مدلسازی عددی نوسانات سطح آب و تغییرات فشار منفذی در بدنه موج‌شکن‌های توده سنگی سنتی

محمد نوید مقیم

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، moghim@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۰۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۱۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۳۱

کلمات کلیدی:
موج‌شکن توده سنگی
مدل عددی
نوسانات سطح آب
تغییرات فشار

چکیده

زمانی که پاسخ سازه توده‌سنگی در برابر برخورد موج مورد مطالعه قرار می‌گیرد، دارا بودن اطلاعات در زمینه نوسانات سطح آب جلوی سازه، تغییرات فشار منفذی داخل سازه متخلخل و درنتیجه چگونگی میرا شدن موج داخل سازه مهم خواهند بود. فشار آب منفذی بعنوان یک پارامتر مفید بر روی بسیاری از پارامترهای پاسخی سازه متخلخل از جمله بالاروی موج، سرریزی موج، انعکاس موج، انتقال موج از درون سازه و همچنین پایداری هیدرولیکی و ژئوتکنیکی سازه اثر می‌گذارد. بدین منظور در تحقیق حاضر یک مدل عددی جهت بررسی نوسانات سطح آب جلوی سازه و تغییرات فشار در داخل موج‌شکن‌های توده-سنگی سنتی توسط نرم افزار FLOW-3D توسعه داده شد. به منظور مدلسازی آشفتگی، مدل دو معادله-ای $k-\varepsilon$ و جهت شبیه‌سازی سطح آزاد روش VOF به کار گرفته شدند. مقایسه نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی حاکی از عملکرد مناسب مدل عددی توسعه داده شده هم برای نوسانات سطح آب جلوی سازه و هم برای تغییرات فشار در موج‌شکن‌های توده سنگی سنتی است.

Numerical Modeling of Water Surface and Pore Pressure Fluctuations in Conventional Rubble Mound Breakwater

Mohammad Navid Moghim

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology; moghim@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 25 Nov. 2013
Accepted: 4 Aug. 2014
Available online: 22 Sep. 2014

Keywords:
Rubble mound breakwater
Numerical modeling
Water surface
Pore Pressure

ABSTRACT

When studying the structural response of rubble mound breakwaters to wave loading, the knowledge of water surface fluctuations, pore pressure variations and related wave attenuation inside the porous structure is important since the pore pressures affect most responses, such as wave run-up, wave overtopping, reflections, transmission and the hydraulic and geotechnical stability of the breakwater. For this purpose a numerical model was developed to investigate the water surface and pressure fluctuations outside and inside the statically conventional rubble mound breakwater by using FLOW-3D software. The water - structure interaction is obtained by $k-\varepsilon$ model to simulate the corresponding turbulence field and volume of fluid (VOF) theory to simulate the free surface. The comparison between numerical and experimental results shows a good agreement in terms of both water surface and pore pressure Fluctuations in conventional rubble mound breakwaters.

۱. مقدمه

موج‌شکن‌های توده‌سنگی از جمله سازه‌های نفوذپذیر ساحلی بوده که بدلیل حفاظت سواحل و ایجاد منطقه امن در پشت این سازه در برابر حمله موج برخوردی، از اهمیت ویژه‌ای در مهندسی سواحل و بنادر برخوردار هستند.

از آنجاییکه بارهای وارد بر سازه یا اجزای سازه‌ای به پارامترهای محیطی، هیدرولیکی، ژئوتکنیکی و سازه‌ای بستگی دارند، این بارها را می‌توان به بارهای مربوط به حرکت خارجی آب بر روی شیب، بارهای تولید شده در اثر حرکت داخلی آب درون سازه و زلزله تقسیم کرد. یکی از مهمترین انواع بارهای ایجاد شده بارهای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.2.5]

ایجادی در اثر حرکت داخلی آب درون سازه بوده که شامل استهلاک یا نفوذ آب به درون سازه، تغییرات فشار و سطح ایستابی داخل سازه می‌باشد. در واقع زمانی که پاسخ سازه توده‌سنگی در برابر برخورد موج مورد مطالعه قرار می‌گیرد، دارا بودن اطلاعات در زمینه نوسانات سطح آب جلوی سازه، تغییرات فشار منفذی داخل سازه متخلخل و درنتیجه چگونگی میرا شدن موج داخل سازه مهم خواهند بود. فشار آب منفذی بعنوان یک پارامتر مفید بر روی بسیاری از پارامترهای پاسخی سازه متخلخل از جمله بالاروی موج، سرریزی موج، انعکاس موج، انتقال موج از درون سازه و همچنین پایداری هیدرولیکی و ژئوتکنیکی سازه اثر می‌گذارند. از طرف دیگر ایجاد تغییرات فشار آب منفذی در داخل سازه در اثر برخورد موج به سازه منجر به تغییر فشار مؤثر گردیده بطوریکه اگر در اثر این تغییرات فشار مؤثر به حدی کاهش یابد که گسیختگی ژئوتکنیکی بوجود آید پایداری سازه موج‌شکن به خطر خواهد افتاد.

خرابی اخیر تعدادی از موج‌شکن‌ها در طول طوفان مانند موج‌شکن - Sines در کشور پرتغال، موج‌شکن Bilbao در کشور اسپانیا، موج-شکن Tripoli در کشور لیبی، موج‌شکن Diablo Canyon در کشور امریکا و غیره نشان می‌دهند که روابط موجود برای طراحی سازه موج‌شکن کفایت نکرده و نیاز به مطالعه بیشتری دارند [۱].

Harlow با بررسی علل خرابی تعدادی از موج‌شکن‌های تخریب شده، یکی از دلایل اصلی خرابیهای بوجود آمده را فشار منفذی بالای بوجود آمده در لایه هسته موج‌شکن گزارش نمود [۲]. De Groot و همکاران اهمیت بررسی فشار منفذی داخل سازه را در طراحی موج‌شکن بویژه در تحلیل پایداری شیب سازه در قسمت پایینی (نزدیک کف) لایه فیلتر و همچنین اثر فشار منفذی بر پایداری هیدرولیکی لایه آرمور، بالاروی موج، سرریزی موج، عبور موج و بالا آمدن تراز سطح آب داخل سازه را مورد بررسی قرار داد [۳].

Biesel رابطه زیر را برای محاسبه دامنه نوسانات فشار داخل سازه نفوذپذیر تحت اثر موج ارایه داد [۴]:

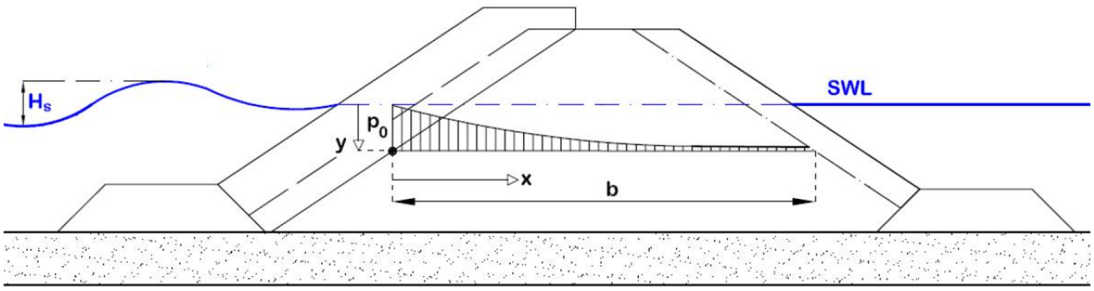
$$P(x) = P_o e^{-\delta \frac{2\pi}{L'} x} \qquad (۱)$$

