sub>	P <sub>14</sub>	P <sub>13</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>11</sub>	Pressure gauge
0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0.25	0.25	0.25	Vertical coordinate (m)
1.36	1.16	0.96	0.76	1.01	0.81	0.61	0.41	Horizontal coordinate (m)

Table 3. The coordinates of pressure recording inside the structure

برای ترکیب موج  $H=0.09$  m,  $T=1.7$  s نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با حرکت به سمت داخل سازه، دامنه تغییرات فشار بدست آمده برای نقاط در یک تراز ثابت، کاهش می‌یابد. به شکلی که با حرکت در راستای شماره ۱ به سمت داخل سازه، از موقعیت فشارسنج P<sub>11</sub> به موقعیت P<sub>14</sub>، دامنه تغییرات فشار به طرز چشمگیری کاهش یافته است. همچنین بررسی تغییرات دامنه فشار مربوط به راستای شماره ۲ نشان می‌دهد که با حرکت به سمت داخل سازه، از موقعیت فشارسنج P<sub>21</sub> به موقعیت P<sub>24</sub>، از دامنه تغییرات فشار کم و بیش ۱/۵ برابر کاسته شده است.

شکل (۵) سری زمانی تغییرات فشار ناشی از جریان در داخل محیط متخلخل، برای موقعیت‌های مکانی مختلف در راستای شماره ۱ و ۲ برای ترکیب موج  $H=0.09$  m,  $T=1.7$  s را نشان می‌دهد. همان‌که در این شکل مشاهده می‌شود، با حرکت به سمت داخل سازه در راستای مشخص x، به دلیل استهلاک انرژی موج در اثر نفوذ موج به داخل محیط متخلخل، میرایی فشار به وجود آمده است. به منظور مطالعه کمی تغییرات فشار در موقعیت‌های مختلف مشخص شده در شکل (۶)، از بررسی دامنه تغییرات فشار مربوط به موقعیت‌های مشخص، استفاده می‌شود. شکل (۶) دامنه تغییرات فشار در دو راستای شماره ۱ و ۲ را

شکل ۵. سری زمانی تغییرات فشار در یک تراز ثابت با حرکت به سمت داخل سازه برای ترکیب موج  $H=0.09$  m,  $T=1.7$  s

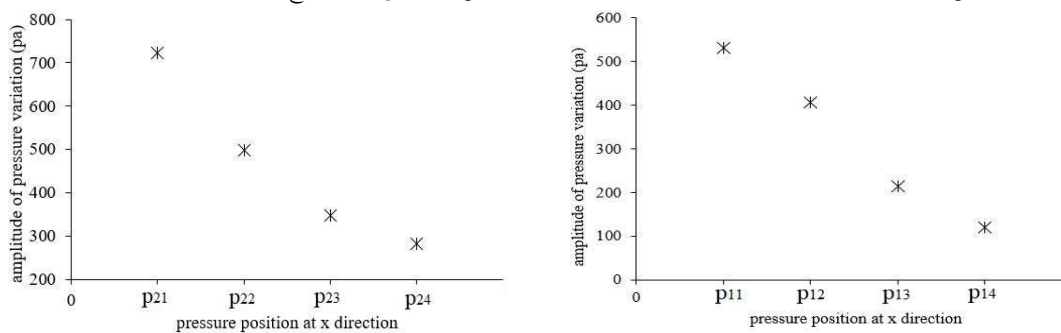


b- سری زمانی تغییرات فشار در راستای شماره ۲  
b. The pressure time series at direction 2

الف- سری زمانی تغییرات فشار در راستای شماره ۱  
a. The pressure time series at direction 1

Fig. 5. The pressure time series at a constant elevation toward the structure for  $H=0.09$  m,  $T=1.7$  s

شکل ۶. دامنه تغییرات فشار در یک تراز ثابت با حرکت به سمت داخل سازه برای ترکیب موج  $H=0.09$  m,  $T=1.7$  s



ب- دامنه تغییرات فشار در راستای شماره ۲  
b. The amplitude of pressure variation at direction 2

الف- دامنه تغییرات فشار در راستای شماره ۱  
a. The amplitude of pressure variation at direction 1

Fig. 6. The amplitude of pressure variation at a constant elevation toward the structure for  $H=0.09$  m,  $T=1.7$  s



