

بررسی اثر شکل حفرات موج شکن حفره دار بر استهلاک انرژی امواج برخوردی به روش عددی

محمود قاسمی زاده^۱، محمدجواد کتابداری^۲

ketabdar@aut.ac.ir

۱- کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

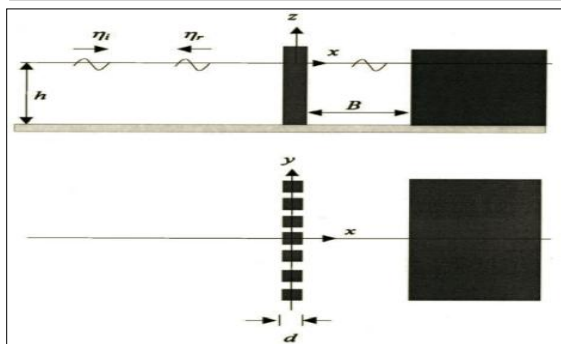
چکیده

موج شکن های حفره دار نسل جدیدتر موج شکن های قائم هستند که در آنها مشکل انعکاس امواج و نیروهای زیاد وارد بر سازه تا حد زیادی حل شده است. در این مقاله به بررسی اثر شکل حفره های موج شکن حفره دار قائم بر مقدار ضریب انعکاس تحت اثر امواج تنهای برخوردی به روش عددی پرداخته شده است. موج شکن قائم مورد بررسی دارای صفحه تک و دابل با چهار شکل حفره و چهار مقدار درصد بازشدگی مختلف صفحه روبرویی است. شبیه سازی این موج شکن در حالت سه بعدی به روش حجم محدود در نرم افزار Flow-3D انجام گردید. برای مدل سازی سطح آزاد جریان از مدل جزء حجم سیال (VOF) و به منظور محاسبه آشفتگی از مدل k-ε-RNG استفاده شد. نتایج نشان داد که در موج شکن با صفحات تک با افزایش مقدار تخلخل، به مقدار انعکاس موج نیز افزوده می شود بطوریکه صفحات با تخلخل ۴۰٪ بیش از ۹۰٪ موج تابشی را منعکس می کنند. همچنین مقدار ضریب انعکاس با افزایش نسبت بدون بعد B/L که در آن B عرض اتاقک موجگیر و L طول موج تابشی است به صورت نوسانی کم و زیاد می شود. همچنین موج شکن با صفحات دابل نسبت به صفحات تک باعث استهلاک انرژی بیشتری در حدود ۲۰ الی ۲۵ درصد می شود.

واژگان کلیدی: موج شکن حفره دار قائم، امواج تنها، روش حجم سیال، مدل آشفتگی RNG، نرم افزار Flow-3D.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۳/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۴/۱۰/۰۳



شکل (۱) نمای برش عرضی و پلان موج شکن حفره دار.

ترت و همکاران (۱۹۶۸) مطالعاتی را در زمینه انعکاس امواج و نیروهای موج بر روی موج شکن‌های حفره دار انجام دادند [۲]. مطالعات آزمایشگاهی توسط کندو و توما (۱۹۷۲) برای پیدا کردن تاثیر خواص امواج و ضخامت سازه بر روی انعکاس و گذر امواج انجام شد [۳]. ماسل و می (۱۹۷۷) یک مدل تحلیلی را برای دست آوردن انعکاس، انتقال و پراکنش مربوط به امواج تصادفی در برخورد با موج شکن‌ها توسعه دادند [۴]. کندو (۱۹۷۹) برآوردی را برای ضرایب انعکاس و انتقال بر روی موج شکن‌های قائم نفوذپذیر و غیر قابل نفوذ دارای دو دیواره متخلخل ارائه کرد [۵]. هاگیوارا (۱۹۸۴) مطالعات تحلیلی را برای یافتن ضرایب انعکاس با استفاده از معادله مشتق شده انتگرال برای مؤلفه افقی سرعت بر روی دیواره جلویی ارائه کرد [۶]. بنت و همکاران (۱۹۹۲) نظریه‌ای را برای محاسبه خواص انعکاس موج از روی صفحه موج شکن ارائه کردند [۷]. مالایاچاری و ساندار (۱۹۹۴) مدل عددی را به منظور بررسی ویژگی‌های انعکاس از روی دیواره‌های ساحلی قائم‌نفوذپذیر توسعه دادند [۸]. ایساکسون و همکاران (۱۹۹۸) ارتباط آنالیزهای تئوری به همراه مدل‌های عددی را برای ارزیابی عملکرد موج شکن با صفحه جلویی حفره دار ارائه کردند [۹]. ایساکسون و همکاران (۲۰۰۰) تاثیر تخلخل، هندسه موج شکن و عمق نسبی آب را بر روی انعکاس امواج بررسی کردند [۱۰]. ژو و چانگ (۲۰۰۱) پیشنهاد یک مدل عددی را جهت بررسی اندرکنش بین امواج و دیواره‌های ساحلی متخلخل دادند [۱۱]. رکوجو و همکاران (۲۰۰۲) به ارائه یک مدل ریاضی برای حل جریان پتانسیل اطراف و درون موج شکن حفره دار پرداختند [۱۲]. سو و همکاران (۲۰۰۱) یک مدل عددی را برای پیش‌بینی بازتاب امواج نامنظم که به طور

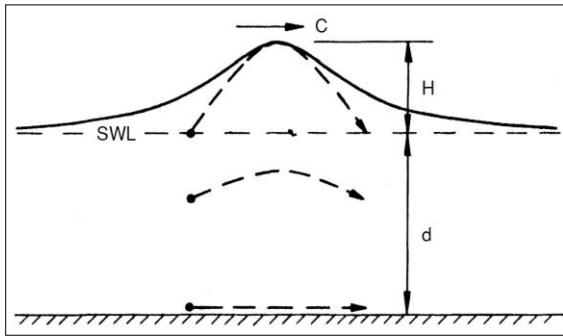
۱- مقدمه

موج شکن‌ها سازه‌هایی هستند که از بنادر و سواحل در مقابل امواج و جریان‌های ساحلی محافظت می‌کنند. امروزه توسعه و ساخت موج شکن‌ها به صورت گسترده‌ای جهت جلوگیری از فرسایش ساحلی، فراهم نمودن یک حوضچه آرامش جهت کاهش امواج مزاحم برای بارگیری و باراندازی کشتی‌ها و همچنین به منظور ایجاد محیطی امن و کم تلاطم در کنار ساحل برای حفاظت از تاسیسات بنادر در برابر دریاهای خشن انجام می‌گردد. موج شکن‌ها از نظر نوع سازه عمدتاً به انواع توده‌سنگی، قائم کیسونی، مرکب و شناور تقسیم می‌شوند.

