Archive of SID

مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۳-۱۲

Original Article

مدل‌سازی عددی نیروهای وارده از طرف امواج بلند (سونامی) بر موج‌شکن‌های کیسونی

حسین نصیرائی (کارشناس ارشد)
محمد حیدرزاده* (استادیار)
مهدی شفیعی‌فر (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

در این پژوهش، نیروهای وارده از طرف امواج بلند (سونامی) بر موج‌شکن‌های کیسونی با کمک شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرارگرفته است. نتایج صحت‌سنجی نشان می‌دهد که مدل‌عددی مورد استفاده، دقت خوبی برای مدل‌سازی نیروهای وارده بر موج‌شکن‌های کیسونی از طرف امواج بلند دارد. در ادامه، فرمول تجربی برای محاسبه‌ی نیرو معرفی شده است. نتایج نشان می‌دهد فشار نقطه‌یی وارد بر سازه، علاوه بر ارتفاع موج، با عمق آب نیز مرتبط است. همچنین با جابه‌جایی سازه به سمت ساحل، مقدار نیروهای وارده در ابتدا کاهش می‌یابد؛ ولی در ادامه با تغییر فرم موج، نیرو افزایش می‌یابد و در نهایت پس از شکست موج، نیرو با شیب تندی کاهش می‌یابد. در پایان، بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که در حالت شکست موج بر روی بدنه‌ی موج‌شکن، نیروهایی تا حدود ۶ برابر نیروی امواج ناشکنا بر موج‌شکن وارد شده است.

واژگان کلیدی: امواج بلند، موج‌شکن‌های کیسونی، نیرو، شبیه‌سازی عددی، سونامی.

h.nassiraei@gmail.com
mohammad_heidarzadeh@yahoo.com
shafiee@modares.ac.ir

۱. مقدمه

امواج بلند معمولاً نیروی بیشتری نسبت به امواج کوتاه و متوسط بر موج‌شکن‌ها وارد می‌کنند. از این رو، مخاطرات بیشتری برای ایمنی و دوام درازمدت آن‌ها به وجود می‌آورند. این دسته از امواج به واسطه‌ی طول موج بسیار بلند نسبت به عمق آب، حامل انرژی زیادی هستند که کل عمق آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این امواج با سرعت تقریباً یکسان در عمق به سمت ساحل حرکت می‌کنند، به جز قسمت تاج موج که با نزدیک‌شدن به ساحل با افزایش سرعت همراه است. با کاهش عمق و نزدیک‌شدن به ساحل، طول موج کاسته می‌شود و در مقابل، ارتفاع موج با افزایش همراه است. افزایش ارتفاع موج همراه با طول موج بسیار بلند، باعث می‌شود تا حجم زیادی از سیال با سرعت و انرژی زیاد به سازه برخورد کند، که موجب ایجاد خسارت‌های فراوانی به سازه‌ها و تأسیسات ساحلی می‌شود.[۱]

از عوامل اصلی ایجادکننده‌ی امواج بلند می‌توان سونامی را نام برد. سونامی معمولاً در اثر فرایندهای ژئوفیزیکی مانند زمین‌لرزه‌های زیردریایی و یا زمین‌لغزش‌ها به وجود می‌آید. وقوع سونامی ۲۶ دسامبر ۲۰۰۴ در منطقه‌ی اقیانوس هند، ضرورت بررسی خطر سونامی در این منطقه را بیش از پیش خاطر نشان کرده است. منطقه‌ی سواحل جنوبی ایران و پاکستان در معرض خطر سونامی‌های ناشی از منطقه‌ی فرورانش مکران قرار دارد،[۲و۳] به خصوص اینکه منطقه‌ی سواحل جنوبی ایران یک سونامی بزرگ را در سال ۱۹۴۵ میلادی تجربه کرده است، که حدود ۴۰۰۰ کشته در سواحل جنوبی ایران و پاکستان بر جای گذاشت. علاوه بر این اضافه می‌شود که سواحل جنوب ایران در معرض امواج بلند با منشأ اتمسفری هم قرار دارند، که نمونه‌یی از آن طوفان گونو[۱] در سال ۲۰۰۷ است، که موجب صدمات گسترده در سواحل ایران و عمان شده است.[۲]

حیدرزاده و همکاران (۲۰۰۸ و ۲۰۰۹)،[۲و۳] با بررسی و مدل‌سازی خطر سونامی برای سواحل جنوبی ایران نشان داده‌اند که خطر سونامی برای مناطق مذکور، واقعی و جدی است و درنظرگرفتن تمهیدات لازم برای مقابله با خطرات احتمالی آن ضروری به نظر می‌رسد. از جمله‌ی این تمهیدات می‌توان به ارزیابی عملکرد موج‌شکن‌ها در اثر برخورد امواج بلند اشاره کرد.

با توجه به لزوم درک و ارزیابی تأثیر عوامل مختلف در مقدار نیروی‌های وارده بر موج‌شکن‌های کیسونی از طرف امواج بلند و همچنین کمبود مطالعات در این زمینه، در این پژوهش این موضوع بررسی و سعی شده است تا به سوالات بدون پاسخ در این زمینه، به‌صورت کمّی پاسخ داده شود. مجموعه‌یی از سوالات به این شرح هستند:

۱. بیشینه‌ی نیروی وارده بر سازه، چه نسبتی با ارتفاع موج، عمق آب پای سازه، عمق آب در محل پیدایش، طول موج و شیب بستر دارد؟
۲. جانمایی سازه، چه تأثیری در مقدار نیروی وارده بر آن دارد؟
۳. نوع فرم موج تا چه اندازه در مقدار نیروی وارده بر سازه تأثیرگذار است؟

هدف از این مطالعه، پاسخ به مجموعه سوالات ذکرشده است. برای این منظور،

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۲/۳، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۱/۱۲، پذیرش ۱۳۹۳/۱۱/۲۱.

www.SID.ir

Archive of SID

مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D توسعه داده شده است، که پس از صحت‌سنجی، از آن جهت پاسخ به سؤالات مذکور استفاده شده است.

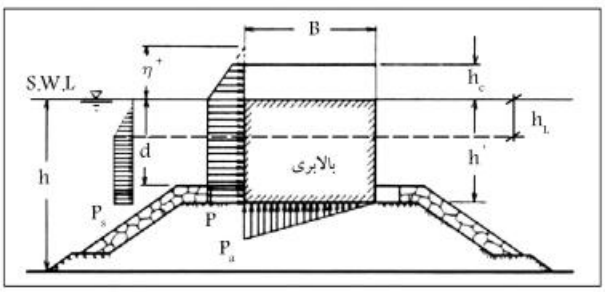
۲. مطالعات پیشین

مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده در پژوهشی در سال ۱۹۸۳،[۵] نشان داده است هنگامی که امواج سونامی به‌صورت ناشکنا به موج‌شکن‌های کیسونی برخورد می‌کنند، توزیع فشار وارده بر سازه تقریباً به‌صورت هیدرواستاتیک است (شکل ۱).

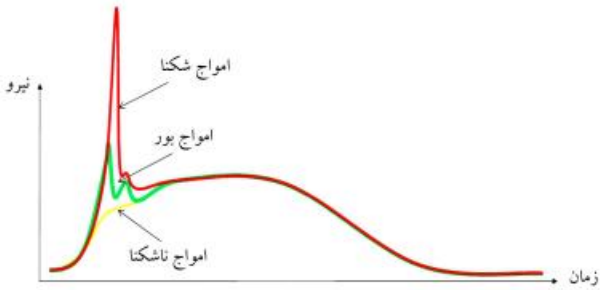
نتایج پژوهشی دیگر در سال ۲۰۰۱،[۶] نیز نشان داده است که نیروهای وارد شده بر سازه‌های با سطح شیب‌دار در مقابل امواج سونامی به ۴ دسته‌ی: فشار ضربه‌یی امواج سرریزی از موج‌شکن، پرتاب جریان بر پشت سازه، فشار دینامیکی، و فشار ناشی از بالاآمدن سطح آب ناشی از امواج تقسیم‌بندی می‌شوند. فشار لحظه‌یی دو مورد اول بیشتر از دو مورد دیگر است. همچنین نتایج فشار در پشت سازه نشان می‌دهد در صورت سرریزی امواج، سرعت پرت‌شدن آب بر پشت سازه بسیار زیاد است، که منجر به آب‌شستگی مصالح پشت سازه می‌شود.