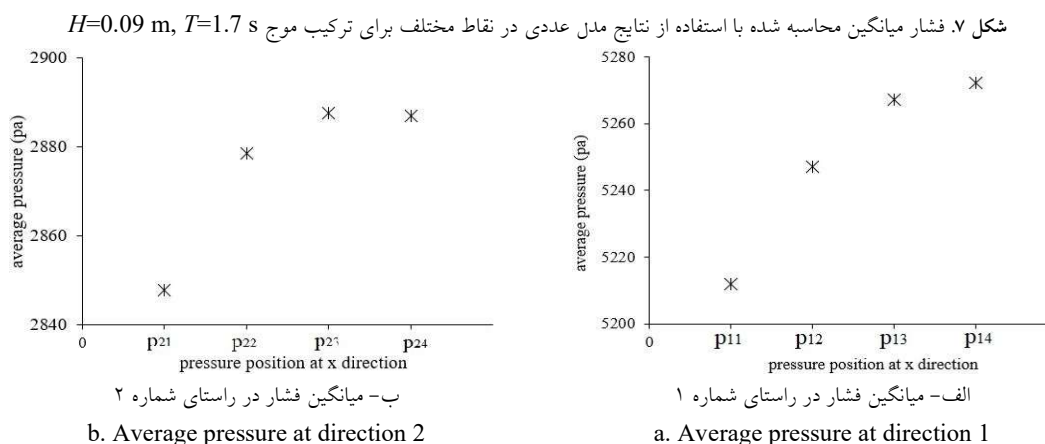


Fig. 7. The calculated average pressure using numerical model at different points for  $H=0.09$  m,  $T=1.7$  s

فشار هیدرولیکی بزرگتری بین تراز آب داخل سازه و تراز آب خارج سازه نیاز است. به بیان ساده‌تر، از آنجایی که در حالت خروج آب از سازه در طول پایین‌روی موج، آب مجبور است از فضای کوچکتری نسبت به حالت نفوذ آب به سازه متخلخل در طول بالاروی موج عبور کند، بنابراین برای آنکه حجم آب ورودی و خروجی از سازه یکسان باشند، باید گرادیان فشار هیدرولیکی بین تراز سطح آب داخل و خارج سازه در حین پایین‌روی موج روی سازه موجود باشد. نکته اشاره شده، با افزایش سطح آب داخلی تأمین شده و از این‌رو منجر به افزایش میانگین فشار در قسمت‌های داخلی سازه می‌شود.

### ۲-۳- بررسی اثر جریان ورودی و خروجی در داخل محیط متخلخل موج‌شکن توده‌سنگی بر پایداری سازه

به منظور بررسی سازوکار جریان ایجاد شده در داخل سازه توده‌سنگی در اثر پر و خالی شدن مداوم آن در هنگام بالاروی و پایین‌روی موج روی سازه، نتایج تغییرات فشار درون سازه در مقاطع مختلف با استفاده از مدل عددی مطالعه می‌شود. برای تفسیر مناسب‌تر نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی، دستگاه مختصات جدید  $k-n$  مطابق شکل (۸) در نظر گرفته شده است. در دستگاه مختصات جدید، مبدأ مختصات در محل پای سازه، محور  $k$  هم‌راستای شیب لایه آرمور و محور  $n$  در جهت عمود بر شیب سازه تعریف شده است. شایان ذکر است که سه مقطع در امتداد محور  $k$  و در هر مقطع سه موقعیت مختلف در داخل سازه در

با استفاده از نتایج بدست آمده از مدل عددی، مقادیر فشار میانگین محاسبه شده در هر یک از موقعیت‌های در نظر گرفته شده برای ثبت فشار، در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با حرکت به داخل سازه، مقدار میانگین فشار بدست آمده در نقاط ثبت فشار مربوط به یک تراز مشخص، افزایش یافته است. علت افزایش میانگین فشار در قسمت‌های داخلی سازه را می‌توان با بررسی جریان‌های ایجاد شده در داخل سازه، در اثر پر و خالی شدن محیط متخلخل سازه توده‌سنگی، در طول بالاروی و پایین‌روی موج روی سازه توجیه کرد. مشاهده‌های آزمایشگاهی و عددی حاکی از بزرگتر بودن تراز بالاروی موج روی شیب سازه نسبت به تراز پایین‌روی موج روی سازه است. در طول بالاروی موج و نفوذ جریان ناشی از آن به داخل سازه متخلخل توده‌سنگی، تراز سطح آب در داخل سازه افزایش می‌یابد. در طول پایین‌روی موج، قسمت عمده جریان خروجی از داخل سازه به سمت بیرون، در محدوده پایینی تراز پایین‌روی موج رخ داده و باعث کاهش سطح آب داخل سازه متخلخل می‌شود. به منظور بدست آوردن مقدار جریان خروجی از سازه برابر با مقدار جریان ورودی به سازه در هر دوره رفت و برگشت موج برخوردی از یک طرف، و با توجه به اینکه در طول وقوع پایین‌روی و خروج جریان از داخل محیط متخلخل، سطح سازه توده‌سنگی در معرض جریان خروجی، کمتر از سطح سازه برای جریان ورودی است، باید سرعت جریان تراوشی (خروجی) بزرگتری نسبت به سرعت جریان نفوذی (ورودی) بوجود آید. به منظور وقوع پدیده ذکر شده، گرادیان

تغییرات تراز سطح آب نشان داده شده است. هرگاه موج در کمترین تراز ممکن در هر دوره رفت و برگشت جریان روی شیب سازه قرار گیرد، در موقعیت مکانی و زمانی بیشینه پایین روی بوده و بالعکس زمانی که موج در بیشینه تراز جریان روی شیب موج شکن قرار داشته باشد، موقعیت مکانی و زمانی بیشینه بالاروی موج در آن مکان و زمان ثبت می شود. مدت زمان فرآیند بالاروی موج بر روی شیب سازه، شامل بازه ای از زمان است که موج فاصله میان بیشینه تراز پایین روی و بیشینه تراز بالاروی را طی می کند. در مدل عددی حاضر، اطلاعات برداشت شده در یک پریود کامل موج، زمان وقوع بیشینه پایین روی و بالاروی موج را به ترتیب برابر با ۵/۰٪ و ۳/۱٪ ثانیه نشان می دهد.

