# مدلسازی عددی روگذری موج از موجشکن توده سنگی با در نظر گرفتن اثر تخلخل

**علی قاسمی[۱] ، مهدی شفیعی فر[۲]* ، روزبه پناهی[۳]**

[۱] کارشناس ارشد، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، alighasemi@modares.ac.ir
[۲] استاد، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، shafiee@modares.ac.ir
[۳] استادیار، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، rpanahi@modares.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

*تاریخچه مقاله:*
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲

*کلمات کلیدی:*
موجشکن توده سنگی
روگذری موج
نرم افزار FLOW-3D

**چکیده**

پدیده روگذری موج از موجشکن توده سنگی از موضوعات مهمی است که همواره بعنوان پارامتری تاثیر گذار در طراحی موجشکن‌ها مطرح است. اغلب مدلسازی‌های انجام شده در زمینه مطالعه روگذری بر مبنای روش‌های آزمایشگاهی بوده است و مدلسازی عددی روگذری موج از موجشکن متخلل که تحت اثر موج نامنظم قرار دارد کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه حاضر با تکیه بر مطالعه آزمایشگاهی انجام شده، میزان روگذری موج از موجشکن توده سنگی متخلل که تحت اثر موج نامنظم قرار دارد مدلسازی عددی شده است. برای سه ارتفاع موج مدلسازی شده در آزمایشگاه، مدلسازی عددی انجام شده است و مقایسه نتایج روگذری حاصل از مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی، خطایی در حدود ۱۵ درصد را نشان داده است. این مقادیر خطا، با توجه به تفاوت‌های مدل عددی و آزمایشگاهی و همچنین خطاهای مدل عددی، قابل قبول است. همچنین برای سه شیب مختلف سازه موجشکن، نتایج روگذری حاصل از مدلسازی عددی برای سازه با نسبت تخلخل ۰/۱۵ و سازه غیر متخلخل با فرمول اون مقایسه شد.

# Numerical Simulation of Wave Overtopping From Armour Breakwater by Considering Porous Effect

**Ali Ghasemi[1] , Mehdi Shafiee Far[2] , Roozbeh Panahi[3]**

*[1],MSc, Marine Structure Group, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University; alighasemi@modares.ac.ir*
*[2] professor, Marine Structure Group, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University; shafiee@modares.ac.ir*
*[3] Assistant Professor, Marine Structure Group, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University; rpanahi@modares.ac.ir*

**ARTICLE INFO**

*Article History:*
Received: 8 Apr. 2015
Accepted: 21 Feb. 2016

*Keywords:*
Armour breakwater
Wave over topping
FLOW-3D Software

**ABSTRACT**

Wave overtopping on the breakwaters is an important issue in breakwaters' design. Most of the previous studies focused on experimental researches and numerical modeling of irregular wave overtopping particularly on porous breakwaters has not been studied. In the present study, the verification between experimental studies and numerical modeling of irregular waves overtopping on the porous breakwater has shown 15% error for the wave height of 3 meters. Due to the existence error in accuracy of numerical model and software and the difference between numerical and experimental model, this error is in the acceptable range and usual in numerical studies. Moreover, this study presented the comparison between Owen formula and numerical modeling results of wave overtopping for two different conditions: the breakwater with the porosity of 0.15 and non-porous breakwater.

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.8.4 ]

## ۱ - مقدمه

روگذری امواج از سازه‌های ساحلی یکی از مهم ترین واکنش‌های هیدرودینامیکی است که در طراحی این نوع سازه‌ها مدنظر گرفته می‌شود. فرایند روگذری ناشی از برخورد موج به سازه، بالا روی آن و نهایتاً سرریزی جریان موج از سازه است. این پدیده عامل بسیاری از تخریب‌ها در سازه‌های ساحلی و سازه‌های موجود در پسکرانه آنها، در گذشته و حال بوده است و در صورت زیاد بودن حجم روگذری، باعث عدم آرامش در حوضچه و عدم امکان بهره برداری از قسمت بالای موجشکن می‌شود. بدلیل عدم قطعیت در پیش بینی تراز طراحی آب و همچنین در پیش بینی امواج طراحی از یک سو و از سوی دیگر به لحاظ هزینه احداث سازه‌های بلند، قبول وقوع درصدی روگذری غیر قابل اجتناب است [۱].

تحقیقات فراوانی در خصوص پدیده روگذری امواج از سازه‌های ساحلی در ۵۰ سال اخیر انجام شده است. این مطالعات منجر به تصحیح مداوم در روشهای پیش بینی روگذری از سازه‌های محافظت از ساحل در مقابل امواج دریا گردیده است. روشهای موجود عمدتا به دو دسته روشهای عددی و روشهای آزمایشگاهی تقسیم بندی می‌شوند. هرچند اغلب تحقیقات انجام شده بر مبنای روش‌های آزمایشگاهی بوده است، روشهای عددی نیز با وجود پیچیدگی‌های آنها، بدلیل آنکه شرایط مختلف موج و اشکال مختلف سازه در آن با تغییرات اندک در برنامه قابل دسترسی است، مورد اقبال عمومی محققین قرار گرفته است.

عموما برای یک طوفان مشخص، حجم کل آب که روگذری می‌کند بخوبی توسط روشهای جنسن و ون در میر (۱۹۹۴)، اوون (۱۹۸۰)، هدجس و ریس (۱۹۹۸)، که مبتنی بر آزمایشات تجربی می‌باشند پیش بینی می‌شود[۲]، [۳]، [۴]؛ اما گودا (۲۰۰۰)، نشان داده است که این فرمول‌ها، بطور کامل پیچیدگی امواج را در آب کم عمق در نظر نمی‌گیرند و ممکن است بطور عمده‌ای دبی‌های روگذری را کمتر از مقدار واقعی پیش بینی کنند[۵]. تجزیه و تحلیل انجام شده توسط بسلی و همکاران (۱۹۹۸)، نیز نشان می‌دهد روش‌هایی که این اثر را در نظر نمی‌گیرند ممکن است روگذری تحت امواج در حال شکست را کمتر از مقدار واقعی پیش بینی کنند[۶]. این یافته توسط مطالعات عددی هیو و همکاران (۲۰۰۰) مورد حمایت و تایید قرار گرفته است[۷].

با افزایش قدرت محاسباتی کامپیوترها، مدل‌های محاسباتی زیادی جهت مدلسازی روگذری موج از سازه‌ها طی سالهای اخیر توسعه یافته است. نخستین تلاشهای جدی در این زمینه در سال ۱۹۸۹ و توسط کوبایاشی و ورجانتو صورت گرفت که به مدلسازی عددی روگذری موج منظم از سازه‌های ساحلی نفوذ ناپذیر واقع بر ساحل شیبدار پرداختند[۸].