در این رابطه x فاصله افقی نسبت به مبدا در محل مرز بین لایه فیلتر و هسته در هر تراز، P_o مقدار فشار مرجع در موقعیت $x = 0$، P(x) ارتفاع فشار منفذی (دو برابر دامنه نوسان فشار) در محل x، δ ضریب استهلاک، L' طول موج داخل هسته سازه برابر $L' = L/\sqrt{D}$، L طول موج برخوردی و D ضریبی است برای بحساب آوردن طول نشت آب در اثر انحراف مسیر جریان توسط دانه‌های سنگی هستند. Mehaute مقدار ضریب D را برای مصالح دانه سنگی بصورت تجربی برابر ۱/۴ بدست آورد. Miche مقدار این ضریب را بصورت تئوری برابر ۱/۵ محاسبه نمود. این رابطه نشان می‌دهد که مقدار دامنه نوسانات فشار داخل سازه نفوذپذیر با افزایش فاصله از محل اندازه‌گیری فشار مرجع در جهت انتشار موج، بصورت نمایی کاهش می‌یابد (شکل ۱) [۱].

Burcharth و همکاران [۵] و Troch و همکاران [۶] رابطه تجربی برای محاسبه مقدار ضریب استهلاک (δ) که بیانگر میزان استهلاک انرژی در راستای انتشار موج بصورت زیر ارایه نمودند:

$$\delta = a_\delta \frac{\sqrt{n} L_p^{\ 2}}{H_s b} \qquad (۲)$$

که در آن n تخلخل لایه مغزه، b عرض لایه مغزه در عمق مشخص، H_s و T_p ارتفاع و پرید موج و L_p طول موج محاسبه شده بر اساس ماکزیمم پرید موج هستند. Troch و همکاران مقدار ضریب a_δ را با توجه به مقادیر فشار اندازه‌گیری در طبیعت برای موج‌شکن Zeebrugge برابر $a_\delta = 0.014$ پیشنهاد نمودند.



شکل ۱- شکل شماتیک از چگونگی توزیع فشار منفذی داخل لایه هسته موج‌شکن توده سنگی [۶]

Vanneste و Troch مدل آزمایشگاهی برای بدست آوردن چگونگی توزیع فشار منفذی داخل سازه برپا نمود. آنها بیان نمودند که شکل یا نوع مصالح لایه آرمور تأثیری در مقدار فشار مرجع ندارد و مقدار فشار مرجع در مرز لایه فیلتر و هسته (P_o) به تیزی موج برخوردی و بخصوص به پرید موج وابسته است. بر همین اساس اثر ارتفاع موج را از رابطه (۲) حذف نمودند و رابطه زیر را برای محاسبه ضریب استهلاک ارایه کردند [۷]:

$$\delta = a_\delta \frac{\sqrt{n} L_p}{b} \qquad (۳)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.2.5]

که در این رابطه بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مقادیر اندازه‌گیری شده در طبیعت (موج‌شکن Zeebrugge) مقدار $a_\delta = 0.5$ بدست آمد.

ساخت مدل فیزیکی قسمتی از طراحی هر موج‌شکن قبل از اجرای آن است. در بعضی از مدلهای ایجاد شده گاهاً مشاهده شده که گسیختگی ژئوتکنیکی در داخل لایه مغزه موج‌شکن ایجاد شده است. در واقع این گسیختگی در اثر وجود مقدار گرادیان منفذی جانبی-قائم بالا ایجاد می‌شود. از آنجاییکه در مدل فیزیکی اندازه-گیری فشار منفذی در نزدیکی مرحله گسیختگی مشکل بوده و همچنین ساخت مدل فیزیکی مستلزم صرف هزینه بالایی است و با توجه به اینکه داشتن دانش کافی در مورد جریان بیرون و داخل سازه برای ارزیابی عملکرد سازه موج‌شکن توده‌سنگی مورد نیاز هستند، بنابراین توسعه یک مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D در این راستا بسیار مفید خواهد بود. مدل دو معادله-ای $k-\varepsilon$ جهت مدلسازی آشفتگی و برای شبیه‌سازی سطح آزاد، روش VOF به کار گرفته می‌شوند و سپس به‌منظور بررسی عملکرد مدل عددی توسعه داده شده نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی هم برای نوسانات سطح آب جلوی سازه و هم برای تغییرات فشار در موج‌شکن‌های توده سنگی سنتی مقایسه می-شوند.

۲. مدلسازی عددی

۲. ۱. معادلات حاکم

قوانین حاکم بر جریان در محیط جلوی سازه (غیر متخلخل) عبارتند از قانون بقای جرم و اندازه حرکت که در حالت جریان آشفته و به صورت متوسط‌گیری شده در زمان، معادله پیوستگی (رابطه ۴) و معادله رینولدز (رابطه ۵) از آنها استخراج می‌شود [۸].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \overline{\rho u_i' u_j'}\right] \qquad (۵)$$

در معادلات فوق u_i (i=1,2) به عنوان مؤلفه‌های متوسط سرعت در دو جهت متناظر، p فشار، ρ چگالی، μ لزجت دینامیکی سیال و جمله $\overline{\rho u_i' u_j'}$ به عنوان تنشهای رینولدز شناخته می‌شوند. این معادلات دارای سه مجهول شامل مؤلفه‌های سرعت در دو جهت (u, w) و فشار هستند. از طرفی معادله اندازه حرکت حاوی سه مؤلفه مجهول تنش رینولدز است، لذا سیستم معادلات فوق کامل نبوده و بایستی با استفاده از مدل آشفتگی مناسب تنشهای رینولدز محاسبه شوند. در این تحقیق از یکی از معروفترین مدلهای آشفتگی دو معادله‌ای به نام $k-\varepsilon$ که k انرژی جنبشی آشفتگی ($k = \frac{1}{2}\overline{u_i' u_i'}$) و ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی ($\varepsilon = \upsilon \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}}$) هستند، استفاده شده است.

نیروهای اصطکاکی ایجاد شده در اثر عبور جریان غیر دائم در یک محیط متخلخل توسط معادله فورشهایمر[۱] به صورت زیر توصیف می‌شوند:

$$I = a.u + b.|u|.u + c.\frac{\partial u}{\partial t} \qquad (۶)$$

که در آن I گرادیان فشار، a، b و c ضرایب بابعد و u سرعت جریان هستند. در سمت راست این معادله اولین ترم مربوط به جریان لایه‌ای، دومین ترم مربوط به سهم جریان آشفته و آخرین ترم مربوط به سهم اینرسی ناشی از شتاب هستند. ضرایب اصطکاک با بعد a (s/m)، b (s^2/m^2) و c (s^2/m) به مشخصاتی از محیط متخلخل نظیر تخلخل، دانه‌بندی و چگونگی قرارگیری ذرات بستگی دارند. فرمولهای تجربی و نیمه تجربی زیادی برای بدست آوردن این ضرایب ارایه شده‌اند که بدین منظور می‌توان به نتایج کار آزمایشگاهی Van Gent اشاره نمود [۹].