موج شکن‌های حفره دار نوعی از موج شکن‌های قائم هستند که برای اولین بار در سال ۱۹۶۱ میلادی توسط جارلان معرفی شدند [۱]. او موج شکنی با دیواره جلویی متخلخل پیشنهاد داد که انرژی موج در فضای بین دیواره متخلخل و دیواره صلب انتهایی مستهلک می‌شد. ایجاد جریان‌های گردابه‌ای و آشفتگی در نزدیکی حفره‌های دیواره جلویی این نوع موج شکن موجب میرایی امواج ورودی و کاهش قابل توجه بارهای ناشی از ضربه موج و سرریزی موج بر این نوع سازه‌ها می‌گردد. این سازه‌ها عملکردهای هیدرولیکی، هزینه‌های نهایی، کنترل کیفیت، جنبه‌های زیست محیطی، زمان ساخت و تعمیر و نگهداری را بهبود بخشیده‌اند. به این خاطر این نوع موج شکن‌ها در بین مهندسان محبوبیت فراوانی را به دست آورده‌اند و به طور گسترده‌ای در دنیا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نوع موج شکن‌ها می‌توانند به صورت تکی، دابل و یا چند لایه باشند. در این تحقیق به بررسی اثر شکل‌های مختلف حفره‌های موج شکن حفره دار قائم بر انعکاس موج تنهای برخوردی با روش حجم محدود پرداخته شده است.

۲- پیشینه تحقیق

در عمل، موج شکن‌های حفره دار دارای دو مدل اصلی هستند. یک مدل با دو دیواره حفره دار و مدل دیگر دارای دیواره صلب انتهایی و دیواره‌های حفره دار جلویی. شکل (۱) تیپ هندسه موج شکن حفره دار و امواج نرمال تابشی را نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر h ، B و d به ترتیب عمق ثابت آب، عرض اتاقک موجگیر و ضخامت دیواره حفره دار هستند.



شکل (۲) نمای نیمرخ سطح برای یک موج تنها.

$$k = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{3H}{4d}} \quad (۲)$$

$$C = \sqrt{gd} \left(1 + \frac{H}{2d}\right) \quad (۳)$$

طول موج و دوره تناوب این موج نیز از روابط زیر استخراج می‌شوند:

$$L = \frac{2\pi}{k} \quad (۴)$$

$$T = \frac{2\pi}{k.C} \quad (۵)$$

کل انرژی در واحد تاج عرض موج تنها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E = \frac{8}{3\sqrt{3}} \rho g (Hd)^{1.5} \quad (۶)$$

برای ضریب انعکاس و گذردهی موج نیز داریم:

$$C_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (۷)$$

$$C_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (۸)$$

در روابط فوق H_i ، H_r ، H_t و H_i به ترتیب بیانگر ارتفاع موج انعکاسی، عبوری و تابشی هستند.

توازن معادله‌ی انرژی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(۹)$$

در $E_i = E_r + E_t + \varepsilon$ معادله بالا E_i ، E_r ، E_t و ε به ترتیب بیانگر انرژی موج تابشی، انرژی موج انعکاسی، انرژی موج عبوری و مقدار استهلاک انرژی موج هستند. براساس روابط (۶) تا (۹) مقدار استهلاک انرژی موج به صورت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_L = \frac{\varepsilon}{E_i} = 1 - C_r^{1.5} - C_t^{1.5} \quad (۱۰)$$

پارامتر C_t در صورتی در این رابطه مقدار دارد که دیواره انتهایی موج‌شکن که به سمت ساحل است، دارای حفره باشد و جریان بتواند از آن عبور کند.

معمول بر روی دیواره موج‌شکن‌های صندوقه‌ای حفره‌دار حادث شده بود، مطالعه کردند [۱۳]. آنها نتیجه گرفتند که ضریب بازتاب امواج نامنظم از دیواره موج‌شکن صندوقه‌ای حفره‌دار، بستگی به فرکانس موج دارد. سو و همکاران (۲۰۰۶) یک مدل عددی دیگر را که مقدار انعکاس امواج نامنظم را از روی بخشی از موج‌شکن صندوقه‌ای حفره‌دار محاسبه می‌کرد، ارائه دادند [۱۴]. آنها مدل توسعه یافته قبلی را که ضریب انعکاس را برای امواج منظم و دیواره‌های کامل متخلخل محاسبه می‌کرد، برای محاسبه ضریب انعکاس برای بخشی از قسمت حفره‌دار و امواج نامنظم اصلاح کردند. کتابداری و ورجاوند (۲۰۰۸) یک مدل اصلاح شده از مدلی که ساهو و همکاران (۲۰۰۱) آن را پیشنهاد داده بودند را به منظور محاسبه ضریب انعکاس فرکانس متوسط، توسط مفهوم پتانسیل سرعت توسعه دادند [۱۵].

ملاحظه می‌گردد که در رابطه با برخورد موج به موج‌شکن حفره‌دار بعضی از مدل‌های تحلیلی و عددی توسعه یافته‌اند. بیشتر مطالعات با در نظر گرفتن امواج منظم بر روی موج‌شکن‌هایی انجام شده که دارای دیواره جلویی حفره‌دار، یک هسته و دیواره صلب انتهایی است و تلاش‌های کمی برای مطالعه موج‌شکن‌هایی با چندین دیواره متخلخل و یا دیواره عقب و جلویی متخلخل انجام شده است. بیشتر تحقیقات به منظور مطالعه بر روی انعکاس موج با پارامترهای گوناگون امواج و ساختارهای هندسی گوناگون سازه بوده است. همچنین مطالعات آزمایشگاهی در این زمینه بسیار محدود است.