مارویاما و هیراشی(۱۹۹۸)، یک مدل عددی بمنظور محاسبه دبی روگذری امواج چند جهته از یک موجشکن قائم ارائه نمودند، فرض اساسی این مدل این بود که دبی روگذری می‌تواند توسط یک رابطه سرریز تعریف شود[۹]. هیو و همکاران (۲۰۰۰)، یک مدل دو بعدی عددی را برای محاسبه روگذری از معادلات غیر خطی آب کم عمق ارائه نمودند اما این مطالعه تنها برای امواج منظم معتبر است[۷]. بمنظور مدلسازی سه بعدی و محاسبه دبی روگذری حاصل از امواج نامنظم روشهایی مورد استفاده قرار گرفت که مبتنی بر حجم سیال بودند. با موفقیت این روش‌ها مطالعه فرایند روگذری با جزئیاتی بیشتر از آنچه که در آزمایش‌های مدل فیزیکی امکان پذیر است انجام می‌گیرد.

یکی از کدهای معروف مبتنی بر روش حجم سیال، کد NASA-VOF2D (توری و همکاران ۱۹۸۵) می‌باشد که اصلاحات زیادی در آن صورت گرفته است[۱۰]. این کد و نیز کد SOLA-VOF در آزمایشگاه ملی Alamos با توسعه این مدل VOF، کد CFD تجاری بنام FLOW-3D را ایجاد نمودند[۱۱]. دنتال و همکاران(۲۰۰۹)، با استفاده از نرم افزار FLOW-3D به بررسی روگذری موج از موجشکن توده سنگی در اثر برخورد امواج حاصل از طیف JONSWAP پرداختند و نشان دادند که نتایج حاصل از نرم افزار از دقت خوبی نسبت به روابط آزمایشگاهی برخوردار است[۱۲].

مطالعه مدلسازی‌های عددی که اشاره شدند نشان می‌دهد، مدلسازی عددی اندرکنش موج نامنظم با محیط متخلخل کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق با الگو قرار دادن نمونه آزمایشگاهی، لایه‌های فیلتر و هسته موجشکن بصورت محیط متخلخل معرفی شد و با تولید طیف موج نامنظم با شرایطی مشابه با آزمایشگاه مدلسازی انجام شد تا صحت نتایج نرم افزار FLOW-3D در مدلسازی اندرکنش محیط متخلخل و موج نامنظم مشخص شود و با مقایسه مقادیر روگذری حاصل از این مدلسازی با نتایج روگذری آزمایشگاهی، دقت نتایج مشخص شد. همچنین برای سه شیب مختلف سازه موجشکن، نتایج روگذری حاصل از مدلسازی عددی برای سازه با نسبت تخلخل ۰/۱۵ و سازه غیر متخلخل با فرمول اون مقایسه شد.

## ۲- معادلات حاکم

نرم افزار FLOW-3D نرم افزاری چند جانبه و سازگار با شرایط پیچیده جریان در مدلسازی به صورت دو بعدی و سه بعدی است. روش حل معادلات در این نرم افزار براساس روش حجم محدود در شبکه بندی منظم است.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.8.4 ]

در ادامه معادلات حاکم بر حرکت سیال، مدل‌های آشفتگی و مدلسازی جریان در محیط متخلخل تشریح می‌گردند. معادلات حاکم بر جریان سیال، بیانگر قوانین فیزیکی بقا بصورت عبارت ریاضی می‌باشد. یکی از این قوانین، معادله پیوستگی می‌باشد که 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:

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

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

یکی دیگر از این قوانین قانون اصل بقای اندازه حرکت یا قانون دوم نیوتون می‌باشد، 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 در جهت‌های x، y و z است، $\mu$ ویسکوزیته سیال، $\rho$ چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و P فشار سیال برحسب پاسکال می‌باشند.

نرم افزار مورد استفاده امکان بهره برداری از چندین مدل آشفتگی از جمله RNG، k-ε و LES را برای کاربران فراهم کرده است. مدل RNG از معادلاتی شبیه به k-ε استفاده می‌کند. ثوابتی که به طور تجربی در مدل‌های k-ε استاندارد بدست آمده است، در مدل RNG به طور صریح استحصال می‌شود، اما به طور کلی مدل RNG کاربرد وسیع‌تری نسبت به k-ε دارد. همچنین مدل LES برای شبیه سازی گردابه‌های بزرگ بیشتر کاربرد دارد.[۱۳].

برای مدلسازی تخلخل در نرم افزار، از دو روش دارسی و فورشهیمر استفاده شده است. بنابر قانون دارسی، افت فشار در محیط متخلخل با سرعت متوسط بصورت خطی مطابق رابطه (۳) مرتبط است. در این رابطه K نفوذپذیری، $\mu$ ویسکوزیته دینامیکی و $U_D$ سرعت دارسی یا همان سرعت ظاهری جریان می‌باشد. در این رابطه جریان پایدار فرض شده، اثرات اینرسی یا وابستگی زمانی در نظر گرفته نشده است و لذا برای اعداد رینولدز خیلی کم (Re «1) صادق است.

$$\nabla p=-\frac{\mu}{K}u_D \qquad (۳)$$

با افزایش عدد رینولدز و کاهش فشار، رابطه دارسی از حالت خطی خارج می‌شود. بمنظور اصلاح رابطه دارسی، فورشهیمر با اضافه کردن ترم غیر خطی به رابطه دارسی و پس از اصلاحات بسیار، رابطه‌ی (۴) را ارائه کرد که به رابطه فورشهیمر معروف گردیده است. فورشهیمر مشاهده کرد با افزایش سرعت، اثرات اینرسی بر جریان حاکم می‌شود.

$$-\nabla p=(a+b\left|u_D\right|)\,\mathrm{u}_D \qquad (۴)$$

که در رابطه (۴)، a و b با استفاده از اطلاعات تجربی بدست می‌آیند.

بمنظور ترکیب روابط خطی و غیر خطی، همه ضرایب در ضریبی به اسم $F_d$، که به ضریب درگ معروف است بصورت رابطه (۵) ترکیب می‌شوند.

$$F_d U_{pore}=-\frac{1}{\rho}\nabla p=\frac{\mu}{\rho}\frac{1-n}{n}\left[A\frac{1-n}{n}+B\frac{\mathrm{Re}_p}{d_{pore}}\right]u_{pore} \qquad (۵)$$

که پارامترهای رابطه (۵) بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$F_d$: ضریب درگ ($1/t$)، $A$: ضریب درگ خطی، $B$: ضریب درگ غیر خطی، $n$: ضریب تخلخل، $\rho$: چگالی سیال، $d_{pore}$: قطر سنگ ریزه‌ها، $\mathrm{Re}_p$: عدد رینولدز جریان در خلل و فرج، $u_{pore}$: سرعت جریان در خلل و فرج.

