بررسی مدلسازی عددی اندرکنش موج نامنظم و سازه موج‌شکن صندوقه‌ای حفره‌دار

روح‌اله امیرآبادی[۱*]، احمد رضایی مزیک [۲]، علی قاسمی[۳]

[۱] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم؛ r.amirabadi@qom.ac.ir
[۲] دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ a.rezaeemazyak@modares.ac.ir
[۳] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم؛ a.ghasemi@stu.qom.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۰۴

کلمات کلیدی:
موج‌شکن کیسونی حفره‌دار
اندرکنش موج و سازه
روگذری موج
انعکاس موج

چکیده

موج‌شکن‌ها یکی از رایج‌ترین سازه‌های حفاظت ساحلی هستند که کاربرد اصلی آن‌ها استهلاک انرژی امواج و ایجاد حوضچه آرامش جهت پهلوگیری شناورها در بنادر است. یکی از روش‌ها برای تامین این منظور، احداث یک دیوار صلب در مقابل امواج است که به عنوان موج‌شکن‌های کیسونی شناخته می‌شوند. لذا در این مقاله اندرکنش طیف موج نامنظم با موج‌شکن کیسونی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D مورد مطالعه قرار گرفته است. از این‌رو به منظور واسنجی و صحت‌سنجی، نتایج سطح آزاد، فشار روی سطح کیسون و روگذری حاصل از مدل‌سازی عددی با مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط لارا و همکاران مقایسه شده است. نتایج بررسی‌های انجام گرفته نشان از تطابق مناسب نتایج مدلسازی عددی و آزمایشگاهی دارد. در ادامه تاثیر ایجاد شیار بر دیواره موج‌شکن در پاسخ‌های هیدرولیکی سازه بررسی گردیده است. نتایج مدلسازی نشان می‌دهد، با ایجاد حفره در دیواره جلویی موج‌شکن کیسونی نسبت به موج‌شکن کیسونی با دیواره یکپارچه، میزان روگذری و انعکاس موج به شدت کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه نتایج حاصل از روگذری موج از موج‌شکن کیسونی حفره‌دار با نتایج Euro top 2016، تعریف عدد بی بعد جدید با در نظر گرفتن عرض حفره داخل کیسون توصیه می‌شود.

Numerical Modeling Investigation of Irregular Wave Interaction with Perforated Caisson Breakwater

Rouhollah Amirabadi[1*], Ahamd Rezaee Mazyak[2], Ali Ghasemi[3]

[1] *Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Qom;*, r.amirabadi@qom.ac.ir
[2] *Ph.D. student, , Faculty of Civil and Environmental Engineering, TMU;* a.rezaeemazyak@modares.ac.ir
[3] *Ph.D. student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Qom;* a.ghasemi@stu.qom.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 4 Dec. 2017
Accepted: 26 Jul. 2018

Keywords:
Perforated caisson breakwater
Interaction of wave and structure
Wave overtopping
Wave reflection

ABSTRACT

Caisson breakwater is one the most common coastal protection structures which their main application is to reduce wave energies and create a calm basin for berthing of the ships in ports. A simple approach to achieve this is to build a solid wall against the waves which are know as caisson breakwater. In this paper interaction of irregular waves with normal and perforated-wall caisson breakwater using FLOW-3D is studied. In this paper, the appropriate numerical model has been selected and then the model setup is explained. After the model setup, sensitivity analysis, calibration and verification of the model results with available laboratory data are presented. When the model performance is verified, the interaction of irregular wave with the perforated-wall caisson breakwaters is evaluated. The modeling results show that the perforated caisson breakwater compared to the vertical breakwater has a better hydraulic performance. In comparison to perforated-wall caisson breakwater results and euro top 2016 results, define a new dimensionless number to consider width of chamber to be recommended.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.6.3]

۱ - مقدمه

موج‌شکن‌ها یکی از رایج‌ترین سازه‌های حفاظت ساحلی هستند که کاربرد اصلی آن‌ها استهلاک انرژی امواج و ایجاد حوضچه آرامش جهت پهلوگیری شناورها در بنادر است. یکی از روش‌ها برای تامین این منظور، احداث یک دیوار صلب در مقابل امواج است که به عنوان موج‌شکن‌های کیسونی شناخته می‌شوند. با توجه به استفاده از موج‌شکن‌های کیسونی در اعماق نسبتاً زیاد، تعیین ابعاد بهینه این سازه در شرایط هیدرولیکی و ژئوتکنیکی گوناگون از اهمیت به سزایی برخوردار است. از این‌رو مطالعات فراوانی در خصوص واکنش های هیدرولیکی همچون فشار سیال بر بدنه سازه و روگذری امواج که متاثر از اندرکنش سازه و سیال است، انجام شده است.

تحقیقات آزمایشگاهی و عددی متعددی پیرامون بررسی اندرکنش موج و موج‌شکن کیسونی انجام شده است. تحقیق Xie (۱۹۸۹)، از جمله نخستین مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی جهت برسی اندرکنش موج ایستاده و موج‌شکن قائم می‌باشد. در مطالعه Sakakiyama و Liu (۲۰۰۱)، تغییرات سطح آزاد و میدان سرعت در جلوی یک موج‌شکن کیسونی بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. Kudella و همکاران (۲۰۰۹)، یک مدل آزمایشگاهی بزرگ مقایس را مطالعه کردند و نتایج مطالعات آنها نشان می‌داد که فشار منفذی باقی مانده ناشی از نیروی موج شکسته می‌تواند باعث لغزش و شکست کیسون شود [۲]. Roul و همکاران (۲۰۱۴)، در دانشگاه آلبروگ برای کیسون‌هایی با اوزان متفاوت و هندسه مشابه تحت برخورد موج‌های منظم و نامنظم مطالعات خود را انجام دادند. آنها دریافتند که تحت اثر موج شکسته یک عدم دقت در پیش‌بینی نیروی موج و نیروی لغزش کیسون وجود دارد [۳].

علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته، با پیشرفت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در سال‌های اخیر مدل‌سازی عددی فرآیندهای دریایی نیز از محبوبیت زیادی برخوردار گردیده است. به عنوان مثال Suh و همکاران (۱۹۹۵)، به توسعه یک مدل عددی برای محاسبه میزان برگشت موج منظم از یک موج‌شکن حفره‌دار پرداختند. با توجه به اینکه مدل عددی بر مبنای معادلات موج خطی توسعه یافته بود، عدم همخوانی نتایج مدلسازی با افزایش اثرات غیرخطی دیده می‌شود [۴]. Suh و همکاران (۲۰۰۶)، با استفاده از نتایج مدلسازی عددی و آزمایشگاهی به محاسبه انعکاس موج منظم و نامنظم از یک موج‌شکن کیسونی پرداختند [۵]. همچنین Lara و همکاران (۲۰۰۸)، با استفاده از کد COBRAS-UC که بر اساس معادلات VARANS[1] توسعه یافته است، به مدل‌سازی دو بعدی اندرکنش موج و موج‌شکن کیسونی مرکب پرداختند. نتایج مطالعات همخوانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد [۶]. Liu و همکاران (۲۰۰۸) با تاکید بر پارامتر فشار به بررسی اثر ایجاد حفره در موج‌شکن صنوقه‌ای پرداخته و با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی برای موج نامنظم صحت سنجی مطالعات انجام گردید [۷].

Xuefeng و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از مدل‌سازی عددی، توزیع فشار روی کیسون حفره دار و در داخل چمبره‌ها را بررسی کردند و به مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاه پرداخته‌اند [۸].