۳- پارامترهای موج

در این مقاله سازه تحت اثر موج تنهای برخوردی مدل گردیده است. یک موج تنها دارای یک تاج است که به طور کامل در بالای تراز ایستایی قرار دارد و حوض وجود ندارد. این موج در مقایسه با امواج نوسانی حالت انتقالی دارد و دارای طول و پریود موج نامحدود است [۱۶]. شکل (۲) پروفیل این موج را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. معادله نیمرخ سطح موج تنها به صورت زیر است:

$$\eta_i = H \sec h^2 [k(x - Ct)] \quad (۱)$$

که در این رابطه H و d به ترتیب ارتفاع موج و عمق آب هستند. C و k به ترتیب عدد موج و سرعت موج بوده و رابطه آنها به صورت زیر است:

۴- معادلات حاکم و حل عددی آن‌ها

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل پیوستگی و اندازه حرکت هستند. در جریان‌های تراکم ناپذیر روابط ۱۱ و ۱۲ به ترتیب بیانگر این معادلات در جهت i هستند [۱۷]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \nu \nabla^2 u_i \quad (12)$$

که در این رابطه u_i مولفه‌ی سرعت لحظه‌ای در جهت i ، ν لزجت سینماتیکی سیال، ρ جرم مخصوص سیال، g_i مولفه‌ی شتاب ثقل در جهت i و p فشار در هر نقطه از سیال است. به منظور مدل‌سازی سطح آزاد، روش VOF مورد استفاده قرار گرفت که در آن تابعی تحت عنوان $F(x,y,t)$ بگونه‌ای تعریف می‌شود که مقدار آن برای هر سلول که کاملاً از سیال اشغال شده یک، برای سلول‌های نیمه پر عددی بین صفر و یک و برای سلول‌های خالی صفر است. زمانیکه میانگین این تابع برای یک سلول محاسباتی به دست آید آنگاه حجم اشغال شده‌ی سلول توسط سیال مشخص می‌شود. سلول‌هایی دربرگیرنده‌ی سطح آزاد خواهند بود که مقدار F برای آنها بین صفر و یک و نیز دارای حداقل یک سلول با مقدار صفر در همسایگی خود باشند. علاوه بر تعیین سلول‌های دربرگیرنده‌ی سطح آزاد، تابع F می‌تواند برای تخمین موقعیت سیال در این سلول‌ها نیز به کار گرفته شود [۱۸].

به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر، در این تحقیق از مدل آشفتگی RNG استفاده شده است. این مدل یکی از شکل‌های معروف روش $k-\varepsilon$ است که در آن یک ترم اضافی در معادله ε وارد می‌شود که باعث افزایش دقت محاسباتی در جریان کرنشی می‌گردد. این مدل در جریان چرخشی کارایی بیشتری دارد و جهت تعیین اعداد آشفتگی پیراندتل از رابطه‌ی تحلیلی استفاده می‌کند. معادلات حاکم در این مدل به صورت روابط زیر هستند [۱۹]:

$$p \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (13)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (14)$$

در این روابط μ_{eff} لزجت گردابه‌ای موثر است. α_k و α_ε مقادیر معکوس عدد پیراندتل آشفتگی هستند که در جریان‌های با عدد رینولدز بالا تقریباً برابر $1/3.63$ می‌باشند. G_k و G_b عبارات چشمه معادل k هستند که به

ترتیب اثرات شناوری و گرادیان سرعت میانگین را در معادله اعمال می‌کنند. ثابت $C_{3\varepsilon}$ اثر سرعت در جهت ثقل و عمود بر آن را بیان می‌کند. عبارت R باعث اصلاح این معادله در نواحی با نرخ کرنش زیاد می‌شود.

در روش حجم محدود که یکی از حالات ویژه باقیمانده وزنی است، ابتدا دامنه به تعدادی حجم کنترل غیرپوشان تقسیم شده به نحوی که هر حجم کنترل حول یک نقطه از میدان قرار می‌گیرد. سپس از معادله دیفرانسیل روی حجم کنترل انتگرال‌گیری شده و معادلات به صورت عددی گسسته‌سازی می‌شوند [۲۰]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

با انتگرال‌گیری از معادله فوق بر روی یک حجم کنترل کوچک خواهیم داشت:

$$\int_{\Delta x} \frac{\partial f}{\partial t} dx + \int_{\Delta x} \frac{\partial F}{\partial x} dx = 0 \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta x} f dx + F_{j+0.5} - F_{j-0.5} = 0 \quad (17)$$

ایده اصلی در این روش گسسته‌سازی، تقریب معادلات دیفرانسیل جزئی در نقاط گسسته نیست، بلکه شرط برقراری، اصل بقا جرم است. پس از انتگرال‌گیری بر روی حجم کنترل مورد نظر مربوط به هر گره، عبارتی که در معادلات دیفرانسیل مربوطه وجود دارند باید به نحوی گسسته شوند که فرمول حاصل پایدار و دقیق باشد. برای حل معادلات دیفرانسیلی، محدوده حل را شبکه‌بندی و معادلات دیفرانسیل با کمک روش تفاضل محدود گسسته سازی شده و روی حجم کنترل مورد نظر حل می‌گردد.