و پارامتر عدد رینولدز در خلل و فرج بصورت رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$\mathrm{Re}_p=\frac{\rho\left|u_{pore}\right|d_{pore}}{\mu}\approx\frac{\rho|U_D|d_{pore}}{n\mu} \qquad (۶)$$

با ترکیب روابط (۴) و (۵) رابطه فورشهیمر بصورت رابطه (۷) می‌شود.

$$-(\frac{\partial p}{\partial x})=A.\left|u_D\right|\mu\frac{(1-n)^2}{n^3}+B.\left|u_d\right|^2\rho\frac{(1-n)}{n^3} \qquad (۷)$$

با مقایسه رابطه (۷) با رابطه (۴)، ضریب درگ خطی و غیر خطی A و B بصورت روابط (۸) و (۹) تعریف می‌شوند.

$$A=a\frac{n^3}{\mu(1-n)^2} \qquad (۸)$$

$$B=b\frac{n^3}{\rho(1-n)} \qquad (۹)$$



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.8.4 ]

در روابط فوق، ضرایب $a$ و $b$ وابسته به جنس سنگ دانه‌های بکار رفته بوده و از اطلاعات و جداول آزمایشگاهی بدست می‌آیند.
روابط (۸) و (۹) در صورتی استفاده می‌شود که اطلاعات کاملی از سنگ دانه‌های استفاده شده در اختیار باشد. در صورتی که اطلاعات اندکی از سنگ دانه‌ها در اختیار باشد روابط (۱۰) و (۱۱) برای محاسبه ضریب درگ خطی و غیر خطی به کار می‌روند.

$$A = \frac{180}{{d_{pore}}^2} \quad (۱۰)$$

$$B = \frac{\beta}{d_{pore}} \quad (۱۱)$$

که در این روابط، $\beta$ ضریب نرمی یا زبری سنگ‌ها می‌باشد که از ۱/۸ تا ۴ بسته به نوع سنگ تغییر می‌کند[۱۳].

## ۳- مدلسازی عددی

پس از معرفی معادلات حاکم بر مدل عددی، در ادامه بر اساس مدلسازی آزمایشگاهی انجام شده در دانشگاه تربیت مدرس، هندسه موجشکن و پارامترهای لازم برای مدلسازی عددی به نرم افزار معرفی می‌شود.

### ۳-۱ معرفی مدل آزمایشگاهی

در مدل آزمایشگاهی با الگو قرار دادن مقطع پروژه طرح توسعه بندر انزلی، هندسه موجشکن مورد استفاده بصورت شکل ۱، ساخته شد.



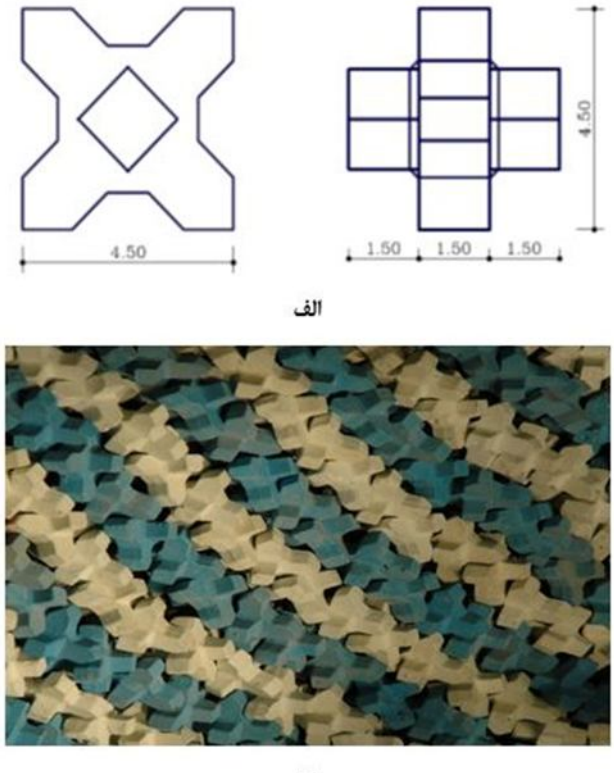
**شکل ۱ – هندسه موجشکن ساخته شده در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس**

ابعاد قسمت‌های مختلف موجشکن مورد مطالعه در آزمایشگاه بصورت جدول ۱ می‌باشد.

**جدول ۱ - ابعاد قسمت‌های مختلف موجشکن مورد مطالعه در آزمایشگاه**

| | |
|---|---|
| ارتفاع موجشکن (cm) | ۳۰/۵ |
| شیب موجشکن (درجه) | ۳۷ |
| ضخامت لایه فیلتر (cm) | ۳ |
| ارتفاع پاشنه (cm) | ۴ |
| شیب پاشنه (درجه) | ۳۴ |
| ارتفاع قسمت پایین موجشکن (cm) | ۲۱/۲ |
| شیب قسمت پایین موجشکن (درجه) | ۸ |

قطعات آرمور مورد استفاده در این مدلسازی آزمایشگاهی، قطعات ایکس بلاک با چینش منظم می‌باشد که اندازه و نوع چینش این قطعات بصورت شکل ۲ می‌باشد.




الف

ب

**شکل ۲ - الف) اندازه قطعات ایکس بلاک ب) چیدمان منظم قطعات ایکس بلاک [14]**

در آزمایشگاه بمنظور فراهم سازی محیط متخلخل از دو نوع دانه بندی با اندازه‌های ۴/۵ سانتی متر و ۱/۲ سانتی متر به ترتیب برای لایه‌های فیلتر و هسته استفاده شده است تا آزمایش‌ها برای یک سازه موج شکن، شبیه به مدل واقعی و بصورت متخلخل انجام شود.
از دیگر اطلاعات آزمایشگاهی مورد نیاز برای مدلسازی عددی، اطلاعات موج تولید شده در فلوم آزمایشگاه می‌باشد. در آزمایشگاه طیف موج نامنظم برای اطلاعات موج جدول ۲ با استفاده از رابطه گودا تولید شده است و با استفاده از کد نوشته شده در برنامه



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.8.4 ]

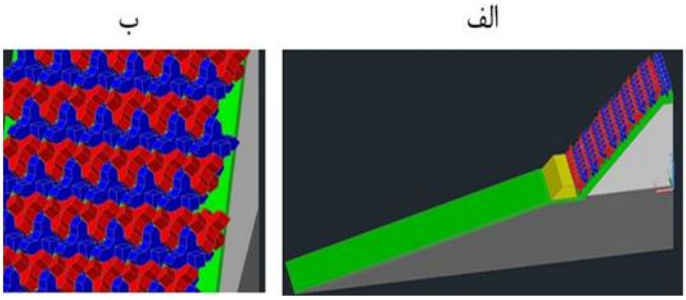
متلب، حرکت پیستون موج ساز طوری مشخص شده است که طیف موج مورد نظر را تولید کند.

