

مدل‌سازی عددی نیروهای وارده از طرف امواج سونامی بر سازه‌های ساحلی

محمدعلی لطف‌اللهی‌یقین^{۱*}، حسین نصیرائی^۲

۱- استاد سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، استان آذربایجان شرقی، تبریز، پست الکترونیکی: lotfollahi@tabrizu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، استان آذربایجان شرقی، تبریز، پست الکترونیکی: h.nassiraei@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۹

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۱۲

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۴، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

هدف از این مقاله، بررسی نیروهای وارده از طرف امواج سونامی بر سازه‌های ساحلی با کمک شبیه‌سازی عددی است. برای انجام شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شد. نتایج صحت‌سنجی نشان داد که این نرم‌افزار از دقت خوبی در شبیه‌سازی مسئله موردنظر برخوردار است. در ادامه بررسی‌های مختلفی روی مقدار نیروهای وارده از طرف امواج شکننا و ناشکننا سونامی بر موج‌شکن کیسونی، دیوار ساحلی شیب‌دار با زاویه ۴۵ درجه و دیوارهای ساحلی با شعاع‌های انحنا مختلف انجام گرفت، سپس روابطی جهت محاسبه اندازه نیروی امواج ناشکننا سونامی وارده بر سازه‌های ساحلی اشاره شده معرفی گردید. بررسی نیروهای امواج شکننا سونامی نشان داد که حداکثر مقدار نیروهای وارده از طرف این امواج بر سازه‌های انحنا دار و شیب‌دار با زاویه ۴۵ درجه به ترتیب معادل ۲۰ و ۳۵ درصد نیروهای وارده بر موج‌شکن‌های کیسونی است.

کلمات کلیدی: سازه‌های ساحلی، سونامی، امواج تنها، دیوارهای ساحلی، نیرو، شبیه‌سازی عددی، FLOW-3D.

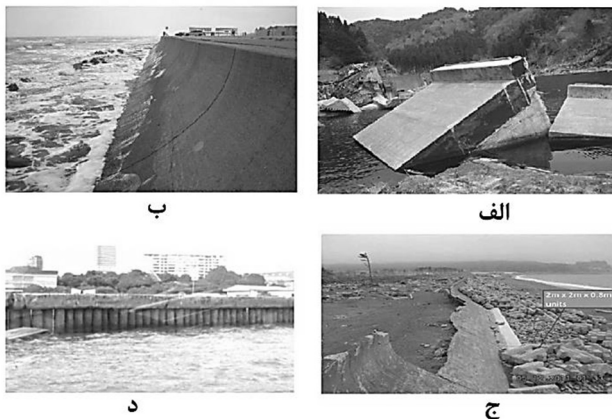
۱. مقدمه

می‌شود. این امر می‌تواند سبب شود تا نیروی زیادی به سازه‌های در معرض برخورد با آن وارد شود (Liu et al., 2011). بررسی‌ها روی ارتفاع امواج سونامی رخ داده نشان می‌دهند که بسته به شرایط مختلف از جمله توپوگرافی بستر، ارتفاع امواج سونامی در سواحل، متفاوت است. تاریخچه پیشینه ارتفاع امواج سونامی‌های رخ داده در سواحل سانریکو^۱ ژاپن در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین علاوه بر ارتفاع موج، مطالعات نشان می‌دهند که نیروهای وارده از طرف امواج سونامی بر سازه، ارتباط تنگاتنگی با فرم موج و موقعیت آن دارد. همین‌طور امواج در حال شکست

بررسی سونامی‌های رخ داده از دو دهه پیش تاکنون نشان می‌دهند، هر سال به طور متوسط یک سونامی در جهان رخ می‌دهد که خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را به همراه دارد (Kanoğlu and Synolakis, 2015). این پدیده که متشکل از امواج بلند است، معمولاً در اثر زمین لرزه‌های دریایی یا زمین لغزش‌ها به وجود می‌آید. امواج سونامی در آب‌های عمیق ارتفاعی کمتر از نیم متر دارند اما می‌توانند با سرعت بیشتر از ۵۰۰ کیلومتر در ساعت حرکت کنند. با نزدیک شدن این امواج به مناطق کم عمق، از بلندی موج کاسته شده و در مقابل به ارتفاع آن افزوده

^۱ Sanriku

آزمایشگاهی روی تاثیر درختان ساحلی بر بالاروی امواج سونامی در سال ۲۰۰۹ انجام شده است. در این بررسی درختان در ۳ لایه متفاوت، در ساحلی با شیب ۱ (قائم) به ۵ (افقی)، مورد اصابت امواج سونامی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده است که درختان ساحلی نقش موثری در کاهش بالاروی امواج داشته‌اند به طوری که تا ۴۵ درصد سبب کاهش بالاروی شده‌اند، همچنین فرمولی جهت تخمین بالاروی امواج ارائه شده است (Irtem et al., 2009). نتایج روی نیروی امواج تنهای در حالت شکست بر موج‌شکن‌های شناور، نشان داده است که نیروی موج در حال شکست روی این موج‌شکن‌ها، حدود ۳/۷ برابر موجی است که با همین ارتفاع حالت شکست ندارند (رضایی و کتابداری، ۱۳۹۰).