Misra و همکاران (۲۰۱۱)، با استفاده از معادلات دوبعدی RANS-VOF به مطالعه پاسخ‌های هیدرودینامیکی موج‌شکن کیسونی پرداختند. صحت‌سنجی نتایج مدل آزمایشگاهی، نشان از موفقیت مدل عددی توسعه یافته در شبیه‌سازی روگذری در مقابل تغییرات سازه تاج موج‌شکن می‌باشد [۹]. همچنین در مطالعات Higuer و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از مدل عددی IHFOAM بازوی اصلی موج‌شکن بندر Laredo در کشور اسپانیا را با ابعاد و اندازه واقعی مدل‌سازی کرده و با انجام این مدل‌سازی پایداری موج‌شکن در محل‌های متفاوت در اثر موج با زاویه برخوردهای مختلف بررسی گردیده است [۱۰].

قاسمی و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از مدل عددی FLOW-3D به بررسی میزان روگذری از موج‌شکن‌های توده سنگی با در نظر گرفتن اثر تخلخل پرداخته و نتایج مدل عددی را با مطالعات آزمایشگاهی و روابط تجربی مقایسه و بررسی کردند[۱۱].

Ching و همکاران (۲۰۱۸) به مدل‌سازی عددی اندرکنش موج و موج‌شکن کیسونی حفره دار پرداختند و هندسه جدیدی از حفره و موج‌شکن کیسونی را مدل‌سازی و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند [۱۲].

علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی و مدلسازی‌های عددی، روابط نیمه تجربی که از تجزیه و تحلیل پاسخ‌های هیدرودینامیکی و هیدرولیکی موج‌شکن کیسونی در آزمایشگاه بدست آمده است، نیز وجود دارد که از آن‌ها برای طراحی این نوع سازه استفاده می گردد. از جمله مهمترین این روابط عبارتند از: Goda (۱۹۸۵)، Takashi و همکاران (۱۹۹۵) برای موج‌شکن قائم [۱۳]، [۱۴].

با توجه به بررسی مطالعات پیشین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل‌های عددی برای مدل‌سازی اندرکنش موج و سازه-های دریایی رو به گسترش می‌باشد. لذا در این مقاله اندرکنش موج نامنظم با موج‌شکن کیسونی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D مورد مطالعه قرار گرفته است. از این‌رو به منظور واسنجی و صحت سنجی مدلسازی عددی، از نتایج سطح آزاد، فشار روی سطح کیسون و روگذری حاصل از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط Lara و همکاران (۲۰۰۸) در دانشگاه کانتابریا استفاده شده است. نتایج بررسی‌های انجام گرفته نشان از تطابق مناسب نتایج مدلسازی عددی و آزمایشگاهی دارد. در ادامه تاثیر ایجاد شیار بر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.6.3]

دیواره موج‌شکن بر پاسخ‌های هیدرولیکی این نوع سازه دریایی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- متدلوژی مطالعات

با توجه به روند مدلسازی عددی، شیوه این مطالعات نیز منطبق با الگوی استاندارد این گونه مدلسازی‌ها انتخاب گردیده است. در اولین گام به انتخاب مدل عددی مناسب پرداخته شده است. در ادامه با تهیه داده‌های آزمایشگاهی جهت کنترل نتایج مدلسازی به برپایی مدل پرداخته شده است. پس از برپایی مدل و انجام تحلیل حساسیت پارامترهای تاثیرگذار بر نتایج (مانند ابعاد مش و مدل آشفتگی)، واسنجی و صحت‌سنجی نتایج مدل عددی جهت اطمینان از نتایج مطالعات مورد توجه قرار گرفته است. در نهایت پس از اطمینان از عملکرد مدل، به مدلسازی اندرکنش موج نامنظم و موج‌شکن کیسونی حفره‌دار پرداخته شده است.

۲-۱- انتخاب مدل عددی

با افزایش قدرت محاسباتی کامپیوترها، مدل‌های عددی به ابزار محبوب و کارآمد در شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی تبدیل شده‌اند. در این بین دینامیک سیالات محاسباتی[۲] یکی از ابزارهای پرقدرت و توانا برای تحلیل رفتار جریان سیال در سیستم‌های با هندسه ناموزون و معادلات حاکم پیچیده می‌باشد.

در بین نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی، FLOW-3D یکی از نرم‌افزارهای قوی در این زمینه می‌باشد. این نرم‌افزار برای تحقیق در مورد رفتار یک، دو و سه بعدی دینامیک سیالات در محدوده کاربردی وسیعی طراحی شده است. تا کنون از این نرم‌افزار در مطالعات متعددی استفاده گردیده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که این مدل قابلیت فراوانی در شبیه‌سازی میدان سیال پیرامون سازه‌های دریایی و هیدرولیکی دارد[۱۵].

۲-۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال، بیانگر قوانین فیزیکی بقا به صورت عبارت ریاضی می‌باشد. بنابراین معادلات حاکم مورد استفاده در مدل FLOW-3D نیز مانند سایر نرم‌افزارهای این زمینه، عبارتند از:

- ✓ معادله پیوستگی (قانون بقای جرم)

معادله پیوستگی از قانون بقای جرم و با نوشتن معادلات تعادل جرم برای یک حجم از سیال و با فرض تراکم ناپذیری سیال در سه جهت x، y و z به صورت رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$\frac{\partial(u)}{\partial(x)}+\frac{\partial(v)}{\partial(y)}+\frac{\partial(u)}{\partial(z)}=0 \qquad (۱)$$

که در آن u، v و w مولفه‌های سرعت به ترتیب در جهت‌های x، y و z هستند.

- ✓ معادله مومنتم – معادلات ناویر استوکس (قانون بقای اندازه حرکت یا قانون دوم نیوتون)

این قانون بیان می‌کند نرخ تغییر اندازه حرکت با برایند نیروهای وارد بر سیال برابر است. با در نظر گرفتن جریان غیر قابل تراکم و ثابت فرض کردن ضریب ویسکوزیته، معادله ناویر استوکس بصورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$\begin{cases}\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\rho g_x+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)\\ \rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\rho g_y+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)\\ \rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial z}+\rho g_z+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)\end{cases} \qquad (۲)$$

در این معادله‌ها g_x، g_y و g_z شتاب‌های جرم، μ ویسکوزیته سیال، ρ چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و P فشار سیال برحسب پاسکال می‌باشند.

علاوه بر معادلات حاکم، در این مدل عددی از روش حجم سیال برای مدلسازی سطح آزاد استفاده می‌گردد. همچنین در نرم افزار امکان بهره برداری از چندین مدل آشفتگی از جمله RNG، k-ε و LES فراهم می‌باشد. از مهم‌ترین قابلیت مدل FLOW-3D که کاربرد آن را در مدلسازی فرآیندهای ساحلی افزایش داده است امکان اعمال شرایط مرزی موج به صورت موج منظم و نامنظم است [۱۵].

۲-۳- معرفی مدل آزمایشگاهی

همانطور که پیشتر نیز مورد اشاره قرار گرفت، جهت اطمینان از نتایج شبیه‌سازی عددی نیاز به واسنجی و صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با مشاهدات آزمایشگاهی می‌باشد. از این‌رو در این مطالعات از نتایج مدل آزمایشگاهی انجام شده توسط Lara و همکاران (۲۰۰۸) در دانشگاه کانتابریا استفاده گردیده است [۶]. نمای فلوم موج و موج‌شکن کیسونی در شکل ۱ نشان داده شده است.

