

تاثیر دوره‌ی تناوب امواج تصادفی بر واکنش دیوارهای ساحلی با اشکال هندسی مختلف به روش عددی

رامین وفايي پورسرخابي^{۱*}، محمدعلي لطف‌اللهي يقين^۲، محمدحسين امين‌فر^۳

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، استان آذربایجان شرقی، تبریز، پست الکترونیکی: r_yafaei@tabrizu.ac.ir

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، استان آذربایجان شرقی، تبریز، پست الکترونیکی: lotfollahi@tabrizu.ac.ir

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، استان آذربایجان شرقی، تبریز، پست الکترونیکی: aminfar@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۲۷

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۱۹/۱۲/۱۵

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۰، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

نیروهای داخلی به وجود آمده در دیوار ساحلی در مواجهه با امواج تصادفی دارای توزیع زمانی نامنظمی هستند. امواج تحت دوره‌های تناوب مختلفی می‌تایند، لذا تعیین رفتار دیوار در برابر تغییرات دوره‌ی تناوب مهم خواهد بود. در این راستا، سه دیوار ساحلی قائم، شیب‌دار و شیب دوگانه، معرفی و در مواجهه با امواج تصادفی، مدل سازی و تحلیل شدند. ارتفاع آب و ارتفاع موثر موج ثابت و دوره‌ی تناوب در محدوده ۰/۱ تا ۳ ثانیه با تغییرات ۰/۰۵ ثانیه‌ای در نظر گرفته شده است. در هر حالت لنگر و نیروی برشی حداکثر در پای دیوار از تاریخچه‌ی زمانی مربوط، استخراج و مقایسه شدند و از تحلیل مودال، دوره‌ی تناوب طبیعی هر کدام از دیوارها به دست آمدند. به‌ازای دوره‌های تناوب اوجی کمتر از دوره‌ی تناوب طبیعی سازه، با افزایش دوره‌ی تناوب، لنگر و نیروی برشی در پای دیوار افزایش و برای دوره‌های تناوب اوجی بیشتر از دوره‌ی تناوب طبیعی سازه این مقادیر کاهش می‌یابند. اگرچه وقتی فرکانس اوجی موج با فرکانس طبیعی دیوار برابر می‌شود مقادیر پاسخ سازه به حداکثر وضعیت خود می‌رسد، اما مقدار این تشدید در دیواره قائم نسبت به دیواره‌ی شیب دار بیشتر بوده و کمترین تشدید در دیوار با شیب دو گانه رخ می‌دهد.

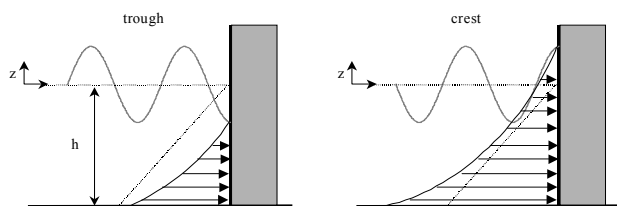
کلمات کلیدی: دیوارهای ساحلی، امواج تصادفی، تحلیل پاسخ دینامیکی موج، دوره‌ی تناوب موج

۱. مقدمه

مهمترین بارهای وارد بر روی دیوارهای ساحلی، امواج دریا هستند که مسلماً در حالت طوفانی شدت آنها زیاد خواهد بود. در این حالت امواج به‌صورت تصادفی وارد می‌شوند و پارامترهای اصلی معرف موج شامل ارتفاع موثر و دوره‌های تناوب اوجی هستند. تعیین نیروهای داخلی در دیوارهای ساحلی نظیر لنگر خمشی و نیروی برشی پای دیوار به‌منظور طراحی، حائز اهمیت خواهد بود (Sorenson, 1993).

دیوارهای ساحلی به‌منظور حفاظت از سواحل در برابر امواج و جلوگیری از پیشرفت آب به سواحل و در راستای به‌کارگیری مناسب از زمینهای ساحلی طراحی و ساخته می‌شوند. به‌منظور درک مناسب از رفتار این سازه‌ها، باید اطلاعات مناسبی از بارهای وارد داشت. یکی از

محدود انجام گرفته مربوط به سالهای اخیر است (Neelamani et al., 1999). Sainflou در سال ۱۹۲۸، اولین نظریه مربوط به محاسبه فشار، نیرو و لنگر وارد بر دیوار را برای امواج منظم را ارائه کرد. شکل (۱) نحوه توزیع فشار مربوط به نظریه Sainflou را زمانی که موج با تاج و حوض در محل برخورد با دیوار تاثیر می کند را نشان می دهد (چگینی، ۱۳۷۷).



شکل ۱- نحوه تاثیر امواج روی دیوارهای قائم بر اساس نظریه Sainflou [۶]

Minikin در سال ۱۹۶۳، بر مبنای مشاهدات تجربی بر روی دیوارهای قائم مقدار فشار حداکثر در سطح آب و مقدار لنگر در پای دیوار را به دست آورد (Minkin, 1963). Goda در سال ۱۹۷۴، نظریه اساسی تاثیر امواج بر روی دیوارهای ساحلی بر روی بستر نفوذپذیر و نفوذناپذیر را ارائه نمود (Goda, 2000). نظریه Goda در سالهای ۱۹۸۹ و ۲۰۰۰ برای صندوق‌ها (کیسون‌های) قائم و برای دیوارهای کوتاه توسط خود ایشان بسط داده شد و امروزه نیز به‌طور وسیعی در طراحی دیوارهای ساحلی در کشور ژاپن مورد استفاده قرار می گیرد. Ahrens و همکاران در سال ۱۹۹۳ تاثیر انعکاس امواج روی دیوارهای قائم در حالت امواج نامنظم را مورد مطالعه قرار دادند (Ahrens et al., 1993). Vander Meer در سال ۱۹۹۵ در بررسی فشارهای وارد از طرف امواج تصادفی انجام یافته روی دیوارهای قائم مطرح گردید. Neelamani و همکاران در سال ۱۹۹۸ مطالعات آزمایشگاهی را برای به دست آوردن فشار وارد بر دیوارهای قائم و شیب دار نفوذ ناپذیر در مواجهه با امواج تصادفی مورد بررسی قرار دادند و خطاهای زیادی بین روش‌های نظری و نتایج آزمایشگاهی مشاهده نمودند (Neelamani et al., 2005).

Muni Reddy در سال ۲۰۰۵ به منظور کاهش اثرات موج بر روی دیوارهای ساحلی از موج شکن‌های مغروق، در جلوی دیوار استفاده نموده و کاهش اثرات آن بر مبنای نسبت ارتفاع موج شکن مغروق به ارتفاع دیوار را مشاهده نمود (Muni Reddy et al., 2005).