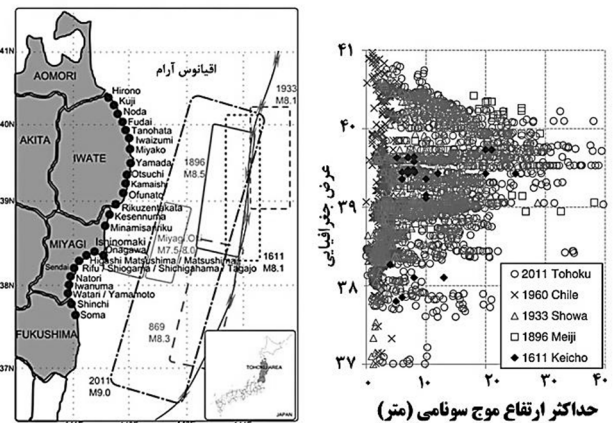


شکل ۳: سازه‌های ساحلی مورد استفاده در مناطق سونامی خیز، الف: موج‌شکن کامایشی منهدم شده در سونامی بزرگ ۲۰۱۱ ژاپن (Tsuji et al., 2011)، ب: دیوار ساحلی انحنادار در جزایر گالوستون آمریکا، پ: دیوار ساحلی منهدم شده در سونامی ۲۰۱۱ ژاپن (Ewing, 2011)، ت: موج‌شکن استوانه‌ای در سواحل پنجاب سنگاپور (Liu et al., 2011).

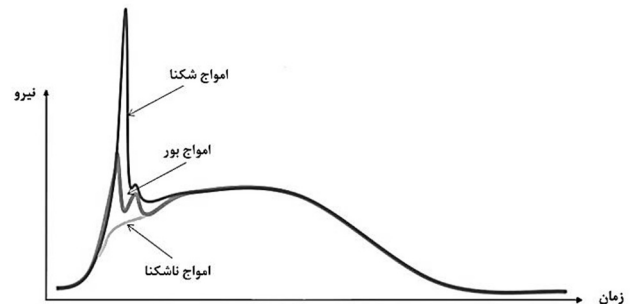
در این مقاله تلاش شده است تا به سوالات بدون پاسخ در این زمینه، به شیوه مناسبی پاسخ داده شود. مجموعه‌ای از سوالات به شرح زیر هستند.

- ۱- مقدار نیروهای وارده بر سازه‌های مختلف در معرض امواج سونامی ناشکنا چه اختلافی با یکدیگر دارند؟
- ۲- چه رابطه‌ای بین نیروهای وارده از طرف امواج ناشکنا بر سازه‌های ساحلی مختلف با مشخصات سازه و امواج وجود دارد؟
- ۳- چه تفاوتی از نظر مقدار و زمان اعمالی نیروهای وارده از طرف امواج شکنا بر سازه‌های ساحلی مختلف وجود دارد؟

روی سازه، نیروهای بزرگتری در مقایسه با دیگر فرم‌های امواج به سازه وارد می‌نمایند. نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که نیروی وارده از طرف امواج سونامی شکنا بر سازه، در زمان کوتاهی کاهش می‌یابد (Arikawa, 2012). وارد شدن نیروی امواج سونامی بر سازه‌ها و تخریب آن‌ها منجر به صدمات فراوانی در گذشته شده است. وقوع سونامی ۲۶ دسامبر ۲۰۰۴ در اقیانوس هند و سونامی بزرگ ۲۰۱۱ ژاپن علاوه بر خسارات مالی فراوان سبب کشته شدن به ترتیب ۲۲۵ هزار نفر و ۱۶ هزار نفر شده است.



شکل ۱: بیشینه ارتفاع امواج سونامی رخ داده در سواحي سانریکو ژاپن (Suppasri, 2012)



شکل ۲: مقایسه تاثیر انواع فرم امواج سونامی در برخورد بر موج‌شکن‌ها

در شکل ۳ چند نمونه از سازه‌های ساحلی مورد استفاده قرار گرفته در مناطق مختلف در معرض سونامی نشان داده شده است. بررسی عملکرد موج‌شکن‌های ستونی (لوله‌ای) در مقابل اصابت امواج تنها نشان داد که با کاهش فاصله بین ستون‌ها، عبور موج کاهش و انعکاس موج افزایش داشته است. همچنین ضریب بدون بعد شده عبور و انعکاس امواج، حساسیت محسوسی با ارتفاع موج ندارند (Liu et al., 2011). مطالعات