معادله حرکت برای جریان داخل سازه متخلخل با استفاده از نتایج کار Van Gent به صورت زیر در نظر گرفته شد [۱۰]:

$$c\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{n^2 g}\frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho g}\frac{\partial p}{\partial x_i} - a u_i - b u_i \sqrt{u_j u_j} - g_i \qquad (۷)$$

در این رابطه g_i شتاب ناشی از گرانش بوده و ضرایب a، b و c نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$a = \alpha \frac{\upsilon (1-n)^2}{n^3 g D} \qquad (۸)$$

$$b = \beta \frac{(1-n)}{n^3 g D} \qquad (۹)$$

$$c = \frac{1 + c_A}{ng} \qquad (۱۰)$$

در این روابط υ لزجت سینماتیکی سیال، n ضریب تخلخل محیط متخلخل، D قطر میانگین معادل ذرات محیط متخلخل، c_A ضریب جرم افزوده ($c_A = 0.34\left(\frac{1-n}{n}\right)$) و α و β دو ضریب هستند. Lin و همکاران مقادیر مربوط به ضرایب را به صورت $\alpha = 200$ و $\beta = 1.1$ پیشنهاد نمودند.

۲. ۲. حل عددی

معادلات حاکم بر این مدل با استفاده از روش حجم محدود و در مختصات کارتزین گسسته سازی شده و به کمک روش پروجکشن[۲] در دو مرحله حل شده‌اند. در این روش حل معادلات در دو گام اصلی انجام می‌شود. در گام اول با نادیده گرفتن جمله فشار از طریق معادله‌های اندازه حرکت یک میدان سرعت میانی محاسبه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.2.5]

شده و در گام دوم به کمک سرعتهای میانی و این بار از طریق معادله پیوستگی، مقادیر فشار محاسبه می‌شوند. به منظور مدلسازی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ به کار گرفته شده است. جهت شبیه‌سازی سطح آزاد از روش VOF که توسط Hirt و Nichols معرفی شد استفاده می‌شود. در روش VOF از یک تابع متغیر به نام α استفاده می‌شود که جزء حجم آب در سلول محاسباتی است. با حل معادله پیوستگی زیر برای جزء حجمی آب α، جزء حجمی در کل میدان حل تعیین می‌گردد [۱۱]:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t}+u\frac{\partial \alpha}{\partial x}+v\frac{\partial \alpha}{\partial y}+w\frac{\partial \alpha}{\partial z}=0 \qquad (۱۱)$$

اگر α برابر یک باشد نشان دهنده پر بودن سلول از آب می‌باشد و اگر α برابر صفر باشد یعنی سلول پر از هوا است. برای $0<\alpha<1$ درصدی از سلول آب و درصدی از آن هوا است. بنابراین با در نظر گرفتن سطح آزاد در یک جزء حجمی معین می‌توان سطح آزاد جریان را مشخص کرد.

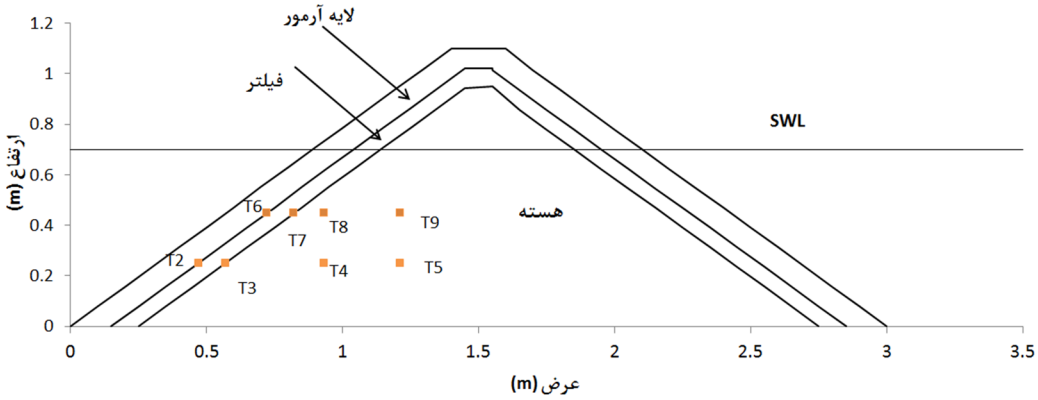
به منظور مدلسازی نیاز به تعریف شرایط مرزی مناسب است. اگر چه در حقیقت جریان میانگین خارج سازه معادل با جریان متوسط (متوسط زمانی) در محیط متخلخل نیست، ولی Liu و همکاران در سال ۱۹۹۹ توجیه نمودند که این دو توصیف نشان دهنده یک جریان هستند. بنابراین می‌توان پیوستگی سرعتهای میانگین و متوسط‌گیری شده و همچنین فشار را در سطح مرزی بین محیط متخلخل و جریان خارجی فرض نمود [۱۲].

در سطح آزاد میانگین شرط صفر بودن تنش برشی اعمال شده و در محل مرز جامد جریان خارجی شرط عدم-لغزش بکار گرفته می‌شود. در تعریف شرایط مرزی در جریان آشفته برای نقاط نزدیک دیواره قانون لگاریتمی برای سرعت مماسی و در سطح آب شرط مرزی گرادیان صفر برای تمامی متغیرهای k و ε بکار گرفته می‌شود.

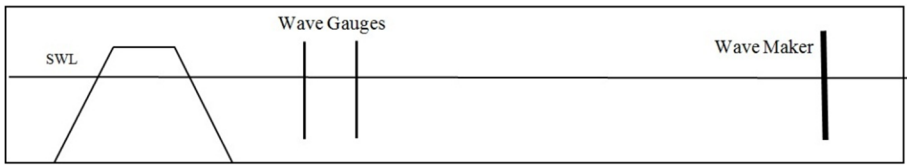
۲ . ۳ . مشخصات میدان حل

در این تحقیق به منظور صحت سنجی مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط Malmedal بهره گرفته شده است. مدل آزمایشگاهی Malmedal در یک فلوم موج برای یک موج-شکن با مشخصات مطابق شکل ۲ انجام گرفته است [۱۳]. شکل شماتیکی از فلوم موج، سازه مورد نظر و همچنین آرایش گیجهای اندازه گیری نوسانات سطح آب در شکل ۳ مشاهده می‌شود. مشخصات هیدرولیکی موج برخوردی به سازه برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج مطابق جدول شماره ۱ انجام گرفت. در این جدول T پرید موج برخوردی و H_{in} ارتفاع موج برخوردی هستند. در کلیه آزمایشها، عمق آب جلوی سازه مقداری ثابت برابر ۷۰ سانتیمتر داشت.

ابعاد دامنه محاسباتی به صورت ۲۰ متر در جهت افقی و ۱/۴ متر از جهت قائم در نظر گرفته شدند (شکل ۴). این دامنه محاسباتی به ۵۰۰ سلول در جهت افقی (x) از ۰ تا ۱۷ متر یعنی موقعیتی که موج‌شکن در آن قرار گرفته (x=0 در شکل ۲) با کاهش تدریجی طول سلول و پس از آن ۱۵۰ سلول محاسباتی به صورت یکنواخت ($\Delta x=0.02m$) از x مساوی ۱۷ متر تا ۲۰ متر بطوریکه کل مقطع موج‌شکن را پوشش دهد، تقسیم شده است. در جهت قائم، دامنه محاسباتی به ۶۰ سلول محاسباتی به صورت یکنواخت ($\Delta z=0.016m$) از z مساوی ۰ متر تا ۰/۹۶ متر و ۱۲ سلول محاسباتی از z مساوی ۰/۹۶ تا ۱/۴ متر با افزایش تدریجی ارتفاع سلولها تقسیم شده است.