**جدول ۲ –اطلاعات موج نامنظم تولید شده در آزمایشگاه**

| ارتفاع موج (سانتی متر) | پریود موج (ثانیه) |
|---|---|
| ۷/۳ | ۱/۳۲ |
| ۹/۷ | ۱/۴۸ |
| ۱۲/۷ | ۱/۵۸ |

## ۳-۲ مدلسازی موجشکن در نرم افزار

با آگاهی از مشخصات هندسه مدل آزمایشگاهی، این هندسه و چیدمان در نرم افزار اتوکد بصورت شکل ۳ ساخته شد.




**شکل ۳ - الف) هندسه موجشکن استفاده شده در مدل عددی ب) چیدمان منظم قطعات مورد استفاده در مدلسازی عددی**

پس از ساخت هندسه موجشکن در نرم افزار اتوکد، این هندسه با پسوند STL ذخیره و به نرم افزار FLOW-3D معرفی شد.

پس از معرفی هندسه موجشکن به نرم افزار، محیط فیلتر و هسته موجشکن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، بصورت متخلخل مدلسازی می‌شوند.

بمنظور مدلسازی تخلخل در نرم افزار FLOW-3D، ابتدا لازم است که متخلخل بودن محیط اعلام شود و در ادامه آن، روش مناسب برای مدلسازی تخلخل انتخاب می‌شود. سپس با توجه به محاسبات زیر، ضریب درگ خطی و غیر خطی به نرم افزار معرفی می‌شوند.

با توجه به ابعاد سنگدانه‌ها، ضریب درگ خطی و غیر خطی فورشهیمر برای فیلتر و هسته با توجه به روابط (۱۰) و (۱۱) بصورت زیر محاسبه می‌شوند.

ضرایب درگ فیلتر:

$$\begin{cases} A = \dfrac{180}{d_{filter}^2} = \dfrac{180}{(4.5\times10^{-2})^2} = 8.88\times10^4 \\ B = \dfrac{\beta}{d_{filter}} = \dfrac{3}{4.5\times10^{-2}} = 66 \end{cases}$$

ضرایب درگ هسته:

$$\begin{cases} A = \dfrac{180}{d_{core}^2} = \dfrac{180}{(1.2\times10^{-2})^2} = 1.25\times10^6 \\ B = \dfrac{\beta}{d_{core}} = \dfrac{2}{1.2\times10^{-2}} = 166 \end{cases}$$

بعد از انتقال هندسه موجشکن به نرم افزار، ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی مشخص می‌شود. طول دامنه محاسباتی با توجه به طول فلوم آزمایشگاهی ۱۰ متر، عرض آن ۳۵ سانتی متر و ارتفاع دامنه محاسباتی ۶۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. بمنظور بهینه سازی تعداد سلول‌های محاسباتی از چهار بلوک شبکه بندی برای این ۱۰ متر دامنه محاسباتی استفاده شده است که اندازه هر یک از این بلوک‌ها بصورت شکل ۴ است.

از نکات اساسی که در شبیه سازی‌های عددی باید مدنظر قرار گیرد اعمال شرایط مرزی است. پس از تعیین دامنه محاسباتی با جزئیات فوق، برای هر وجه از این چهار بلوک شبکه بندی باید شرط مرزی تعریف شود. در ابتدای بلوک محاسباتی اول از شرط مرزی موج، در تمامی مرزهای پایین شرط مرزی دیوار در انتهای بلوک چهارم از شرط مرزی خروجی استفاده شده است و در سایر مرزها، شرط مرزی تقارن است.

تنها شرط مرزی که نیاز به توضیح بیشتر دارد شرط مرزی موج است که در ابتدای بلوک اول استفاده شده است. چون در این مدلسازی قصد بر آن است که موج نامنظمی شبیه به کار آزمایشگاهی تولید شود.




**شکل ۴ - تقسیم بندی دامنه محاسباتی**



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.8.4 ]

شرط مرزی موج برای تولید موج نامنظم، طیف موج را به عنوان ورودی نیاز دارد. با استفاده از رابطه گودا (۱۹۸۸) (رابطه (۱۲))، طیف موج مورد نظر بر اساس ارتفاع و پریود موج آزمایشگاه (جدول ۲) تولید می‌شود [15].

$$S(f)=\beta_j H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5}\exp\left[-1.25(T_p f)^{-4}\right]\gamma^{\exp\left[-(T_p f-1)^2/2\sigma^2\right]} \quad (۱۲)$$

که برای مقادیر $\beta_j$، $\gamma$ و $\sigma$ روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) ارائه شده است.

$$\beta_j=\frac{0.06238}{0.23+0.0336\gamma-0.185(1.9+\gamma)^{-1}}\left[1.094-0.01925\ln\gamma\right] \quad (۱۳)$$

$$\begin{cases}\gamma=5 \text{ for } T_p/\sqrt{H_s}\le 3.6\\ \gamma=\exp(5.75-1.15T_p/\sqrt{H_s}) \text{ for } 3.6\le T_p/\sqrt{H_s}<5\\ \gamma=1 \text{ for } T_p/\sqrt{H_s}\ge 5\end{cases} \quad (۱۴)$$

$$\sigma=\begin{cases}0.07 & f\le f_p\\ 0.09 & f\ge f_p\end{cases} \quad (۱۵)$$

در این روابط f فرکانس موج و $f_p$ فرکانس پیک موج می‌باشد، مقدار $f_p$ از نتایج آزمایشگاه موجود است. با استفاده از این روابط برای مقادیر مختلف f مقدار S(f) که انرژی موج است بدست می‌آید. بمنظور معرفی موج نامنظم به نرم افزار بترتیب مقادیر $2\pi f$ و S(f) در یک فایل اکسل با فرمت CSV ذخیره و در ورودی شرط مرزی موج، قسمت random به نرم افزار معرفی می‌شود.