دیوارهای ساحلی می‌توانند به اشکال هندسی مختلفی نظیر دیوارهای قائم، شیب دار، شیب دوگانه یا چند گانه و انحنادار اجرا شوند. هر کدام از این دیوارها دارای معایب و محاسنی هستند و انتخاب آن بر مبنای بررسی رفتار در مواجهه با امواج و همچنین شرایط محیطی حاکم صورت می‌گیرد (چگینی، ۱۳۷۷). به دلیل انعکاس موج در دیوارهای قائم نیروی ضربه موج زیاد بوده ولی بالا روی موج ایجاد نشده و وزن آب روی دیوار وجود ندارد. همچنین با اجرای این دیوارها می توان استفاده بیشتری را از زمینهای خط ساحلی نمود. عامل به وجود آمدن لنگر در پای دیوار ناشی از برخورد افقی موج خواهد بود. در دیوارهای شیب دار، نیروی ضربه‌ای موج در تماس با دیوار مستهلک شده و کاهش می‌یابد. در این حالت، لنگر ناشی از نیروی برخوردی موج، وزن خود دیوار و وزن آب روی دیوار هستند (وفایی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). در دیوارهای با شیب دو گانه که به صورت قسمت تحتانی قائم و قسمت فوقانی شیب دار اجرا می‌گردد، وزن آب روی سازه و نیروی ضربه‌ای موج کم شده و لنگر ناشی از وزن خود سازه نیز به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. به همین دلیل این نوع دیوارها محاسن دو نوع دیوار قبلی را دارند (وفایی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹).

در بررسی امواج تصادفی، با توجه به تاثیر عوامل مختلف نظیر شدت طوفان در بیان رفتار تصادفی امواج، پارامترهای موثر نظیر دوره‌ی تناوب، ارتفاع موج و ارتفاع آب متغیر هستند. لذا تحلیل دیوارهای ساحلی با اشکال هندسی مختلف تحت دوره‌های تناوب و ارتفاع موج‌های مختلف به منظور دستیابی به لنگر خمشی و نیروی برشی حداقل در پای دیوار حائز اهمیت خواهد بود. به همین منظور در تحقیق حاضر تغییرات لنگر خمشی و نیروی برشی پای دیوار تحت دوره‌های تناوب اوجی متفاوت امواج تصادفی روی دیوارهای با اشکال هندسی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به انجام تحلیل‌های زیاد و همچنین وجود عوامل متعدد دخیل در مساله نظیر تابش تصادفی موج و ارتعاش دیوار تحت این امواج معمولاً استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی مورد نیاز خواهد بود. در این راستا بسته‌های نرم‌افزاری معتبر نظیر نرم‌افزار SACS کمک شایانی به حل مساله خواهد نمود.

۲. مروری بر سوابق تحقیقات

اگرچه مطالعات زیادی روی مدل‌های عددی و آزمایشگاهی امواج تصادفی و دیوارهای ساحلی صورت نگرفته، اما تحقیقات

نامتناهی از امواج منظم تعریف شوند. امواج دریا، در حالت طوفانی از نوع امواج تصادفی بوده و تراز سطح آب، به صورت غیر منظم است. امواج تصادفی را می‌توان با استفاده از تحلیل‌های طیفی بر اساس امواج ثبت شده مورد بررسی قرار داد که در این راستا می‌توان با چگالی طیفی توجیه جامعی از امواج تابیده شده در شرایط دریا را بیان نمود. براین مبنای، طیف‌های مختلفی نظیر Bretschneider (۱۹۵۹)، P-M (۱۹۶۴)، طیف JONSWAP (۱۹۷۴) و TMA (۱۹۸۵) از روی داده‌های ثبت شده تعریف شده‌اند (SPM, 1984). در تحقیق حاضر، طیف JONSWAP به عنوان یک طیف متداول موج که قابلیت کاربرد آن از طریق نرم افزار SACS میسر بوده و در تحقیقات محققین قبلی نیز بکار گرفته شده است، انتخاب گردید.

۴. روش تحقیق

در این تحقیق سه نوع دیوار قائم، شیب دار و شیب دوگانه مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده‌اند. هر سه مدل دارای شرایط تکیه‌گاهی یکسان بوده و در کف به صورت گیردار و در کناره‌ها به صورت آزاد در نظر گرفته شده است. جنس دیوار فولادی به ضخامت یک سانتی‌متر، به عرض یک متر و ارتفاع ۱/۵ متر است. با توجه به اینکه معمولاً دیوارهای ساحلی در طول ساحل ساخته می‌شوند، در نظر گرفتن عرض یک متر می‌تواند مدل مناسبی از رفتار کل دیوار باشد. ارتفاع دیوار طوری در نظر گرفته شده است که روگذری آب از روی دیوار به هنگام تابش موج صورت نگیرد. مدل‌های در نظر گرفته شده تحت تابش امواج تصادفی با دوره‌های تناوب ۰/۱ تا ۳ ثانیه با گام ۰/۰۵ ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. هر مدل ایجاد شده تحت امواج تصادفی قرار گرفته و از روی تاریخچه‌ی زمانی لنگر خمشی و نیروی برشی به دست آمده از نرم افزار، مقادیر حداکثر لنگر خمشی و نیروی برشی پای دیوار به دست آمدند و مورد مقایسه قرار گرفتند.

۴-۱. نرم افزار SACS

SACS یکی از قوی‌ترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای تحلیل و طراحی سازه‌های دریایی تحت شرایط بارگذاری مختلف است. امواج تصادفی دریا به روش‌های مختلف از جمله به روش طیفی با طیف‌های مختلف می‌توانند در این نرم افزار در نظر گرفته شوند. مدل هندسه‌ی دیوار، در زیر مجموعه SACINP وارد می‌شود. در

Pullen در سال ۲۰۰۹، با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری دقیق، مقدار خمش به وجود آمده بر روی دیوار ساحلی قائم را مطالعه نمود (Pullen et al., 2009).