شکل۲- مشخصات مدل موج شکن مورد آزمایش و موقعیت فشار سنجهای نصب شده در سازه [۱۳]



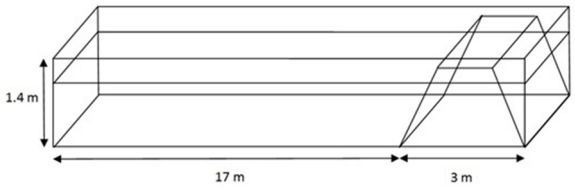
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.2.5]

شکل۳- شکل شماتیک فلوم موج و مشخصات آزمایشگاهی Malmedal [۱۳]

جدول ۱- شکل مشخصات هیدرولیکی موج برخوردی به سازه [۱۳]

شماره نمونه	d (m)	T (s)	H_{in} (m)
۱	۰/۷	۱/۵	۰/۲۱۳
۲	۰/۷	۲/۰	۰/۲۱۰
۳	۰/۷	۲/۵	۰/۱۹۹



شکل ۴- ابعاد دامنه محاسباتی

برای تولید موج در ابتدای کانال از تابع ریاضی مولد موج که توسط Lin و Liu پیشنهاد گردید استفاده شد [۱۴]. تابع مورد نظر توسط انتگرال‌گیری از نوسانات زمانی سطح آب در یک پرید موج بدست می‌آید و قادر به تولید امواج مختلف در ناحیه محاسباتی می‌باشد. امواج تولید شده در این مقاله با همان ارتفاع و پرید موج تولیدی در آزمایشگاه توسط تئوری موج استوکس مرتبه پنجم در نظر گرفته شدند. قابل توجه اینکه امواج بازتاب یافته از موج‌شکن پس از رسیدن به مولد موج، اجازه خروج از محدوده محاسباتی خواهند داشت تا با امواج تولیدی تداخل نداشته باشند.

۲ . ۴. مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

بمنظور صحت سنجی مدل عددی بکار گرفته شده در این تحقیق از نتایج مدل آزمایشگاهی Malmedal استفاده شده است. هندسه مدل موج‌شکن آزمایش شده در تحقیقات آنها مطابق شکل ۲ است. امواج تابیده به سازه موج‌شکن از نوع امواج منظم هستند. مدل انتخابی شامل یک لایه داخلی هسته از مصالح جنس ماسه با قطر اسمی در محدوده ۱/۴ میلیمتر تا ۲/۸ میلیمتر است. هسته موج-شکن از نوع یک لایه نفوذپذیر بوده که میزان تخلخل آن ۰/۴۱۴ بدست آمده است. بعد از لایه هسته لایه فیلتر به ضخامت ۱۰ سانتیمتر از جنس مصالح شنی با قطر متوسط ۰/۰۲ متر و مقدار تخلخل مصالح برابر ۰/۳۳ درنظر گرفته شد. در نهایت از لایه بیرونی آرمور متشکل از دانه‌های سنگی با قطر اسمی ۰/۰۷۱ متر و وزن ۱ کیلوگرم ($W_{50} = 1kg, D_{n50} = 0.071m$) استفاده گردید که تخلخل این مصالح برابر با ۰/۳ گزارش شده است [۱۳].

خارج از سازه و در جلوی آن دو گیج اندازه‌گیری نوسانات سطح آب و ارتفاع موج برخوردی به سازه نصب گردیده بودند. داخل سازه موج‌شکن تعداد ۸ فشار سنج برای اندازه‌گیری تغییرات فشار در داخل محیط متخلخل در نظر گرفته شدند (شکل ۲). گیجهای اندازه‌گیری سطح آب در نقاط گره و شکم ایجاد شده در اثر انعکاس موج جلوی سازه و بر روی پوش تشکیل شده در نظر گرفته شدند. محل تشکیل نقاط گره و شکم مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده-اند. در این جدول فاصله افقی هر کدام از گیجها تا محل برخورد تراز سطح ایستابی و شیب جلویی سازه موج‌شکن و همچنین فاصله افقی دو گیج از همدیگر ($|x_{WG1} - x_{WG2}|$) نشان داده شده‌اند. فشار سنجها مطابق شکل ۲ در لایه فیلتر و هسته قرار گرفتند. فشار سنجهای T_2 و T_6 در مرز بین دو لایه آرمور و فیلتر ، فشار سنجهای T_3 و T_7 در مرز بین دو لایه فیلتر و هسته و فشار سنجهای T_4، T_5، T_8 و T_9 داخل لایه هسته قرار گرفتند. موقعیت مختصاتی مرکز سلول مربوط به فشار سنج نیز در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

زمانی که سطح آب آرام است فشار سنجهای نصب شده در داخل سازه فشار هیدرواستاتیکی را نشان می‌دهند. در این حالت فشار سنجهای T_2، T_3، T_4 و T_5 مقدار ۴۵۰۰ پاسکال و فشار سنجهای T_6 تا T_9 فشار ۲۵۰۰ پاسکال را نشان داده‌اند.[۱۳].

جدول ۲- فاصله افقی گیجهای اندازه‌گیری نوسانات سطح آب تا محل برخورد تراز سطح ایستابی و شیب جلویی سازه موج‌شکن و همچنین فاصله افقی دو گیج از همدیگر [۱۳]

شماره نمونه	T (s)	WG1	WG2	$\|x_{WG1} - x_{WG2}\|$
۱	۱/۵	۲/۳۸ m (گره)	۳/۴۵ m (شکم)	۱/۰۷ m
۲	۲/۰	۳/۴۲ m (گره)	۲/۲۱ m (شکم)	۱/۲۱ m
۳	۲/۵	۲/۹۷ m (شکم)	۴/۳۸ m (گره)	۱/۴۱ m

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.2.5]

جدول ۳- موقعیت مختصاتی مرکز سلول مربوط به فشار سنج [۱۳]

شماره سلول	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
مختصات قائم	۰/۲۵۰	۰/۲۵۰	۰/۲۵۰	۰/۲۵۰	۰/۴۵۰	۰/۴۵۰	۰/۴۵۰	۰/۴۵۰
مختصات افقی	۰/۴۵۰	۰/۵۲۵	۰/۹۰۰	۱/۲۰۰	۰/۷۰۰	۰/۷۸۰	۰/۹۰۰	۱/۲۰۰

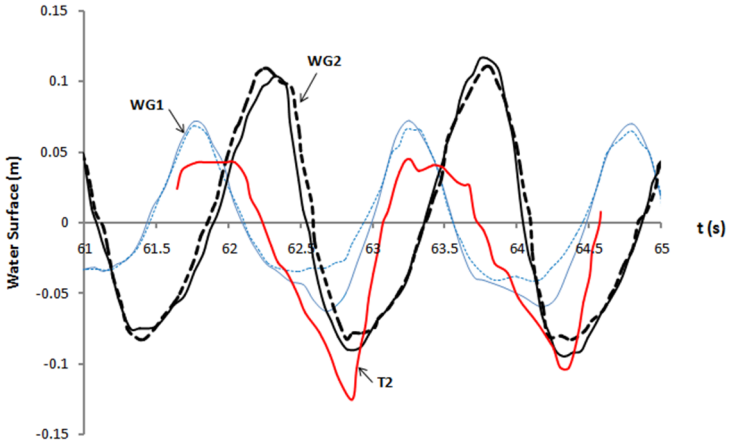
۳. نتایج و بحث

در این بخش به‌منظور تحلیل نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی توسعه یافته، به بررسی و مقایسه تغییرات سطح آب و فشار آب در مدل آزمایشگاهی و عددی پرداخته می‌شود. مقایسه انجام شده برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج موجود انجام خواهد گرفت. برای استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در این مقایسه، یک نقطه از تاریخچه زمانی بصورت تصادفی بعنوان نقطه شروع در یک محدوده زمان ثبت شده در آزمایشگاه انتخاب می‌شود. برای انجام مقایسه با نتایج مدل عددی، تاریخچه زمانی بدست آمده از مدل عددی برای فشار سنج T_2 در طول زمان را آنقدر جابجا نموده تا بیشترین انطباق را با نتایج مدل آزمایشگاهی مربوط به این فشار سنج نشان دهد. این تطبیق زمان بعنوان معیار اصلی تطبیق زمان برای سایر فشارسنجهای موجود استفاده می‌شود، بنابراین اطلاعات مربوط به فاز نسبی بین رکوردهای انجام شده در هر حالت ترکیب موج با روش فوق حفظ خواهد شد.