راستای عمود بر شیب (در جهت محور  $n$ ) با فواصل یکسان از هم، برای ثبت مقادیر فشار انتخاب شده اند. موقعیت های مختلف ثبت فشار بر اساس دستگاه مختصات جدید، در شکل (۸) نشان داده شده است. موقعیت مختصاتی مربوط به هر یک از نقاط در نظر گرفته شده برای ثبت فشار در راستای دستگاه مختصات جدید  $k-n$  در جدول (۴) ارائه شده است.

به منظور بررسی موقعیت موج روی سازه، اطلاعات مربوط به زمان وقوع بیشینه بالاروی موج و پایین روی موج روی لایه آرمور در یک پریود کامل موج در نظر گرفته می شود. بدین منظور، تغییرات تراز سطح آب در اثر موج برخوردی به سازه در مقطع دلخواه در محل پای سازه، تحت عنوان مقطع شاخص ثبت می شود. در شکل (۷) محل قرارگیری مقطع شاخص برای ثبت

جدول ۴. موقعیت های مختلف ثبت فشار در دستگاه مختصات  $k-n$

مقطع سوم		محل ثبت فشار	مقطع دوم		محل ثبت فشار	مقطع اول		محل ثبت فشار
k (m)	n (m)		k (m)	n (m)		k (m)	n (m)	
0.83	0	S <sub>31</sub>	1.0	0	S <sub>21</sub>	1.17	0	S <sub>11</sub>
0.83	-0.03	S <sub>32</sub>	1.0	-0.03	S <sub>22</sub>	1.17	-0.03	S <sub>12</sub>
0.83	-0.06	S <sub>33</sub>	1.0	-0.06	S <sub>23</sub>	1.17	-0.06	S <sub>13</sub>

Table 4. The locations of pressure recording in K-n coordination system

شکل ۸. نمایش دستگاه مختصات و مقاطع اندازه گیری فشار

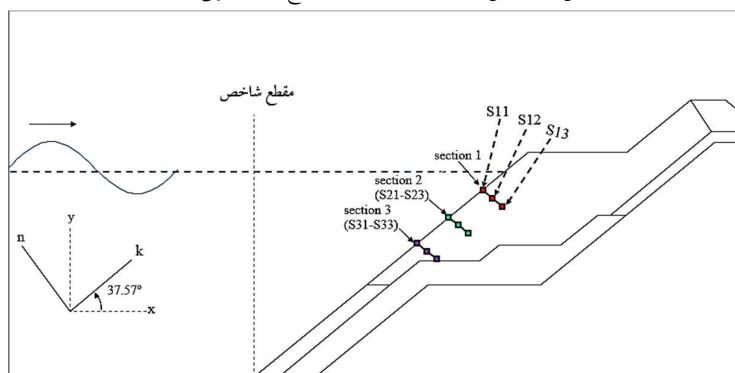


Fig. 8. Schematic view of the coordination system and the pressure recording sections

شکل ۹. تعریف جهت گرادیان فشار. (الف) گرادیان فشار به سمت داخل، (ب) گرادیان فشار به سمت خارج

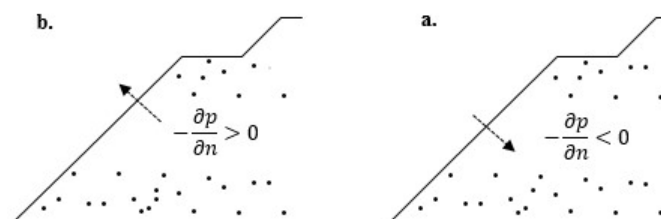
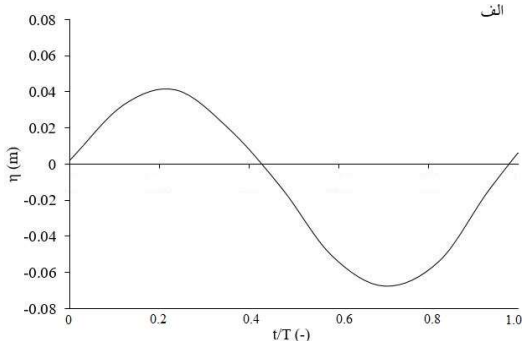