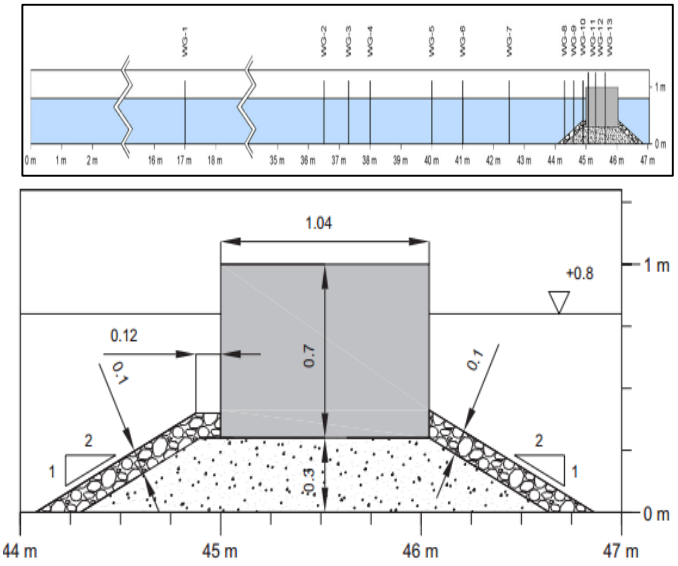
فلوم موج مورد استفاده دارای ۶۰ متر طول، ۲ متر عرض و ۲ متر ارتفاع می‌باشد. عرض موج‌شکن کیسونی ۲ متر، قطر سنگدانه‌های هسته و فیلتر مورد استفاده به ترتیب ۰/۰۳۵و ۳/۵ سانتی‌متر است. همچنین با استفاده از طیف JONSWAP سه شرایط موج با مشخصات ارتفاع موج‌های مشخصه ۰/۱۸، ۰/۱۸ و ۰/۲۱متر که پریود آن‌ها به ترتیب عبارتند از ۵، ۶ و ۳ ثانیه، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.6.3]

۲-۴- برپایی مدل

پس از آشنایی با مشخصات مدل آزمایشگاهی، تنظیمات کلی نرم-افزار که جهت صحت‌سنجی نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی استفاده شده، اشاره می‌گردد. جهت مدل‌سازی، مدل یک فازی با سیال غیرقابل تراکم با مدنظر قرار دادن تغییرات قابل توجه سطح آب، مورد استفاده قرار گرفته است. فیزیک‌های متنوعی جهت مدل‌سازی پدیده‌های مختلف وجود دارد، ولیکن در مدلسازی انجام گرفته دو فیزیک گرانش و ویسکوزیته-آشفتگی فعال گردیده است. با آگاهی از مشخصات هندسه مدل آزمایشگاهی مطابق شکل ۱، این هندسه در نرم‌افزار اتوکد ساخته و بصورت یک جسم صلب با پسوند STL به نرم‌افزار معرفی شده است. در مدل‌سازی‌های انجام گرفته از تخلخل لایه‌های سنگی صرفنظر گردیده است.



شکل ۱- نمای فلوم موج و موج‌شکن کیسونی در مدل‌های آزمایشگاهی Lara و همکاران [۶]

۳- واسنجی و صحت‌سنجی مدلسازی عددی

پس از برپایی مدل عددی لازم است اطمینان حاصل شود که مدل عددی مشابه با آزمایشگاه، پارامترهای استفاده شده را مدل سازی می‌کند یا خیر.لذا لازم است ابتدا واسنجی مدل عددی انجام شود و در ادامه به منظور اطمینان از نتایج مدلسازی عددی صحت‌سنجی انجام می‌شود. پیش از شروع واسنجی ابتدا تحلیل حساسیت مدل عددی نسبت به تعداد سلول محاسباتی و مدل آشفتگی انجام می-شود. پس از تعیین شبکه محاسباتی و مدل آشفتگی مناسب به واسنجی و صحت‌سنجی مدل پرداخته شده است.

۳-۱- تحلیل حساسیت

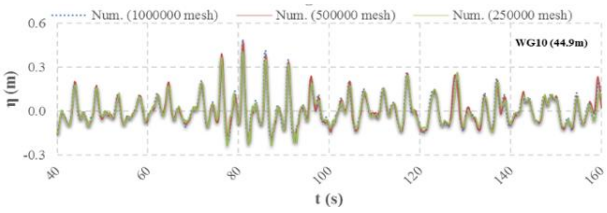
در این بخش حساسیت نتایج مدلسازی به تغییرات ابعاد شبکه محاسباتی و مدل آشفتگی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه نتایج این بخش در مطالعات واسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد، تغییرات تراز سطح آب، فشار و روگذری برای موج نامنظم با ارتفاع موج مشخصه ۰/۱۸ متر و پریود پیک ۵ ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج سطح آزاد و فشار به ترتیب برای نقطه WG10 (44.9m) و نقطه PG4(45m-0.772m) مقایسه شده-است.

- ✓ شبکه محاسباتی: جهت تعیین شبکه محاسباتی مناسب، ابعاد مش در سه بعد مساوی در نظر گرفته شد. بر این اساس سه شبکه محاسباتی با ۱ میلیون مش (ابعاد مش در هر سه جهت تقریبا ۳/۵ سانتی‌متر)، ۵۰۰ هزار مش (ابعاد مش در هر سه جهت تقریبا ۷ سانتی‌متر) و ۲۵۰ هزار مش (ابعاد مش در هر سه جهت تقریبا ۱۴ سانتی متر) مورد مطالعه قرار گرفت. مقایسه نتایج شبکه‌بندی های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است.
- ✓ مدل آشفتگی: انتخاب مدل آشفتگی به منظور تولید طیف موج مشابه با موج نامنظم تولید شده در آزمایشگاه نیز از اهداف حساسیت سنجی انجام شده در این مرحله می‌باشد. از اینرو برای سه مدل آشفتگی RNG، K-ε و LES مدل‌سازی‌ها انجام گرفته است. مقایسه نتایج سه مدل آشفتگی در شکل ۳ ارائه شده است.

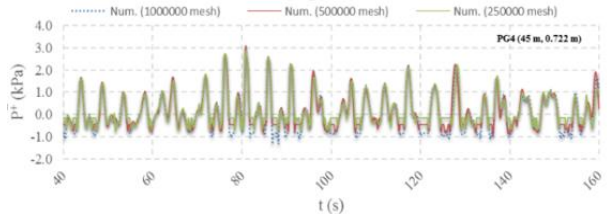
با در نظر داشتن برآورد کلی از نتایج آزمایشگاهی، مدنظر داشتن زمان مدل سازی و تجارب مدل سازی‌های پیشین، مدل با پانصد هزار سلول محاسباتی و مدل آشفتگی RNG برای ادامه مدلسازی-ها انتخاب گردید.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

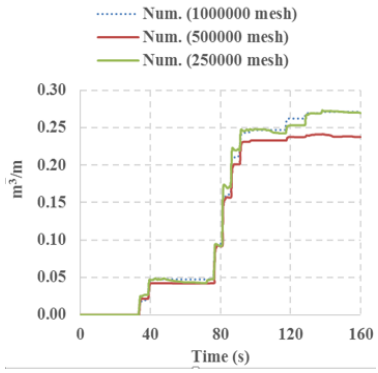
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.6.3]



(الف)

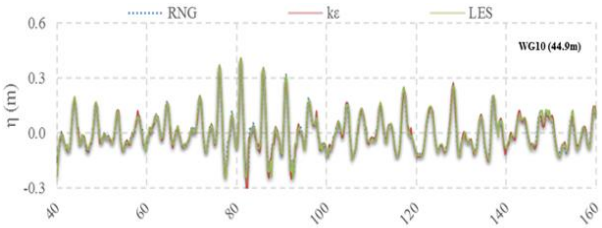


(ب)

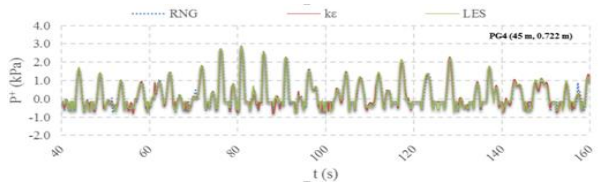


(ج)