۳. ۱. تغییرات سطح آب

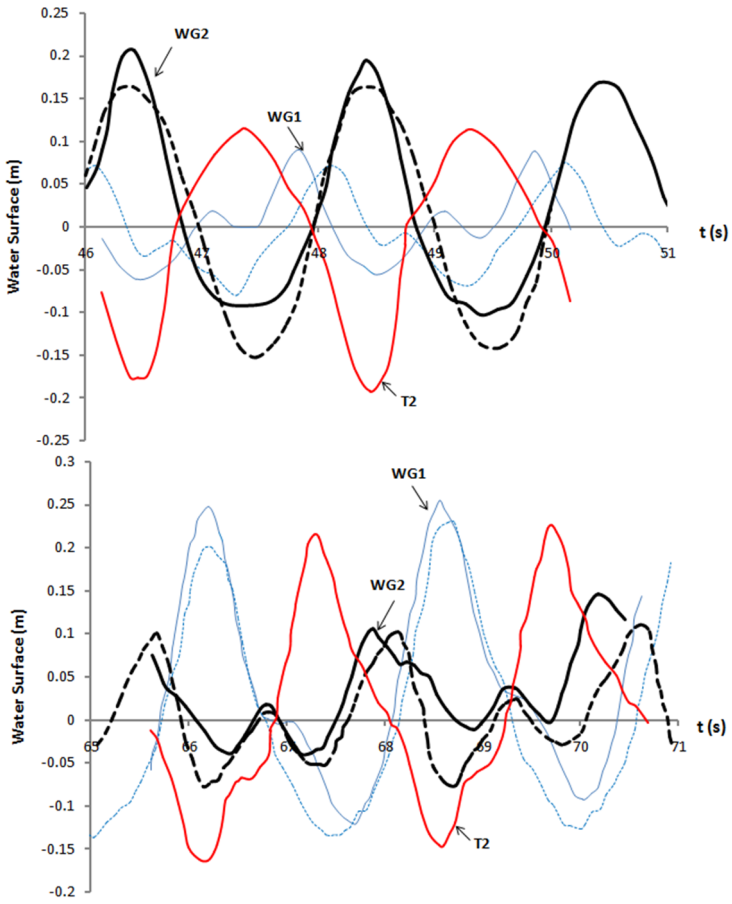
شکل ۵ سری زمانی تغییرات سطح آب جلوی سازه بدست آمده توسط دو گیج اندازه‌گیری نوسانات سطح آب، برای داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و نتایج مدل عددی را نشان می‌دهد. در این شکل سری زمانی نوسانات سطح آب بدست آمده توسط مدل عددی در محل نصب فشار سنج T_2 نیز نمایش داده شده است. قابل توجه اینکه در آزمایشگاه نوسانات سطح آب در محل نصب فشار سنج T_2 اندازه‌گیری نشده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که نحوه تغییرات نمودار سری زمانی سطح آب در محل دو گیج و همچنین محدوده تغییرات آنها توسط مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی تطابق مناسبی دارند. جدول ۴ مقایسه‌ای از تغییرات سطح آب بدست آمده توسط مدل عددی (n) و مدل آزمایشگاهی (e) را نشان می‌دهد. در این جدول ماکزیمم ارتفاع موج ($H_{\max}$) در نقطه شکم، مینیمم ارتفاع موج ($H_{\min}$) در نقطه گره، فاصله زمانی بین دو تراز ماکزیمم متوالی ثبت شده توسط دو گیج اندازه‌گیری نوسانات سطح آب (Δt) و سرعت موج ($C = |x_{WG1} - x_{WG2}| / \Delta t$) را نشان می‌دهد. در ستون آخر این جدول مقدار سرعت موج توسط تئوری موج خطی (C_{LWT}) نشان داده شده است. اندیسهای e و n بترتیب نشان دهنده نتایج آزمایشگاهی و عددی هستند.

همانطور که از جدول ۴ و شکل ۵ مشاهده می‌شود برای ترکیب موج شماره ۲ نتایج بدست آمده نشان از وجود اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی دارند. اختلاف بیان شده در این ترکیب خود را در سرعت موج بدست آمده از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی نشان می‌دهد. فاصله زمانی بین دو تراز ماکزیمم متوالی ثبت شده توسط دو گیج اندازه‌گیری نوسانات سطح آب در مدل عددی برابر $\Delta t_s = 0.60s$ بوده در حالیکه این مقدار در مدل آزمایشگاهی برابر $\Delta t_e = 0.31s$ بدست آمده است. متقابلاً مقدار سرعت موج عددی و آزمایشگاهی به ازی دو مقدار Δt بدست آمده بترتیب برابر $C_n = 2.0m/s$ و $C_e = 3.9m/s$ هستند. معادل این مقادیر توسط تئوری موج خطی برابر $C = 2.3m/s$ بدست آمده است. برای ترکیب موج در حالت اول و سوم اختلاف معناداری بین نتایج آزمایشگاهی و عددی مشاهده نمی‌شود.



[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.2.5]



شکل ۵- سری زمانی تغییرات سطح آب در محل دو گیج اندازه‌گیری نوسانات سطح آب و محل نصب فشار سنج T_2 برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج (خط ممتد = نتایج مدل عددی، خط چین = نتایج مدل آزمایشگاهی)

جدول ۴- مقایسه تغییرات سطح آب بدست آمده توسط مدل عددی (n) و مدل آزمایشگاهی (e)

شماره نمونه	$H_{max,e}$ (m)	$H_{max,n}$ (m)	$H_{min,e}$ (m)	$H_{min,n}$ (m)	Δt_e (s)	Δt_n (s)	C_e (m/s)	C_n (m/s)	C_{LWT} (m/s)
۱	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۵۰	۰/۵۵	۲/۱۴	۱/۹۵	۲/۱
۲	۰/۳۰	۰/۲۹	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۳۱	۰/۵۷	۳/۹	۲/۱	۲/۳
۳	۰/۳۹	۰/۳۸	۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۵۶	۰/۶۹	۲/۵	۲/۰۴	۲/۴

۳. ۲. فشار آب

شکل ۶ تغییرات فشار آب برحسب زمان برای سه ترکیب متفاوت موج بدست آمده از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. فشار آب ناشی از موج نتیجه برخورد هم موج برخوردی به سازه و هم موج انعکاسی از سازه است. با توجه به اینکه شکل موج برخوردی به سازه کم و بیش بصورت سینوسی بوده است ولی همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود تغییرات فشار آب بدست آمده از آزمایشگاه و مدل عددی به صورت سینوسی نبوده است. مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهند که مدل عددی زمان وقوع ماکزیمم فشار را بخوبی بدست آورده است.