Fig. 9. Definition of pressure gradient direction. a) inward-directed gradient, b) outward-directed gradient

فشار در نقاط داخل سازه در راستای محور  $\Pi$  منفی هستند، تحت عنوان ناحیه (II) مشخص شده است. با توجه به نمودارهای مربوط به موقعیت‌های مختلف ثبت فشار داخل سازه، محدوده‌های زمانی که در شکل (۱۰) به عنوان نواحی I و II تعریف شده‌اند، به ترتیب بیانگر جریان تراوشی از داخل به خارج سازه و جریان نفوذی از خارج به داخل سازه هستند. علاوه بر این در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که نمودار تغییرات فشار در مکان‌های مختلف در طول یک پریود کامل موج، یکدیگر را در یک نقطه قطع کردند، به طوری که در آن نقاط، فشار در تمام موقعیت‌های مختلف مکانی در یک مقطع با هم برابر هستند. همچنین در محل تقاطع مذکور در نمودار، جریان از ناحیه I به ناحیه II و یا برعکس تغییر جهت می‌دهد.

با در نظر گرفتن نمودار تغییرات فشار در داخل سازه در حین وقوع جریان بالارونده و پایین‌رونده روی شیب سازه در طول یک دوره کامل موج، می‌توان نتیجه گرفت که در طول بالاروی موج (از بیشینه تراز پایین‌روی تا بیشینه تراز بالاروی)، فشار از بیشترین مقدار در لایه‌های درونی‌تر سازه و کمترین مقدار خود در نزدیکی شیب سازه، به وضعیتی برعکس در مقدار فشار داخل سازه، با مقادیر کمتر فشار در نقاط داخلی‌تر موج‌شکن و مقادیر بیشتر فشار در نزدیکی لایه خارجی سازه تغییر می‌کند.

شکل ۱۰- الف) تغییرات زمانی سطح آب در مقطع شاخص، (ب) تغییرات زمانی فشار در مقطع ۳ برای مکان‌های مختلف



برای مطالعه تأثیر جریان‌های ایجاد شده در داخل موج‌شکن سکویی چندلایه بر پایداری سازه، در طول یک دوره رفت و برگشت موج در حین وقوع جریان بالارونده و پایین‌رونده روی شیب سازه، از بررسی تغییرات فشار در جهت عمود بر شیب سازه (در جهت  $n$ ) استفاده می‌شود. بدین منظور، تغییرات فشار در راستای محور  $n$ ، به صورت  $(-\partial p/\partial n)$  تعریف شده است. در ادامه با در نظر گرفتن نمای پندارین در شکل (۹)، تفسیر علامت  $(-\partial p/\partial n)$  بیان می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۹-الف) نشان داده شده، در صورتی که  $-\partial p/\partial n > 0$  باشد، به معنای آن است که مقدار فشار با فرورفتن در داخل سازه (در راستای مخالف محور  $n$ ) نسبت به نقاط بیرونی‌تر افزایش یافته است. بدین ترتیب، مؤلفه نیروی به سمت خارج سازه در راستای عمود بر شیب سازه ایجاد شده که در جهت ناپایداری سنگ‌دانه‌ها عمل می‌کند. از طرفی با افزایش فشار در جهت عمود بر شیب سازه، در راستای مثبت محور  $n$ ، آنگاه  $-\partial p/\partial n < 0$  بوده و سبب تولید نیروی عمود بر سازه، به سمت داخل سازه می‌شود شکل (۹-ب). با توجه به تعاریف انجام شده برای مطالعه اختلاف فشار داخل سازه می‌توان بیان کرد که تغییرات مکانی مثبت فشار  $(-\partial p/\partial n > 0)$ ، سبب شکل‌گیری نیروی فشاری به سمت خارج از سازه شده و مانند یک نیروی محرک بر سنگ‌دانه‌های لایه آرمور عمل می‌کند، درحالی‌که تغییرات مکانی منفی فشار  $(\partial p/\partial n < 0)$  با تولید نیروی فشاری به سمت داخل سازه، مانند یک نیروی مقاوم بر سنگ‌دانه‌های لایه آرمور عمل کرده و منجر به تثبیت سنگ‌دانه‌ها در موقعیت اولیه خود روی لایه آرمور می‌شود.

در شکل (۱۰) نمودار تغییرات زمانی فشار برای موقعیت‌های در نظر گرفته شده در مقطع سوم و نمودار تغییرات تراز سطح آب در مقطع شاخص به طور هم‌زمان در طول یک دوره کامل موج ارائه شده است. لازم به ذکر است که به منظور بررسی مناسب‌تر تغییرات فشار در داخل سازه در جهت عمود بر شیب سازه، در طول زمان وقوع جریان بالارونده و پایین‌رونده روی شیب سازه، محدوده‌های مشخص زمانی در طول یک پریود کامل موج تعریف شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، محدوده‌هایی از زمان که در آن تغییرات فشار در نقاط داخل سازه در راستای محور  $n$  مثبت است، تحت عنوان ناحیه (I) در نظر گرفته می‌شود، و محدوده‌هایی از زمان که در آن تغییرات

جریان خروجی از داخل موج‌شکن توده‌سنگی در زمان وقوع بیشینه پایین‌روی موج، در شکل (۱۱) ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، در محل تقریبی بیشینه پایین‌روی موج، برای حرکت جریان از داخل سازه به سمت بیرون سازه و هم‌جهت با نیروی ناشی از تغییرات مکانی فشار مثبت است.