### ۳-۳ شبکه بندی و حساسیت سنجی مدلسازی

تعیین بهترین شبکه بندی یکی از مهمترین گام‌ها در کار عددی است چرا که با شبکه بندی درشت، گرادیان تغیرات بیشتر می‌شود و بدیهی است که به جواب صحیح نمی‌توان رسید. لذا شبکه بندی باید ریزتر شود تا با اعمال فشرده سازی نقاط شبکه در مناطقی که متغیرهای جریان تحت گرادیان‌های شدید قرار دارند بتوان تمام تغییرات را بررسی نمود و با بررسی همه جوانب عددی در یک سلول محاسباتی به جواب دقیق‌تر رسید. ولی باید به این نکته توجه داشت که این ریز کردن شبکه نیز باید با احتیاط انجام گیرد چرا که اولین پیامد آن زیاد شدن سلولهای محاسباتی و در نتیجه طولانی شدن زمان حل عددی است.

بعد از شبیه سازی فیزیکی مدل، لازم است بهینه سازی شبکه بندی صورت گیرد. به منظور حساسیت سنجی مدل عددی نسبت به تعداد سلول محاسباتی، ابتدا برای ارتفاع و پریود موج ۱۲/۷ سانتی متر و ۱/۵۸ ثانیه، طیف موج نامنظم با استفاده از رابطه گودا و روشی که قبلاً گفته شده تولید و به نرم افزار معرفی شد. برای موجشکن با هندسه توضیح داده شده، ارتفاع آب پای سازه ۴۰ سانتی متر، نسبت تخلخل ۰/۳۵ و استفاده از مدل RNG برای آشفتگی، به ازای شبکه بندی‌هایی با ابعادی بصورت جدول ۳ مدلسازی انجام شد و مقدار دبی روگذری برای زمان ۶۰ ثانیه مدلسازی بدست آمد.

همانطور که از اعداد جدول ۳ مشخص است، در محدوده‌ای که هندسه موجشکن وجود دارد اندازه سلول محاسباتی کوچکتر در نظر گرفته شده است تا با حساسیت بیشتری مدلسازی انجام شود و در بلوک‌های دیگر اندازه سلول‌های محاسباتی ۱/۲ تا ۱/۸ برابرِ اندازه سلول محاسباتی در بلوک کناری در نظر گرفته شده است.

با توجه به جدول ۳، کوچکتر شدن اندازه سلول‌های محاسباتی، منجر به افزایش زمان لازم برای محاسبات می‌شود که با توجه به نزدیک بودن مقادیر دبی روگذری برای ردیف‌های ۲، ۳ و ۴ جدول، ردیف سوم جدول ۳ به عنوان شبکه بهینه بمنظور صحت سنجی انتخاب شد.

## ۴- نتایج مدلسازی عددی

### ۴-۱ کالیبراسون و صحت سنجی با داده‌های آزمایشگاهی

بعد از معرفی موجشکن و جزئیات لازم برای مدلسازی در نرم افزار، مدلسازی انجام می‌شود. بمنظور اطمینان از صحت نتایج نرم افزار، برای سه ارتفاع و پریود موج جدول ۲ مدلسازی انجام و نتایج حاصل از نرم افزار با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است.

**جدول ۳ - نتایج حساسیت سنجی مدل عددی**

| | اندازه سلول محاسباتی در بلوک۱(mm) | اندازه سلول محاسباتی در بلوک(mm)۲ | اندازه سلول محاسباتی در بلوک(mm)۳ | اندازه سلول محاسباتی در بلوک۴(mm) | زمان لازم برای محاسبات (ساعت) | دبی روگذری (liter) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۴ | ۱۵/۱ | ۹/۶ | ۸/۳ | ۱۴ | ۰/۱۳۵ |
| ۲ | ۲۳ | ۱۳/۵ | ۹ | ۷/۵ | ۲۰ | ۰/۸۵۳ |
| ۳ | ۲۲/۵ | ۱۲/۹ | ۸/۶ | ۷/۰۴ | ۲۸ | ۰/۹۵ |
| ۴ | ۲۲ | ۱۲/۵ | ۸/۲ | ۶/۶ | ۴۰ | ۱/۰۵۲ |



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.8.4 ]

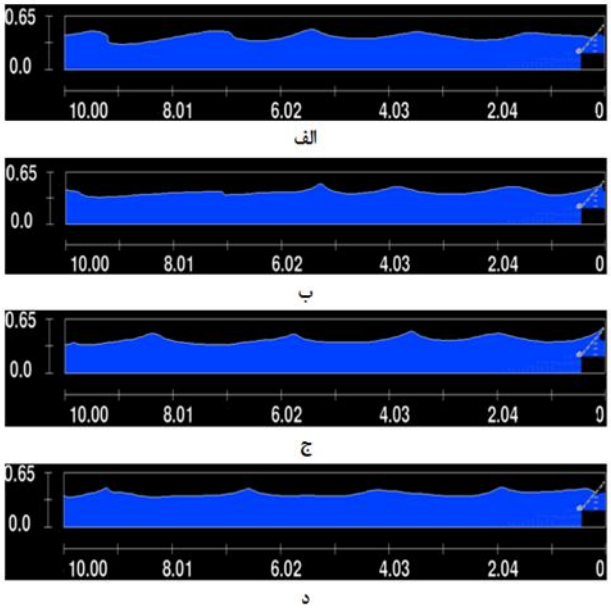
از آنجایی که در مدل آزمایشگاهی اطلاع دقیقی راجع به تخلخل و چیدمان لایه‌های فیلتر و هسته وجود ندارد، در ابتدای امر نیاز به کالیبراسیون بوده تا بررسی شود روگذری حاصل از مدلسازی عددی برای کدام نسبت تخلخل نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی بوده است و از دقت بالاتری برخوردار است. بدین منظور برای ارتفاع موج ۱۲/۷ سانتی متر و پریود ۱/۵۸ ثانیه طیف موج نامنظم تولید و به نرم افزار معرفی شد. برای موجشکن با هندسه شکل ۳، ارتفاع آب پای سازه ۴۰ سانتی متر،عرض موثر ۳۵ سانتی متر، مدل آشفتگی RNG و مدت زمان ۱۰۰ ثانیه، مدلسازی برای نسبت تخلخل‌های ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۳۵، ۰/۴۵ انجام شد. دبی متوسط روگذری حاصل از مدلسازی آزمایشگاهی ۰/۰۰۶۱۲۵ لیتر بر ثانیه می‌باشد، این مقدار با دبی متوسط روگذری حاصل از مدلسازی عددی برای مقادیر مختلف نسبت تخلخل مقایسه شد که نتایج بصورت جدول ۴ است.