نتایج آزمایش‌های دقیق برخی پژوهشگران (۲۰۱۰) بر روی فرم‌های مختلف شکست امواج تنها نیز نشان داده است که با افزایش عمق، نیروی موج کاهش و محل شکست موج به تاج سازه نزدیک‌تر می‌شود. همچنین نیروی وارده از طرف این امواج بر سازه‌ها، به‌شدت به فرم موج بستگی دارد.[۷] مطالعات بر روی موج‌شکن‌ها در ژاپن نیز نشان داده است که اگرچه موج‌شکن کامایشی[۲] برای مقابله با امواج سونامی طراحی شده بود، اما در اثر سرریزی اولین موج سونامی بر سازه، به شدت دچار آسیب شده است. بررسی‌ها نشان داده است که در امواج سونامی ژاپن در سال ۲۰۱۱، ارتفاع موج بر موج‌شکن ذکرشده، ۷٫۸ متر بوده است. اما در طراحی موج‌شکن کامایشی برای مقابله با امواج سونامی از ارتفاع موج کمتری استفاده شده است. در نتیجه، سونامی بزرگ ژاپن در سال ۲۰۱۱، نیروی بسیار بیشتری بر سازه وارد کرده است. همچنین در طراحی موج‌شکن مذکور، اثر نیروی هیدرواستاتیک امواج بلند در نظر گرفته شده بود. انهدام موج‌شکن کامایشی و موج‌شکن‌های دیگر در سونامی بزرگ ژاپن در سال ۲۰۱۱ باعث شده است تا نحوه‌ی محاسبه‌ی مقدار نیروهای وارده بر موج‌شکن‌ها مورد تجدید نظر قرار گیرد و مطالعات وسیعی در این زمینه شروع شود.[۸و۹]

مطالعات برخی پژوهشگران در سال ۲۰۱۲،[۸] نشان داده است هر چند که موج‌شکن کامایشی در اثر امواج سونامی ۲۰۱۱ ژاپن به شدت دچار آسیب شده، اما توانسته است از نیروی امواج سونامی بکاهد. موج‌شکن کامایشی توانسته است ارتفاع موج در ساحل را از ۱۳٫۷ متر به حدود ۸ متر کاهش دهد. کاهش ۴۰



شکل ۱. توزیع فشار وارد بر موج‌شکن از طرف امواج بلند بر طبق فرمول تانیموتو (۱۹۸۳).[۵]



شکل ۲. مقایسه‌ی تأثیر انواع فرم امواج سونامی در برخورد با موج‌شکن‌ها.[۱۱]

درصدی ارتفاع امواج، همان‌طوری که در بخش‌های بعدی بررسی شده ، باعث شده است تا نیروهای وارده با کاهش زیادی همراه شود. نتایج پژوهشی در سال ۱۳۹۰،[۱۰] بر روی نیروی امواج تنها در حالت شکست نشان می‌دهد که در زمان برخورد موج به موج‌شکن شناور، چنانچه موج حالت شکست به خود گرفته باشد، فشار وارد بر موج‌شکن بسیار بیشتر از فشار امواجی است که با همین ارتفاع حالت شکست ندارند. این نسبت برای مدل نمونه در پژوهش مذکور حدود ۳٫۷ است. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۲،[۱۱] با شبیه‌سازی آزمایشگاهی امواج سونامی بزرگ ۲۰۱۱ ژاپن نشان داده شده است که نیروی وارده از طرف امواج سونامی، به فرم موج و موقعیت آن وابسته است و امواج در حال شکست بر روی سازه، نیروی بیشتری در مقایسه با دیگر فرم‌های امواج به سازه نیرو وارد می‌کنند. همچنین نتایج پژوهش مذکور نشان می‌دهد که نیروی وارد بر سازه، در زمان کوتاهی فروکش می‌کند (شکل ۲). بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که توزیع فشار وارده برکیسون از طرف امواج ناشکنای بلند، فقط با ارتفاع موج مرتبط است و همچنین فرم موج، پارامتر مهمی در مقدار نیروی اعمالی برکیسون است. با توجه به مطالعات اندکی که در این زمینه انجام شده است، مطالعات بیشتری مورد نیاز است تا درک موجود در زمینه‌ی مسئله‌ی نیروی وارده از طرف امواج بلند بر موج‌شکن‌ها را افزایش دهند.

۳. مدل عددی و صحت‌سنجی

در این مطالعه از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شده است، که یک نرم‌افزار قوی جهت بررسی اندرکنش امواج با سازه‌های دریایی است. این نرم‌افزار، معادله‌های حاکم بر سیال را با استفاده از تقریب احجام محدود حل می‌کند. در این نرم‌افزار از دو شیوه‌ی روش حجم سیال (VOF)[۳] و روش کسر مساحت ـ حجم مانع (FAVOR)[۴] به ترتیب برای نشان‌دادن رفتار سیال در سطح آزاد و شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب استفاده می‌شود.

در این بخش، صحت نتایج نرم‌افزار در محاسبه‌ی نیروهای وارده بر موج‌شکن‌های کیسونی بررسی شده است. بدین منظور از نتایج کارهای آزمایشگاهی هسیاو و لین (۲۰۱۰)،[۷] و همچنین فرمول تحلیلی موج تنها،[۱۲] برای مقایسه‌ی سطح آزاد، از فرمول تانیموتو (۱۹۸۳)،[۵] برای مقایسه‌ی توزیع فشار و مقدار نیروی امواج بلند بر موج‌شکن‌های مرکب و از فرمول سن‌فلو (۱۹۲۸)[۱۳] برای مقایسه‌ی نیروی امواج خطی بر موج‌شکن‌های کیسونی استفاده شده است. برای آشفتگی از مدل (RNG)[۵] و برای گام زمانی محاسبات از مقدار ۰٫۰۱ ثانیه استفاده شده است. برای خروجی نتایج سطح آزاد، ارتفاع امواج در زمان و مکان‌های مشخص به‌صورت فایل متنی از نرم‌افزار دریافت و سپس در نرم‌افزار اکسل ترسیم شده است. برای بررسی نیروها در مرحله‌ی تکمیل مدل، قسمت حرکت اجسام[۶] در نرم‌افزار فعال و در مرحله‌ی بعد،

www.SID.ir

Archive of SID

حرکت سازه (موج‌شکن کیسونی) در تمام جهات برابر صفر قرار داده شده است. با انجام این کار می‌توان مجموع نیروهای وارده به سازه را در هر جهتی بر حسب زمان مستقیماً از قسمت پراب[۷] نرم‌افزار دریافت کرد. این نرم‌افزار برای محاسبه‌ی نیروهای وارده از طرف امواج بر سازه، معادلات مومنتوم (ناویر استوکس) را در ۳ جهت مختصاتی x، y و z با روش حجم محدود حل می‌کند و با انتگرال‌گیری از فشار امواج وارده بر سازه، مجموع نیروهای وارده را در جهت موردنظر محاسبه می‌کند. در رابطه‌ی ۱،[۱۲] معادله‌ی مومنتوم در جهت x نشان داده شده است:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left(uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial y}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+g_x+f_x \quad (1)$$