۵- مشخصات مدل‌های ساخته شده

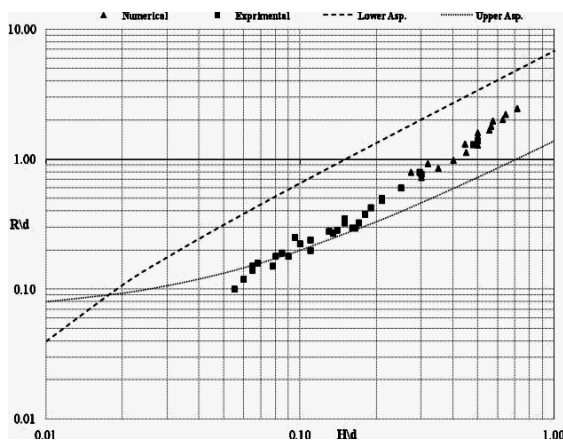
در این تحقیق تعداد ۴ شکل مختلف حفره (دایروی، مربعی، مستطیلی قائم و افقی) به همراه ۴ مقدار تخلخل مختلف (۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد) نسبت به ۹ حالت مختلف عدد بدون بعد B/L که L طول موج تابشی است مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای موج و مشخصات موج‌شکن‌های مورد بررسی قرار گرفته به ترتیب در جداول شماره ۱ و ۲ آورده شده است. دلیل انتخاب بازه تخلخلی بین ۱۵ تا ۴۰ درصد برای دیواره‌های دریایی، اثرگذاری بیشتر آنها در این بازه است. در شکل (۳) مقدار ضریب انعکاس از یک دیوار متخلخل با حفرات دایروی شکل و موثر بودن بازه انتخابی نشان داده شده است. در جدول

برای موج شکن با صفحات حفره دار دابل چهار فاصله مختلف بین دو صفحه متخلخل که با B' معرفی شده است به صورت t ، $1.5t$ ، $1.75t$ و $2t$ در نظر گرفته شده است.

۶- صحت سنجی مدل

به منظور صحت سنجی مدل ساخته شده توسط نرم افزار در این تحقیق، یک دیواره دریایی صاف با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق تحت اثر برخورد امواج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بالاروی بی بعد بر حسب ارتفاع موج بی بعد مدل با نتایج آزمایشگاهی هال و واتز [۲۱] در شکل (۵) مورد مقایسه قرار گرفت. همانطور که در این شکل مشاهده می گردد نتایج مدل و آزمایش تطابق مناسبی با یکدیگر دارند. که در آن d ، H و R به ترتیب بیانگر عمق ثابت آب در جلوی دیواره شیبدار، ارتفاع موج و ارتفاع بالاروی موج از روی دیواره دریایی بر حسب متر هستند.

به منظور بهینه کردن حافظه مورد استفاده کامپیوتر و زمان محاسباتی، شبکه مربوط به مدل موج شکن با دیواره تک دارای حفرات مستطیلی قائم با تخلخل ۳۰ درصد، عرض اتاق موجگیر ۰/۵ متر و ارتفاع موج ۰/۲ متر، آنالیز حساسیت سنجی شد. نتایج در جدول (۳) و شکل (۶) آمده است. همانگونه که این جدول نشان می دهد از تعداد شبکه دویست هزار به بالاتر، مقدار انعکاس موج از این موج شکن تغییر محسوسی نمی کند. لذا در این تحقیق تمامی مدل ها با تعداد شبکه دویست هزار مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی هال و واتز با مدل موجود برای دیواره با شیب ۱:۱.

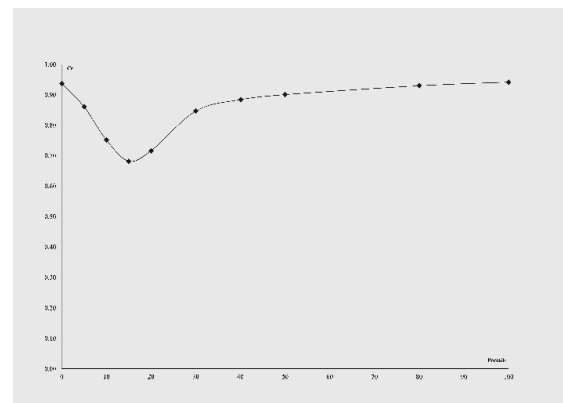
(۲) پارامترهای a ، b و t به ترتیب بیانگر عرض، ارتفاع و ضخامت صفحه حفره دار هستند. همچنین نوع حفرات C ، H ، S و V بیانگر اشکال دایروی، مستطیلی افقی، مربعی و مستطیلی قائم هستند. به عنوان نمونه از شکل حفرات صفحه جلویی موج شکن و درصد تخلخل آن ها، شکل (۴) آورده شده است.

جدول (۱) پارامترهای موج برخوردی.

ارتفاع موج (m)			عمق ثابت آب (m)
۰/۱۵	۰/۱۷۵	۰/۲	۰/۵

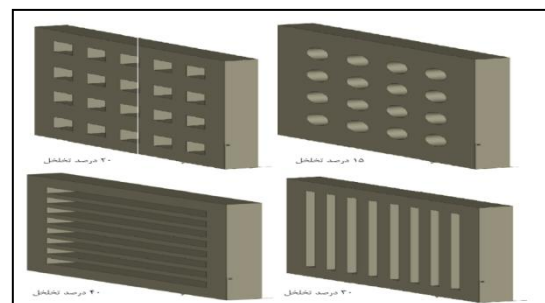
جدول (۲) پارامترهای موج شکن های مورد مطالعه.