شکل ۱۱. جهت تراوش جریان در زمان تقریبی بیشینه پایین‌روی موج

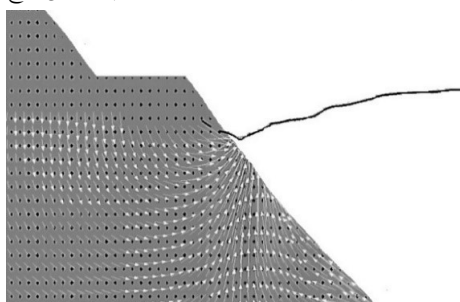


Fig. 11. The outward directed approximately at the same time as maximum run-down level

### ۳-۳- سازوکار جابه‌جایی سنگ‌دانه‌ها در لایه آرمور

با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی حاضر، به نظر می‌رسد که ناحیه بین تراز بالاروی و پایین‌روی موج روی سازه، به دو ناحیه متفاوت قابل تفکیک است. ناحیه بالای قسمت پایین‌روی موج، به عنوان ناحیه ۱ تعریف می‌شود (شکل (۱۲-الف))، و ناحیه پایینی شیب سازه، که در آن جریان پایین‌رونده به داخل پیشانی موج تازه از راه رسیده فرورفته، به عنوان ناحیه ۲ می‌تواند تعریف شود (شکل (۱۲-ب)). با در نظر گرفتن نواحی مذکور، شکل پندارین از نیم‌رخ سطح آب ناشی از موج برخوردی روی شیب موج‌شکن در حین جریان بالارونده و پایین‌رونده، در شکل (۱۲-ج) ترسیم شده است.

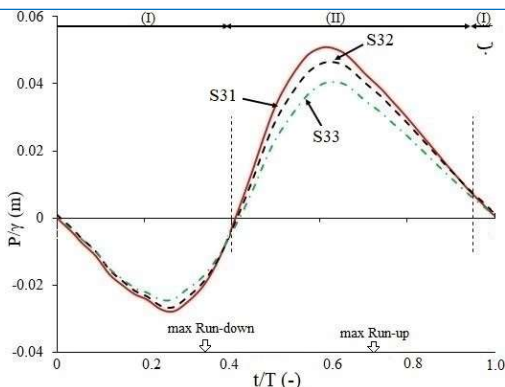
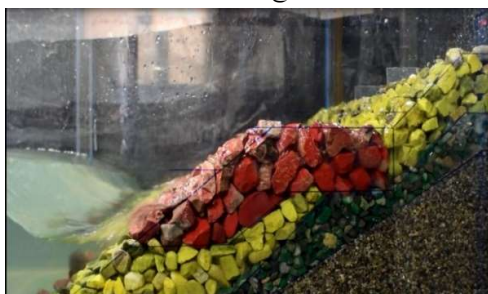


Fig. 10. a) Time series of water surface elevation at the reference section, b) pressure time series at section 3 at different positions

تغییرات فشار اشاره شده در داخل سازه در اثر پر و خالی شدن محیط متخلخل، منجر به ایجاد نیروی فشاری به سمت خارج سازه در طول پایین‌روی جریان روی شیب سازه و نیروی فشاری به سمت داخل سازه در طول بالاروی موج می‌شود. علاوه بر این، در طول بالاروی موج، تراز آب بر روی لایه آرمور (خارج سازه) از تراز آب در محیط متخلخل داخل سازه بالاتر است و تفاوت تراز سطح آب اشاره شده، منجر به نفوذ جریان به داخل سازه در حین جریان بالارونده می‌شود. درحالی که در حین پایین‌روی موج روی شیب سازه، تراز سطح آب در لایه خارجی سازه پایین‌تر از تراز سطح آب داخل سازه قرار گرفته و تراوش جریان از داخل محیط متخلخل به خارج سازه اتفاق می‌افتد.