که در آن، V_F نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان، u سرعت افقی سیال، t زمان، A_x، A_y و A_z به ترتیب برابر با مساحت کسری محیط به جریان در جهت‌های x، y و z، g_x شتاب بدنه در جهت افقی، f_x شتاب لُزجت در جهت افقی، ρ چگالی سیال، و p فشار سیال است. همچنین نحوه‌ی انتگرال‌گیری فشار وارده بر سازه برای محاسبه‌ی نیرو در رابطه‌ی ۲،[۱۵] نشان داده شده است:

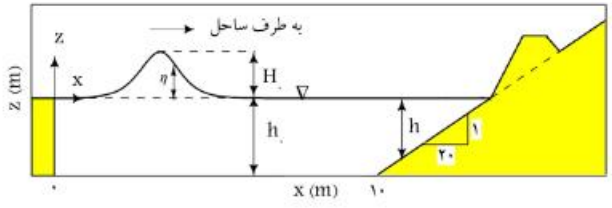
$$F=\int p\bar{n}dA+\int \bar{\tau}dA \quad (2)$$

که در آن، dA سطح در تماس با سیال، $\bar{\tau}$ بردار تنش برشی، p فشار، $\bar{n}$ بردار نرمال واحد، و F نیروی وارده بر سازه است.

۱.۳. صحت‌سنجی سطح آزاد

برای مش‌بندی شبکه‌ی عددی، با توجه به اینکه مدل دو بُعدی مد نظر است، برای بُعد عرض از یک سلول و در دو راستای افق و قائم از مش غیریکنواخت مربعی ۸ میلی‌متر تا ۳ میلی‌متر استفاده شده است. بعد از تکمیل مدل و اجرای آن برای مقادیر عمق و ارتفاع موج تنها به ترتیب برابر با ۰٫۲۰ متر و ۰٫۰۷ متر، خروجی‌های موردنظر دریافت شده و با داده‌های آزمایشگاهی هسیاو و لین (۲۰۱۰)،[۷] مقایسه شده است. در شکل ۳، مدل به‌صورت شماتیک و در شکل ۴، سطح آزاد موج به‌صورت کیفی نشان داده شده است. مشخصات محل قرارگیری ارتفاع‌سنج‌ها و پروفیل موج در ۵ نقطه‌ی ثابت در زمان‌های متفاوت در شکل ۵ نشان داده شده است. در ادامه، موج تولیدشده با نتایج فرمول موج تنها (رابطه‌ی ۳)،[۱۲] که توسط گیزین[۸] (۲۰۰۲) معرفی شده است، در شکل ۶ مقایسه شده است.

$$\eta(x,t)=H.sech^2\left[n(x-Ct)\right] \quad (3)$$



شکل ۳. شماتیک مدل عددی.[۷]

که در آن، C سرعت و $H.$ ارتفاع اولیه‌ی موج تنهاست. n و C نیز مطابق روابط ۴ و ۵ تعریف می‌شوند:

$$n=\sqrt{\frac{3H.}{4h.^2(H.+h.)}} \quad (4)$$

$$C=\sqrt{g(H.+h.)} \quad (5)$$

که در آن‌ها، $h.$ عمق آب قبل از شیب ساحلی یا همان عمق متوسط آب است. شکل‌های ۴ الی ۶ نشان می‌دهند که نتایج شبیه‌سازی عددی انجام‌شده در این پژوهش به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است.

۲.۳. صحت‌سنجی نیرو

برای مقایسه‌ی نتایج عددی توزیع فشار و مقدار نیروی افقی وارد بر سازه با نتایج تانیموتو (۱۹۸۳)،[۵] ابتدا مدل موردنظر ساخته شده است، به صورتی که موج‌شکن مرکب با عرض برابر با ۱ متر تا ارتفاع ۱۴ سانتی‌متری از بستر دریا به‌صورت سنگریزه‌یی و بقیه‌ی قسمت موج‌شکن به‌صورت کیسون در نظر گرفته شده است. پس از ساخت و تکمیل مدل، در مرز سمت چپ از یک موج تنها با ارتفاعی برابر با ۰٫۱۸ متر به‌عنوان موج ورودی استفاده شده است. برای مش‌بندی بُعد عرض از یک سلول و در دو راستای افق و قائم از مش غیریکنواخت مربعی ۸ میلی‌متر تا ۳ میلی‌متر استفاده شده است. نتایج آزمون‌های انجام‌شده در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین در قسمت‌های بعد بررسی شده است که چرا با تغییر عمق، در توزیع فشار و نیروی کل افقی نمودارهای شکل ۷، کمی تفاوت وجود دارد. مطابق شکل مذکور، نیروهای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی انجام‌شده در این پژوهش به نیروهای به‌دست‌آمده از مطالعات آزمایشگاهی بسیار نزدیک است.

۳.۳. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج فرمول سن‌فلو (۱۹۲۸)

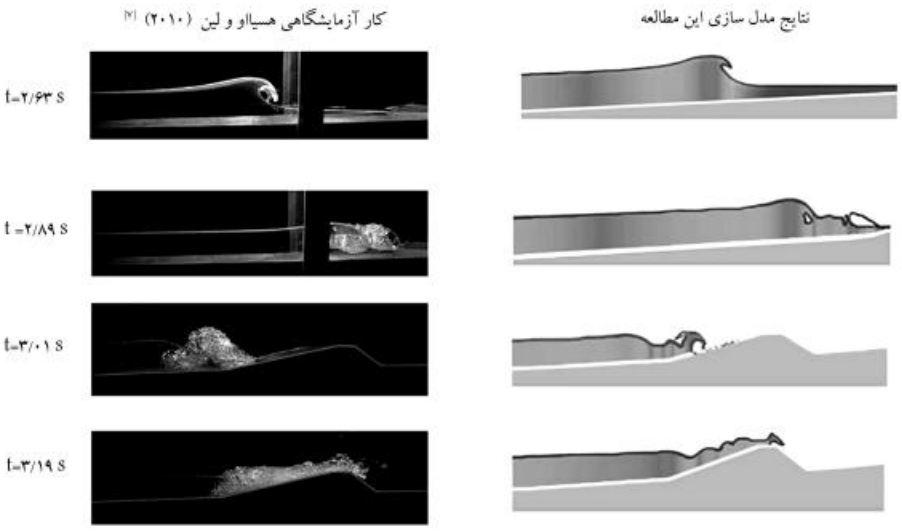
معمولاً در طراحی نیروهای وارد بر موج‌شکن‌های کیسونی از فرمول سن‌فلو (۱۹۲۸)،[۱۲] استفاده می‌شود. به همین دلیل در این بخش، به شبیه‌سازی مسئله و مقایسه‌ی نتایج آن با فرمول سن‌فلو (۱۹۲۸) پرداخته شده است. برای شبیه‌سازی مسئله‌ی موردنظر از موج خطی با ارتفاع‌های ۶ تا ۱۴ سانتی‌متر به عنوان موج ورودی استفاده شده است. اندازه‌ی عرض سازه ۱ متر، عمق آب ۳۰ سانتی‌متر و دوره‌ی تناوب موج ۱۰ ثانیه است. ابعاد مش به‌صورت مربعی غیریکنواخت ۸ میلی‌متر در اوایل شبکه و ابعاد ۴ میلی‌متر در اطراف موج‌شکن کیسونی است. نیروی افقی فشاری کل وارد بر سازه از نرم‌افزار استخراج و با نتایج فرمول سن‌فلو (۱۹۲۸) مقایسه شده است، که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل مذکور، حاکی از نزدیک‌بودن نتایج مدل عددی پژوهش حاضر به نتایج فرمول سن‌فلو (۱۹۲۸) است.