شکل	عرض موجگیر (m)	اتاقک موجگیر (m)	ابعاد صفحه متخلخل (m)			درصد تخلخل صفحه			
			a	b	t	۱۵	۲۰	۳۰	۴۰
C	*	*	۰/۱	۱	۱	*	*	*	*
H	*	*	۰/۱	۱	۱	*	*	*	*
S	*	*	۰/۱	۱	۱	*	*	*	*
V	*	*	۰/۱	۱	۱	*	*	*	*



شکل (۳) مقدار ضریب انعکاس از یک دیوار متخلخل با

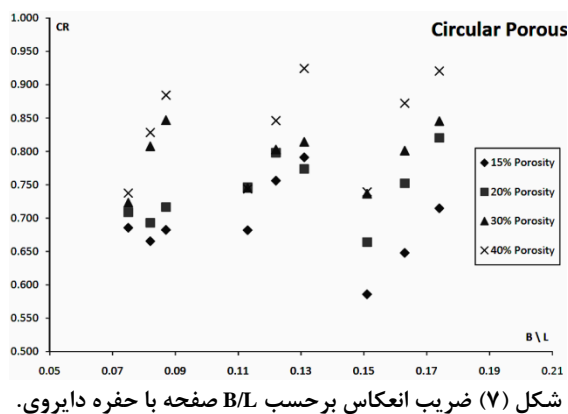
$$B/L=0.087.$$



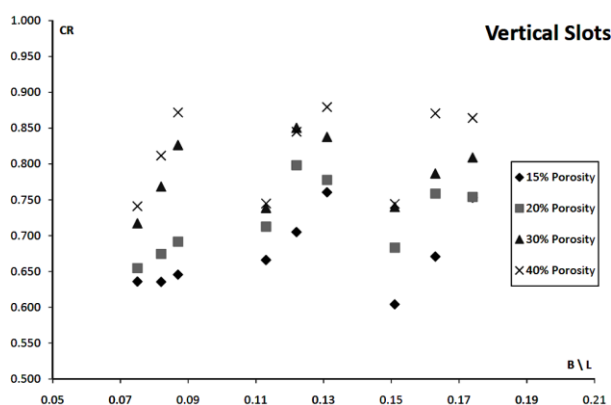
شکل (۴) صفحات حفره دار با چهار مدل مختلف حفره دایره ای مربعی شیار قائم و شیار افقی و تخلخل های به ترتیب ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد.

0.075, 0.113, 0.151 دارای کمترین مقدار و در نسبت‌های 0.087, 0.131, 0.174 دارای بیشترین مقدار انعکاس است. در واقع مقدار ضریب انعکاس با افزایش نسبت B/L به صورت نوسانی کم و زیاد می‌شود [۲۲].

این روند در موج‌شکن با حفرات مستطیلی قائم نیز دیده می‌شود (شکل (۸)). نتایج موج‌شکن با حفرات مربعی و مستطیلی افقی در اشکال (۹) و (۱۰) آمده است. ملاحظه می‌گردد که در این موج‌شکن‌ها مقدار درصد تخلخل 30% در برخی از مقادیر نسبتی B/L دارای بیشترین انعکاس موج تابشی است. اما همان روند نوسانی افزایش و کاهش ضریب انعکاس با افزایش نسبت B/L در این دو نوع موج‌شکن نیز دیده می‌شود. مشاهده گردید که با مقدار تخلخل 15% موج‌شکن با حفره مربعی در اکثر نسبت‌های B/L با کمترین مقدار ضریب انعکاس (شکل (۱۱)) و موج‌شکن با تخلخل دایروی دارای بیشترین مقدار ضریب انعکاس موج است. همچنین این امر در مورد مقدار تخلخل 40% نیز صادق است (شکل (۱۲)).



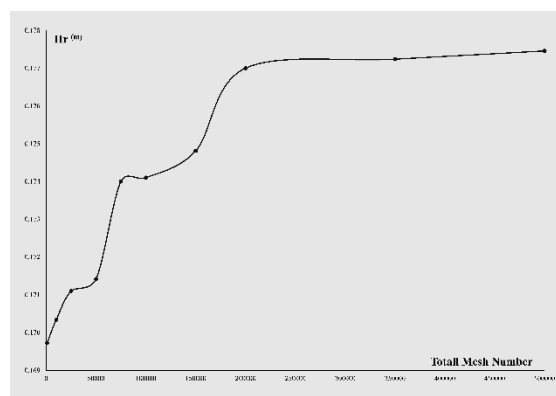
شکل (۷) ضریب انعکاس بر حسب B/L صفحه با حفره دایروی.



شکل (۸) ضریب انعکاس بر حسب B/L صفحه با حفره مستطیلی قائم.

جدول (۳) مقایسه تعداد شبکه برای مدل بالاروی موج روی موج‌شکن.

تعداد شبکه	انعکاس موج (m)	تعداد شبکه	انعکاس موج (m)
۱۰۰۰۰۰	۰/۱۷۴	۱۰۰۰	۰/۱۷۰
۱۵۰۰۰۰	۰/۱۷۵	۱۰۰۰۰	۰/۱۷۰
۲۰۰۰۰۰	۰/۱۷۷	۲۵۰۰۰	۰/۱۷۱
۳۵۰۰۰۰	۰/۱۷۷	۵۰۰۰۰	۰/۱۷۱
۵۰۰۰۰۰	۰/۱۷۷	۷۵۰۰۰	۰/۱۷۴



شکل (۶) نمودار ارتفاع موج برگشتی H_r نسبت به تعداد شبکه (دیواره حفره دار قائم با نسبت $B/L=0.5$ و $H_i=0.2$ متر).

۷- نتایج

تعداد مدل‌هایی که مورد آنالیز قرار گرفت در مجموع شامل ۱۴۴ مورد برای موج‌شکن با دیواره‌ی متخلخل تک و ۵۷۶ مورد با دیواره متخلخل دوبل بود. سهم هر کدام از موج‌شکن‌ها با نوع حفره خاص خود و چهار حالت تخلخل مختلف با دیواره تک ۳۶ حالت و دیواره دوبل ۱۴۴ حالت بود. همچنین نسبت عدد بدون بعد B/L مورد تحلیل قرار گرفته نیز شامل ۹ مورد (0.131, 0.151, 0.163, 0.174, 0.122, 0.113, 0.087, 0.082, 0.075) گردید.