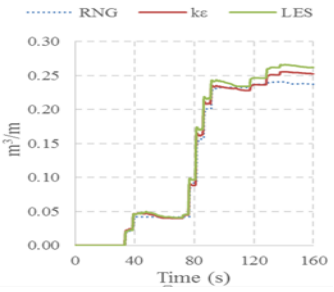
شکل ۲- نتایج تحلیل حساسیت مدل عددی نسبت به تعداد سلول محاسباتی (الف) سطح آزاد (ب) فشار دینامیکی (ج) روگذری



(الف)



(ب)



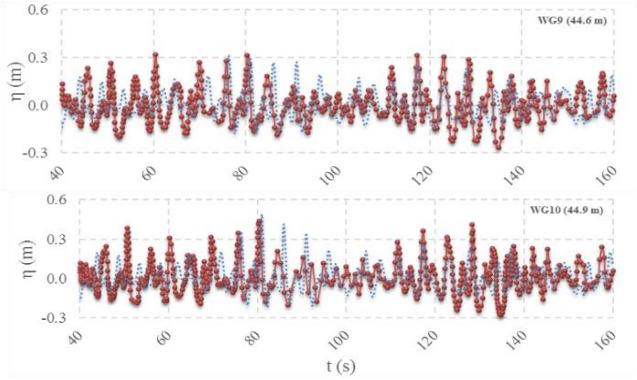
(ج)

شکل ۳- نتایج حساسیت سنجی مدل عددی نسبت به مدل‌های آشفتگی (الف) سطح آزاد (ب) فشار دینامیکی (ج) روگذری

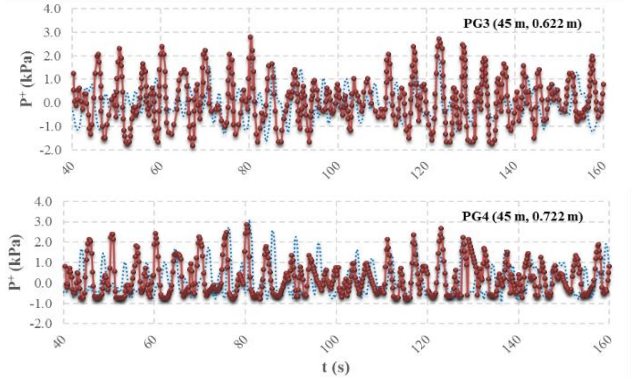
۳-۲- واسنجی

به منظور رسیدن به یک سازگاری بهینه بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبات مدل عددی برای متغیرهای شبیه سازی شده واسنجی مدل عددی انجام می‌شود؛ لذا با آگاهی از مشخصات مدل آزمایشگاهی و مدنظر داشتن نتایج حساسیت‌سنجی انجام شده، موج‌شکن و جزئیات لازم برای مدل‌سازی به نرم افزار معرفی می‌شود.

از میان سه مدل‌سازی آزمایشگاهی انجام شده، با توجه به در اختیار بودن تاریخچه زمانی تغییرات تراز سطح آب و فشار برای موج نامنظم (طیف JONSWAP) با ارتفاع موج مشخصه ۰/۱۸ متر و پریود پیک ۵ ثانیه، واسنجی مدلسازی عددی نیز برای این مشخصات موج انجام شده است. نتایج واسنجی مدل عددی برای متغیرهای تغییرات سطح آب، فشار روی سطح کیسون و روگذری بترتیب در شکل ۴، شکل ۵ و شکل ۶ ارائه شده‌اند. نتایج واسنجی نشان از همخوانی مناسب نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی دارد. از اینرو برای اطمینان از اینکه مدل عددی در شرایط متفاوت نیز به درستی رفتار می‌کند، با ثابت نگه داشتن همه پارامترها، صحت سنجی مدل عددی برای اطلاعات موج مختلف انجام می‌شود.



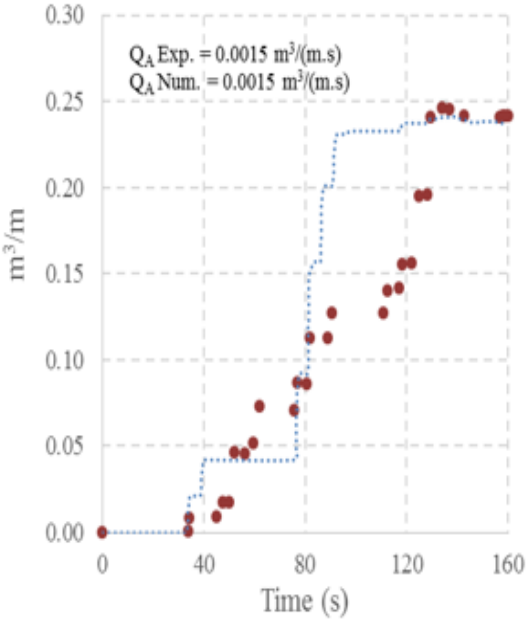
شکل ۴- مقایسه تاریخچه زمانی نتایج تغییرات تراز سطح آب در مقابل موج‌شکن (قرمز= آزمایشگاهی، آبی= مدلسازی عددی)



شکل ۵- مقایسه تاریخچه زمانی نتایج تغییرات فشار بر روی بدنه موج شکن کیسونی (قرمز= آزمایشگاهی، آبی= مدلسازی عددی)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

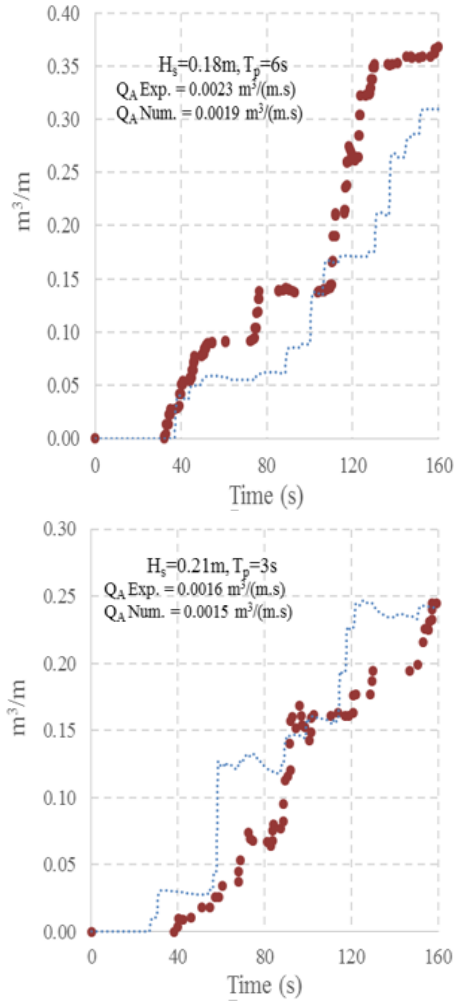
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.6.3]



شکل ۶- تاریخچه زمانی تغییرات روگذری (قرمز= نتایج مدلسازی آزمایشگاهی، آبی= نتایج مدلسازی عددی)

۳-۳- صحت‌سنجی

این مرحله به نوعی تایید توانایی مدل عددی در مدلسازی پدیده‌های مورد نظر می‌باشد. با توجه به در اختیار نبودن اطلاعات آزمایشگاهی سطح آزاد و فشار برای سایر شرایط موج، در این بخش از مطالعات تنها به بررسی میزان روگذری برای دو شرایط موج با مشخصات ارتفاع موج مشخصه ۰/۱۸ متر و پریود پیک ۶ ثانیه و ارتفاع موج مشخصه ۰/۲۱ متر و پریود پیک ۳ ثانیه پرداخته شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای شرایط موج در نظر گرفته شده در شکل ۷ ارائه شده است. همانگونه که مشخص می باشد، مدل عددی به کارگرفته شده، قابلیت مناسبی در شبیه‌سازی اندرکنش موج نامنظم و موج‌شکن کیسونی دارد. نکته قابل توجه در شکل ۷ کاهش مقدار روگذری در بخش‌هایی از نمودار می‌باشد. علت این موضوع این است که مکانیزم روگذری اتفاق افتاده مانند جریان روی یک پله بر عکس[۳] می‌باشد که تشکیل ناحیه برگشتی[۴] در ناحیه پای پله باعث برگشت موج می‌گردد و در محاسبات نرم افزار به صورت منفی عمل کرده و منتج به کاهش حجم روگذری گردیده است. این نتایج در مطالعات حذف نگردید تا دقت شبکه محاسباتی در اندازه گیری پدیده‌ها نشان داده شود و تفسیری از این نوع روگذری نیز ارائه گردد[۱۶].