۴.۳. تأثیر اندازه‌ی مش و گام زمانی

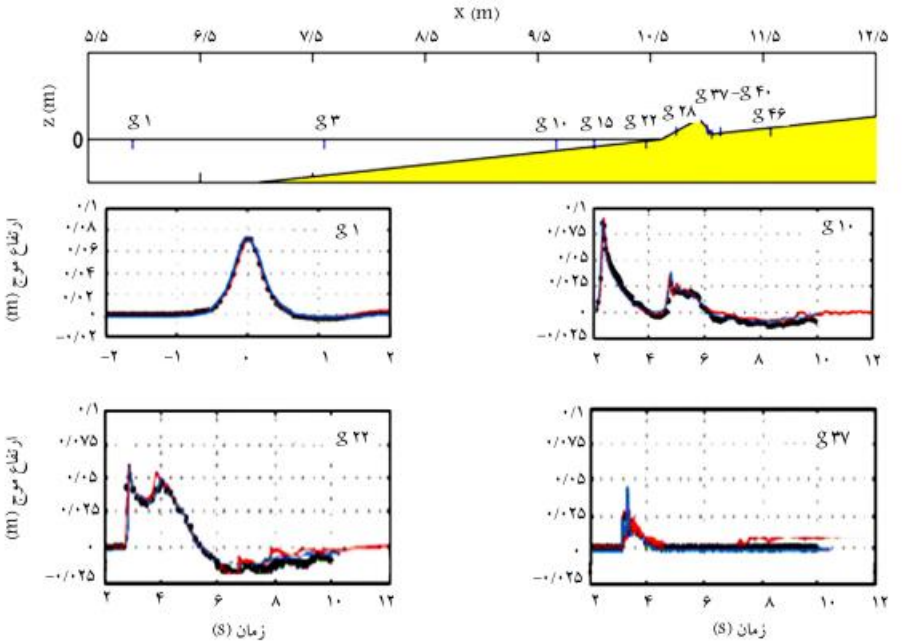
برای انتخاب مقادیر مناسب اندازه‌ی سلول‌های شبکه‌ی محاسباتی و گام‌های زمانی، آزمون‌های متعددی انجام شده است. این آزمون‌ها برای گام‌های زمانی و اندازه‌ی سلول‌های شبکه‌ی عددی مختلف اجرا شده است. سپس با مقایسه‌ی نتایج آزمون‌های صورت‌گرفته با نتایج آزمایشگاهی و تجربی، بهترین مقادیر

www.SID.ir

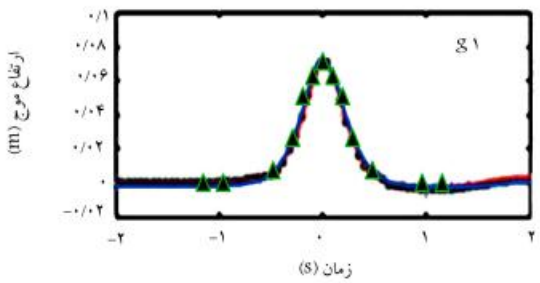
Archive of SID



شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی شبیه‌سازی سطح آزاد.



شکل ۵. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی شبیه‌سازی پروفیل موج تنها در مطالعات هسیاو و لین (۲۰۱۰)،[۷] (خطوط مشکی) با نتایج مدل عددی پژوهش حاضر (خطوط آبی) و نتایج مدل عددی هسیاو و لین (خطوط قرمز).[۷]



شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج مدل عددی پژوهش حاضر (خط آبی) با فرمول تحلیلی امواج تنها (نقاط قرمز).[۱۲]

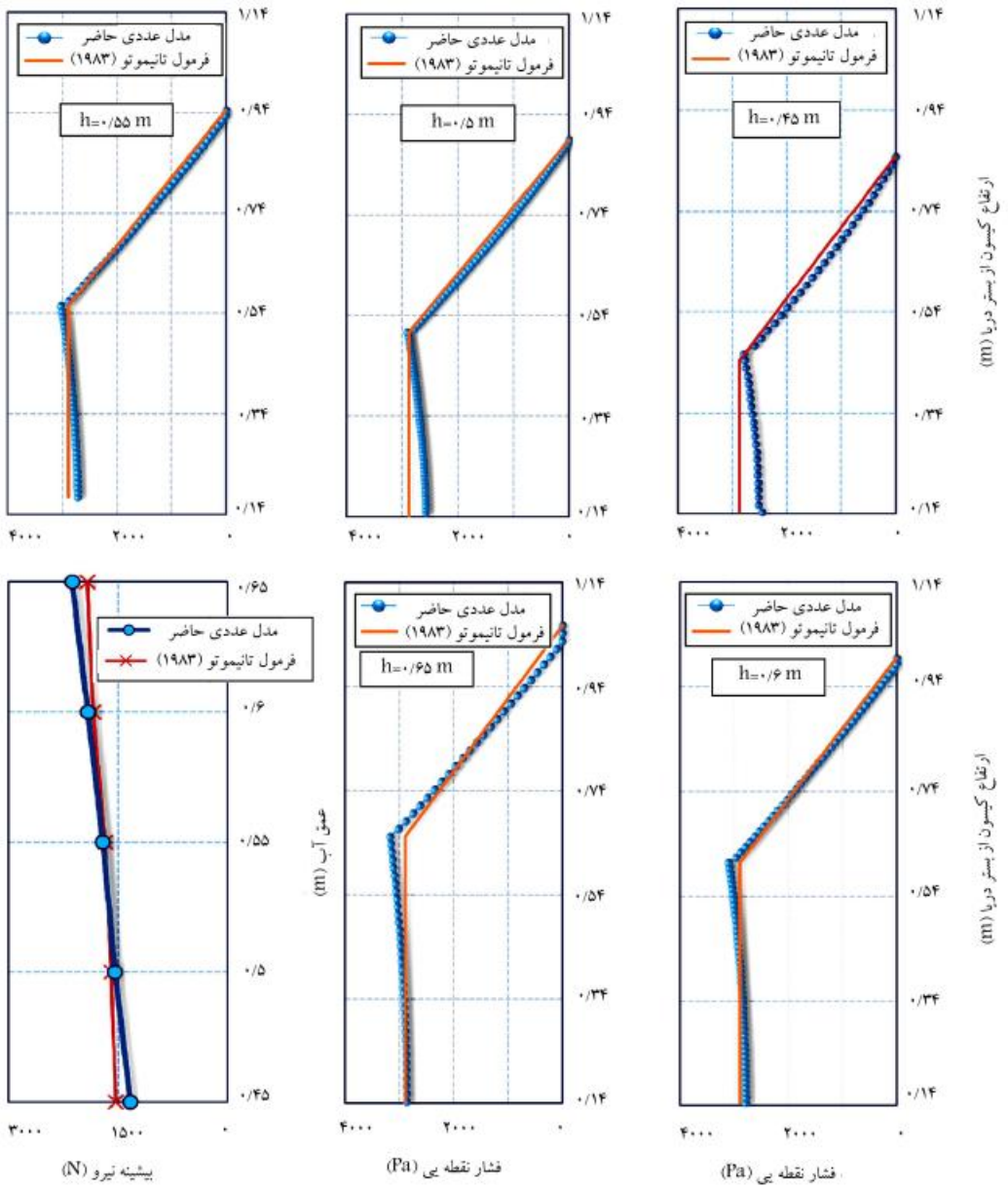
برای گام زمانی و اندازه‌ی سلول‌های شبکه‌ی عددی انتخاب شده است. در مرحله‌ی بعد با استفاده از مدل معتبرسازی‌شده به بررسی پارامتریک پرداخته شده است.