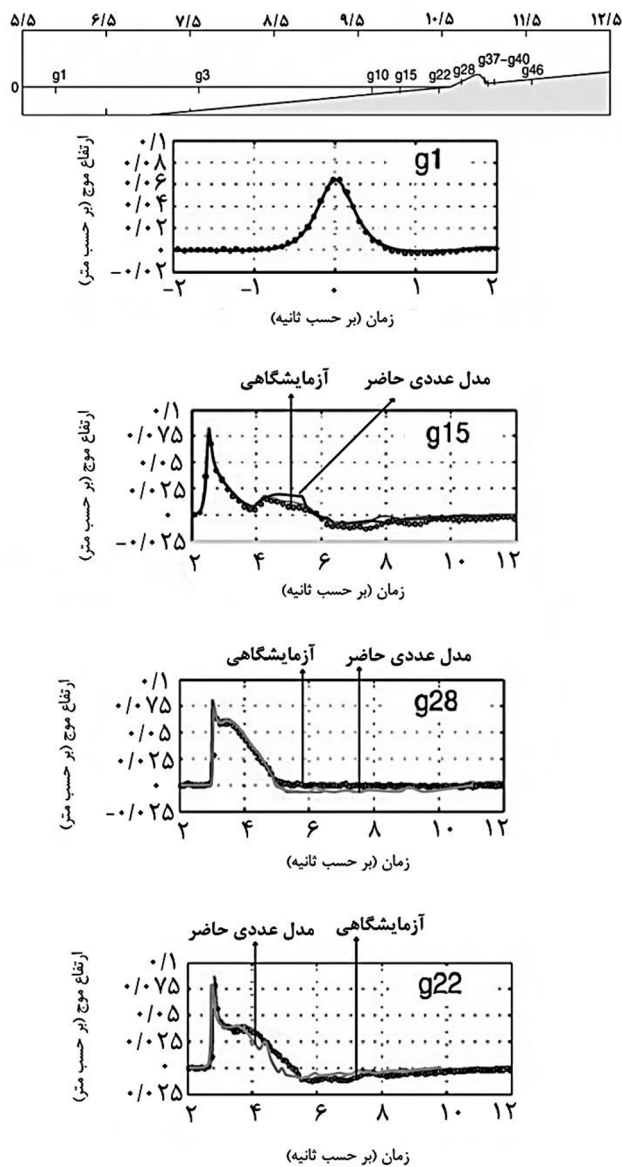
۲. مواد و روش تحقیق

مدل عددی، بیشینه فشار نقطه‌ای وارد بر ۸ نقطه مشخص شده بر سازه، استخراج گردید.

این تحقیق با استفاده از معادلات RANS در نرم افزار حجم محدود FLOW-3D انجام شده است. این نرم‌افزار از دو روش VOF و FAVOR به ترتیب برای محاسبات سطح آزاد (سیال) و تعریف کردن جسم (سازه‌های ساحلی) استفاده می‌کند. در این مطالعه از نسخه ۱۰/۰/۱ نرم‌افزار استفاده شده است. برای سنجش اعتبار نتایج حاصل از مدل عددی حاضر، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی و تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. برای این کار، نتایج سطح آزاد مدل عددی توسعه داده شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است (Hisao and Lin, 2010) و برای مقایسه نتایج نیروی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی و تجربی، از مطالعات آزمایشگاهی (Lin et al., 2012) و نتایج تجربی (Sainflou, 1928) استفاده شده است.

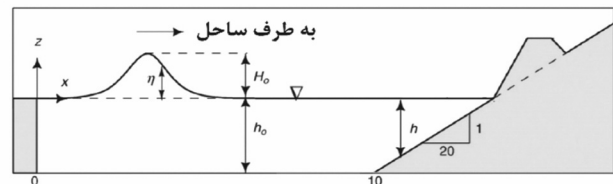
۱-۲ صحت سنجی سطح آزاد

برای مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج سطح آزاد آزمایشگاهی (Hisao and Lin, 2010)، شکل ۴ در اتوکد مدل شد و به صورت فایل اس-تی-ال در نرم‌افزار FLOW-3D وارد گردید. در شروع شرط مرزی از عمق آب و ارتفاع اولیه موج به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۶۳۸ متر استفاده شد. بررسی و مقایسه نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که مدل عددی حاضر قادر است تا سطح آزاد امواج سونامی با فرم‌های مختلف را به خوبی مدل نماید، به خصوص زمانی که امواج رفتار غیر خطی و پیچیده در حالت شکست دارند (شکل ۵).



شکل ۵: مقایسه کمی نتایج سطح آزاد

در مرحله بعد، فشار نقطه‌ای حاصل نسبت به فشار آب ساکن در شروع شرط مرزی بی‌بعد گشت. همچنین برای استخراج نیروی کل افقی وارد بر سازه (بخش ۲-۲-۲)، در مرحله تکمیل مدل قسمت حرکت اجسام^۱ در نرم‌افزار را فعال و در مرحله بعد، حرکت سازه در تمام جهات برابر صفر قرار داده شد. با انجام این کار می‌توان مجموع نیروهای وارد شده به سازه را در هر