شکل ۷- تاریخچه زمانی تغییرات روگذری (قرمز= نتایج مدلسازی آزمایشگاهی، آبی= نتایج مدلسازی عددی)

۴- موج‌شکن کیسونی حفره‌دار

ارائه هندسه جدید برای موج‌شکن‌های کیسونی به منظور ایجاد عملکرد هیدرودینامیکی بهتر برای این سازه‌ها در سالهای اخیر همواره مورد توجه محققین بوده است. در این تحقیق نیز با الگو قرار دادن هندسه استفاده شده در مدل Suh و همکاران (۱۹۹۵)، به مدلسازی عددی این نوع موج‌شکن پرداخته شده است و عملکرد موج‌شکن کیسونی حفره‌دار با دو هندسه متمایز با موج‌شکن کیسونی سنتی مقایسه شده‌است [۵].

۴-۱- هندسه موج‌شکن

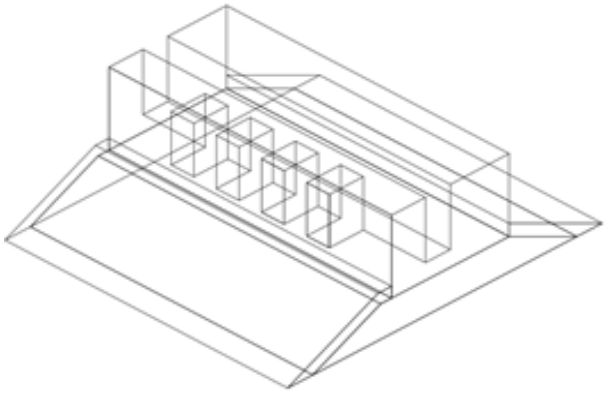
با در نظر داشتن مدل Suh و همکاران (۱۹۹۵)، هندسه موج‌شکن کیسونی حفره‌دار در نرم افزار اتوکد بصورت شکل ۸ تولید می‌شود. به منظور بررسی عملکرد بهینه حفره‌های موجود در هندسه موج-شکن حفره‌دار، برای دو نوع حفره بصورت شکل ۸ مدل‌سازی‌عددی انجام می‌شود.

لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر با در نظر داشتن ملاحظات اجرایی تنها هندسه حفره مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته‌است، و

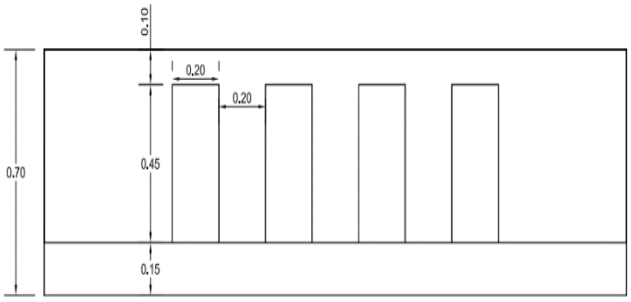
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.6.3]

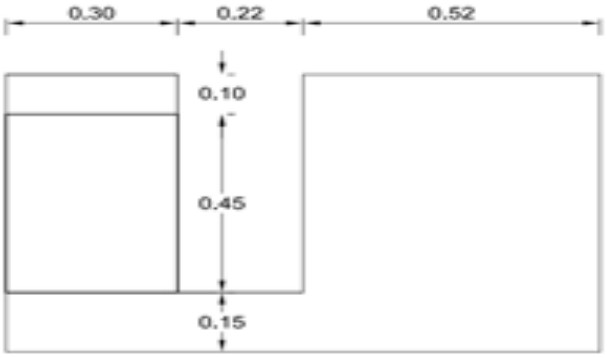
سایر اشکال مانند لوزی و دایره قابل بررسی بوده ولی با توجه به مشکلات اجرایی فقط جنبه مطالعاتی داشته و کاربردی بنظر نمی‌رسد.



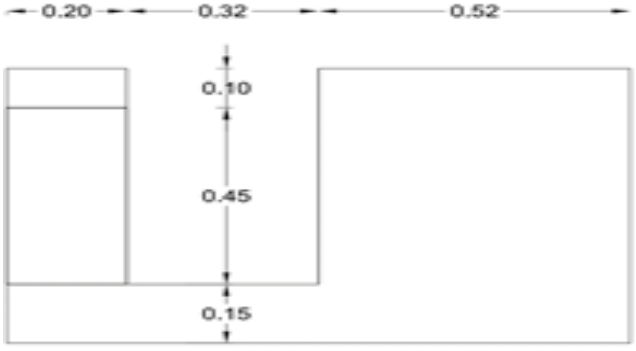
نمای سه بعدی موج‌شکن کیسونی



وجه جلویی موج‌شکن کیسونی حفره‌دار



موج‌شکن کیسونی حفره‌دار- نوع اول



موج‌شکن کیسونی حفره‌دار- نوع دوم

شکل ۸- نمای سه‌بعدی و مشخصات هندسه‌های متفاوت موج‌شکن کیسونی حفره‌دار

۴-۲- برنامه آزمایش‌ها

با در نظر گرفتن دو هندسه ارائه شده در شکل ۸، جهت تفسیر کلی عملکرد هیدرولیکی موج‌شکن‌های حفره‌ای شرایط موج با ارتفاع موج مشخصه ۹، ۱۸ و ۳۶ سانتی‌متر و پریودهای ۲/۵، ۵ و ۱۰ ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است، با توجه به هندسه و عمق آب پای سازه، اطلاعات موج نامنظم به گونه‌ای انتخاب شده‌است که نماینده مناسبی برای پارامترهای مورد بررسی باشد.

۵- تحلیل نتایج مدلسازی کیسون حفره‌دار

با در نظر گرفتن مدلسازی‌های انجام شده، پارامترهای هیدرولیکی و هیدرودینامیکی مانند میدان سرعت پیرامون موج‌شکن، روگذری امواج و ضریب انعکاس برای اطلاعات موج مطرح شده در برنامه آزمایش و با در نظر گرفتن دو هندسه حفره‌دار نوع اول و نوع دوم، بررسی شده است که در ادامه ارائه می‌شود.

لازم به ذکر است تمامی مبانی و نیازمندی‌های لازم برای یک مدل عددی، در مدلسازی کیسون حفره دار، مشابه موارد ذکر شده در مرحله صحت سنجی می‌باشد. در مورد مدل آشفتگی ذکر این نکته حائز اهمیت است که با تغییر هندسه موج‌شکن الگوی آشفتگی جریان در جلو موج‌شکن دچار تغییر خواهد شد اما لزوما نیاز به استفاده از مدل آشفتگی جدید نیست زیرا مدل‌های آشفتگی در حالت کلی بوده و تغییرات تا این اندازه در الگوی آشفتگی را پوشش خواهند داد، لذا در این قسمت نیز از مدل آشفتگی RNG استفاده می‌گردد.