Cumo در سال ۲۰۱۰، مطالعات آزمایشگاهی وسیعی بر روی دیوارهای با شیب ملایم در مواجهه با امواج تصادفی و Anand در سال ۲۰۱۰، تاثیر امواج تصادفی بر روی دیوارهای انحنادار را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند (Anand et al., 2010). وفایی‌پور و همکاران در سال ۱۳۸۹، با استفاده از نرم افزار SACS تاثیر امواج تصادفی بر روی دیوارهای قائم و شیب دار را به ازای ارتفاع موج، دوره‌ی تناوب و عمق آب ثابت به منظور تعیین حداقل لنگر پای دیوار مورد مطالعه قرار دادند و شیب با زاویه ۱۵ درجه را در امتداد تاثیر موج به عنوان بهترین شیب برای رسیدن به حداقل لنگر پای دیوار به دست آوردند (وفایی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). وفایی‌پور و همکاران در سال ۱۳۸۹، ضمن معرفی دیوارهای با شیب دوگانه که در قسمت تحتانی دیوار قائم و در قسمت فوقانی شیب دار با زوایای مختلف اجرا می‌شوند را مورد تحلیل قرار داده و در مدل عددی انجام یافته، مشاهده نمودند که اگر شکستگی روی دیوار به منظور شیب‌دار نمودن دیوار در مدل انجام یافته به اندازه‌ی نصف ارتفاع موج پایین‌تر از سطح ساکن آب دریا باشد و زاویه شیب ۳۵ درجه در نظر گرفته شود، لنگر خمشی پای دیوار حداقل شده و شیب‌دار نمودن بیش از این زاویه تاثیری بر کاهش لنگر نخواهد داشت. به همین منظور در تحقیق حاضر برای بررسی تغییرات پرپود موج با مقادیر لنگر خمشی و نیروی برشی پای دیوار از سه نوع دیوار قائم، شیب‌دار و شیب‌دار با شیب دوگانه با مشخصات ذکر شده استفاده گردیده است (وفایی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). با توجه به نبود مطالعات کافی روی تاثیر شکل هندسی دیوارهای ساحلی بازای امواج با دوره‌های تناوب مختلف در بهبود پاسخ سازه‌ی پای دیوار، تحقیق حاضر شکل یافته است. در این راستا، دیوارهای با شکل‌های هندسی متفاوت و تحت دوره‌های تناوب مختلف به منظور رسیدن به حداقل لنگر خمشی و نیروی برشی پای دیوار، با بکارگیری بسته نرم‌افزاری SACS، مورد بررسی قرار گرفته است.

۳. اثر امواج بر روی دیوارهای ساحلی

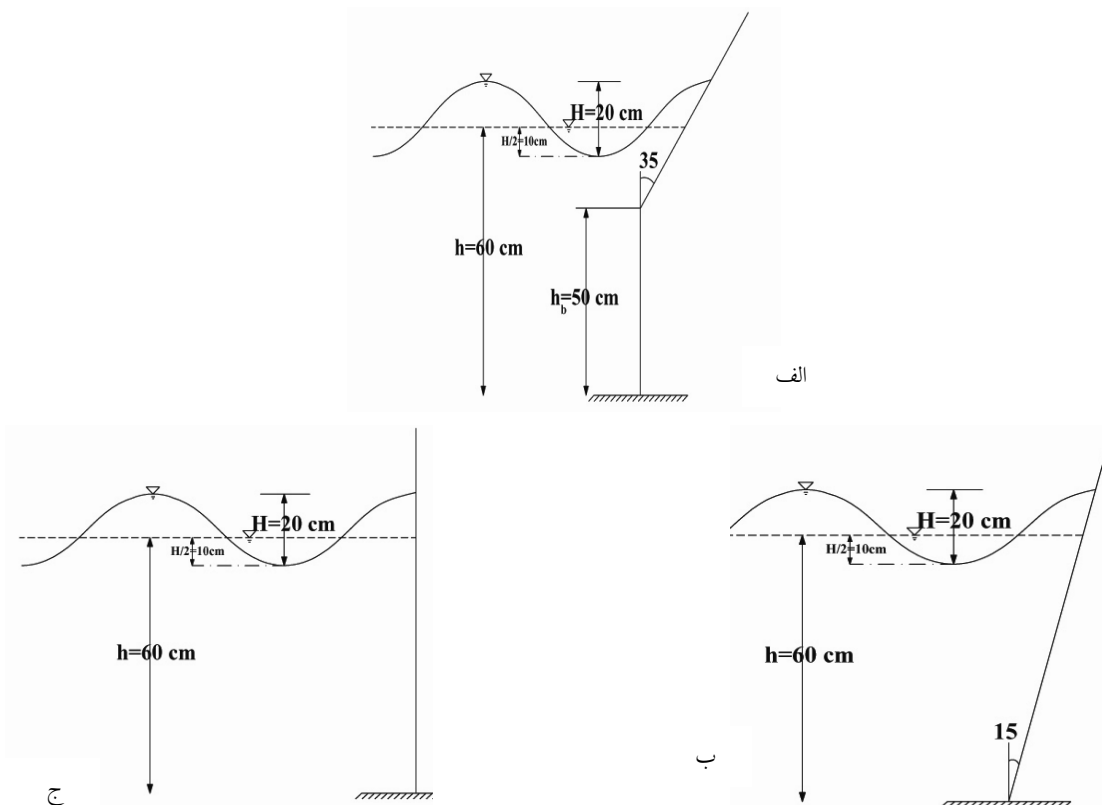
در حالت کلی امواج به دو دسته‌ی امواج منظم و تصادفی طبقه‌بندی می‌شوند که امواج تصادفی می‌توانند به وسیله‌ی ترکیبی

اعمال موج و گام زمانی $0/02$ ثانیه با توجه به هم‌پوشانی مناسب بین طیف JONSWAP و طیف تولیدی توسط نرم افزار بوده است. در شکل ۳ مدل‌های ایجاد شده در قسمت SACINP نرم افزار نشان داده شده‌اند. محدوده دوره‌ی تناوب با توجه به به ابعاد مدل و ارتفاع موثر موج، $0/1$ تا 3 ثانیه در این تحقیق استفاده شده است. به منظور دقت بیشتر گام زمانی $0/05$ ثانیه‌ای اعمال گردیده‌اند. با توجه به تعداد زیاد دوره‌های تناوب بررسی شده، دوره‌های تناوب ۱ و ۳ ثانیه به منظور نشان دادن طیف ایجاد شده توسط نرم افزار و طیف JONSWAP به عنوان طیف‌های انتخاب شده در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شوند. هر کدام از این اشکال حاوی دو طیف نظری و واقعی حاصل از تولید نرم افزار هستند که با توجه به طول مدت اعمال موج و گام زمانی در نظر گرفته شده مطابقت خوبی بین این دو طیف قابل ملاحظه است. با توجه به اینکه دوره‌ی تناوب، عکس فرکانس است، در شکل ۴ که دوره‌ی تناوب موج ۱ ثانیه است نقطه‌ی اوج طیف به ازای فرکانس ۱ هرتز و چگالی انرژی موج $0/105$ و در شکل ۵ که دوره‌ی تناوب موج ۳ ثانیه است، نقطه‌ی اوج طیف فرکانس $0/333$ هرتز و چگالی انرژی موج $0/425$ است لذا امواج با دوره‌ی تناوب بزرگتر چگالی انرژی موج بیشتری را دارند.