**جدول ۴ مقایسه دبی متوسط روگذری حاصل از مدلسازی عددی برای مقادیر مختلف نسبت تخلخل با داده آزمایشگاهی**

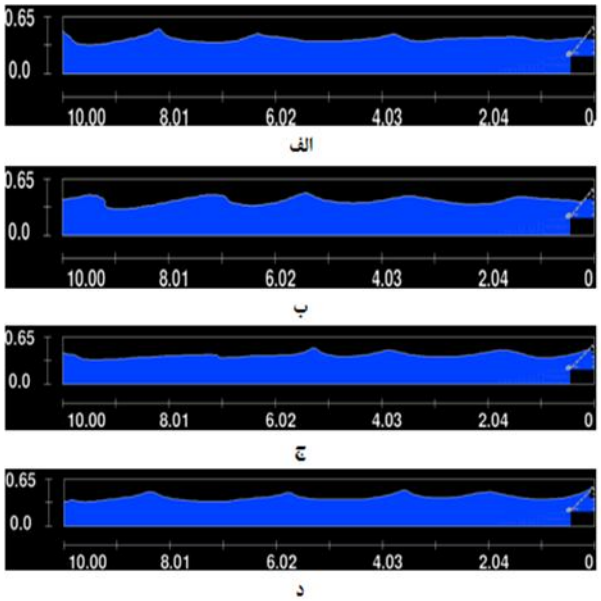
| نسبت تخلخل | دبی متوسط روگذری (liter/s) | خطا (درصد) |
|---|---|---|
| ۰/۱۵ | ۰/۲۳۶ | -۳۷ |
| ۰/۲۵ | ۰/۰۵۳۶ | -۷ |
| ۰/۳۵ | ۰/۰۱۲۱ | -۱ |
| ۰/۴۵ | ۰/۰۰۶۹۷ | -۰/۰۱ |

همانطور که از اعداد جدول ۴ مشخص است، نتایج حاصل از مدلسازی عددی با نسبت تخلخل ۰/۴۵ از دقت و نزدیکی خوبی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی برخوردار است. لذا برای ادامه صحت سنجی از نسبت تخلخل ۰/۴۵ استفاده می‌شود.

پس از انجام مدلسازی برای ارتفاع موج‌های مختلف اطلاعات بسیاری در دسترس می‌باشد. از جمله مهمترین این اطلاعات، سطح آزاد است که در یک زمان خاص، شکل سطح آزاد برای ارتفاع موج‌های مختلف بصورت اشکال ۵، ۶ و ۷ بدست آمده است.



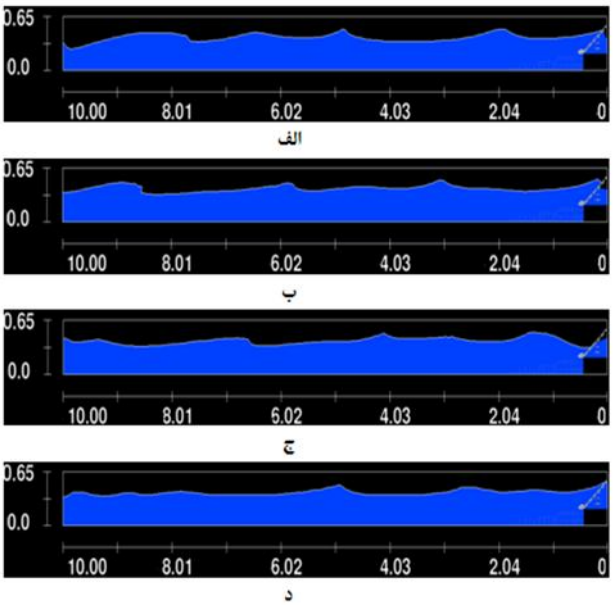

**شکل ۵ - سطح آزاد برای ارتفاع موج ۷/۳ سانتی متر در زمان‌های الف: ثانیه ۳۱ام، ب: ثانیه ۳۲ام، ج: ثانیه ۳۳ام، د: ثانیه ۳۴ ام**




**شکل ۶ - سطح آزاد برای ارتفاع موج ۹/۷ سانتی متر در زمان‌های الف: ثانیه ۳۱ام، ب: ثانیه ۳۲ام، ج: ثانیه ۳۳ام، د: ثانیه ۳۴ ام**

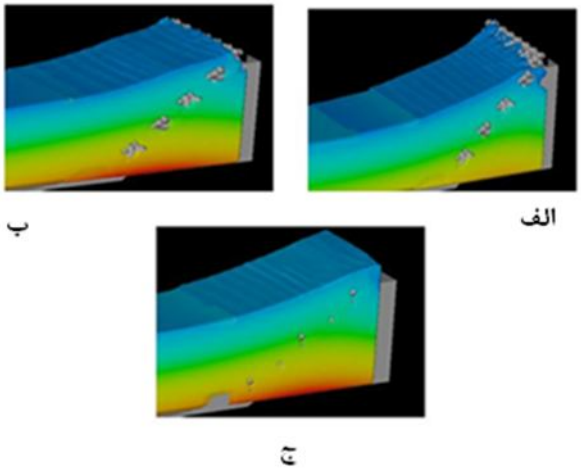
[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.8.4 ]




**شکل ۷ - سطح آزاد برای ارتفاع موج ۱۲/۷ سانتی متر در زمان‌های الف: ثانیه ۳۱ام، ب: ثانیه ۳۲ام، ج: ثانیه ۳۳ام، د: ثانیه ۳۴ ام**

یکی دیگر از خروجی‌های مهم نرم افزار، نحوه روگذری موج از سازه می‌باشد؛ لحظه بیشترین روگذری برای ارتفاع موج‌های مختلف بصورت شکل ۸ می‌باشد.




**شکل ۸ - لحظه روگذری برای مقادیر مختلف ارتفاع موج**
**الف: Hs=7.3 cm، ب: Hs=9.7 cm ، ج: Hs=12.7 cm**

بمنظور صحت سنجی، نتایج دبی متوسط روگذری حاصل از کار عددی با دبی متوسط روگذری حاصل از کار آزمایشگاهی برای ارتفاع موج‌های مختلف مقایسه شد که حاصل این مقایسه بصورت خلاصه در جدول ۵ آورده شده است.