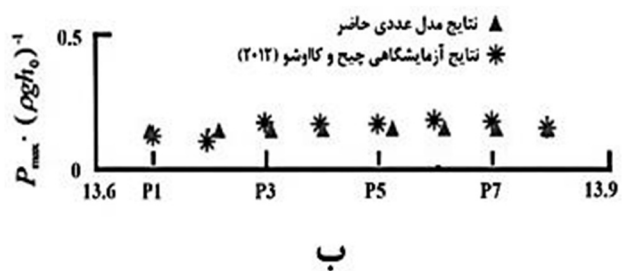
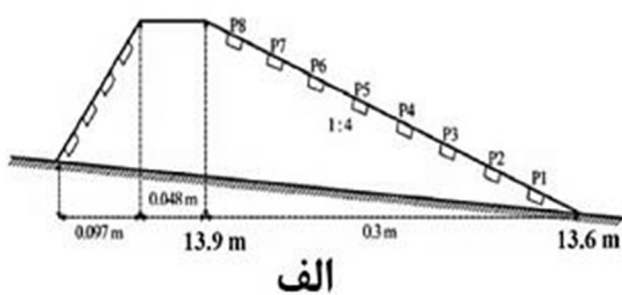
شکل ۴: شماتیک مدل عددی (بدون مقیاس) (Hsiao et al., 2010)

۲-۲ صحت‌سنجی نیرو

برای صحت‌سنجی نیرو، ابتدا مشابه با آزمون آزمایشگاهی، مدل عددی مشابه آن (بخش ۲-۲-۱) ساخته شد. پس از اجرای

^۱ Probe

۶). همچنین بستر بدون شیب به طول ۱۰ متر از شروع شرط مرزی شبیه‌سازی شد. در شروع شرط مرزی جهت شبیه‌سازی امواج سونامی، از موج تنها (مشابه با شرایط آزمایشگاهی) استفاده گردید. همچنین دیواره‌های شبکه مرزی همانند محیط آزمایشگاه بصورت وال^۱ در نظر گرفته و از مدل آشفتگی RNG استفاده شد. بعد از تکمیل مدل و اجرای آن برای مقادیر عمق و ارتفاع موج تنها به ترتیب برابر با ۰/۲۵۶ متر و ۰/۰۲۵۶ متر، خروجی‌های مورد نظر دریافت شد و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. در شکل‌های ۵ و ۶ مدل به صورت شماتیک و همچنین مشخصات محل قرارگیری فشارسنج‌ها و نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی نشان داده شده است. مقایسه نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۶ نشان می‌دهد که مدل عددی حاضر قادر است تا فشار و نیروی وارده بر سازه‌های ساحلی را به خوبی پیش‌بینی نماید.



شکل ۶: الف) شماتیک سازه، ب) مقایسه نتایج آزمایشگاهی (Lin et al., 2012) با نتایج مدل عددی حاضر

۲-۲-۲ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج فرمول سن‌فلو (Sainflou, 1928)

در این قسمت، به مدل‌سازی مسئله و بررسی نتایج عددی مدل حاضر با نتایج فرمول سن‌فلو (Sainflou, 1928) پرداخته شده است. برای شبیه‌سازی مسئله مورد نظر از موج خطی با

جهتی بر حسب زمان به صورت مستقیم از قسمت پراب نرم‌افزار دریافت نمود. این نرم‌افزار برای محاسبه نیروی وارده از طرف امواج سونامی بر سازه، معادلات مومنتوم (ناویر استوکس) را در سه جهت مختصات x ، y و z با روش حجم محدود حل می‌نماید و با انتگرال‌گیری از فشار امواج وارده بر سازه، مجموع نیروهای وارده را در جهت مورد نظر محاسبه می‌کند. در رابطه ۱ معادله مومنتوم در جهت x و در رابطه ۲ نحوه انتگرال‌گیری فشار وارده بر سازه برای محاسبه نیرو نشان داده شده است (Lau, 2011).

$$\frac{du}{dt} + (1/V_F)(uA_x \delta u / \delta x + vA_y \delta u / \delta y + wA_z \delta u / \delta z) = (-1/\rho)(\delta p / \delta x) + g_x + f_x \quad (1)$$

در رابطه ۱، V_F نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان، u ، w به سرعت افقی سیال به ترتیب در جهت‌های x ، y و z ، t زمان، A_x ، A_y و A_z به ترتیب برابر با مساحت کسری محیط به جریان در جهت‌های x ، y و z شتاب بدنه در جهت افقی، f_x شتاب لزجت در جهت افقی، ρ چگالی سیال و p فشار سیال است.

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

در رابطه ۲، dA سطح در تماس با سیال، τ بردار تنش برشی، n بردار نرمال واحد و F نیروی وارده بر سازه است.

برای انتخاب مقادیر مناسب گام‌های زمانی، آزمون‌های متعددی انجام گرفته است. این آزمون‌ها برای گام‌های زمانی مختلف اجرا گردید. سپس با مقایسه نتایج آزمون‌های صورت گرفته با نتایج آزمایشگاهی و تجربی، بهترین مقادیر برای گام زمانی انتخاب شد. در مرحله بعد با استفاده از مدل معتبرسازی شده به بررسی پارامتریک پرداخته شد.