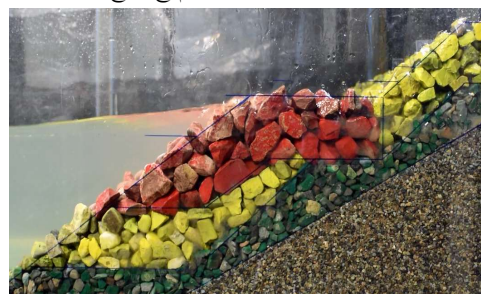
در مجموع با توجه به مطالب اشاره شده می‌توان بیان کرد که در طول وقوع جریان پایین‌رونده موج روی شیب سازه، نیروی ناشی از گرادیان فشار مثبت که به سمت خارج سازه جهت‌دهی شده و همچنین نیروی عمودی ناشی از جریان تراوشی ایجاد شده از داخل به خارج سازه، به صورت هم‌زمان اتفاق افتاده و مانند یک نیروی محرک بر سنگ‌دانه‌ها عمل کرده و می‌تواند سبب ناپایداری و جابه‌جایی سنگ‌دانه‌ها شود. در ادامه، الگوی

شکل ۱۲. نیم‌رخ سطح آب در طول جریان بالارونده و پایین‌رونده تحت اثر موج تابشی



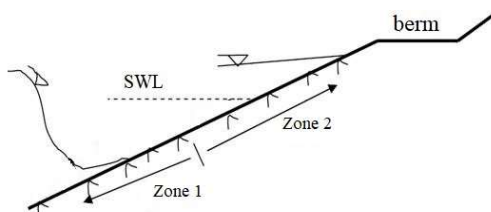
ب- نیم‌رخ سطح آب در پایین‌روی موج

B. The water surface side-view during the wave run-down



الف- نیم‌رخ سطح آب در حین بالاروی موج

a. The water surface side-view during the wave run-up



ج- شکل پندارین نیم‌رخ سطح آب و نواحی ایجاد شده

c. The schematic view of water surface and the created zones

Fig. 12. The water surface side-view during the incident wave run-up and run-down

سازه خارج شود، به دلیل وجود نیروی محرک ناشی از جریان پایین‌رونده به موازات شیب سازه به سمت پایین شیب و تحت اثر نیروی وزن خود سنگ‌ها، سنگ‌دانه‌ها بیشتر با مود غالب غلظتی به سمت پایین شیب سازه می‌غلطند. در صورتی که به دلیل قفل‌شدگی زیاد بین سنگ‌های مجاورهم، تنها سنگ‌دانه در حین بالاروی جریان در جای خود تکان بخورد و از مکان اولیه خود از لایه آرمور خارج نشود، آنگاه لازم است که علاوه بر نیروهای محرک در حین جریان بالارونده، نیروهای محرک وارد بر قطعات سنگی در حین پایین‌روی موج مانند نیروی تراوشی (بیرون‌رونده) از داخل به خارج سازه و نیروی پسای ایجاد شده به موازات شیب سازه نیز بر نیروهای مقاوم غلبه کنند.

با توجه به مطالب بیان شده در مورد دلایل ناپایداری سنگ‌دانه‌ها در موج‌شکن‌های توده‌سنگی و براساس مشاهده‌های آزمایشگاهی حاضر، در شکل (۱۳) مراحل مختلف جابه‌جایی سنگ‌دانه‌ها با استفاده از تصاویر ثبت شده در هنگام انجام آزمایش‌های حاضر، به نمایش درآمده است. به منظور نمایش مناسب‌تر سازوکار جابه‌جایی سنگ‌دانه‌ها در لایه آرمور از سنگ نشانه استفاده می‌شود، که در تصاویر ارائه شده در شکل (۱۳) با نشانگر پیکان مشخص شده است.

مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که با شروع بالاروی جریان روی شیب سازه، سنگ‌دانه‌هایی که در محدوده بین تراز بالاروی و پایین‌روی موج روی سازه شکل (۱۲)، یا به عبارتی ناحیه تر و خشک لایه آرمور جایابی شده‌اند، به حالت غوطه‌ور در خواهند آمد. به دلیل ایجاد نیروی شناوری و در نتیجه کاهش نیروی وزن قطعات سنگی، نیروی اصطکاک و تماسی بین سنگ‌دانه‌ها کمتر می‌شود. پیرو نکته ذکر شده و در اثر نیروی محرک ناشی از جریان بالارونده، سنگ‌دانه‌ها احتمال تکان خوردن در موقعیت اولیه خود را داشته و با جا باز کردن سنگ در میان سنگ‌های مجاور، درهم قفل‌شدگی بین سنگ‌دانه‌ها کاهش می‌یابد. در صورتی که در طول جریان بالارونده روی شیب سازه، نیروی محرک بوجود آمده در اثر بالاروی جریان روی لایه آرمور، بزرگتر از نیروهای مقاوم از قبیل نیروی درهم قفل‌شدگی بین سنگ‌دانه‌ها و نیروی وزن سنگ‌دانه‌ها شود، آنگاه سنگ‌دانه از مکان اولیه خود بیرون آمده و شروع به حرکت به سمت بالای شیب سازه می‌کند. بعد از رسیدن موج به بالاترین تراز بالاروی، بلافاصله پایین‌روی موج روی شیب سازه آغاز می‌شود. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داد که در صورتی که در هنگام بالاروی موج از درهم قفل‌شدگی بین واحدهای سنگی کاسته شود و در این زمان سنگ‌دانه‌ای از موقعیت اولیه خود در لایه آرمور