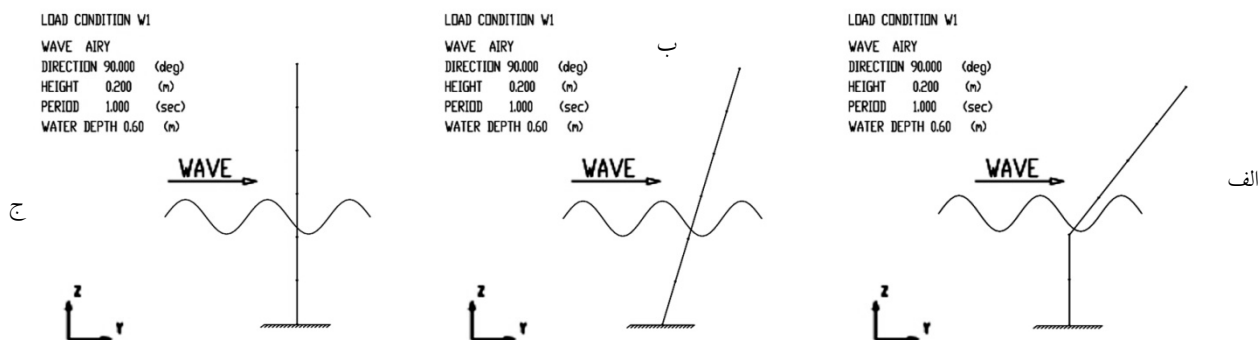
این قسمت علاوه بر معرفی هندسه‌ی سازه، بارگذاری اولیه، نظیر وزن سازه، حالت سکون دریا و موج منظم معرفی می‌گردند. به هنگام تابش امواج تصادفی، دیوار نیز ارتعاش، می‌کند لذا به منظور تحلیل پاسخ دینامیکی موج، ابتدا تحلیل استاتیکی و سپس تحلیل مودال صورت می‌گیرد. به هنگام تابش امواج روی سازه در هر گام زمانی تراز سطح آب با توجه به طیف مورد نظر محاسبه و متناظر با آن نیروهای داخلی در سازه نظیر لنگر و نیروی برشی در همان گام زمانی به دست می‌آیند. نتایج خروجی نرم افزار به صورت داده‌ها و نمودارهای تاریخچه‌ی زمانی هستند (SACS, 2005).

۲-۴. مدل استفاده شده در نرم‌افزار

به منظور تعریف امواج تصادفی در نرم افزار، پارامترهای ورودی موج با در نظر گرفتن شرایط محیطی حاکم بیان می‌شوند. با توجه به مدل به کاررفته در تحقیق حاضر، ارتفاع موثر موج 20 سانتی متر، ارتفاع آب در جلوی دیوار 60 سانتی متر، طیف موج JONSWAP، پارامتر γ در طیف $3/3$ ، طول مدت اعمال موج 300 ثانیه، پارامتر C در طیف $0/142$ و گام زمانی $0/02$ ثانیه اعمال گردیده است. دلیل در نظر گرفتن 300 ثانیه طول مدت



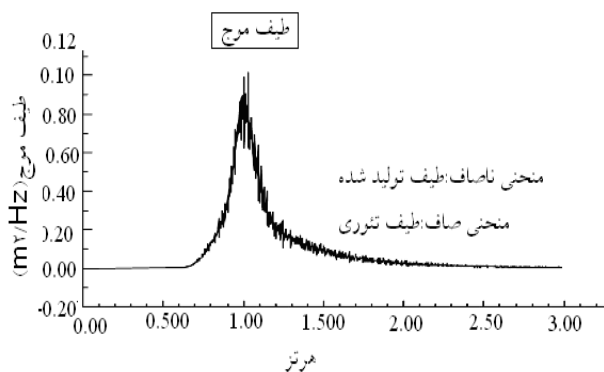
شکل ۲- انواع دیوارهای در نظر گرفته شده (الف: دیوار با شیب دوگانه، ب: دیوار شیب‌دار، ج: دیوار قائم)



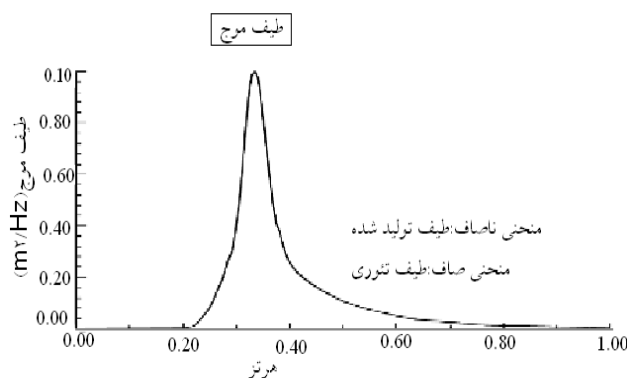
شکل ۳- دیوارهای مدل شده در نرم افزار SACS (الف: دیوار با شیب دوگانه، ب: دیوار شیب دار، ج: دیوار قائم)

و برای دیوار با شیب دو گانه $3/72$ هرتز به دست آمده‌اند. با توجه به فرکانس‌های مذکور دوره‌ی تناوب طبیعی برای دیوار قائم $0/256$ ثانیه، برای دیوار شیب دار $0/261$ ثانیه و برای دیوار با شیب دو گانه $0/268$ ثانیه خواهد بود. سپس تحلیل‌ها به‌ازای دوره‌های تناوب $0/1$ تا 3 ثانیه با گام $0/05$ ثانیه‌ای روی سه نوع دیوار مورد نظر انجام شده است. در هر تحلیل، به‌منظور تحلیل پاسخ دینامیکی موج روی دیوار ساحلی ابتدا تحلیل استاتیکی و سپس تحلیل مودال و در نهایت تحلیل پاسخ دینامیکی صورت گرفته است. لذا با توجه به حجم بالای تحلیل‌های انجام شده، نمودارها به‌صورت نمونه‌ای آورده شده‌اند.

در شکل‌های ۶ و ۷، نمودار تاریخچه‌ی زمانی سطح آب به‌ترتیب به‌ازای دوره‌های تناوب ۱ ثانیه و ۳ ثانیه برای دیوار قائم به‌دست آمده‌اند. به‌همین ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹، نمودار تاریخچه‌ی زمانی لنگر خمشی پای دیوار قائم و نمودار تاریخچه‌ی زمانی نیروی برشی پای دیوار قائم در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، به‌ازای همین دوره‌های تناوب مشاهده می‌شوند. به‌همین ترتیب اگرچه نمودارهای تاریخچه‌ی زمانی برای دیوارهای شیب‌دار و شیب دوگانه به‌ازای کلیه دوره‌های تناوب ذکر شده تعیین گردیدند، اما برای اختصار از ترسیم آنها چشم‌پوشی و مقادیر حداکثر از هر کدام از سری‌های زمانی حاصل از تحلیل، در جدول ۱ درج گردیده‌اند. در این جدول، مقادیر به‌دست آمده برای دیوار قائم با اندیس ۷، دیوار شیب‌دار با اندیس ۸ و دیوار با شیب دو گانه با اندیس d نشان داده شده‌اند. در این جدول T دوره‌ی تناوب برحسب ثانیه، f_{wave} فرکانس اوجی موج، f_{wall} فرکانس دیوار، نسبت f_{wave}/f_{wall} فرکانس موج به دیوار، M لنگر خمشی پای دیوار و F نیروی برشی پای دیوار هستند.