۲-۲-۲-۱ صحت‌سنجی نیرو با نتایج آزمایشگاهی (Lin et al., 2012)

برای مش‌بندی شبکه عددی، با توجه به اینکه مدل دو بعدی مد نظر است، برای بعد عرض از یک سلول و در دو راستای افق و قائم از مش غیریکنواخت مربعی ۸ میلی‌متر تا ۳ میلی‌متر استفاده شد. در مدل عددی، سازه ساحلی با شیب بدنه رو به دریای ۱ (قائم) به ۴ (افقی) و عرض ۱ متر روی بستری با شیب ۱ (قائم) به ۲۰ (افقی) ساخته شده است. سازه ساحلی شیب‌دار در فاصله ۳/۶ متری از شروع شیب بستر دریا مدل گردید (شکل

^۱ Wall

۳-۱ مقایسه نیروی وارده از طرف امواج ناشکنای سونامی بر سازه‌های ساحلی متفاوت

برای بررسی مقدار نیروهای وارده از طرف امواج ناشکنا بر سازه‌های ساحلی (شکل ۸)، از دو دسته مقادیر ارتفاع موج و عمق آب استفاده شد تا بتوان به طور دقیق‌تر مقدار نیروهای وارده بر سازه‌های مختلف را بررسی نمود. در دسته اول از ارتفاع موج‌های ۰/۰۴ تا ۰/۱ متر با عمق ۰/۴ متر و در دسته دوم از ارتفاع موج ۰/۱ تا ۰/۳ متر با عمق ۱/۲ متر استفاده شد (جدول ۱).

جدول ۱: مشخصات امواج مورد استفاده قرار گرفته برای امواج ناشکنا (بر حسب متر)

ارتفاع موج	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۰
عمق آب	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴
ارتفاع موج	۰/۱۰	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۲۶	۰/۳۰	
عمق آب	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	

همچنین اندازه عرض سازه‌ها، واحد در نظر گرفته شده است. پس از تکمیل و تحلیل مدل، نتایج حداکثر نیروی وارده بر سازه‌های مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. در نمودارهای شکل ۹، محور قائم بیانگر حداکثر نیروی وارد شده بر سازه حاصل از نتایج عددی و محور افقی بیانگر F_0 بوده که از رابطه‌های ۳ و ۴ به دست می‌آیند.

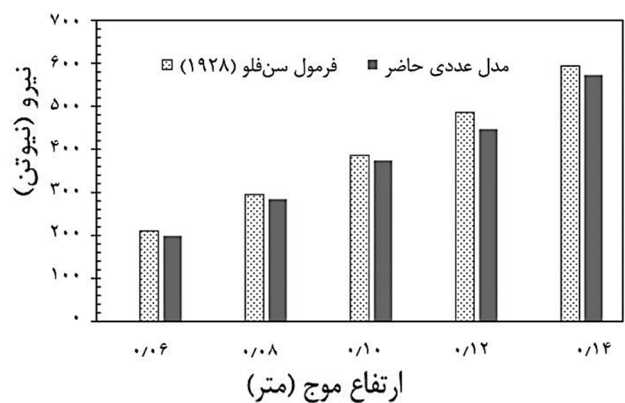
$$F_0 = \rho g h H b \quad (۳)$$

که در آن، ρ چگالی آب (1030 kg/m^3)، g شتاب گرانش زمین (9.81 m/s^2)، h عمق آب پای سازه (بر حسب متر) در حالت تراز ساکن آب، H ارتفاع اولیه موج (بر حسب متر) بدون حضور سازه و b عرض سازه (بر حسب متر) است. این رابطه برای $0.10 < H/h < 0.25$ به صورت رابطه ۴ ارایه شده است.

$$F = K \rho g h H b \quad (۴)$$

که در آن K برای سازه‌های ۱، ۲ و ۴ برابر ۲ به ترتیب با ضریب تعیین ۰/۹۸۲، ۰/۹۶۵ و ۰/۹۹۲ و برای سازه ۳ برابر ۲/۱ با ضریب تعیین ۰/۹۹۳ است.

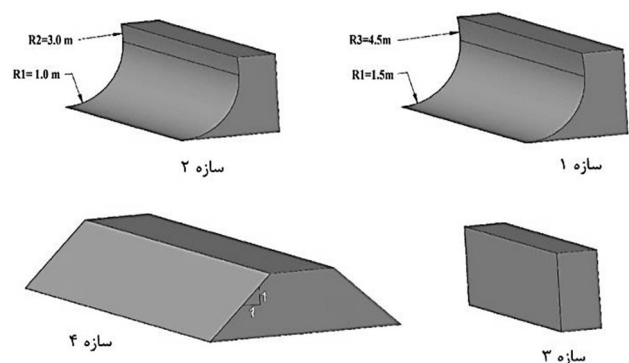
ارتفاع‌های ۶ تا ۱۴ سانتی‌متر به عنوان موج ورودی استفاده گردید. اندازه عرض سازه ۱متر، عمق آب ۳۰ سانتی‌متر و پریود موج ۱۰ ثانیه بود. همچنین دیواره‌های شبکه مرزی همانند محیط آزمایشگاه بصورت وال در نظر گرفته و از مدل آشفتگی RNG استفاده شد. نیروی افقی فشاری کل وارد بر سازه از نرم‌افزار استخراج شده و با نتایج فرمول سن‌فلو (Sainflou, 1928) مقایسه گردید، که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل ۷ حاکی از نزدیک بودن نتایج مدل عددی حاضر به نتایج فرمول سن‌فلو (Sainflou, 1928) است.