جدول ۵ میزان درصد اختلاف بین مقدار میانگین فشار بدست آمده توسط مدل عددی (n) و مدل آزمایشگاهی (e) را در محل نصب هر یک از فشار سنجها برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج نشان می‌دهد. همانطور که این جدول نشان می‌دهد میانگین فشار بدست آمده توسط مدل عددی و مدل آزمایشگاهی برای تمام فشارسنجها و ترکیبهای متفاوت موج به مقدار حداقل ۰/۳۹ درصد و حداکثر ۱۲/۶۵ درصد یکدیگر بدست آمده‌اند که این نتیجه حاکی از تطابق مناسب نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی است. یکی از علل وجود این اختلاف کم موجود بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی را می‌توان در این موضوع دانست که مقدار تخلخل در آزمایشگاه در نقاط مختلف موج‌شکن توده سنگی به دلیل ذات مساله متغیر بوده، در حالی که مقدار تخلخل مدل شده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.2.5]

در مدل عددی در تمام نقاط به صورت یکنواخت فرض گردیده است. با این وجود متوسط اختلاف موجود بین مقدار میانگین فشار بدست آمده توسط مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در هر یک از فشار سنجها برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج در حدود ۴/۶ درصد یکدیگر بدست آمده که بسیار ناچیز و قابل قبول است. همچنین جدول ۶ درصد اختلاف بین مقدار دامنه تغییرات فشار بدست آمده توسط مدل عددی (n) و مدل آزمایشگاهی (e) در محل نصب هر یک از فشار سنجها برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج را نشان می‌دهد. همانطور که این جدول نشان می‌دهد دامنه تغییرات فشار بدست آمده توسط مدل عددی و مدل آزمایشگاهی برای تمام فشارسنجها و ترکیبهای متفاوت موج به مقدار حداقل ۰/۶۸ درصد، حداکثر ۴۶/۹۶ درصد و متوسط ۱۴/۲ درصد یکدیگر بدست آمده‌اند، که این نتیجه نشان دهنده قابلیت مناسب مدل عددی حاضر است.

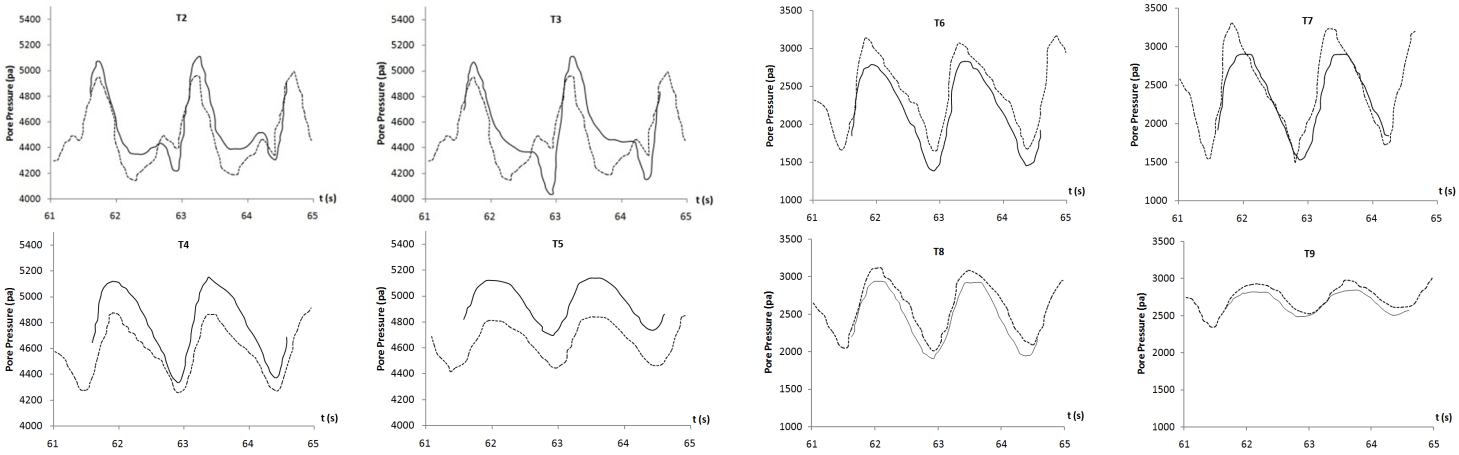
جدول ۵- درصد اختلاف بین مقدار میانگین فشار بدست آمده توسط مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در هر یک از فشار سنجها برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج

شماره نمونه	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
۱	۱/۲۹	۰/۴۷	۴/۱۳	۵/۸۵	۹/۶۱	۳/۳۳	۴/۵۳	۱/۷۴
۲	۱/۹۳	۲/۷۸	۳/۶۳	۴/۰۲	۲/۴۵	۶/۴۷	۲/۹۶	۱/۱۸
۳	۱۲/۶۵	۱۰/۴۲	۸/۵۸	۹/۲۷	۰/۳۹	۴/۴۱	۲/۷۰	۵/۷۰

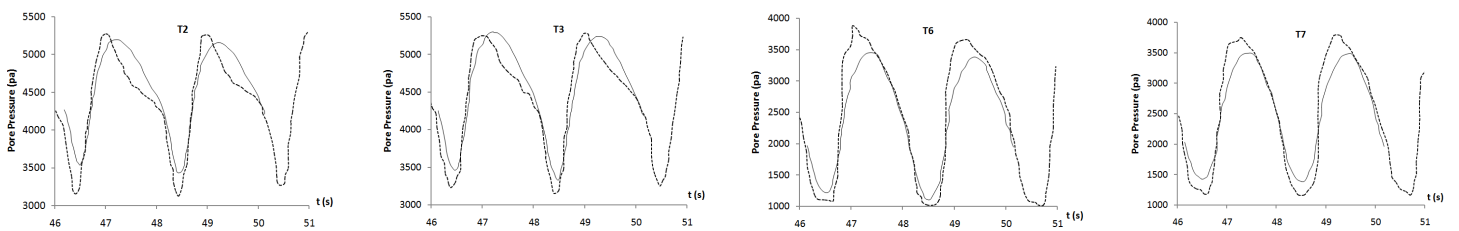
جدول ۶- درصد اختلاف بین مقدار دامنه تغییرات فشار بدست آمده توسط مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در هر یک از فشار سنجها برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج

شماره نمونه	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
۱	۵/۰۱	۲۹/۳۹	۲۰/۱۷	۱/۶۴	۴/۶۳	۲۴/۰۸	۶/۴۹	۴۶/۹۶
۲	۱۹/۱۰	۷/۵۴	۰/۶۸	۱۹/۶۱	۱۸/۱۱	۱۹/۶۲	۱۷/۱۶	۳۵/۸۷
۳	۶/۹۹	۳/۸۴	۵/۴۹	۹/۷۳	۱/۶۴	۱۰/۱۳	۳/۰۹	۲۳/۸۱