۵.۳. خلاصه‌ی نتایج صحت‌سنجی

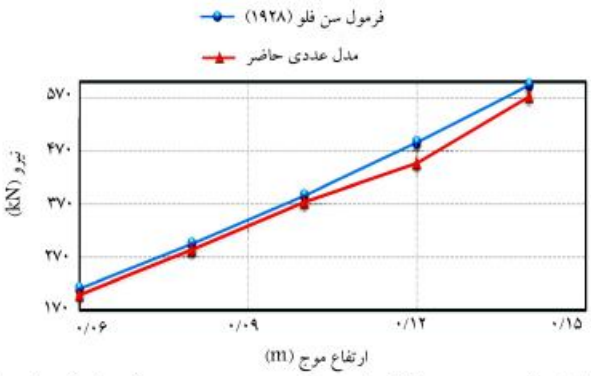
مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با نتایج مطالعات آزمایشگاهی مختلف در جدول ۱ به‌صورت خلاصه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نرم‌افزار موردنظر توانایی بالایی در شبیه‌سازی سطح آزاد امواج بلند، توزیع فشار، و نیروی افقی کل وارده بر سازه‌ی موردنظر دارد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷. بررسی تأثیر عمق پای سازه در توزیع فشار و نیروی افقی وارده بر کیسون.



شکل ۸. مقایسه‌ی نیروی افقی وارده برکیسون بر حسب عمق آب پای آن برای نتایج فرمول سن‌فلو (۱۹۲۸)،[۱۳] با نتایج مدل عددی پژوهش حاضر.

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج مدل عددی پژوهش حاضر با دیگر نتایج آزمایشگاهی، تحلیلی و تجربی موجود.

میانگین خطا (درصد)	موضوع مورد بررسی	نوع موج	نوع سازه	نتایج آزمایشگاهی، تجربی و تحلیلی
۴/۳	پروفیل سطح آزاد	تنها	دیوار ساحلی	هسیاو و لین (۲۰۱۰)
۲/۱	تولید موج	تنها	—	گیزین (۲۰۰۲)
۶/۷	توزیع فشار و نیرو	تنها	کیسون	تانیموتو (۱۹۸۳)
۴/۵	نیرو	خطی	کیسون	سن‌فلو (۱۹۲۸)

www.SID.ir

Archive of SID

۴. نتایج و تجزیه و تحلیل

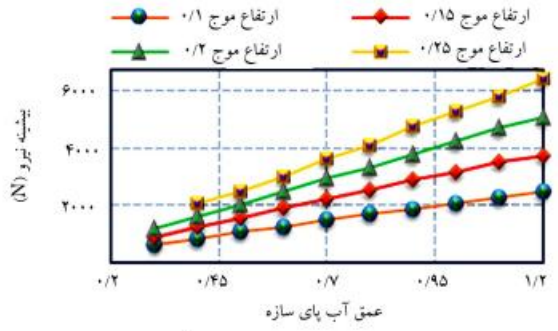
در این بخش پس از اطمینان از صحت مدل عددی، تأثیر هر یک از پارامترهای ارتفاع اولیه‌ی موج، عمق آب پای سازه، طول موج، شیب بستر، جانمایی موج‌شکن در طول بستر شیب‌دار، و شکست موج در مقدار نیروهای وارده بر موج‌شکن کیسونی بررسی شده است. همچنین، به بررسی و مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده با نتایج فرمول‌های تانیموتو (۱۹۸۳) پرداخته شده است. در جدول ۲، چیدمان آزمون‌های انجام‌شده نشان داده شده است. برای همه‌ی آزمون‌های انجام‌شده از مدل آشفتگی RNG و از گام زمانی محاسبات ۰٫۰۱ ثانیه و موج‌شکن کیسونی با عرض واحد و در شروع شرط مرزی سمت چپ از موج تنها استفاده شده است. انجام هر یک از شبیه‌سازی‌های عددی بر روی رایانه‌یی با یک پردازنده‌ی مرکزی با سرعت ۳ گیگا هرتز و حافظه‌ی دسترسی ۴ گیگابایت، حدود ۳ تا ۱۵ ساعت طول کشیده است.

۱.۴. تأثیر ارتفاع اولیه‌ی موج در عمق آب پای سازه و طول موج

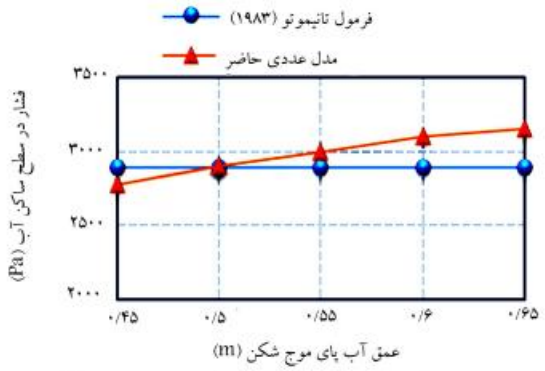
به‌منظور بررسی ارتفاع اولیه‌ی موج و عمق آب پای سازه در مقدار نیروهای وارده بر موج‌شکن، یک سری مدل‌سازی عددی انجام شده است، که نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است. در شکل ۱۰، نتایج فشار موج وارده بر سازه در تراز سطح ساکن آب نشان داده شده است. مقایسه‌ی شکل‌های ۹ و ۱۰ و همچنین توزیع فشار شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش عمق و ارتفاع موج، مقدار نیروی وارد بر سازه با افزایش همراه است. افزایش نیرو در نتایج فرمول تانیموتو (۱۹۸۳) فقط متأثر از افزایش ارتفاع موج و افزایش سطح تماس سازه با موج است. در واقع فشار

جدول ۲. آرایش آزمون‌های انجام‌شده.

پارامتر مورد مطالعه	تعداد	آزمایش‌ها
ارتفاع اولیه‌ی موج و عمق آب پای سازه	۱۱ عمق آب ۴ ارتفاع موج	۴۴
شیب بستر	۱۱ عمق آب ۴ ارتفاع موج ۳ بستر شیب‌دار	۱۳۲
مکان‌یابی	۱۷ عمق آب	۱۷
شکست موج	۱۴ عمق آب	۱۴
مجموع آزمون‌ها		۲۰۷



شکل ۹. نیروی افقی وارده بر حسب عمق پای موج‌شکن برای بستر بدون شیب برای امواجی با ارتفاع اولیه‌ی متفاوت.



شکل ۱۰. فشار نقطه‌یی موج در سطح ساکن آب بر حسب عمق آب پای موج‌شکن.

نقطه‌یی حاصل از فرمول تانیموتو (۱۹۸۳)، اثر عمق آب را در نظر نمی‌گیرد، اما در نمودارهای مدل عددی مشاهده شده است که با افزایش عمق آب، فشار نقطه‌یی وارد بر بدنه‌ی سازه با افزایش همراه است.

۲.۴. تأثیر شیب بستر در نیرو

جهت بررسی تأثیر شیب بستر در میزان نیروهای وارده بر موج‌شکن‌ها، آزمون‌های متعددی با درنظرگرفتن شیب‌های مختلف برای بستر انجام شده است. نتایج شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش شیب بستر، مقدار نیروی وارد بر سازه با افزایش همراه است. به‌عنوان نمونه، در عمق آب ۰٫۵۰ متر در پای سازه و ارتفاع اولیه‌ی موج ۰٫۲۵ متر، برای شیب بستر ۱ به ۳۵، ۳۰ و ۲۵ به ترتیب مقادیر نیروی ۳۳۷۰، ۳۵۰۰ و ۳۶۵۰ نیوتن بر سازه وارد شده است. همچنین با افزایش عمق آب، نسبت نیروها در شیب‌های مختلف بستر با کاهش همراه است، به طوری که برای مشخصات ذکرشده در بالا و عمق آب ۱٫۰۰ متر، به ترتیب مقادیر نیروی ۵۹۳۰، ۶۰۵۰ و ۶۰۶۰ نیوتن بر سازه‌ی موردنظر وارد شده است.