شکل ۷: مقایسه نیروی افقی وارده بر کیسون بر حسب عمق آب پای آن برای نتایج فرمول (Sainflou, 1928) با نتایج مدل عددی حاضر

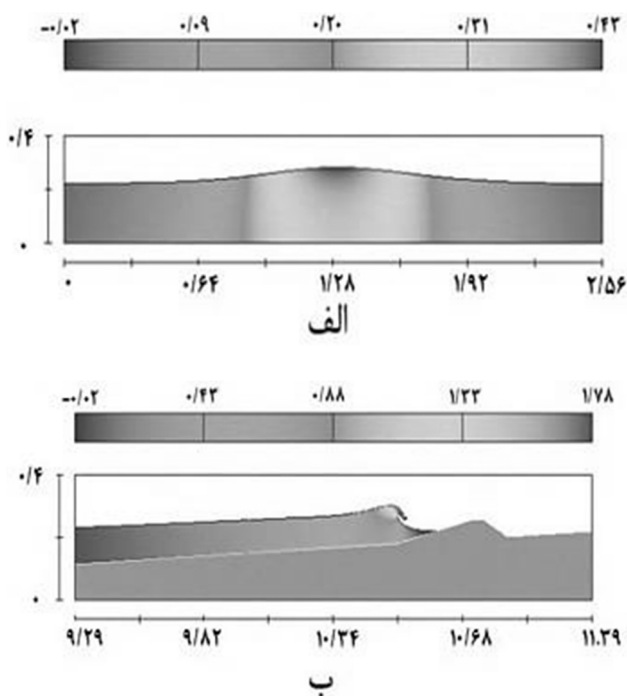
۳.۲ بحث و نتایج

در این بخش مقدار نیروهای وارده بر سازه‌های متفاوت (شکل ۸) در اثر برخورد امواج سونامی ناشکنا، شکنا و شکسته و همچنین زمان اعمال نیروی وارده بر سازه‌های مختلف بررسی شده است.



شکل ۸: سازه‌های ساحلی مورد آزمایش قرار گرفته

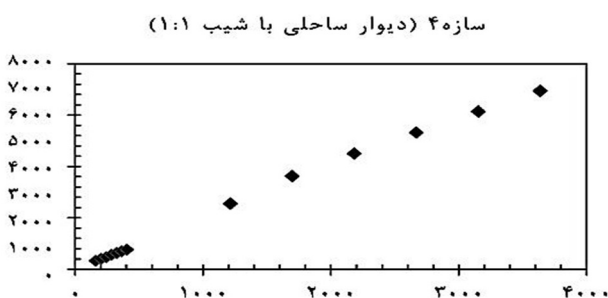
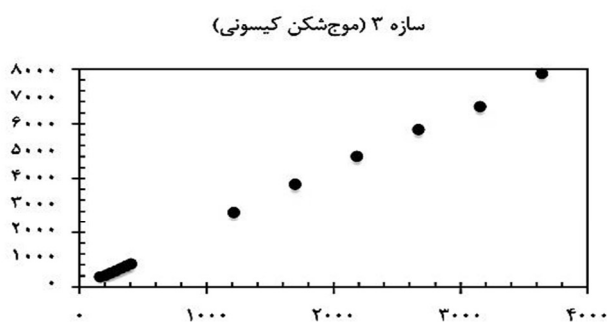
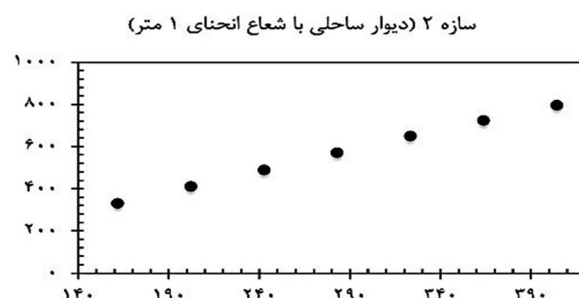
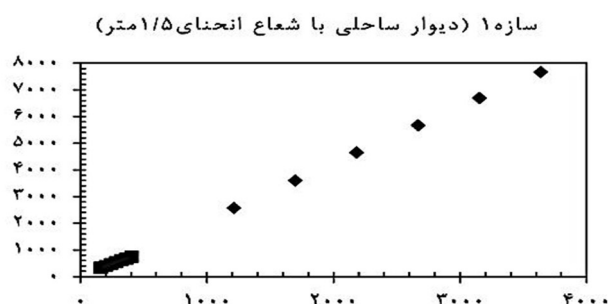
۲۵ (افقی) به طول ۱۰ متر و ارتفاع موج اولیه ۰/۲۵ متر استفاده گردید. دو مثال از امواج ناشکنا و شکنا در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. شکل ۱۱-الف نشان می‌دهد که در زمان شکست موج روی سازه‌های مختلف، در صورت استفاده از سازه‌های ۱، ۲ و ۴ نسبت به سازه ۳، مقدار نیروهای وارده به ترتیب ۸۱، ۷۷ و ۶۵ درصد کاهش یافته است. همچنین تاریخچه زمانی نیروی اعمالی نشان داده شده برای سازه‌های ۱ و ۲ در شکل ۱۱-ب نشان داده شده است. نتایج نیروهای وارده بر دو دیوار ساحلی انحنادار نشان داد که سازه ۱ که از دو انحنا با شعاع‌های ۱/۵ متر در قسمت پایینی و ۴/۵ متر در قسمت بالایی آن تشکیل شده، توانسته است نسبت به سازه شماره ۲ که از انحنا کم‌تری در بدنه آن برخوردار است، نقش بهتری در کاهش مقدار نیروی اعمالی و اتلاف آن ایفا کند. همچنین افزایش شعاع انحنا، باعث یکنواخت‌تر شدن نیروی وارده در طول زمان شکست موج بر سازه شده است.