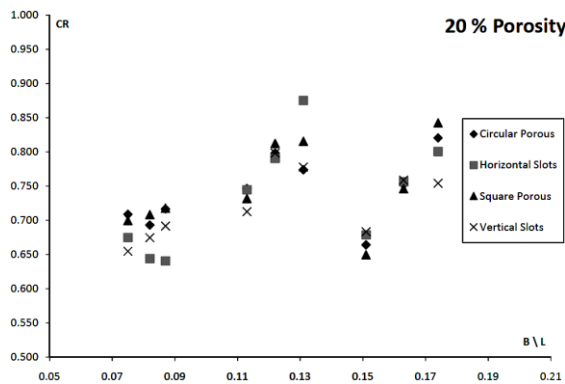
۷-۱- نتایج آنالیز موج‌شکن با دیواره تک

نتایج تحلیل برای موج‌شکن با حفرات دایره‌ای در شکل (۷) نشان داده شده است. براساس این شکل صفحه با درصد تخلخل 15% دارای کمترین مقدار انعکاس (بیشترین مقدار جذب موج) است. با افزایش مقدار تخلخل، به مقدار انعکاس موج نیز افزوده می‌شود بطوریکه صفحات با تخلخل 40% بیش از 90% موج تابشی را منعکس می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار ضریب انعکاس امواج در نسبت‌های بدون بعد B/L برابر

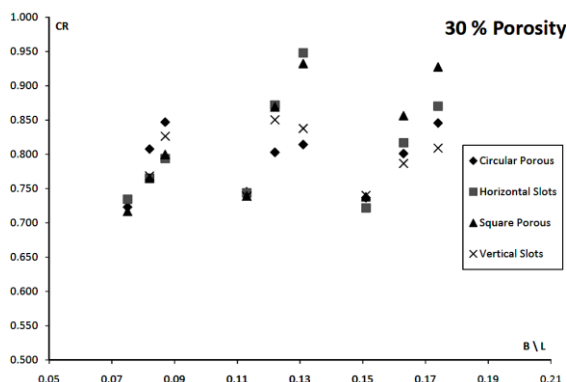
برای مقدار تخلخل ۲۰٪ مشاهده شد که صفحه با شکل حفرات قائم مستطیلی در اکثر نسبت‌های مختلف B/L دارای کمترین مقدار ضریب انعکاس است (شکل (۱۳)) و موج‌شکن با حفرات مربعی دارای بیشترین مقدار ضریب انعکاس موج در این حالت است.

برای مقدار تخلخل ۳۰٪ مشاهده شد که ضرایب انعکاس از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند. اما تقریباً می‌توان استنتاج کرد که موج‌شکن با حفرات مربعی و مستطیلی افقی در اکثر نسبت‌های مختلف B/L دارای کمترین ضریب انعکاس و حفرات مستطیلی قائم دارای بیشترین ضریب انعکاس هستند (شکل (۱۴)).

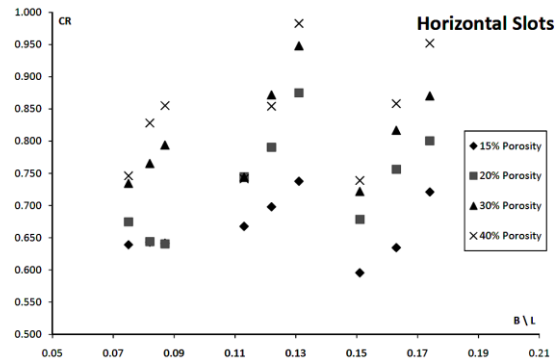
در مورد مقدار ضریب انعکاس موج‌شکن‌های با نوع حفرات مختلف و درصد تخلخل‌های گوناگون همان روند نوسانی افزایش و کاهش ضریب انعکاس با افزایش نسبت B/L دیده می‌شود.



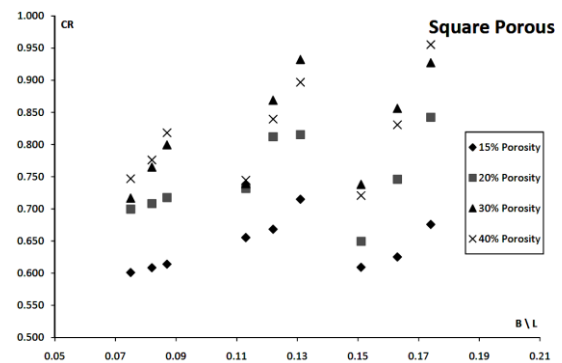
شکل (۱۳) ضریب انعکاس بر حسب B/L برای صفحات با مقدار تخلخل ۲۰٪.



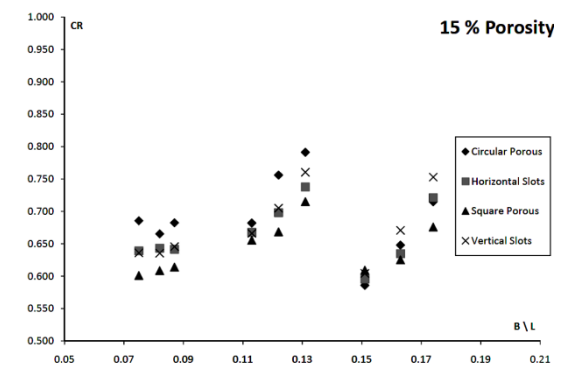
شکل (۱۴) ضریب انعکاس بر حسب B/L برای صفحات با مقدار تخلخل ۳۰٪.



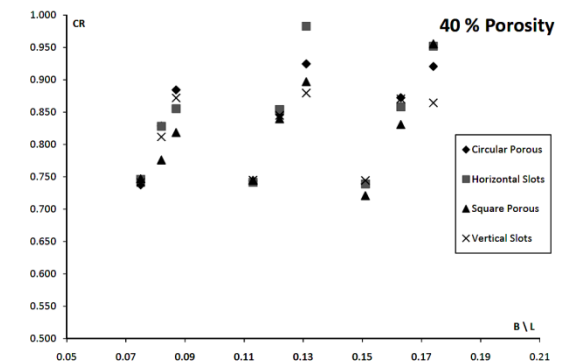
شکل (۹) ضریب انعکاس بر حسب B/L صفحه با حفره مستطیلی افقی.