افزایش نیرو تا زمانی که امواج به‌صورت ناشکنا باشند با تغییر عمق آب، با آهنگ تقریباً ثابتی تغییر می‌کند، اما همان‌طوری که در بخش‌های بعدی نشان داده شده است، با تغییر فرم موج در بسترهای شیب‌دار، شیب تغییر مقدار نیرو با آهنگ‌های متفاوتی تغییر می‌کند. در این راستا، مطالعات آریکاوا (۱۲ ۲۰)، هسیاو ولین (۲۰۱۰)، و رضایی و کتابداری (۱۳۹۰) نشان داده است که فرم موج، عامل مهمی در مقدار نیروی وارد بر سازه است و امواج شکنا در برخورد با سازه، نیروی بسیار زیادی در مقایسه با دیگر فرم‌های امواج بلند بر سازه وارد می‌کنند.

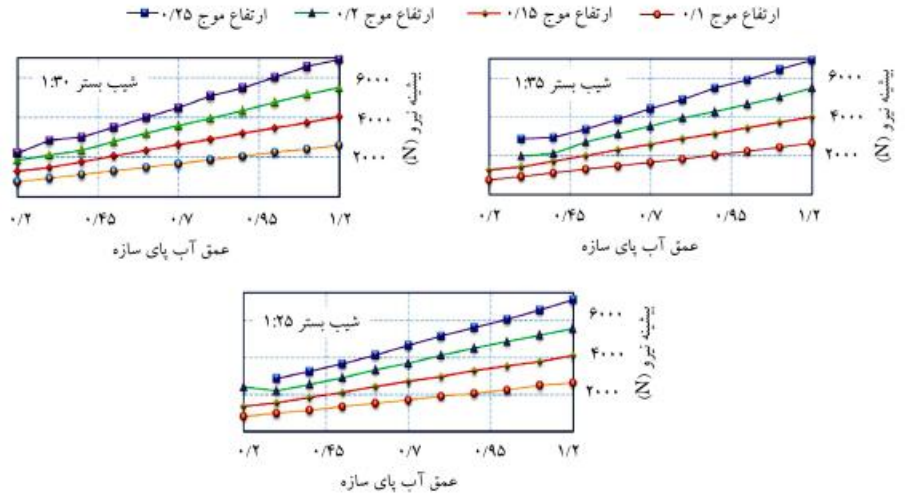
۳.۴. تأثیر جانمایی موج‌شکن در نیرو

جهت بررسی تأثیر جانمایی موج‌شکن در مقدار نیرو، مدل موردنظر با توجه به شکل ۱۲ ساخته شده است. در شرط مرزی سمت چپ، موج تنها با ارتفاع اولیه‌ی ۰٫۲۵ متر و عمق آب دور از ساحل برابر با ۰٫۵ متر در نظرگرفته شده است. برای بررسی مسئله، سازه‌ی موردنظر به سمت ساحل حرکت داده شده و در مکان‌های مشخص، شبیه‌سازی عددی شده است.

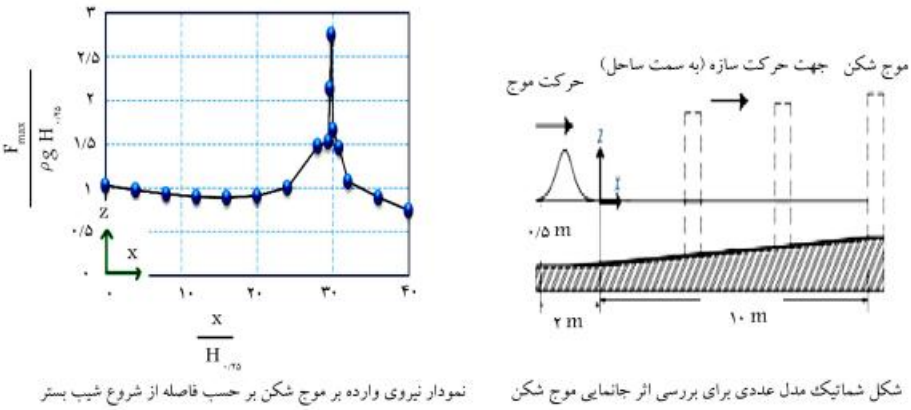
نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که با حرکت سازه به سمت ساحل، در ابتدا مقدار نیرو با کاهش تقریباً خطی همراه است که علت آن، کاهش عمق آب، کاهش سرعت و طول موج، و همچنین کاهش سطح فشار اعمالی بر سازه است. با نزدیک‌ترشدن سازه به ساحل، به‌تدریج موج از حالت ناشکنا به شکنا تغییرشکل می‌دهد، که با افزایش سرعت اوربیتال‌های افقی ذرات قله‌ی موج همراه است. مطابق

www.SID.ir

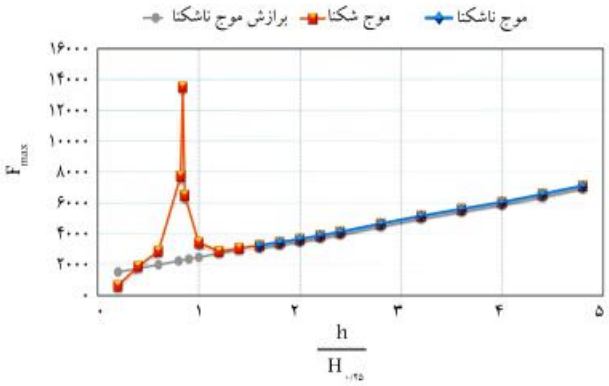
Archive of SID



شکل ۱۱. بررسی تأثیر شیب بستر در مقدار نیروی افقی وارد سازه.



شکل ۱۲. تاثیر جانمایی موج شکن بر مقدار نیرو.



شکل ۱۳. نمودار نیروی وارده بر موج شکن بر حسب نسبت عمق آب پای کیسون به ارتفاع اولیه‌ی موج.

شکل مذکور، با عبور از فاصله‌ی ۴ متری از شروع شیب، نیرو با نرخ تندی با افزایش همراه است و نیز مقدار نیرو زمانی که زبانه‌ی موج در نزدیکی سطح آب بر روی سازه بشکند، با افزایش همراه است.

شکست موج بر روی سازه باعث می‌شود تا به‌صورت لحظه‌یی نیروی چندین برابری به سازه وارد شود. این مقدار نیروی زیاد هر چند که در زمان بسیار کوتاهی بر سازه وارد می‌شود، ولی از آنجایی که به دلیل طبیعت شکست موج، این اتفاق در عمق‌های کم و در قسمت پایین‌تر موج‌شکن رخ می‌دهد، می‌تواند باعث آب‌شستگی پای سازه و در نتیجه ناپایداری سازه درکنار جابه‌جایی افقی سازه به علت نیروی افقی زیاد شود. مطالعات ایماس[9] و همکاران (۲۰۱۲)،[16] نیز خاطر نشان کرده است که نیروی ضربه‌یی ایجادشده در اثر شکست موج بر سازه باعث واردآمدن نیروی زیادی به بستر سازه می‌شود، که به سرعت باعث تضعیف پی سازه می‌شود. با عبور از این ناحیه، به‌واسطه‌ی اتلاف انرژی موج در اثر شکست، از سرعت اوربیتال‌های افقی و در نتیجه نیروی وارد بر سازه کاسته می‌شود.