شکل ۱۰: مقایسه سرعت اوربیتال‌های افقی امواج شکنا (الف) با سرعت اوربیتال‌های افقی امواج ناشکنا (ب) (بر حسب متر بر ثانیه)

نمودارهای نیروی وارده بر سازه شماره ۲ (سازه با دو شعاع انحنا ۱ و ۳ متر) برای فرم‌های مختلف امواج در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

این نتایج نشان می‌دهند که برخورد امواج ناشکنا (عمق ۰/۸۵ و ۱ متر) بر سازه باعث شده تا نیروی اعمالی در بازه



شکل ۹: نتایج حداکثر نیروهای وارده از طرف امواج ناشکنا سونامی بر سازه‌های ساحلی مختلف نسبت به F_0 بر حسب نیوتن

۳-۲ تاثیر فرم‌های مختلف موج‌شکن‌ها در مقدار و زمان نیروی اعمالی از طرف امواج شکنا

جهت بررسی تاثیر نیروی وارده از طرف امواج شکنا بر سازه‌های مختلف (شکل ۸)، از بستر شیب‌دار با شیب ۱ (قائم) به

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، به بررسی نیروهای وارده از طرف امواج سونامی شکنا و ناشکنا بر سازه‌های ساحلی پرداخته شد. نتایج مدل‌سازی نیروهای وارده بر سازه‌های ساحلی مختلف از طرف امواج سونامی را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

۱- نتایج صحت‌سنجی نشان می‌دهند که نرم‌افزار FLOW-3D قادر است تا به خوبی سطح آزاد و نیروهای وارده از طرف امواج سونامی را بر سازه‌های ساحلی پیش‌بینی نماید.

۲- مقدار نیروهای وارده بر سازه‌های مختلف بررسی شده از طرف امواج ناشکنای سونامی برای $0/25 < H/h < 0/10$ ، اختلاف محسوسی با یکدیگر نداشته و تنها نیروی وارده بر سازه کیسونی کمی بیشتر از دیگر سازه‌ها بوده است.

۳- رابطه‌ای جهت پیش‌بینی مقدار نیروهای وارده بر سازه‌های ساحلی مختلف در مقابل اصابت امواج ناشکنای سونامی ارائه شده است.

۴- سازه‌هایی با فرم بدنه انحنادار نقش موثرتری در کاهش نیروی اعمالی از طرف امواج سونامی شکنا نسبت به سازه‌های دیگر داشته و با افزایش شعاع انحنای سازه، کاهش نیروی اعمالی بیشتر محسوس است.

۵- برخورد امواج سونامی شکنا روی سازه‌ای با شعاع انحنای ۱/۵ متر و دیوارهای ساحلی با شیب بدنه ۴۵ درجه، به ترتیب باعث وارد شدن ۲۰ درصد و ۳۵ درصد نیروهای اعمال شده بر سازه‌های قائم شده است.

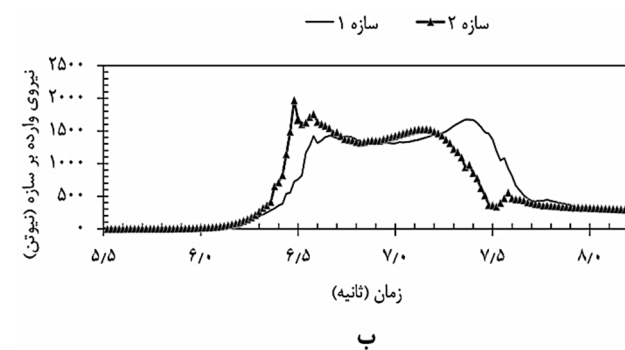
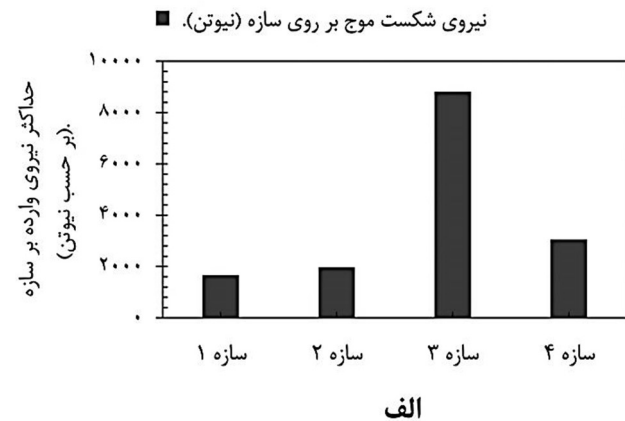
منابع