**جدول ۵ - نتایج صحت سنجی برای اطلاعات موج مختلف**

| ارتفاع موج (cm) | ۷/۳ | ۹/۷ | ۱۲/۷ |
|---|---|---|---|
| دبی متوسط روگذری حاصل از کار آزمایشگاهی (liter/s) | $۱/۰۹\times۱۰^{-۴}$ | $۲/۴۰۶\times۱۰^{-۳}$ | $۶/۱۲۵\times۱۰^{-۳}$ |
| دبی متوسط روگذری حاصل از کار عددی (liter/s) | $۹/۵۶\times۱۰^{-۵}$ | $۲/۰۷\times۱۰^{-۳}$ | $۶/۹۷\times۱۰^{-۳}$ |
| خطای نرمال (%) | -۱۴ | -۱۶ | ۱۲ |

جدول ۵ نشان می‌دهد که نتایج دبی متوسط روگذری حاصل از مدلسازی عددی از دقت خوبی نسبت به نتایج آزمایشگاهی برخوردار است و خطای مدلسازی عددی ۱۲ تا ۱۶ درصد می‌باشد که با توجه به تفاوت‌های مدل عددی و آزمایشگاهی و همچنین خطاهای مدل عددی، قابل قبول می‌باشد.

بمنظور بررسی اثر زمان مدلسازی در نتایج، زمان مدلسازی ۵۰ ثانیه افزایش و ۵۰ ثانیه کاهش داده شد و مقدار دبی متوسط روگذری برای زمان‌های ۱۵۰ ثانیه و ۵۰ ثانیه مدلسازی با یکدیگر مقایسه شد که نتایج برای ارتفاع موج ۱۲/۷ سانتی متر بصورت جدول ۶ می‌باشد.

**جدول ۶ - تاثیر زمان مدلسازی در دبی متوسط روگذری برای ارتفاع موج ۱۲/۷ سانتی متر**

| زمان (ثانیه) | ۵۰ | ۱۰۰ | ۱۵۰ |
|---|---|---|---|
| دبی متوسط روگذری (liter/s) ($\times۱۰^{-۳}$) | ۷/۱۲۳ | ۶/۹۷ | ۶/۸۸ |

این مقایسه نشان داد مقدار دبی متوسط روگذری با افزایش زمان مدلسازی، به مقدار کمی کاهش می‌یابد؛ دلیل این تفاوت مربوط به اندرکنش امواج با یکدیگر می‌باشد. در ۵۰ ثانیه ابتدایی مدلسازی، چون امواج تازه در حال شکل گیری بوده‌اند و کاهش ارتفاع موج در اثر اندرکنش امواج با یکدیگر کمتر بود، مقدار دبی متوسط روگذری از زمان‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ ثانیه بیشتر بدست آمده است.

### ۴-۲ مقایسه نتایج با فرمول اون

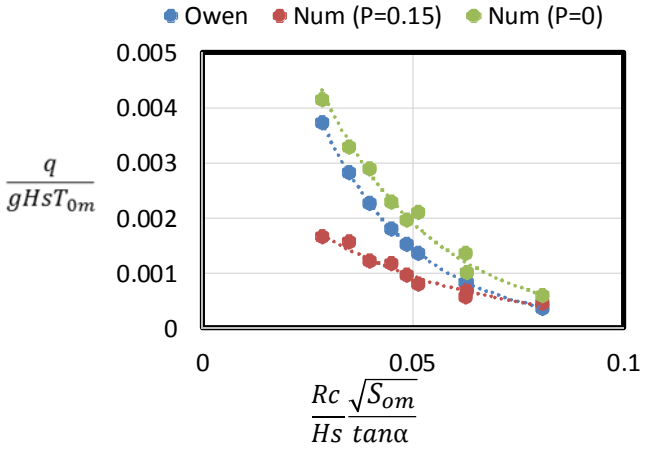
پس از مقایسه نتایج دبی متوسط روگذری حاصل از مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی و اطمینان از صحت مدل عددی، نتایج مدلسازی عددی با فرمول تجربی نیز مقایسه شده است. محاسبه روگذری برای سازه‌ای با هندسه، تراز آب و شرایط موج خاص بر اساس روابطی صورت می‌گیرد که از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی بدست می‌آیند، مدل‌های آزمایشگاهی به تعدادی از اشکال سازه‌ای خاص محدود می‌شوند. در نتیجه روابط آزمایشگاهی موجود برای شرایط سازه‌ای خاص قابل استفاده می‌باشند. در این تحقیق برای مقایسه نتایج روگذری با فرمول‌های تجربی، با توجه به هندسه



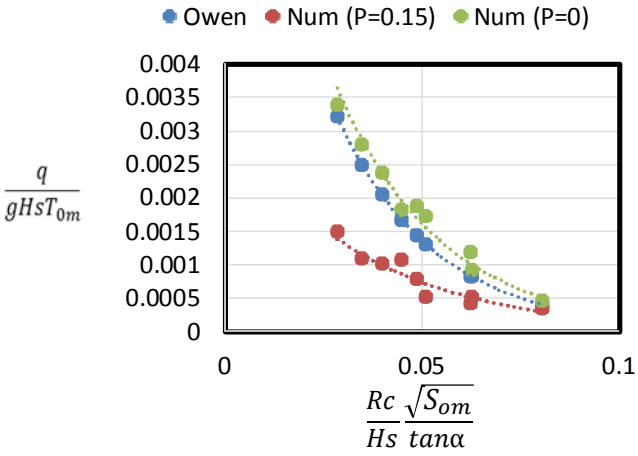
[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.8.4 ]

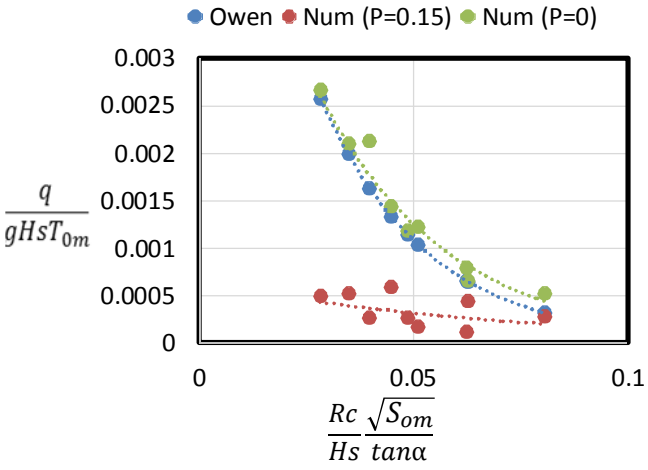
سازه مورد نظر از فرمول تجربی اون استفاده شده است. اما فرمول اون برای سازه نفوذ ناپذیر یا غیر متخلخل استفاده می‌شود. بدین منظور نتایج روگذری برای سازه با نسبت تخلخل ۰/۱۵ و سازه غیر متخلخل برای سه شیب مختلف سازه با فرمول اون مقایسه شده است که نتایج بصورت اشکال ۹، ۱۰ و ۱۱ می‌باشد.