شکل ۱۳. نمایش سازوکار جابه‌جایی یک واحد سنگ، با کمک تصاویر ثبت شده در هنگام انجام آزمایش‌های حاضر

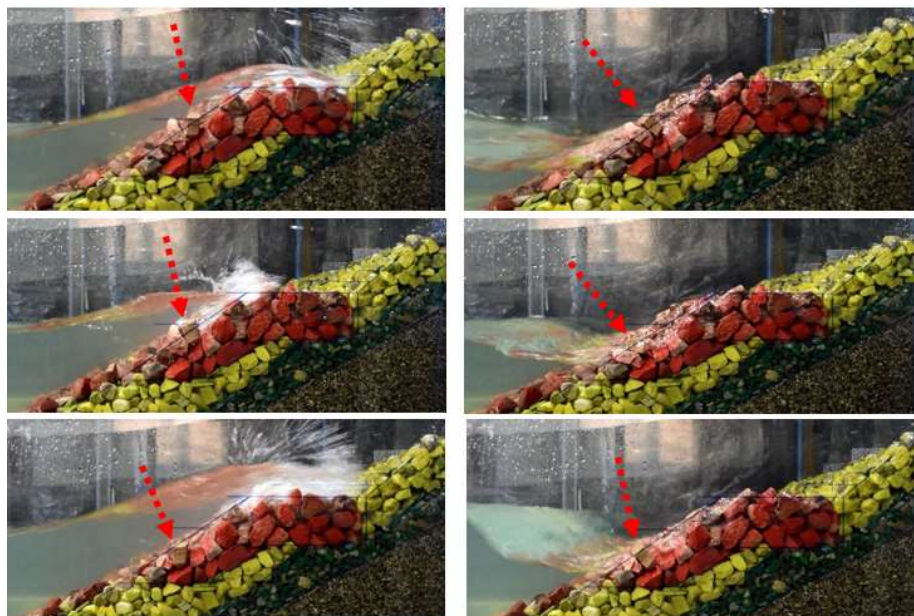


Fig 13. Display of the movement mechanism of an individual stone using the recorded pictures during the present tests

#### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با انجام مدل‌سازی عددی اندرکنش موج با موج‌شکن سکویی چندلایه و در نظر گرفتن مشاهده‌های آزمایشگاهی و استفاده از تصاویر ثبت شده در هنگام انجام آزمایش‌ها، تأثیر جریان‌های بوجود آمده در داخل محیط متخلخل سازه و خارج آن در طول وقوع بالاروی و پایین‌روی موج روی شیب سازه، روی سازوکار ناپایداری سنگ‌دانه‌های لایه آرمور مطالعه شده است. در ادامه به برخی از نتایج این پژوهش اشاره می‌شود.

- با استفاده از نتایج مدل عددی، سری زمانی تغییرات فشار جریان در داخل محیط متخلخل نشان می‌دهد که با حرکت به داخل سازه، به دلیل استهلاک انرژی موج در اثر نفوذ موج به داخل محیط متخلخل، میرایی فشار بوجود آمده و دامنه تغییرات فشار بدست آمده برای نقاط در یک تراز ثابت، به صورت چشمگیری کاهش یافته است. علاوه بر این، با حرکت به داخل سازه، مقدار میانگین فشار بدست آمده در نقاط ثبت فشار مربوط به یک تراز مشخص، افزایش یافته است.

- با استفاده از نتایج مدل عددی، الگوی جریان خروجی از داخل موج‌شکن توده‌سنگی در زمان وقوع بیشینه پایین‌روی موج نشان می‌دهد که در محل تقریبی بیشینه پایین‌روی موج، جهت حرکت جریان به سمت بیرون بوده و هم‌جهت با نیروی ناشی از تغییرات مکانی فشار مثبت است.

- تغییرات فشار ایجاد شده در داخل سازه در اثر پر و خالی شدن محیط متخلخل، منجر به ایجاد نیروی فشاری به سمت خارج سازه در طول پایین‌روی جریان روی شیب سازه و همچنین ایجاد نیروی فشاری به سمت داخل سازه در طول بالاروی موج می‌شود.

- نتایج نشان می‌دهد که در طول جریان پایین‌رونده موج روی سازه، نیروی ناشی از گرادبان فشار مثبت که به سمت خارج سازه جهت‌دهی شده و همچنین نیروی عمودی ناشی از جریان تراوشی ایجاد شده از داخل به خارج سازه، به صورت هم‌زمان اتفاق افتاده و مانند یک نیروی محرک بر سنگ‌دانه‌ها عمل می‌کند.