رضایی، ح.؛ کتابداری، م.ج.، ۱۳۹۰، برآورد فشار موج تنهای در حال شکست بر موج‌شکن صندوقی شناور مهار شده، با استفاده از روش کسر حجمی سیال، مجله عمران شریف، سال چهارم، شماره ۲۷، صفحات ۱۱۱-۱۲۲.

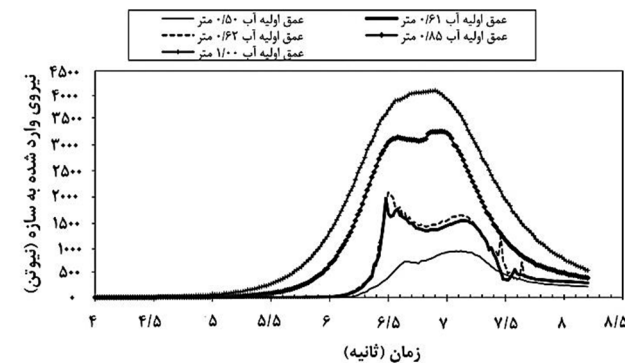
Arikawa, T., 2012. Tsunami and damage to coastal facilities of the March 11, 2011, Tohoku. Japan Earthquake, 15th world conference on earthquake engineering, Lisbon, Portugal, 753-784.

Ewing, L., 2011. Port & harbor damage from the port &

زمانی طولانی بر سازه وارد شود که با افزایش عمق آب، زمان اعمال نیرو نیز با افزایش همراه شده است. اما در برخورد امواج در حال شکست بر سازه (عمق ۰/۶۰ و ۰/۶۱ متر)، در ابتدا نیرو با شیب تند افزایش یافته و پس از زمان بسیار کوتاهی فروکش کرده و با مقدار کم‌تری در زمان طولانی بر موج‌شکن وارد گردیده است.



شکل ۱۱: مقایسه نیروهای وارده بر سازه (الف، ب)



شکل ۱۲: نیروی وارده بر سازه شماره ۲ برای عمق‌های مختلف اولیه آب نسبت به زمان

2011. Numerical investigation of the interactions between solitary waves and pile breakwaters using BGK-based methods. *Computers & Mathematics with Applications*, 61(12): 3668-3677.
- Sainflou, G., 1928. Essai sur les digues martimes verticales, *Ann. Ponts et Chausees*, (translated by W.J., Yardoff, U.S.Army Corps of Engineers), 98(1): 5-48.
- Suppasri, A.; Shuto, N.; Imamura, F.; Koshimura, S.; Mas, E.; Yalciner, A.C., 2013. Lessons learned from the 2011 Great East Japan tsunami: performance of tsunami countermeasures, coastal buildings, and tsunami evacuation in Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 170(6-8): 993-1018.
- Tsuji, Y.; Satake, K.; Ishibe, T.; Kusumoto, S.; Harada, T.; Nishiyama, A.; Kim, H.Y.; Ueno, T.; Murotani, S.; Oki, S.; Sugimoto, M.; Tomari, J.; Heidarzadeh, M.; Watada, Sh.; Imai, K.; Choi, B.H.; Yoon, S.B.; Bae, J.S.; Kim, K.O.; Kim, H.W., 2011. Field surveys of tsunami heights from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan Earthquake. *Bull. Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 86: 29-279.
- harbor damage from the March 11, 2011 Tohoku Oki Tsunami Tsunami, ASCE.
- Hsiao, S.C.; Lin, T.C., 2010. Tsunami-like solitary waves impinging and overtopping an impermeable seawall: Experiment and RANS modeling. *Coastal Engineering*, 57(1): 1-18.
- Irtem, E.; Gedik, N.; Kabdasli, M.S.; Yasa, N.E., 2009. Coastal forest effects on tsunami run-up heights. *Ocean Engineering*, 36(3): 313-320.
- Kânoğlu, U.; Synolakis, C., 2015. Coastal and marine hazards, risks, and disasters: Tsunami Dynamics, Forecasting, and Mitigation, First Edition. 15-27P.
- Lau, T.L.; Ohmachi, T.; Inoue, S.; Lukkunaprasit, P., 2011. Experimental and numerical modeling of tsunami force on bridge decks. *Tsunami a growing disaster*, in tech publication, 105-130 (chapter 6) PP.
- Lin, T.C.; Hwang, K.S.; Hsiao, S.C.; Yang, R.Y., 2012. An experimental observation of a solitary wave impingement, run-up and overtopping on a seawall. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 24(1): 76-85.
- Liu, H.; Ghidaoui, M.S.; Huang, Z.; Yuan, Z.; Wang, J.,