ترکیب اول موج

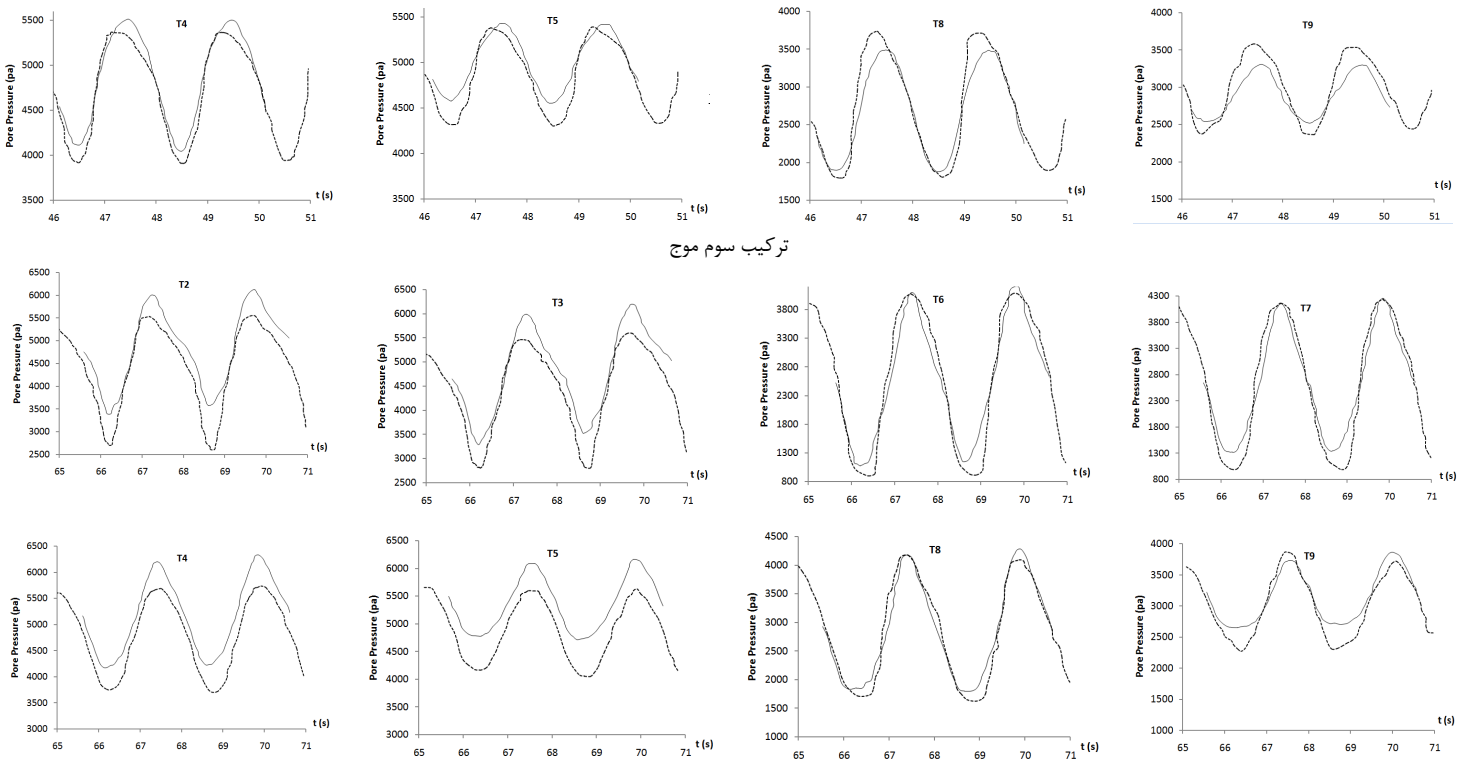


ترکیب دوم موج



[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.2.5]



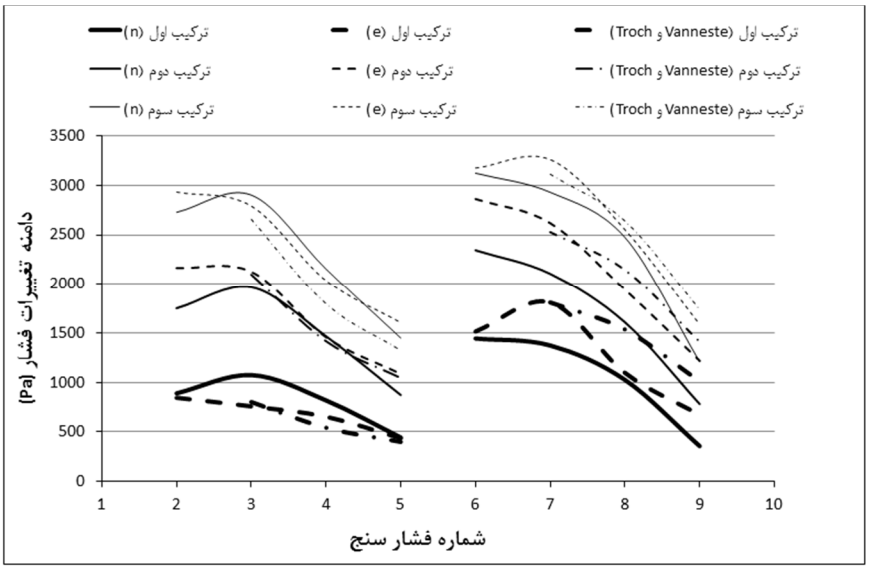
شکل ۶- سری زمانی تغییرات فشار آب در فشار سنجهای نصب شده داخل سازه برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج (خط ممتد = نتایج مدل عددی، خط چین = نتایج مدل آزمایشگاهی)

شکل ۷ دامنه تغییرات فشار در محل هر یک از فشار سنجها برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج را برای مدل عددی، مدل آزمایشگاهی و رابطه Vanneste و Troch (روابط ۱ و ۳) نشان می‌دهد. شکل موجود تطابق مناسب نتایج مدل عددی (خط ممتد)، مدل آزمایشگاهی (خط چین) و رابطه Vanneste و Troch (خط و نقطه) را بخوبی نشان می‌دهد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که دامنه تغییرات فشار بدست آمده برای فشارسنجها در یک تراز ثابت با حرکت به سمت داخل سازه کاهش می‌یابد که این موضوع به دلیل وجود استهلاک انرژی موج در اثر نفوذ آن به داخل محیط متخلخل که با ضریب δ در رابطه Biesel در نظر گرفته شد، می‌باشد.