شکل ۴- طیف JONSWAP و طیف ایجاد شده در نرم‌افزار برای بازای دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه برای دیوار قائم



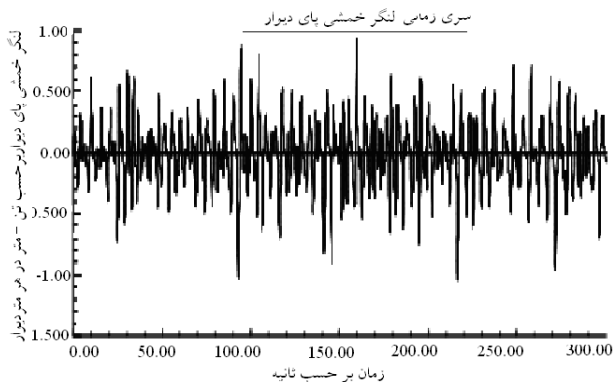
شکل ۵- طیف JONSWAP و طیف ایجاد شده در نرم‌افزار برای بازای دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه برای دیوار قائم

۵. تحلیل‌ها و نتایج

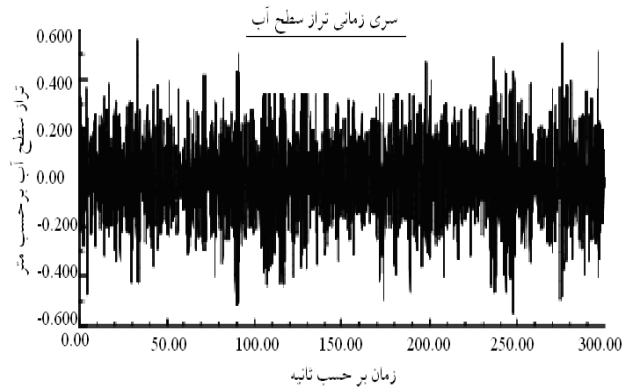
ابتدا برای دیوارهای در نظر گرفته شده، آنالیز مودال برای ۱۰ مود اول انجام شده است. فرکانس طبیعی برای مود اول به‌عنوان مود غالب در دیوار قائم $3/90$ هرتز، برای دیوار شیب دار $3/85$ هرتز

جدول ۱- مقادیر استخراج گردیده از تحلیل

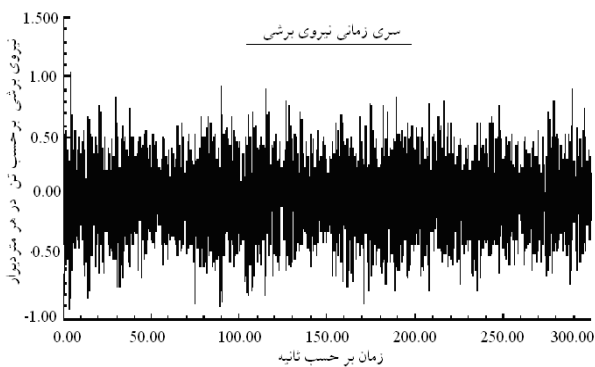
T	f_{wave}	f_{wave} / f_{wall}	Mv	Fv	f_{wave} / f_{wall}	Ms	Fs	f_{wave} / f_{wall}	Md	Fd
0.1	10	2.564103	3.5	4.9	2.597403	3.3	4.6	2.688172	3	4
0.15	6.666667	1.709402	4.6	5.6	1.731602	4.2	5.3	1.792115	3.9	5
0.2	5	1.282051	5.3	6.5	1.298701	5	6.2	1.344086	4.6	5.8
0.25	4	1.025641	5.69	7.29	1.038961	5.2	7	1.075269	4.8	6.2
0.3	3.333333	0.854701	5.4	6.8	0.865801	5	6.2	0.896057	4.6	5.8
0.35	2.857143	0.732601	5.2	5.1	0.742115	4.8	4.9	0.768049	4.4	4.5
0.4	2.5	0.641026	3.3	4.4	0.649351	3.2	4.1	0.672043	3	3.9
0.45	2.222222	0.569801	2.9	3.9	0.577201	2.8	3.7	0.597372	2.6	3.5
0.5	2	0.512821	2.35	3.67	0.519481	2.3	3.5	0.537634	2.1	3.2
0.55	1.818182	0.4662	2.3	3.4	0.472255	2.15	3.25	0.488759	2	3.1
0.6	1.666667	0.42735	2.2	3.1	0.4329	2.1	3	0.448029	1.95	2.8
0.65	1.538462	0.394477	2.1	2.8	0.3996	2	2.7	0.413565	1.8	2.6
0.7	1.428571	0.3663	2	2.5	0.371058	1.9	2.4	0.384025	1.8	2.3
0.75	1.333333	0.34188	1.99	2.17	0.34632	1.87	2.1	0.358423	1.75	2
0.8	1.25	0.320513	1.8	2	0.324675	1.73	1.9	0.336022	1.59	1.8
0.85	1.176471	0.301659	1.4	1.9	0.305577	1.3	1.8	0.316256	1.2	1.7
0.9	1.111111	0.2849	1.2	1.7	0.2886	1.1	1.6	0.298686	1	1.5
0.95	1.052632	0.269906	1	1.5	0.273411	0.93	1.4	0.282965	0.83	1.3
1	1	0.25641	0.92	1.25	0.25974	0.88	1.2	0.268817	0.8	1.1
1.05	0.952381	0.2442	0.9	1.2	0.247372	0.85	1.15	0.256016	0.78	1
1.1	0.909091	0.2331	0.85	1.1	0.236128	0.8	1.05	0.244379	0.75	0.98
1.15	0.869565	0.222965	0.83	1	0.225861	0.77	0.96	0.233754	0.73	0.92
1.2	0.833333	0.213675	0.81	0.95	0.21645	0.74	0.9	0.224014	0.69	0.85
1.25	0.8	0.205128	0.77	0.9	0.207792	0.72	0.85	0.215054	0.65	0.8
1.3	0.769231	0.197239	0.74	0.88	0.1998	0.7	0.83	0.206782	0.62	0.77
1.35	0.740741	0.189934	0.7	0.87	0.1924	0.68	0.81	0.199124	0.6	0.73
1.4	0.714286	0.18315	0.65	0.86	0.185529	0.63	0.82	0.192012	0.58	0.67
1.45	0.689655	0.176835	0.59	0.85	0.179131	0.57	0.83	0.185391	0.55	0.65
1.5	0.666	0.170769	0.55	0.85	0.172987	0.5	0.81	0.179032	0.45	0.64
1.55	0.645	0.165385	0.51	0.83	0.167532	0.49	0.78	0.173387	0.44	0.63
1.6	0.625	0.160256	0.48	0.8	0.162338	0.45	0.77	0.168011	0.41	0.61
1.65	0.606	0.155385	0.46	0.79	0.157403	0.43	0.75	0.162903	0.4	0.6
1.7	0.588	0.150769	0.44	0.73	0.152727	0.42	0.69	0.158065	0.39	0.59
1.75	0.571	0.14641	0.43	0.69	0.148312	0.39	0.64	0.153495	0.37	0.59
1.8	0.555	0.142308	0.42	0.66	0.144156	0.38	0.63	0.149194	0.36	0.58
1.85	0.54	0.138462	0.39	0.65	0.14026	0.37	0.62	0.145161	0.35	0.57
1.9	0.526	0.134872	0.37	0.63	0.136623	0.35	0.61	0.141398	0.33	0.56
1.95	0.512	0.131282	0.36	0.63	0.132987	0.34	0.6	0.137634	0.33	0.57
2	0.5	0.128205	0.36	0.6	0.12987	0.34	0.57	0.134409	0.32	0.55
2.05	0.487	0.124872	0.34	0.59	0.126494	0.32	0.56	0.130914	0.3	0.51
2.1	0.476	0.122051	0.33	0.57	0.123636	0.31	0.54	0.127957	0.29	0.49
2.15	0.465	0.119231	0.32	0.53	0.120779	0.29	0.47	0.125	0.27	0.44
2.2	0.454	0.11641	0.31	0.49	0.117922	0.28	0.45	0.122043	0.26	0.43
2.25	0.444	0.113846	0.3	0.47	0.115325	0.28	0.45	0.119355	0.26	0.43
2.3	0.434	0.111282	0.3	0.47	0.112727	0.28	0.45	0.116667	0.26	0.43
2.35	0.425	0.108974	0.29	0.46	0.11039	0.27	0.44	0.114247	0.25	0.41
2.4	0.416	0.106667	0.28	0.45	0.108052	0.25	0.41	0.111828	0.22	0.39
2.45	0.408	0.104615	0.27	0.43	0.105974	0.25	0.41	0.109677	0.22	0.39
2.5	0.4	0.102564	0.25	0.41	0.103896	0.23	0.39	0.107527	0.2	0.37
2.55	0.392	0.100513	0.24	0.39	0.101818	0.22	0.35	0.105376	0.19	0.32
2.6	0.384	0.098462	0.23	0.38	0.09974	0.19	0.33	0.103226	0.17	0.3
2.65	0.377	0.096667	0.23	0.37	0.097922	0.19	0.33	0.101344	0.17	0.3
2.7	0.37	0.094872	0.22	0.36	0.096104	0.19	0.33	0.099462	0.17	0.3
2.75	0.363	0.093077	0.21	0.35	0.094286	0.19	0.33	0.097581	0.17	0.3
2.8	0.357	0.091538	0.21	0.35	0.092727	0.19	0.33	0.095968	0.17	0.3
2.85	0.35	0.089744	0.21	0.35	0.090909	0.19	0.33	0.094086	0.17	0.3
2.9	0.344	0.088205	0.21	0.35	0.089351	0.19	0.33	0.092473	0.17	0.3
2.95	0.338	0.086667	0.21	0.35	0.087792	0.19	0.33	0.09086	0.17	0.3
3	0.333	0.085385	0.21	0.35	0.086494	0.19	0.33	0.089516	0.17	0.3