۴.۴. تأثیر فرم موج و نحوه‌ی شکست آن بر نیرو

برای بررسی این پارامتر، در مدل عددی در بُعد عرض از یک سلول و در دو راستای افق و قائم از مش غیریکنواخت مربعی ۸ میلی‌متر تا ۲/۵ میلی‌متر استفاده شده است. برای شرط مرزی سمت چپ از موج تنها به ارتفاع ۰/۲۵ متر و برای شرط مرزی سمت راست از موج‌شکن قائم با عمق آب پای سازه ۰/۰۵ متر تا ۱/۲ متر استفاده شده است. در شکل ۱۳، نتایج بیشینه‌ی مقدار نیروی وارده بر موج‌شکن برای بستر با شیب ۱:۲۵ و طول ۱۰ متر نشان داده شده است.

آزمون‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که انواع حالت‌های موج برخوردی به سازه

www.SID.ir

Archive of SID

به ۴ دسته تقسیم می‌شوند. در ادامه به معرفی آنها و بحث درباره‌ی نحوه و میزان تأثیرشان در مقدار نیروی وارد بر سازه پرداخته شده است.

۱.۴.۴. امواج ناشکنا

این فرم از امواج بلند، که در عمق‌های دور از ساحل روی می‌دهد، نیروی کمی در مقایسه با دیگر نوع امواج به سازه وارد می‌کند. در عین حال، بازه‌ی زمانی اعمال نیرو بیشتر است. در امواج بلند ناشکنا، سرعت اوربیتال‌های افقی با حرکت از بستر تا سطح آب مقدار ثابتی است و فقط سرعت آن در سطح موج کمی بیشتر است. سرعت اوربیتال های افقی، مقدار این نیرو و ارتباط آن با شیب بستر در قسمت‌های قبل بحث شده است.

۲.۴.۴. امواج در حال شکست

امواج ناشکنا با نزدیک‌شدن به ساحل و عبور از بستر شیب‌دار، طول موج آن‌ها کاهش پیدا می‌کند و ارتفاع آن بیشتر می‌شود. شکل ۱۴، الگوی سرعت جریان را برای عمق اولیه‌ی آب ۰٫۵۵ متر نشان می‌دهد. موج با حرکت به سمت ساحل تیزتر و به سمت جلو خم می‌شود. این فرم موج که موج بور نامیده می‌شود، سرعت اوربیتال‌های افقی سیال در قله‌ی آن به سرعت با افزایش همراه است. در نتیجه، نیروی وارده در این حالت برخلاف امواج ناشکنا، با کاهش عمق با نرخ مثبتی در هر لحظه با افزایش همراه است.

۳.۴.۴. شکست موج بر روی سازه

چنانچه زبانه‌ی موج در حال نزدیک‌شدن به سطح آب جلوی خود بر روی بدنه‌ی سازه بشکند، در زمان کمی، سرعت افقی زیاد ذرات قله‌ی موج به فشار بر روی بدنه‌ی سازه تبدیل می‌شود. در نتیجه، نیروی چند برابری به سازه در زمان بسیار کوتاهی وارد می‌شود. برای بررسی نسبت بیشینه‌ی نیروی موج شکسته بر روی سازه نسبت به موج ناشکنا به این صورت عمل شده است:

با استفاده از نتایج قسمت بررسی شیب بستر مشاهده شده است که نیروی امواج ناشکنا با تغییر عمق از الگوی ثابتی پیروی می‌کند، و رابطه‌ی آن برای مدل در حال بررسی در این بخش به‌صورت رابطه‌ی ۶ است:

$$F = ۱۲۰۹٫۷x + ۱۲۶۰ \qquad (۶)$$

که در آن، x نسبت عمق آب در پای کیسون به ارتفاع اولیه‌ی موج و F بیشینه‌ی نیروی وارد بر سازه از طرف امواج ناشکنا بر حسب نیوتن برای شیب بستر ۱:۲۵ است. برای مقایسه‌ی مقدار نیروی موج ناشکنا با موج در حال شکست، از عمق آب پای سازه در بحرانی‌ترین حالت شکست موج بر روی سازه استفاده شده است. در این حالت عمق آب ۰٫۲۱۰ متر است و نتایج نشان داده است که نیرویی برابر با ۱۳۵۱۴ نیوتن برای شکست موج بر روی سازه و نیرویی برابر با ۲۲۷۶ نیوتن در برخورد امواج ناشکنا بر سازه وارد شده است. ملاحظه می‌شود که در حالت شکست موج بر روی سازه، نیرویی تا حدود ۶ برابر موج ناشکنا در حالت مشابه به موج‌شکن کیسونی قائم وارد شده است.

۴.۴.۴. موج شکنا

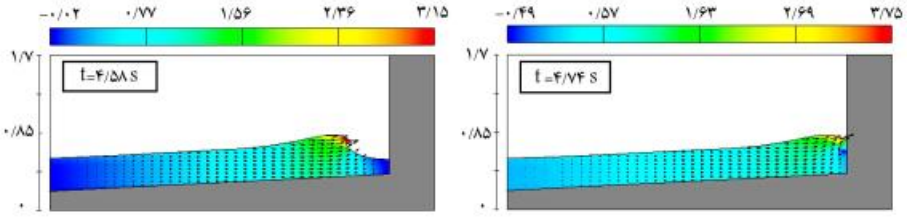
پس از شکست موج از سرعت اوربیتال های افقی و ارتفاع آن به شدت کاسته می‌شود. در نتیجه، نیروهای وارده بر سازه در این حالت نسبت به امواج ناشکنا با شدت بیشتری با کاهش همراه است.

موضوع بررسی فرم موج در مقدار و زمان اعمال نیروکه در این بخش بحث شده است، توسط آریکاوا (۲۰۱۲) نیز بررسی شده است. آریکاوا (۲۰۱۲) با شبیه‌سازی آزمایشگاهی امواج مختلف سونامی بزرگ ژاپن در سال ۲۰۱۱ نشان داده است که با تیزشدن موج و نزدیک‌شدن امواج به ساحل، مقدار نیروی وارد بر سازه بیشتر و در مقابل، زمان اعمال بیشینه‌ی نیرو کمتر می‌شود.

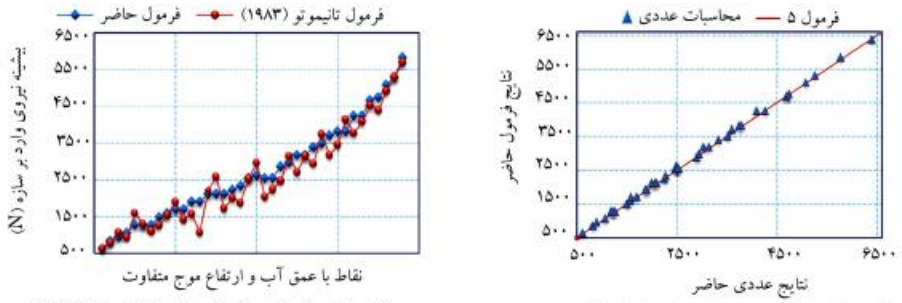
۵.۴. معرفی فرمول محاسبه‌ی نیروی وارده بر موج‌شکن‌های کیسونی از طرف امواج بلند

در این بخش با توجه به نتایج بررسی‌های عددی صورت‌گرفته، رابطه‌ی ۷ برای محاسبه‌ی مقدار بیشینه‌ی نیروی افقی وارد بر موج‌شکن های کیسونی از طرف امواج بلند ناشکنا معرفی شده است:

$$F = ۲٫۱\rho g H_{ini} h_{toe} b \qquad (۷)$$



شکل ۱۴. بردارهای افقی سرعت جریان (بر حسب متر بر ثانیه) برای عمق آب و ارتفاع اولیه‌ی موج به ترتیب ۰٫۵۵ و ۰٫۲۵ متر، در بستر با شیب ۱:۲۰ و به طول ۸ متر.