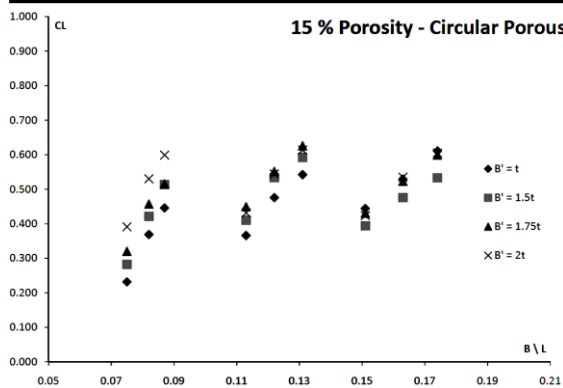
شکل (۱۰) ضریب انعکاس بر حسب B/L صفحه با حفره مربعی.



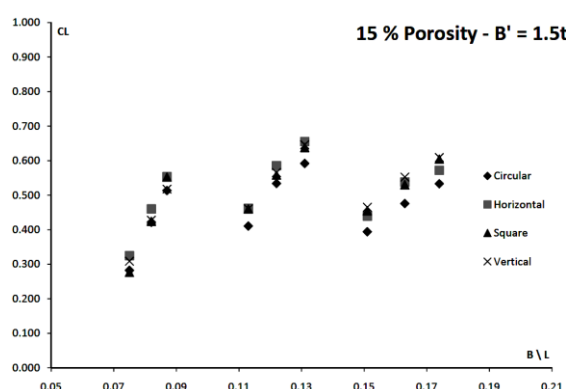
شکل (۱۱) ضریب انعکاس بر حسب B/L صفحات مختلف با مقدار تخلخل ۱۵٪.



شکل (۱۲) ضریب انعکاس بر حسب B/L صفحات با مقدار تخلخل ۴۰٪.



شکل (۱۵) ضریب انعکاس بر حسب B/L برای صفحات دوبل دایروی با مقدار تخلخل ۱۵٪.



شکل (۱۶) استهلاک موج‌شکن دوبل با تخلخل ۱۵٪ و $B'=1.5t$.

در تمامی حالت‌های (B') و درصد تخلخل‌های ۱۵ و ۲۰، حفرات دایروی دارای کمترین مقدار استهلاک انرژی هستند. در مقدار درصدهای ۳۰ و ۴۰ در برخی نسبت‌های (B/L)، حفرات مستطیل شکل قائم بعضاً استهلاکی برابر حفرات دایروی دارند.

۸ - جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مدل‌سازی عددی برای هر دو نوع موج‌شکن با صفحات متخلخل تک و دوبل نشان داد که ضریب انعکاس C_R و مقدار ضریب استهلاک انرژی C_L وابسته به عرض نسبی اتاقک موجگیر B/L ، هندسه و درصد تخلخل دیواره روبرویی است. بعلاوه ضریب انعکاس با افزایش عرض نسبی اتاقک موجگیر B/L برای تمامی انواع حفرات به صورت نوسانی افزایش و کاهش پیدا می‌کند. دیگر بررسی‌ها نشان داد که ضریب انعکاس و استهلاک با افزایش مقدار درصد تخلخل افزایش پیدا می‌کند. در موج‌شکن با صفحه تک دارای حفرات مربعی، با مقدار تخلخل ۱۵٪ و ۴۰٪ ضریب انعکاس دارای کمترین مقدار

۷-۲- نتایج آنالیز موج‌شکن با دیواره دوبل

نتایج تحلیل برای موج‌شکن با حفرات دایره‌ای نشان داد که در تمامی حالات تخلخل (۱۵ الی ۴۰ درصد)، مقدار استهلاک انرژی (C_L) برای صفحاتی که دارای فاصله $B'=t$ هستند در تمامی نسبت‌های بدون بعد B/L ، دارای کمترین مقدار است. در حالات تخلخل ۱۵ و ۲۰ درصد، در سه نسبت انتهایی B/L یعنی مقادیر ۰.۱۵۱، ۰.۱۶۳ و ۰.۱۷۴، مشاهده گردید که بعضاً صفحات دارای فاصله $B'=1.5t$ نیز دارای مقدار استهلاک انرژی برابری با صفحات دارای فاصله $B'=t$ شدند. همچنین در سه نسبت ابتدایی B/L یعنی مقادیر ۰.۰۷۵، ۰.۰۸۲ و ۰.۰۸۷، در تمامی حالات تخلخل، صفحاتی که دارای فاصله $B'=2t$ بودند، بیشترین مقدار استهلاک انرژی را دارا شدند. برای دیگر موج‌شکن‌های جارلان با دیواره‌ی دوبل نیز شکل‌های مختلف حفرات، عملکردی به مانند موج‌شکن با حفرات دایروی داشتند. در شکل (۱۵) مقدار استهلاک موج‌شکن با صفحات دوبل دایروی نشان داده شده است.

به مانند موج‌شکن جارلان با دیواره‌ی تک، این موج‌شکن نیز در مقدار تخلخل ۱۵٪ دارای بیشترین مقدار استهلاک انرژی است و با افزایش مقدار درصد تخلخل، از توانایی آن در استهلاک انرژی موج، کاسته می‌شود. با افزایش نسبت B/L مقدار استهلاک انرژی به صورت نوسانی کم و زیاد می‌شود.

در مقایسه عملکرد شکل حفرات مختلف در استهلاک انرژی موج با مقادیر درصدهای مختلف تخلخل (۱۵ الی ۴۰ درصد)، مشاهده شد که با تمامی نسبت‌های فاصله‌ی دو صفحه حفره دار یعنی ($B'=t, 1.5t, 1.75t, 2t$)، موج‌شکن با حفرات مستطیلی افقی دارای بیشترین مقدار استهلاک انرژی موج است؛ اما بعضاً مشاهده شد که در تمامی حالت‌های (B')، در سه نسبت انتهایی (B/L) یعنی مقادیر (۰.۱۵۱، ۰.۱۶۳ و ۰.۱۷۴)، صفحات حفره دار با شکل حفره‌ی مربعی نیز دارای استهلاک انرژی برابری با صفحات با شکل حفره‌ی مستطیلی افقی شدند. همچنین در مقدار تخلخل ۱۵٪ نیز حفرات مربعی و مستطیلی افقی در تمامی مقادیر (B/L)، تقریباً عملکرد برابری در استهلاک انرژی موج دارند. در (شکل ۱۶) با در تخلخل ۱۵ درصدی، تمامی انواع صفحات مختلف با نسبت ($B'=1.5t$) نشان داده شده است.