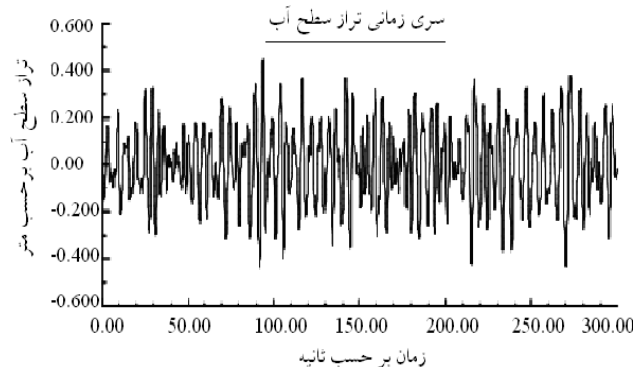
شکل ۹- نمودار تاریخچه‌ی زمانی لنگر خمشی پای دیوار برای دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه



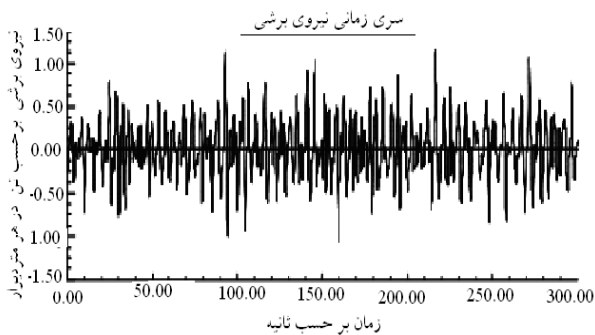
شکل ۶- نمودار تاریخچه‌ی زمانی سطح آب برای دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه



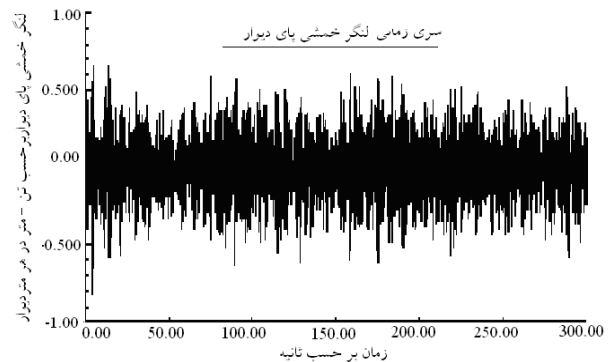
شکل ۱۰- نمودار تاریخچه‌ی زمانی نیروی برشی پای دیوار برای دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه



شکل ۷- نمودار تاریخچه‌ی زمانی سطح آب برای دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه



شکل ۱۱- نمودار تاریخچه‌ی زمانی نیروی برشی پای دیوار برای دوره‌ی تناوب ۳ ثانیه



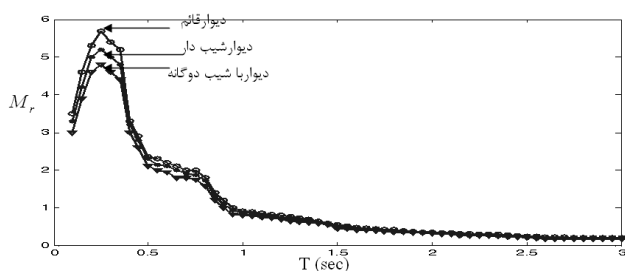
شکل ۸- نمودار تاریخچه‌ی زمانی لنگر خمشی پای دیوار برای دوره‌ی تناوب ۱ ثانیه