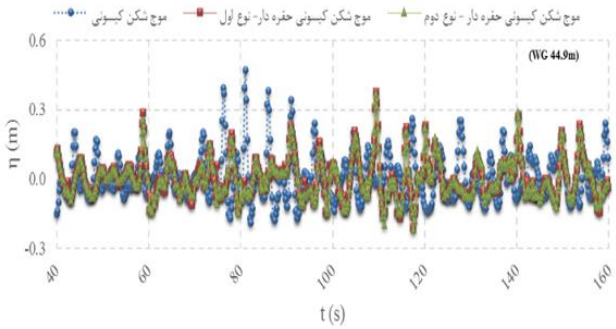
۵-۱- میدان سرعت پیرامون موج‌شکن

با توجه به وجود حفره داخل موج‌شکن کیسونی مورد مطالعه و لزوم ارزیابی تاثیر آن بر اضمحلال انرژی امواج، میدان سرعت موج روی کیسون و تغییرات سطح آب بر اساس خروجی مدلسازی‌های عددی صورت گرفته، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در شکل ۹ نتایج حاصل از مقایسه پارامترهای مذکور برای هر سه هندسه موج‌شکن کیسونی ارائه شده‌است.

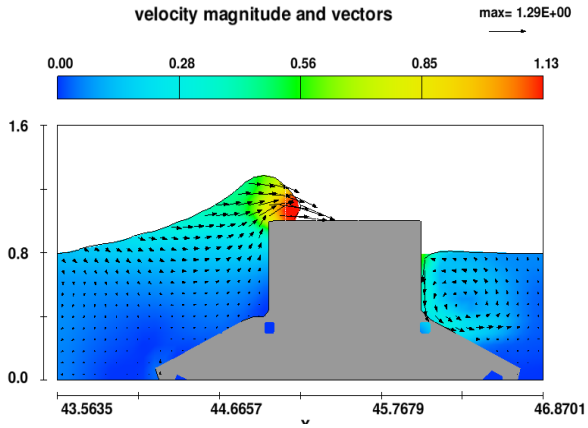
همانطور که نتایج ارائه شده در شکل ۹ نشان می‌دهد با مقایسه مقادیر و بردارهای سرعت موج در مقابل موج‌شکن در موقعیت رخداد بیشترین روگذری مشخص می‌شود که با حفره‌دار شدن کیسون، سرعت افقی موج روی کیسون می‌تواند تا نصف کاهش پیدا کند که نشان از عملکرد بهینه هندسه حفره‌دار می‌باشد. همانطور که شکل نشان می‌دهد با بزرگتر شدن چنبره جلوی موج‌شکن موج برگشتی از چنبره حجم بیشتری داشته و باعث زوال بیشتر موج ورودی و کاهش سرعت آن می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

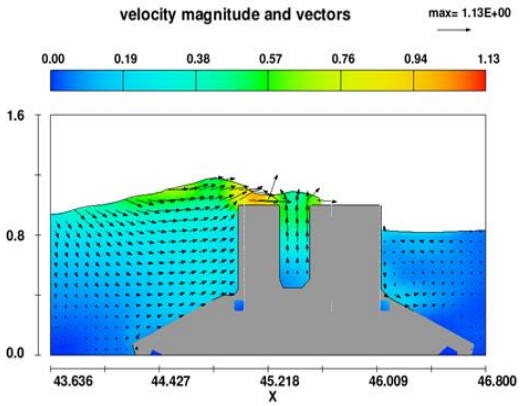
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.6.3]



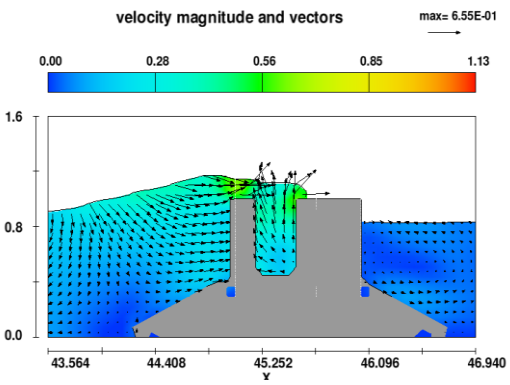
تغییرات تراز سطح آب در مقابل موج‌شکن



میدان سرعت موج برای موج‌شکن کیسونی



میدان سرعت موج برای موج‌شکن کیسونی حفره‌دار- نوع اول

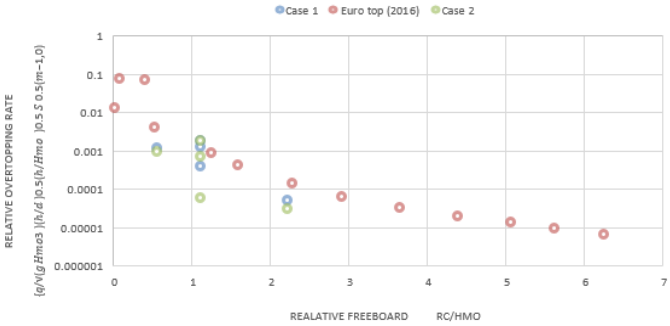


میدان سرعت موج برای موج‌شکن کیسونی حفره‌دار- نوع دوم

شکل ۹- تغییرات تراز آب و میدان سرعت موج برای هر سه هندسه موج‌شکن کیسونی برای ارتفاع موج مشخصه ۰/۱۸ متر و پریود ۵ ثانیه

۵-۲- روگذری امواج

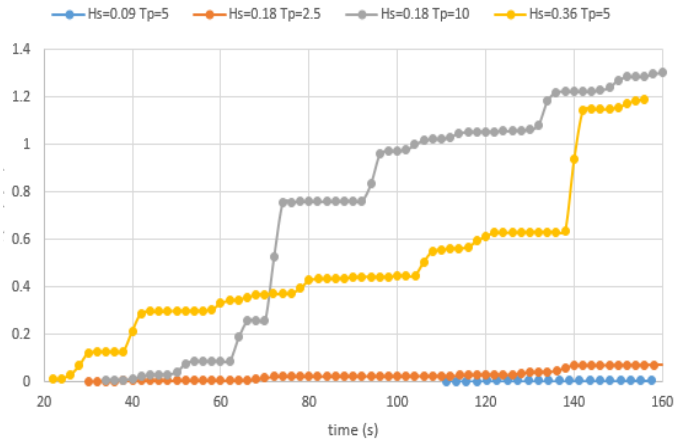
روگذری امواج از سازه‌های ساحلی یکی از مهمترین واکنش‌های هیدرودینامیکی است که در طراحی این نوع سازه‌ها مدنظر قرار می‌گیرد. لذا با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده، به منظور برآورد و مقایسه اولیه مقادیر روگذری، مقدار روگذری بدست آمده از مدل عددی با مقادیر ارائه شده در آیین نامه Eurotop 2016 در شکل ۱۰ مقایسه شده‌است[۱۷].



شکل ۱۰ – مقایسه نتایج مطالعات با EUROTOP 2016

با توجه به شکل ۱۰ و اختلاف بین نتاج روگذری حاصل از مدل عددی و آیین نامه Euro top 2016 تعریف پارامتر بی بعد جدید با در نظر گرفتن شرایط کیسون حفره‌دار و اضافه کردن عرض حفره کیسون به اعداد بی بعد استفاده شده پیشنهاد می‌شود.

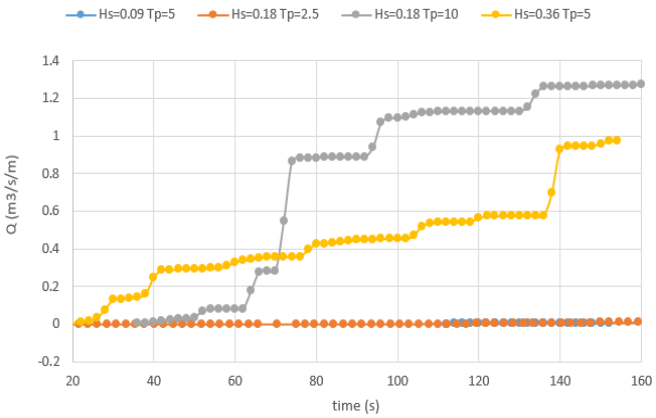
در ادامه باتوجه به مدلسازی‌های انجام شده، برای هندسه حفره‌دار نوع اول و دوم و شرایط مختلف موج، مقادیر روگذری به ترتیب بصورت شکل ۱۱ و شکل ۱۲ می‌باشد.