مقایسه نتایج فرمول معرفی شده با فرمول تانیموتو(۱۹۸۳)[۵]

مقایسه نتایج مدل عددی پژوهش حاضر با فرمول ارائه شده

شکل ۱۵. مقایسه نیروهای بدست آمده از مدل عددی حاضر با فرمول تانیموتو (۱۹۸۳).

www.SID.ir

Archive of SID

که در آن، g شتاب گرانش بر حسب متر بر مجذور ثانیه، ρ چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، H_{ini} ارتفاع اولیه‌ی موج بدون تأثیر سازه بر حسب متر، h_{toe} عمق آب در پای سازه بر حسب متر، b عرض سازه بر حسب متر، و F نیروی افقی وارد بر موج‌شکن کیسونی بر حسب نیوتن است. در شکل ۱۵، بین نتایج عددی پژوهش حاضر و نیز فرمول تانیموتو (۱۹۸۳) با رابطه‌ی ۷ مقایسه صورت گرفته است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، امواج دوبُعدی بر روی موج‌شکن‌ها شبیه‌سازی شده است. پس از صحت‌سنجی نتایج عددی مقدار نیرو و پروفیل سطح آزاد برای امواج بلند، به بررسی پارامترهای مؤثر در مقدار نیروهای وارده بر سازه‌ی موردنظر پرداخته شده است. نتایج مدل‌سازی نیروهای وارده بر موج‌شکن‌های کیسونی از طرف امواج بلند را می‌توان به این صورت بیان کرد:

۱. نتایج صحت‌سنجی نشان می‌دهد که نرم‌افزار FLOW-3D، دقت خوبی در شبیه‌سازی سطح آزاد و نیروهای وارده بر موج‌شکن‌های کیسونی از طرف امواج بلند دارد.

۲. توزیع فشار وارده بر موج شکن‌های کیسونی، علاوه بر ارتفاع موج با عمق آب و طول موج رابطه‌ی مستقیم دارد.

۳. فرمولی جهت محاسبه‌ی نیروی وارده از طرف امواج بلند ناشکنا بر موج‌شکن های کیسونی ارائه شده است.

۴. با افزایش شیب بستر از حالت بستر بدون شیب تا بستر با شیب ۱:۲۵، مقدار نیرو ۱۰ تا ۲۰ درصد با توجه به عمق آب افزایش داشته است.

۵. در بسترهای شیب‌دار با افزایش مقدار ارتفاع اولیه‌ی موج، نرخ افزایش نیرو نسبت به امواج با ارتفاع کوتاه‌تر با افزایش همراه است. با افزایش ارتفاع موج از ۱۰ سانتی‌متر به ۲۵ سانتی‌متر مشاهده می‌شود که نیروی وارد بر سازه حدود ۲٫۷ برابر شده است.

۶. با افزایش عمق آب، زمان اعمال نیرو به سازه با افزایش همراه است. با افزایش عمق آب از ۴۰ سانتی‌متر به ۱۲۰ سانتی‌متر مشاهده شده است که زمان اعمال نیرو از ۲٫۶ ثانیه به ۷٫۱ ثانیه افزایش یافته است.

۷. با حرکت سازه به سمت ساحل (در بسترهای شیب‌دار)، نیروهای وارده در ابتدا با کاهش همراه است، اما با نزدیک‌شدن به ساحل و تغییر فرم موج، با افزایش نیرو همراه می‌شود و بعد از نقطه‌ی شکست، به شدت از مقدار نیرو کاسته می‌شود.

۸. بر اثر شکست موج برروی بدنه‌ی موج‌شکن‌ها، نیروهایی تا حدود ۶ برابر امواج ناشکنا بر سازه اعمال شده است.

تقدیر و تشکر

نرم‌افزار FLOW-3D توسط شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس تهیه شده است. نویسندگان از همکاری صمیمانه‌ی مدیریت این شرکت به دلیل در اختیار گذاشتن این نرم‌افزار قدردانی می‌کنند.

پانوشت‌ها

1. Guno
2. Kamaishi
3. volume of fluids
4. fractional area/volume obstacle representation
5. random number generation (RNG)
6. moving object
7. Probe
8. Guizien
9. Imase

منابع (References)

1. Nassiraei, H. "Numerical simulation of long waves forces on caisson breakwaters", Thesis of Master of Science in Marine Structures, Tarbiat Modares University (2013). (in Persian)

2. Heidarzadeh, M., Pirooz, M.D., Zaker, N.H., Yalciner, A.C., Mokhtari, M. and Esmaeily, A. "Historical tsunami in the Makran subduction zone off the southern coasts of Iran and Pakistan and results of numerical modeling", *Ocean Engineering*, **35**(8-9), pp. 774-786 (2008).

3. Heidarzadeh, M., Pirooz, M.D. and Zaker, N.H. "Modeling the near-field effects of the worst-case tsunami in the Makran subduction zone", *Ocean Engineering*, **36**(5), pp. 368-376 (2009).

4. Fritz, H.M., blount, C.D., Albusaidi, F.B. and Al-Harthy, A.H.M. "Cyclone Gonu storm surge in Oman", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **86**(1), pp. 102-106 (2010).

5. Tanimoto, K. "On the hydraulic aspects of tsunami breakwaters in Japan", in: *Tsunami Their Science and Engineering*, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, pp. 423-435 (1983).

6. Mizutani, S. and Imamura, F. "Dynamic wave force of tsunamis acting on a structure", *Proceeding of the International Tsunami Symposium*, pp. 941-948 (2001).

7. Hsiao, S.C., Hsu, T.W. and Lin, T.C. "Tsunami like solitary wave impinging and over-topping an impermeable seawall: Experimentas and RANS modeling", *Journal Coastal Engineering*, **57**(1), pp. 1-18 (2010).

8. Tucker, J. "The failure of the Kamaishi protection breakwater", *Journal of Undergraduate Engineering Research and Scholarship*, **1** pp. 1-7 (2013).

9. Suppasri, A., Shuto, N., Imamura, F., Koshimura, S., Mas, E. and Yalciner, A.C. "Lessons learned from the

www.SID.ir

Archive of SID

2011 great east Japan tsunami: Performance of tsunami countermeasures, coastal buildings, and tsunami evacuation in Japan", *Pure and Applied Geophysics*, **170**(6-8), pp. 993-1018 (2013).

10. Rezaee, H. and Ketabdari, M.J. "Estimate breaking wave pressures on anchored float-ing breakwater box using a volume fraction", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **27**(4), pp. 111-122 (2011). (in Persian)
11. Arikawa, T. "Tsunami and damage to coastal facilities of the March 11, 2011, Tohoku. Japan Earthquake", *15th world Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, pp. 753-784 (2012).
12. Guizien, K. and Barthelemy, E. "Accuracy of solitary wave generation by a piston wave maker", *Journal of Hydraulic Research*, **40**(3), pp. 321-333 (2002).
13. Sainflou, G. "Essai sur les digues martimes verticales, Ann. Ponts et Chausees", *Annales de Ponts et Chaussées*, **98**(1), pp. 5-48 (1928).
14. Flow Science Inc., *FLOW-3D User's Manuals, V10*, Inc., Santa Fe, N.M (2012).
15. Lau, T.L., Ohmachi, T., Inoue, S. and Lukkunaprasit, P., *Experimental and Numerical Modeling of Tsunami force on Bridge Decks*, In Book: Tsunami- a Growing Disaster, In Tech Publication, Chapter 6, pp. 105-130 (2011).
16. Imase, T., Maeda. K. and Mlyake. M. "Detsabilization of a caisson-type breakwater by scouring and seepage failure of the seabed due to tsunami", ICSE 6-128, Paris, France, pp. 807-814 (2002).

www.SID.ir