آورد. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تغییرات لنگر خمشی و نیروی برشی پای دیوار به‌ازای تغییرات دوره‌ی تناوب برای سه نوع دیوار مدل شده را نشان می‌دهند. لنگر خمشی در محور قائم در شکل ۱۲ به‌صورت بی بعد $(M_r = M / (\rho g d^3))$ به‌ازای طول واحد دیوار و در شکل ۱۳ نیروی برشی در محور قائم به‌صورت بی

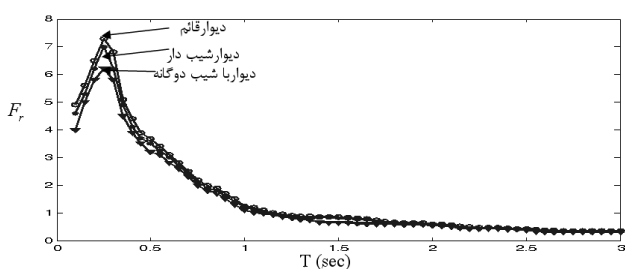
۶. بحث و بررسی نتایج

با توجه به مباحث و نمودارهای حاصل از تحلیل، می‌توان لنگر خمشی و نیروی برشی حداکثر پای دیوار را به‌ازای دوره‌های تناوب در نظر گرفته شده، در اثر تابش امواج تصادفی، به‌دست

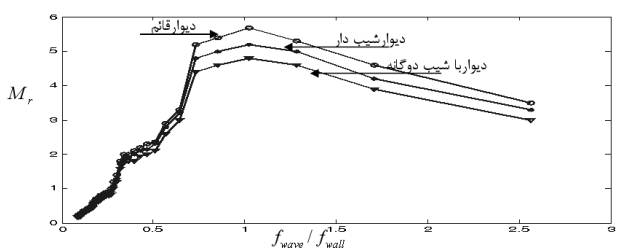
یک ثانیه منحنی‌های ترسیم شده شکل یکنواخت‌تری دارند. ولی با این وجود رفتار مناسب دیوار با شیب دوگانه نسبت به شیب‌دار و قائم قابل ملاحظه است که به‌منظور رویت بهتر این محدوده‌ی دوره‌ی تناوب برای لنگر در شکل ۱۶ و برای نیروی برشی در شکل ۱۷ ترسیم شده‌اند. از سوی دیگر، دوره‌ی تناوب موج‌های متعارف در سازه‌های ساحلی بیش از دو ثانیه در نظر گرفته می‌شوند و اگر مقیاس مدل به‌کار گرفته شده در تحقیق حاضر را نسبت به دیوار فرضی با ابعاد اصلی یک به پنج در نظر گرفته شود، مطابق تشابه فرود مقیاس زمان برابر با جذر مقیاس مزبور بوده و دوره‌ی تناوب نظیر ۲ ثانیه در مدل برابر با ۰/۸۹ ثانیه خواهد شد (چگینی، ۱۳۷۷). بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که در دوره‌های تناوب متعارف امواج دریا، پدیده تشدید بعید خواهد بود.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات M_r با دوره‌ی متناوب برای دیوارهای قائم، شیب‌دار و دیوار با شیب دوگانه



شکل ۱۳- نمودار تغییرات F_r با دوره‌های متناوب برای دیوارهای قائم، شیب‌دار و دیوار با شیب دوگانه



شکل ۱۴- نمودار تغییرات M_r با f_{wave} / f_{wall} برای دیوارهای قائم، شیب‌دار و دیوار با شیب دوگانه

بعد $(F_r = F / (\rho g d^2))$ به‌ازای طول واحد دیوار بیان شده‌اند. همان‌طور که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، به‌ازای دوره‌های تناوب موج کمتر از دوره‌ی تناوب طبیعی سازه که در هر سه دیوار تقریباً باهم برابرند و مقدار آن حدوداً برابر با ۰/۲۷ ثانیه است، با افزایش دوره‌ی تناوب، لنگر خمشی و نیروی برشی حداکثر در پای دیوار افزایش و برای دوره‌های تناوب موج بیشتر از دوره‌ی تناوب طبیعی سازه این مقادیر کاهش می‌یابند. در دوره‌های تناوب بزرگتر، تغییرات دوره‌ی تناوب تاثیر قابل توجهی در مقدار لنگر و نیروی برشی پای دیوار ندارد. برای مثال در شکل ۱۲ تفاوت بین لنگرهای خمشی به‌ازای دوره‌های تناوب ۱/۵ ثانیه و ۳ ثانیه در مقایسه با دوره‌های تناوب اوجی ۰/۵ ثانیه و ۱ ثانیه کم است و همین امر در مورد نیروهای برشی در شکل ۱۳ ملاحظه می‌گردد. به همین علت امواج تصادفی که دوره‌ی تناوب اوجی آن‌ها به دوره‌ی تناوب طبیعی سازه نزدیک است، حائز اهمیت خواهند بود. همچنین در این نمودارها ملاحظه می‌گردد که دیوارهای با شیب دوگانه نسبت به دیوارهای شیب دار و قائم به‌ازای دوره‌های تناوب مختلف دارای لنگر و نیروی برشی کمتری بوده و عملکرد بهتری دارند. برای درک بهتر مسئله، تغییرات لنگر خمشی و نیروی برشی به‌ازای فرکانس نسبی امواج (f_{wave} / f_{wall}) در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. هرچند فرکانس نشان داده شده در این اشکال صرفاً بیانگر فرکانس اوجی طیف تاییده شده بر دیوار است، اما سایر امواج نیز همزمان با این فرکانس اوجی بر دیوار موثرند و نزدیک شدن فرکانس اوجی امواج به فرکانس طبیعی سازه، رفتار دیوار را تا حدودی به عملکرد تشدید نزدیک می‌کند. با کاهش فرکانس نسبی از مقدار واحد، نیروهای داخلی کاهش می‌یابند و در چنین حالتی فاصله‌ی زمانی اعمال موج در مقابل ارتعاش به قدری زیاد می‌شود که مانع از تجمع انرژی موج روی پاسخ دیوار شده و مقادیر لنگرها و برش‌ها کاهش می‌یابند. با افزایش فرکانس نسبی از مقدار واحد نیز دوباره نیروهای داخلی با کاهش مواجه می‌شوند و در این حالت نوسان موج سریعتر اتفاق افتاده و در نتیجه دیوار بخشی از انرژی موج را جذب و تاثیر کمتری از آن را می‌گیرد و بدیهی است که رفتار سازه به‌تدریج از موقعیت تشدید دور خواهد شد. همان‌طوری که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ملاحظه می‌شود، روند تغییرات لنگر و نیروی برشی در دوره‌های تناوب بالا کاهش یافته و یکنواخت‌تر می‌گردد و به‌صورت تقریبی می‌توان قضاوت کرد که به‌ازای دوره‌های تناوب بیش از

دیوار زیاد است، اما با افزایش دوره تناوب موج مقدار تغییرات کاهش می‌یابد و رفتار دیوارها نیز نسبت به هم نزدیکتر می‌شوند. ۳- در حالت کلی، دیوارهای با شیب دوگانه نسبت به دیوارهای شیب‌دار و دیوارهای شیب‌دار نیز نسبت به دیوارهای قائم تحت اثر تغییرات دوره‌ی تناوب امواج تصادفی، در عملکرد بهتری دارند.