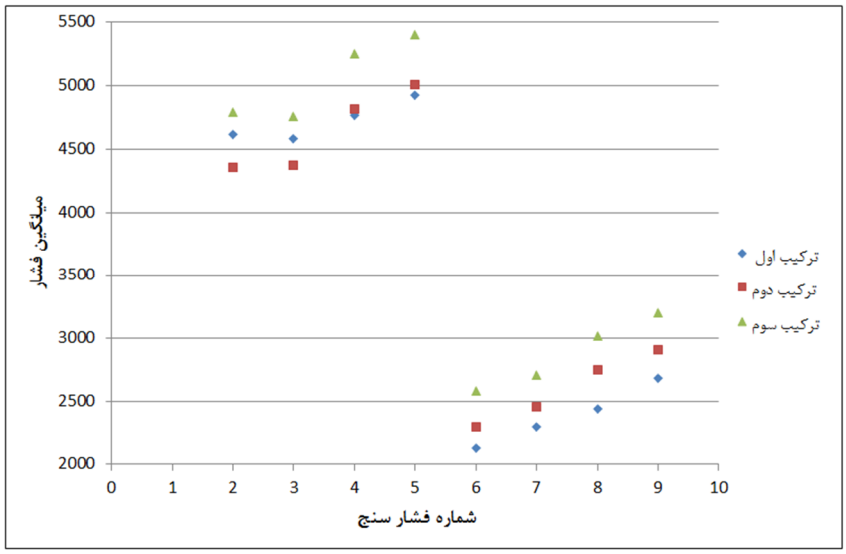
شکل ۸ مقدار فشار میانگین محاسبه شده با استفاده از نتایج مدل عددی برای تمام فشارسنجها در ترکیبهای متفاوت ارتفاع و پرید موج را نشان می‌دهد. نکته جالبی که در این شکل مشاهده می‌شود این است که در یک تراز ثابت با حرکت به سمت داخل سازه مقدار میانگین فشار بدست آمده روبه افزایش است. دلیل این امر را می‌توان به این صورت شرح داد که در طول بالاروی موج و نفوذ جریان ناشی از آن به داخل محیط متخلخل توده‌سنگی، سطح مقطع سازه جلوی جریان نسبتاً بزرگ بوده و بنابراین طول مسیر نفوذ مورد نیاز نسبتاً کوتاه می‌شود. در طول پایین‌روی، قسمت عمده جریان خروجی یا تراوش، در محدوده پایینی تراز پایین‌روی موج روی سازه رخ می‌دهد. به‌دلیل پایین بودن تراز ناحیه تراوش آب و سطح آب در خارج سازه در حین پایین‌روی، به‌نظر می‌رسد سطح آب داخل سازه باید پایین آید، منتها به‌منظور بدست آوردن جریان خروجی برابر با جریان ورودی در هر دوره رفت و برگشت موج و با توجه به اینکه در طول پایین‌روی و تراوش جریان از محیط متخلخل، سطح مقطع سازه توده‌سنگی در جلوی جریان تراوشی کمتر از جریان نفوذی است، لذا باید سرعت جریان تراوشی (خروجی) بیشتری نسبت به سرعت نفوذ (ورودی) به‌وجود آید، که این پدیده نیاز به وجود گرادیان فشار هیدرولیکی بزرگتری بین تراز آب داخل سازه و تراز آب خارج سازه دارد. به بیان ساده‌تر بدلیل آنکه جریان خروجی از سازه در حالت پایین‌روی و در قسمت پایین سازه اتفاق می‌افتد و با توجه به اینکه در حالت خروج آب از سازه (تراوش)، آب مجبور است از فضای کوچکتری نسبت به حالت نفوذ عبور کند، بنابراین برای آنکه حجم آب ورودی و خروجی از سازه یکسان باشند باید گرادیان فشار هیدرولیکی موجود باشد، که این امر با افزایش سطح آب داخلی تأمین می‌گردد و این موضوع منجر به افزایش میانگین فشار در قسمتهای داخلی سازه می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.2.5]



شکل ۷- دامنه تغییرات فشار برحسب پاسکال در هر محل هر یک از فشار سنجها برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج (خط ممتد = نتایج مدل عددی، خط چین = نتایج مدل آزمایشگاهی، خط و نقطه = رابطه Vanneste و Troch)



شکل ۸- مقدار فشار میانگین محاسبه شده با استفاده از نتایج مدل عددی برای تمام فشارسنجها در ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل عددی جهت بررسی نوسانات سطح آب و تغییرات فشار در داخل موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D توسعه داده شد. نتایج بدست آمده در این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- مقایسه نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی استفاده شده برای جریان بیرون سازه و جریان داخل تطابق مناسبی را نشان دادند. دامنه تغییرات فشار بدست آمده توسط مدل عددی و مدل آزمایشگاهی برای تمام فشارسنجها و ترکیبهای متفاوت موج به طور متوسط ۱۴/۲ درصد یکدیگر بدست آمدند و همچنین متوسط اختلاف موجود بین مقدار میانگین فشار بدست آمده توسط مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در هر یک از فشار سنجها برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج در حدود ۴/۶ درصد یکدیگر نتیجه شدند که می‌توان یک دلیل وجود این اختلاف ناچیز را در غیر یکنواخت بودن مقدار تخلخل در آزمایشگاه در نقاط مختلف سازه توده‌سنگی و یکنواخت فرض نمودن این پارامتر در کلیه نقاط در مدل عددی در نظر گرفت. با این احوال نتایج حاصل شده نشان دهنده قابلیت مناسب مدل عددی حاضر در بررسی فشار داخل موج‌شکن توده‌سنگی متخلخل است.

۲- دامنه تغییرات فشار در محل هر یک از فشار سنجها برای سه ترکیب متفاوت ارتفاع و پرید موج برای مدل عددی، مدل آزمایشگاهی و رابطه Vanneste و Troch تطابق مناسبی را نسبت به یکدیگر نشان دادند. دامنه تغییرات فشار برای نقاط مختلف در یک تراز ثابت با حرکت به سمت داخل سازه مقدار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.2.5]

کاهش می‌یابند که این موضوع به دلیل وجود استهلاک انرژی موج در اثر نفوذ آن به داخل محیط متخلخل است.

۳- بدلیل آنکه جریان خروجی از سازه در حالت پایین‌روی و در قسمت پایین سازه اتفاق می‌افتد و با توجه به اینکه در حالت خروج آب از سازه (تراوش)، آب مجبور است از فضای کوچکتری نسبت به حالت نفوذ عبور کند، بنابراین برای آنکه حجم آب ورودی و خروجی از سازه یکسان باشند باید گرادیان فشار هیدرولیکی موجود باشد، که این امر با افزایش سطح آب داخلی تأمین می‌گردد و این موضوع منجر به افزایش میانگین فشار در قسمتهای داخلی سازه می‌شود. پس در یک تراز ثابت با حرکت به سمت داخل سازه، میانگین فشار افزایش می‌یابد.

کلید واژگان

1-Forchheimer
2- Projection

۵. مراجع

1- Troch, P., (2000), *Experimental study and numerical simulation of wave interaction with rubble mound breakwaters*, Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, Ghent University, Belgium.

2- Harlow, E.H., (1980), *Large rubble mound breakwater failures*, Proc. ASCE, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 106, WW2.

3- de Groot, M.B., Yamazaki, H., Van Gent M. and Kheyruri, Z., (1994), *Pore pressures in rubble mound breakwaters*, Proc. 24th International Conference on Coastal Engineering, Kobe, Japan. ASCE, New York, Vol. 2, p. 1727-1738.

4- Biésel, F., (1950), *Equations de l'écoulement non lent en milieu permeable*, La Houille Blanche, No. 2.

5- Burcharth, H.F., Liu, Z. and Troch, P., (1999), *Scaling of core material in rubble mound breakwater model tests*, Proc. 5th COPEDEC, Cape Town (South Africa), p. 1518-1528.

6- Troch, P. , De Rouck, J. and Burcharth, H.F., (2002), *Experimental study and numerical modeling of wave induced pore pressure attenuation inside a rubble mound breakwater*, Proc. 28th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, p. 1607-1619.

7- Vanneste, D. and Troch, P., (2010), *Experimental research on pore pressure attenuation in rubble – mound breakwaters*, Proc. of the International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Shanghai, China.

8- Daily, J.W., (1973), *Fluid Dynamics*, Addishing-Westley Publishing Company, Boston.

9- Van Gent, M., (1993), *Stationary and oscillatory flow through course porous media*, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering 93-9, Delft University of Technology.

10- Van Gent, M., (1995), *Wave interaction with berm breakwaters*, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 121, No. 5.

11- Hirt, C.W. and Nichols, B.D., (1981), *Volume of Fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries*, J. Comp. Phys., Vol. 39, p. 201-225.

12- Liu, P., Lin, P., Chang, K. and Sakakiyama, T., (1999), *Numerical modeling of wave interaction with porous structures*, J. of Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., 125(6), p. 322–330.

13- Malmedal, I.J., (2002), *Hydraulic and geotechnical stability of rubble mound breakwater*, M.Sc. thesis, Dep. of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

14- Lin, P. and Liu, L.-F. P., (1999), *Internal wave-maker for Navier-Stokes equation models*, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 125(4), pp. 207-215.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.2.5]