**شکل ۹ – مقایسه نتایج مدلسازی عددی با فرمول اون برای شیب ۲-۱**




**شکل ۱۰ – مقایسه نتایج مدلسازی عددی با فرمول اون برای شیب ۱/۵-۱**




**شکل ۱۱ – مقایسه نتایج مدلسازی عددی با فرمول اون برای شیب ۱-۱**

اعداد بی بعد استفاده شده در نمودارها بر اساس فرمول اون می‌باشد و پارامترهای استفاده شده بصورت زیر است:

q: دبی روگذری ($m^3/s/m$)، g: شتاب گرانش ($m/s^2$)، Hs: ارتفاع موج (m)، $T_{om}$: پریود موج(s)، Rc: ارتفاع آزاد (m)، $S_{om}$ : تیزی موج و tanα: شیب موجشکن[16].

نمودارها نشان می‌دهند نتایج روگذری حاصل از مدلسازی عددی برای سازه موجشکن با نسبت تخلخل ۰/۱۵ تفاوت زیادی با نتایج حاصل از فرمول اون دارد که دلیل این تفاوت، عدم در نظر گرفتن تخلخل در فرمول اون می‌باشد. همچنین با مقایسه نتایج روگذری حاصل از مدلسازی عددی برای سازه غیر متخلخل با نتایج حاصل از فرمول اون مشخص می‌شود در مدل سازی عددی مقدار روگذری کمی بیشتر است که این اختلاف در مطالعات گودا (۲۰۰۶) نیز دیده شده است؛ همچنین نمودارها نشان می‌دهد در شیب ۲-۱ نتایج مدلسازی عددی نزدیکی بهتری با نتایج حاصل از فرمول اون دارند.

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق از نرم افزار FLOW-3D برای مطالعه هیدرودینامیک موجشکن توده سنگی استفاده شده است. نتایج روگذری حاصل از مدلسازی عددی برای موجشکن با هسته و فیلتر متخلخل که تحت اثر موج نامنظم قرار دارد با نتایج مدلسازی آزمایشگاهی مقایسه شده است. در ادامه نتایج مدلسازی عددی با فرمول تجربی اوون مقایسه شده است. نتایج این تحقیق بصورت زیر جمع بندی می‌گردد.

۱- نتایج صحت سنجی نشان می‌دهد که نرم افزار FLOW-3D ابزار خوب و توانمندی برای مدلسازی



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.8.4 ]

محیط متخلخل، طیف موج، هندسه پیچیده و اندازه گیری روگذری می‌باشد.

۲- نتایج روگذری حاصل از مدلسازی عددی برای سازه موجشکن با نسبت تخلخل ۰/۱۵ تفاوت زیادی با نتایج حاصل ازفرمول اون دارد که دلیل این تفاوت، عدم در نظر گرفتن تخلخل در فرمول اون می‌باشد.

۳- با مقایسه نتایج روگذری حاصل از مدلسازی عددی برای سازه غیر متخلخل با نتایج حاصل از فرمول اون مشخص می‌شود در مدل سازی عددی مقدار روگذری کمی بیشتر است.

۴- در شیب ۲-۱ نسبت به شیب‌های تند دیگر، نتایج روگذری حاصل از مدلسازی عددی تطابق بهتری با فرمول اون دارد و در شیب ۱-۱ نتایج از شباهت و نزدیکی مناسبی با فرمول اون برخوردار نیست. که دلیل این موضوع، به نوعی خنثی شدن اثر تخلخل سازه با شیب کند و در نتیجه نزدیکی مقادیر روگذری با فرمول اوون در شیب کند ۲-۱ می‌باشد.

## ۶- مراجع


1- Frahad Zadeh, A., and Shafeei far, Mehdi., (2004), *Analytical models of numerical modeling of wave overtopping from coastal structure*, Eighth Conference of marine industry, Boosheh. (In Persian).

2- J. W. van der Meer, J. P. F. M. Janssen, and D. Hydraulics, (1994), *Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments,* Delft Hydraulics.

3- Owen, M. W. (1980), *The hydroulic design of seawall profiles*, proc. Conf. On Shoreline Protection, ICE, London, UK: pp.185-192.

4- T. S. Hedges, M. T. Reis, and M. W. OWEN, (1998), *Random Wave Overtopping Of Simple Sea Walls: A New Regression Model*, Proc. Ice-Water Marit. Energy, vol. 130, no. 1, pp. 1–10.

5- Y. Goda, (2000), *Random seas and design of maritime structures*, University Of Tokyo Press, Tokyo, Japan.

6- P. Besley, T. Stewart, and N. W. H. Allsop, (1998), *Overtopping of vertical structures: new prediction methods to account for shallow water conditions*, Proc. Coastlines, Struct. Break. London, UK, pp. 46–57.

7- K. Hu, C. G. Mingham, and D. M. Causon. (2000), *Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the non-linear shallow water equations*, Coast. Eng., vol. 41, no. 4, pp. 433–465.

8- N. Kobayashi and A. Wurjanto, (1989), *Wave overtopping on coastal structures*, J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng., vol. 115, no. 2, pp. 235–251.

9- Marayama and Hiraishi, (1988), *presented a numerical model for calculation of over topping discharge for a vertical breakwater in multi direction wave ,The basic assumption is that the overtopping discharge can be described by a weir expression as suggested by Kikkawa et al 1988*.

10- M. D. Torrey, L. D. Cloutman, R. C. Mjolsness, and C. W. Hirt, (1985), *NASA-VOF2D: a computer program for incompressible flows with free surfaces*, NASA STI/Recon Tech. Rep. N, vol. 86, p. 30116.

11- J. M. Sicilian, C. W. Hirt, and R. P. Harper, (1987), *FLOW-3D: Computational modeling power for scientists and engineers*, Flow Sci. report, FSI-87-QO-l.

12- F. Dentale, G. Donnarumma, and E. E. P. Carratelli, (2012), *Rubble Mound Breakwater: Run-Up, Reflection and Overtopping by Numerical 3D Simulation*, flow3d.com.

13- F. Science, *FLOW-3D Documentation*, (2012).

14- Mousavi, S.A., Motalbi Zade, M.R., Shafeei Far, M. and Haj Momeni, A., (2014), *Comparing The Performance Of Hydrodynamic And Structural Of Dezhpod Iranian Armour With X-Block Armour*, ICOPMAS. (In Persian).

15- Y. Goda, (1988) *Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum*, Coast. Eng. Japan, vol. 31, no. 1, pp. 39–52.

16- S. P. *Manual, Coastal Engineering Research Center*, Dep. Army, Waterw. Exp. Stn., vol. 1, 1984.


[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.8.4 ]