- [8] Mallayachari, V. and Sundar, V., "Reflection Characteristics of Permeable Seawalls", Coastal Engineering, Vol. 23, pp. 135-150, 1994.
- [9] Isaacson, M., Baldwin, J., Allyn, N. and Cowdell, S., "Design of a Perforated Breakwater", Ports 98 Conference, Vol. 2, pp. 1189-1198, 1998.
- [10] Isaacson, M., Baldwin, J., Allyn, N. and Cowdell, S., "Wave Interactions with Perforated Breakwater", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 126, No. 5, pp. 229-235, 2000.
- [11] Zhu, S. and Chwang, A. T., "Investigations on the Reflection Behaviour of a Slotted Seawall", Coastal Engineering, Vol. 43, pp. 93-104, 2001.
- [12] Requejo, S., Vidal, C. and Losada, I. J. "Modelling of Wave Loads and Hydraulic Performance of Vertical Permeable Structures", Coastal Engineering, Vol. 46, pp. 249-276, 2002.
- [13] Suh, K. D., Choi, J. C., Kim, B. H., Park, W. S. and Lee, K. S., "Reflection of Irregular Waves from Perforated-wall Caisson Breakwaters", Coastal Engineering, Vol. 44, pp. 141-151, 2001.
- [14] Suh, K. D. and Park, J. K. and Park, W. S., "Wave Reflection from Partially Perforated-wall Caisson Breakwater", Coastal Engineering, Vol. 33, pp. 264-280, 2006.
- [15] Ketabdari, M. J. and Varjavand, I., "Reflected Energy Spectrum from Slotted Breakwaters Due to Irregular Waves", Journal of Coastal Research, Vol. 24, No. 6, pp. 1529-1535, 2008.
- [16] Sorensen, R. M., "Basic Coastal Engineering", Springer, Usa, 1997.
- [17] Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., "Wave Mechanics for Engineers and Scientists", World Scientific, Singapore, 2000.
- [18] Hirt, C. W. and Nichols, B. D., "Volume of Fluid Method for the Dynamics of Free Boundaries", J. Computational Physics, Vol. 39, pp. 201-225, 1981.
- [19] Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method", Pearson Education Limited, England, 2007.
- [20] Leveque, R. J. "Finite-Volume Methods for Hyperbolic Problems", Cambridge University Press, 2002.
- [21] Hall, J. V. and Watts, J. W., "Laboratory Investigation of the Vertical Rise of Solitary Waves on Impermeable Slopes", Tech. Memo., Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engrs, No. 33, 1953.
- [22] Yong, Liu, and Yu-cheng, Li, "Wave Interaction with a Wave Absorbing Double Curtain wall Breakwater", Ocean Engineering, Vol. 38, pp. 1237-1245, 2011.

موج شکن با حفرات دایروی با همین مقدار تخلخل دارای بیشترین مقدار ضریب انعکاس هستند. با مقدار تخلخل ۲۰٪ موج شکن دارای حفرات مستطیلی قائم دارای کمترین مقدار ضریب انعکاس است. در مقدار تخلخل ۳۰٪ برای تمامی صفحات الگوی خاصی رانمی توان برشمرد، اما در اکثر نسبت های B/L، حفرات مربعی و مستطیلی افقی دارای کمترین مقادیر ضریب انعکاس و حفرات مستطیلی قائم دارای بیشترین مقدار ضریب انعکاس هستند. برای موج شکن جارلان دویل، با تمامی حالات تخلخل و در کلیه یحالت های B، صفحات با نوع حفره ی مستطیلی افقی دارای بیشترین مقدار استهلاک انرژی هستند؛ اما بعضاً نیز مشاهده شد در بعضی از نسبت های B/L، صفحات با نوع حفره ی مربعی نیز عملکرد مشابهی با صفحات با شکل حفره ی مستطیلی افقی دارند. در تمامی نسبت های B، صفحات دویل نسبت به صفحات تک در حدود ۲۰ الی ۲۵ درصد استهلاک انرژی بیشتری را برای امواج به وجود می آورند. در صفحات دویل با افزایش مقدار B، این صفحات نسبت به یکدیگر در حدود ۲ الی ۴ درصد افزایش استهلاک انرژی امواج را نشان می دهند.

۹- مراجع

- [1] Jarlan, G. E. "A Perforated Vertical Wall Breakwater", The Dock and Harbour Authority, Vol. 41, pp. 394-398, 1961.
- [2] Terrett, F. L., Osorio, J. D. C. and Lean, G. H., "Model Studies of a Perforated Breakwater", 11th ASCE Conference. Coastal Engineering, America, pp. 1104-1109, 1968.
- [3] Kondo, H. and Toma, S., "Reflection and Transmission for a Porous Structure", 13th Coastal Engineering Conference. America, Vol. 3, pp. 1847-1866, 1972.
- [4] Massel, S. R. and Mei, C. C., "Transmission of Random Wind Waves Through Perforated or Porous Breakwaters", Coastal Engineering, Vol. 1, pp. 63-78, 1977.
- [5] Kondo, H., "Analysis of Breakwaters Having Two Porous Walls", Coastal Structures, pp. 962-977, 1979.
- [6] Hagiwara, K., "Analysis of Upright Structure for Wave Dissipation using Integral Equation", Coastal Engineering, pp. 2810-2826, 1984.
- [7] Bennet, G. S., McIver, P. and Smallman, J. V. "Mathematical Model of a Slotted Wave Screen Breakwater", Coastal Engineering, Vol. 18, pp. 231-249, 1992.