## ۵- مراجع

- of Icelandic-type berm breakwaters. *Coastal Engineering*, 156, 103599.
- [8] Mansard E.P. & Funke E.R. 1980 The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. In *Coastal Engineering*, 154-172.
- [9] Hirt C.W. 2011 Flow-3D user manual version 10. Flow Science.
- [10] Liang B., Ma S., Pan X. & Lee D.Y. 2017 Numerical Modelling of Wave Run-up with Interaction Between Wave and Dolosse Breakwater. *Journal of Coastal Research*, 79(1), 294-298.
- [11] Maliki A.Y., Musa M.A., Ahmad M.F., Zamri I. & Omar Y. 2017 Comparison of numerical and experimental results for overtopping discharge of the OBREC wave energy converter. *Journal of Engineering Science and Technology*. 12(5), 1337-1353.
- [12] Dentale F., Reale F., Di Leo A. & Carratelli E.P. 2018 A CFD approach to rubble mound breakwater design. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 10(5), 644-650.
- [13] Forchheimer P. 1901 Wasserbewegung durch boden. *Z. Ver. Deutsch, Ing.* 45, 1782-1788.
- [14] Vanneste D. & Troch P. 2015 2D numerical simulation of large-scale physical model tests of wave interaction with a rubble-mound breakwater. *Coastal Engineering*, 103, 22-41.
- [1] Oumeraci H. & Partenscky H.W. 1990 Wave-induced pore pressure in rubble mound breakwaters. 22nd Int. Conference on Coastal Engineering, 1334-1347.
- [2] De Groot M.B., Yamazaki H., Van Gent M.R. & Kheyruri Z. 1994 Pore pressures in rubble mound breakwaters. 24th Int. Conference on Coastal Engineering, 1727-1738.
- [3] Moghim M.N. & Tørum A. 2012 Wave induced loading of the reshaping rubble mound breakwaters. *Applied Ocean Research*, 37, 90-97.
- [4] Vanneste D. 2012 Experimental and numerical study of wave-induced porous flow in rubble-mound breakwaters. PhD. Thesis. Ghent University, Belgium.
- [5] Jensen B., Christensen E.D. & Sumer B.M. 2014 Pressure-induced forces and shear stresses on rubble mound breakwater armour layers in regular waves. *Coastal Engineering*, 91, 60-75.
- [6] Jensen B., Christensen E.D., Mutlu Sumer B.M. & Vistisen M. 2015 Flow and turbulence at rubble-mound breakwater armor layers under solitary wave. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 141(6), 04015006.
- [7] Ehsani M., Moghim M.N. & Shafieefar M. 2020 An experimental study on the hydraulic stability

۲۲۴

# Numerical and experimental study on wave interaction with a porous media of multi-layer berm breakwater

M. Ehsani<sup>1</sup>, M.N. Moghim<sup>2\*</sup>, M. Safieefar<sup>3</sup>

1- Ph.D., Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

3- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

\*moghim@iut.ac.ir

## Abstract

Porous breakwater structures are widely used as protection against waves for ports and harbors as well as for general coastal protection. Often the breakwater structure is designed as a porous structure that allows water to flow through the structure while the wave energy is removed. These structures prevent coastal erosion and ensure safe and functioning harbors. As such, it is of high importance that these structures remain stable under extreme wave action. On the other hand, regarding the high complexity of wave interaction with porous structures, it is required to provide a rich understanding and conduct fundamental studies on the mechanism of rubble mound breakwaters subjected to incident waves. The existing literature review on wave interaction with rubble mound breakwaters reveals two mechanisms inside the porous media of such structures and outside the structure on the armor layer. Both could make destructive forces affecting the structure's stability. In the present study, the stability of the multi-layer berm breakwater has been studied by considering the effect of run-up/run-down flow on the armor layer of a breakwater and, consequently, the flow inside the porous media as it gets filled and empty during wave run-up and run-down. Both numerical and experimental methods are used to investigate the flow inside and outside the multi-layer berm breakwater. Validation of numerical results is conducted through the use of experimental results, including the water level fluctuation outside the structure and also the water pressure variations inside the porous media of the multi-layer berm breakwater. The Flow-3D software has been used to simulate and solve the governing equations on the flow. FLOW-3D numerically integrates RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) equations using the Volume of Fluid (VOF) method to track the free surface. It has been thoroughly tested for coastal hydrodynamics problems. Various turbulence models are available, and the results presented here are based on the RNG turbulence model. The time series of pressure variation in the porous media indicates that as the flow infiltrates, the created pressure damping and also its variation at a constant elevation have been significantly decreased due to energy dissipation during the infiltration. Moreover, at the maximum run-down wave and exfiltration process, the created flow from inside to outside would be approximately perpendicular to the structure's slope at about the maximum run-down elevation. Results reveal that the pressure gradient due to changes in the flow field of porous media would lead to a pressure force toward the outside during the run-down process and a pressure force toward the inside during the run-up process. It has been found that the positive pressure gradient force toward outside during the run-down and also the perpendicular force of flow during the exfiltration occurred simultaneously and acted as an active force to destabilize the stones. More to the destabilizing mechanism of stones, the effect of flows occurred during the run-up, and run-down on the armor layer have been investigated using the recorded images during the experimental tests on multi-layer berm breakwater.

**Keywords:** Multi-layer berm breakwater, Numerical simulation, Experimental modeling, Run-down, Porous media.