۴- با توجه به تحقیقات انجام شده در این مقاله، پدیده‌ی تشدید دیوار در محدوده‌ی فرکانس‌های متعارف دریا ایجاد نخواهد شد.

منابع

چگینی، و.، ۱۳۷۷. راهنمای طراحی موج‌شکن‌ها، شرکت جهاد تحقیقات و آبخیزداری.

وفایی‌پور، ر.؛ لطف‌اللهی یقین، م.ع.؛ امین‌فر، م.ح.، ۱۳۸۹. بررسی عددی شیب بهینه دیوارهای ساحلی در مواجهه با امواج تصادفی دریایی با استفاده از نرم‌افزار SACS، نشریه عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز (زیر چاپ)، تبریز، ایران.

وفایی‌پور، ر.؛ لطف‌اللهی یقین، م.ع.؛ امین‌فر، م.ح.، ۱۳۸۹. بررسی عددی تاثیر زاویه و نقطه شروع شیب بر روی لنگر خمشی پای دیوارهای ساحلی، تحت تاثیر امواج تصادفی دریا، نشریه دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد (زیر چاپ)، مشهد.

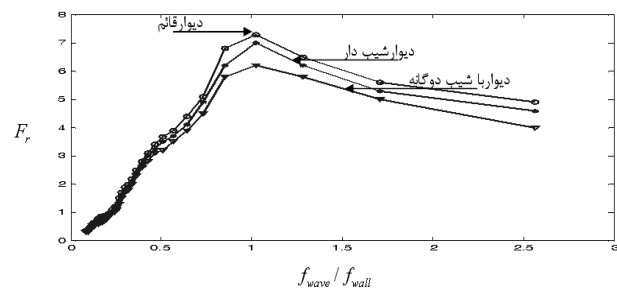
Ahrens, J.P.; Seelig, W.N.; Ward, D.L.; Allsop, W., 1993. Wave Run-up and Wave Reflection from Coastal Structures, ASCE, Proceedings, Waves, 489-502 pp.

Anand, K.V.; Sundor, V.; Sannasiraj, W., 2010. Dynamic Pressures on Curved from Seawall Models under Random Waves, Journal of Hydrodynamics, Vol 22, 538-544 pp.

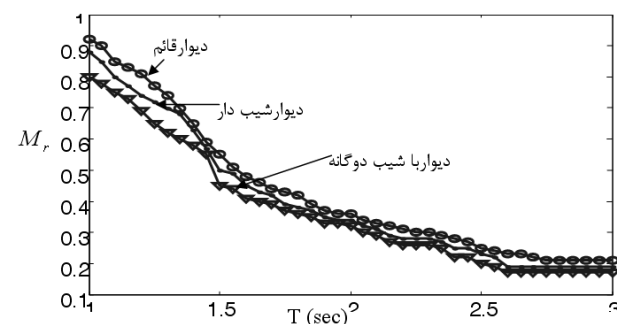
Goda, Y., 2000. Random Seas and Design of Maritime structures, World scientific, 443-551 pp.

Minkin, R.R., 1963. Winds, Waves and Maritime structures, Studies in Harbor Making and in Protection of Coasts, 2nd Rev. Ed., Griffin, 224-304 pp.

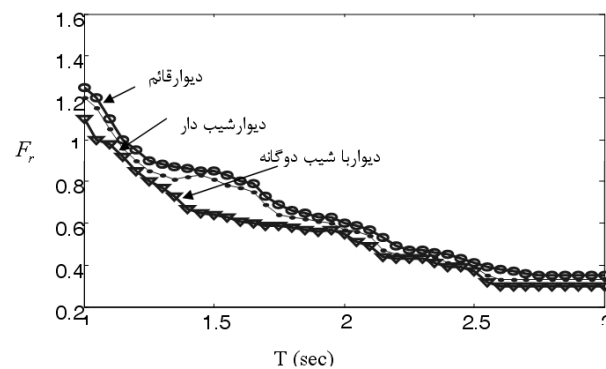
Muni Reddy, M.G.; Neelamani, S., 2005. Hydrodynamic Studies on Vertical Seawall Defended by Low-Crested Break Water, Ocean Engineering, Vol 32, 747-764 pp.



شکل ۱۵- نمودار تغییرات F_r با f_{wave} / f_{wall} برای دیوارهای قائم، شیب‌دار و دیوار با شیب دوگانه



شکل ۱۶- نمودار تغییرات M_r با دوره‌های متناوب بیشتر از یک ثانیه برای دیوارهای قائم، شیب‌دار و دیوار با شیب دوگانه



شکل ۱۷- نمودار تغییرات F_r با دوره‌های متناوب بیشتر از یک ثانیه برای دیوارهای قائم، شیب‌دار و دیوار با شیب دوگانه

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱- مقدار تشدید در دیواره‌ی قائم نسبت به دیواره‌ی شیب‌دار بیشتر بوده و کمترین تشدید در دیوار با شیب دو گانه اتفاق می‌افتد.
- ۲- اگرچه به‌ازای دوره‌های تناوب اوجی موج نزدیک به دوره‌ی تناوب طبیعی دیوار، تغییرات لنگر و نیروی برشی پای

- Laboratory Measurements of Mean Over topping and Spatial Distribution at vertical Seawall, Coastal Engineering, Vol 56, 121-140 pp.
- SACS., 2005. Users Guide, SACS Inc.
- Sorensen, R.M., 1993. Basic Wave Mechanic for Coastal and Ocean Engineers, John Wiley, New York.
- SPM., 1984. Shore protection Manual, US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg MS.
- Neelamani, S.; Sandhya, N., 2005. Surface Roughness Effect of Vertical and Sloped Seawall in Incident Random Wave Fields, Ocean Engineering, Vol 32, 395-416 pp.
- Neelamani, S.; Schüttrumpf, H.; Muttary, M.; Oumeraci, H., 1999. Prediction of Wave pressures on Smooth Impermeable Seawalls, Ocean Engineering, Vol 26, 739-765 pp.
- Pullen, T.; Allsop, W.; Pearson, J., 2009. Field and