شکل ۱۱ – اثر مشخصات موج در مقدار روگذری موج از موج شکن کیسونی حفره‌دار نوع یک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.6.3]



شکل ۱۲ - اثر مشخصات موج در مقدار روگذری موج از موج شکن کیسونی حفره‌دار نوع دو

مقایسه نتایج ارائه شده در هر یک از نمودارها نشان از اهمیت قابل توجه پریود موج در مقدار روگذری دارد، به صورتی که با دو برابر شدن پریود و نصف شدن ارتفاع موج، مقدار روگذری در نوع اول ۱۶٪ و در نوع دوم ۳۰٪ افزایش پیدا می‌کند. همانطور که در نمودارها مشخص است، اولین جهش روگذری نسبت به سایر جهش‌ها قابل توجه بوده‌است و در ادامه با کاهش عمق آب در پای سازه به دلیل برگشت موج حاصل از بالاروی و روگذری، مقدار روگذری کاهش میابد.

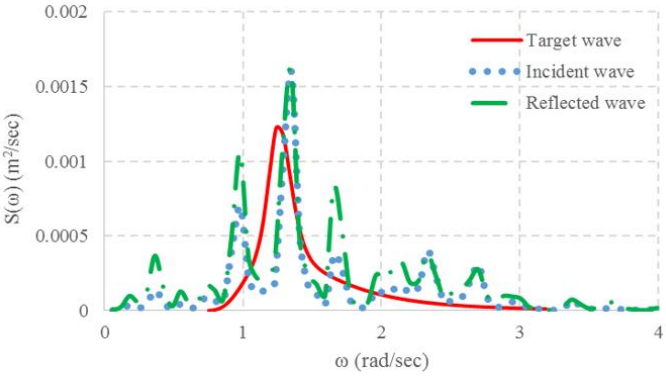
با مقایسه نتایج روگذری انجام شده از موج‌شکن نوع اول و دوم و بررسی اثر هندسه حفره‌های موجود در بدنه صندوقه کیسون، مشخص می‌شود که در نوع دوم و با توجه به افزایش حجم محفظه، نسبت به نوع اول مقدار روگذری کمتری رخ می‌دهد.

۵-۳- ضریب انعکاس موج

ضریب انعکاس موج از موج‌شکن‌های کیسونی، یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد این نوع سازه دریایی می‌باشد. از این‌رو در این بخش از مطالعات به بررسی ضریب انعکاس امواج از موج‌شکن کیسونی حفره‌دار پرداخته شده است.

روش‌های جداسازی موج انعکاسی از موج برخوردی در مراجع مختلف ارائه شده است [۱۸]، [۱۹]. با توجه به اینکه در مطالعات عددی انجام گرفته امکان استخراج تغییرات تراز آب در هر موقعیتی از فلوم موج عددی فراهم می‌باشد، از متدلوژی به‌روزتر روش Zelt و Skjelbreia در این مطالعات استفاده شده است [۱۹].

در شکل ۱۳ نمونه‌ای از نتایج جداسازی امواج نشان داده شده است. با توجه به اطلاعات مدل، طیف قرمز مرز ورودی مدل، طیف آبی موج برخوردی و طیف سبز موج انعکاسی می‌باشد.



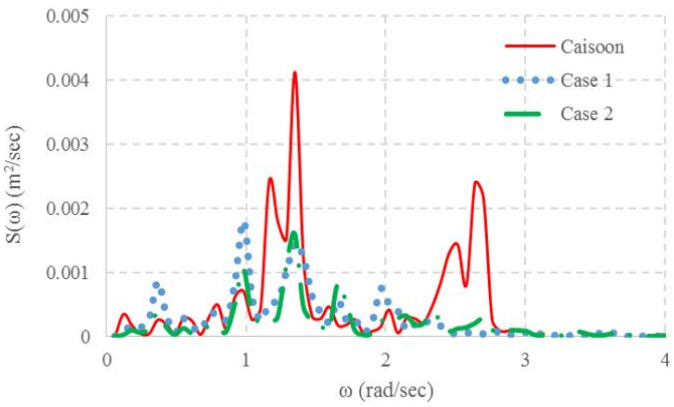
شکل ۱۳- نمونه‌ای از نتایج جداسازی امواج برای موج با ارتفاع مشخصه ۰/۰۹ متر و پریود ۵ ثانیه در موج‌شکن حفره‌دار نوع اول

بر اساس محاسبات انجام گرفته، میزان متوسط ضریب انعکاس (C_R) به صورت رابطه (۳) قابل محاسبه می‌باشد.

$$C_R = \sqrt{\frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S_R(f)df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S_I(f)df}} \qquad (۳)$$

که در آن S_R طیف موج بازگشتی و S_I طیف موج برخوردی می‌باشد.

در شکل ۱۴ تغییرات طیف موج انعکاسی برای سه نوع موج‌شکن کیسونی و موج‌شکن کیسونی حفره‌دار نوع اول و دوم نشان داده شده است. مقدار ضریب انعکاس محاسبه شده برای این سه نوع موج‌شکن به ترتیب برابر ۰/۹۵، ۰/۸۱ و ۰/۸ است. مقادیر بدست آمده نشان از کاهش حدود ۱۵-۲۰ درصدی مقدار ضریب انعکاس دارد. البته همانگونه که در شکل نیز مشخص می‌باشد، ماهیت امواج بازگشتی نیز در موج‌شکن‌های حفره‌دار تغییر کرده است.

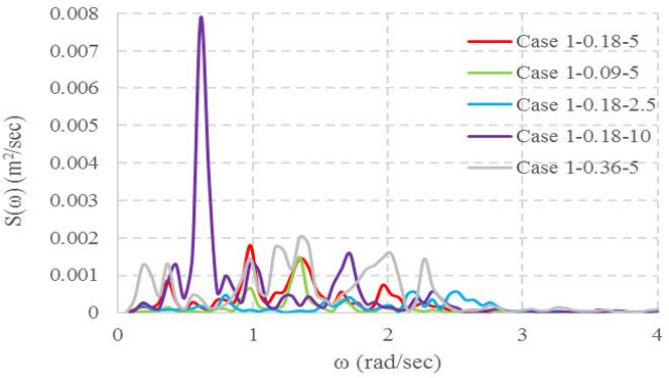


شکل ۱۴- مقایسه طیف انعکاسی از موج‌شکن کیسونی، موج‌شکن کیسونی حفره‌دار نوع اول (Case 1) و موج‌شکن کیسونی نوع دوم (Case 2) برای موج با ارتفاع مشخصه ۰/۱۸ متر و پریود ۵ ثانیه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.6.3]

در شکل ۱۵ مقایسه طیف موج انعکاسی موج‌شکن کیسونی نوع اول برای حالت‌های مختلف موج مورد بررسی نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌گردد در پریود موج ده ثانیه یک پیک در طیف موج برگشتی در فرکانس‌های کوچک می‌باشد که نشان از شدت انعکاس امواج بلند دارد. همچنین در جدول ۱ مقادیر ضریب انعکاس برای شرایط مختلف موج و نوع کیسون ارائه شده است. همانگونه که مشخص است، با افزایش پریود موج، میزان انعکاس موج نیز افزایش یافته است.

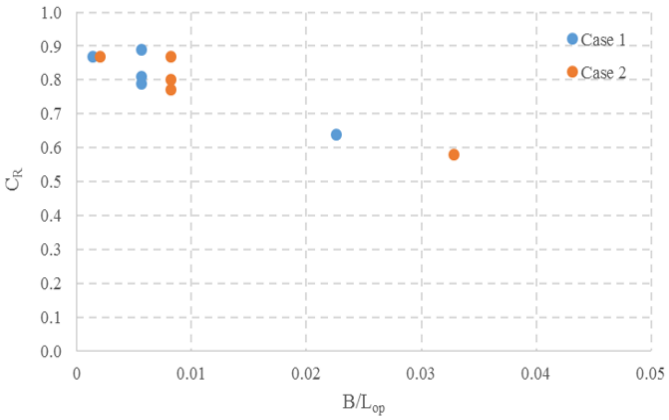


شکل ۱۵- مقایسه طیف موج انعکاسی موج‌شکن کیسونی نوع اول برای حالت‌های موج مختلف

جدول ۱- ضرایب انعکاس برای مشخصات موج مختلف

مشخصات موج	Case 1	Case 2
0.18 m – 5.0 s	0.82	0.80
0.09 m – 5.0 s	0.78	0.78
0.18 m – 2.5 s	0.64	0.58
0.18 m – 10.0 s	0.87	0.87
0.36 m – 5.0 s	0.89	0.88

با توجه به مطالعات پیشین، تغییرات ضریب انعکاس (C_R) نسبت به عرض نسبی اتاقک موج (B/Lop) مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۶ این تغییرات نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۶ می‌توان دریافت که با افزایش نسبت عرض اتاق موج به طول موج برخوردی میزان انعکاس به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۶- تغییرات ضریب انعکاس موج نسبت به عرض نسبی اتاقک موج

۶- نتیجه‌گیری

همانطور که نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد با مقایسه مقادیر و بردارهای سرعت موج در مقابل موج‌شکن در موقعیت رخداد بیشترین روگذری مشخص می‌شود با حفره‌دار شدن کیسون سرعت افقی موج روی کیسون می‌تواند تا نصف کاهش پیدا کند که نشان از عملکرد بیهنه هندسه کیسون حفره‌دار می‌باشد. همانطور که شکل نشان می‌دهد با بزرگتر شدن چنبره جلوی موج‌شکن موج برگشتی از چنبره حجم بیشتری داشته و باعث زوال بیشتر موج ورودی و کاهش سرعت آن می‌شود.

در صورت استفاده از کیسون حفره‌دار، سرعت سیال در مواجه با موج‌شکن (خصوصا کیسون حفره‌دار نوع ۲) بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همانطورکه نتایج نشان می‌دهد حفره‌دار شدن کیسون می‌تواند تا ۵۰٪ باعث کاهش سرعت سیال شود (شکل ۹).

پریود موج از اهمیت قابل توجهی در مقدار روگذری دارد، بطوریکه با دو برابر شدن پریود و نصف شدن ارتفاع موج، مقدار روگذری در موج‌شکن حفره دار نوع اول ۱۶٪ و در نوع دوم ۳۰٪ افزایش پیدا می‌کند (شکل ۱۱ و شکل ۱۲)

با مقایسه نتایج روگذری انجام شده از موج‌شکن نوع اول و دوم و بررسی اثر هندسه حفره‌های موجود در بدنه صندوقه کیسون، مشخص می‌شود که در نوع دوم، با توجه به افزایش حجم محفظه موج، نسبت به نوع اول مقدار روگذری کمتری رخ می‌دهد (شکل ۷، شکل ۱۱ و شکل ۱۲).

با تحلیل موج برگشتی از موج‌شکن مشخص می‌شود که حفره‌دار شدن موج‌شکن باعث کاهش قابل توجه ضریب برگشت موج می‌شود بطوری که ضریب برگشت موج از موج‌شکن کیسونی حفره‌دار نوع دوم ۰/۸ و از کیسون بدون حفره ۰/۹۵ می‌باشد. (شکل ۱۴).

بررسی تغییرات ضریب انعکاس (C_R) نسبت به عرض نسبی اتاقک موج (B/L_{op}) نشان از این دارد که با افزایش نسبت عرض اتاقک به طول موج برخوردی میزان انعکاس به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد (شکل ۱۶).

کلید واژگان

[1] Volume Averaged Reynolds Averaged Navier Stoke's
[2] Computational Fluid Dynamics
[3] flow over backward facing step
[4] Recirculation region

۱۰- مراجع

1. Sakakiyama, T. and Liu, P.L.F., (2001), Laboratory experiments for wave motions and turbulence flows in front of a breakwater, Coast. Eng., vol. 44, no. 2, pp. 117–139.
2. Kudella, M., Oumeraci, H., De Groot, M.B. and Meijers, P., (2006), Large-scale experiments on

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.6.3]

pore pressure generation underneath a caisson breakwater, J. Waterw. port, coastal, Ocean Eng., vol. 132, no. 4, pp. 310–324.

3. Engineering, C. and Sv, A., (2000), EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON CAISSON BREAKWATER SLIDING Piero Ruol, Paolo Martin, Thomas Lykke Andersen and Luca Martinelli 1, pp. 1–11.
4. Suh, K.D., and Park, W.S., (1995), Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters, Coast. Eng., vol. 26, no. 3–4, pp. 177–193.
5. Suh, K.D., Park, J.K., and Park, W.S., (2006), Wave Reflection from Partially-Perforated-Wall Caisson Breakwater, Coast. Eng., vol. 26, no. 3–4, pp. 177–193.
6. Losada, I.J., Lara, J.L., Guanche, R., and Gonzalez-Ondina, J.M., (2008), Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters, Coast. Eng., vol. 55, no. 1, pp. 47–62.
7. Huang, Zhenhua, Yucheng Li, and Yong Liu. (2011), Hydraulic performance and wave loadings of perforated/slotted coastal structures: A review." Ocean Engineering 38.10: 1031-1053.
8. Chen, Xuefeng, Yucheng Li, and Liu Long. (2011), Simulation Of Irregular Wave Pressure On Perforated Breakwaters. Coastal Engineering Proceedings 1.32 : 29.
9. Misra, S., Narayanaswamy, M., Bayram, A., and Shi, F., (2011), Optimizaton of Caisson Breakwater Superstructure Geometry Using 2DV RANS-VOF Numerical Model, Coast. Eng. Proc., vol. 1, no. 32, p. 49.
10. Higuera, P.C., (2015), Aplicaci´on de la Din´amica de Fluidos Computacional a la Acci´on del Oleaje Sobre Estructuras, Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, 2015.

11. 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)

12. Tsai, Ching-Piao, Chun-Han Ko, and Ying-Chi Chen. (2018), Investigation on Performance of a Modified Breakwater-Integrated OWC Wave Energy Converter. Sustainability 10.3 : 643.
13. Ito, V., 12. Historical development of breakwater structures in the world, in Coastal Structures and Breakwaters: Proceedings of the Conference Organized by the Institution of Civil Engineers, and Held in London on 6-8 November 1991, 1992, p. 193.
14. Goda, Y. (1994), Dynamic response of upright breakwaters to impulsive breaking wave forces, Coast. Eng., vol. 22, no. 1–2, pp. 135–158, 1994. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, p.1787-1790.
15. Hirt, C. W., & Nichols, B. (1988). Flow-3D User's Manual. Flow Science Inc.
16. D. M. Driver, H. L. Seegmiller, and J. G. Marvin, "Time-dependent behviour of a reattaching shear layer," AIAA Journal, vol. 25, no. 7, pp. 914–919, 1987.
17. S. Edition, EurOtop Manual on wave overtopping of sea.
18. Mansard, E.P.D. & Funke, E.R. (1987) On the reflection analysis of irregular waves. Tech. Rep. TR-HY-017, NRCC No. 27522, National Research Council of Canada.
19. Zelt, J.A. & Skjelbreia, J.E. (1992) Estimating incident and reflected wave fields using an arbitrary number of wave gauges. Coastal Engineering, ASCE, pp. 777-789.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.6.3]