





دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

مدل سازی عددی رفتار اندرکنش موج شکن و شمع تحت بارگذاری دینامیکی

نگارنده: علی مولائی

اساتید راهنما

دکتر رضا نادری

دکتر فرشید جندقی علائی

دی ۱۳۹۸

تقدیم به مہربان فرشتائی کہ:

محظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربہ ہای یکتا و زیبای زندگیم،

مدیون حضور سبز آنہاست.

تقدیم به خانوادہی عزیزم.

تشکر و قدردانی

سپاس مخصوص خداوند مهربان که به انسان توانایی و دانایی بخشید تا به بندگانش شفقت ورزد، پروردگاری بهمتی که مرا به راه کسب دانش هدایت و با عنایت و فضل خود توفیق تدوین این رساله را نصیب نمود. خالصانه در برابر فرزانهان دانشوری که توان و دانش خود را با محبت و اخلاص در اختیارم گذاشتند و انضباط و انضامی آموختن را به من ارزانی داشتند، سرفرودمی آورم.

صمیمانه ترین سپاس و تشکر تقدیم به زحمات و محبت‌های بی‌شائبه اساتید عزیز و بزرگوارم جناب آقای دکتر رضاناوری و جناب آقای دکتر فرید جنتی علانی که بارها بهمانی‌های دلسوزانه و مساعدت همه‌جانبه خود، بنده را یاری نمودند. بدون شک، تهیه و تدوین این رساله بدون ارائه نظرات ارزنده و پیکیری مستمر ایشان امکان پذیر نبود. از صمیم قلب برای ایشان سلامتی و طول عمری پر برکت همراه با موفقیت روزافزون آرزو مندم.

از اساتید فریخته و گرامی جناب آقای دکتر محسن کرامتی و جناب آقای دکتر فنوش باسلطه که زحمت بازنگری و داوری پایان نامه را به عهده داشتند، نهایت قدردانی و سپاس را دارم. همچنین از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر مهدی گل‌کی که قبول زحمت نموده و مسئولیت نمایندگی محترم تحصیلات تکمیلی جلسه را بر عهده گرفتند، صمیمانه قدردانی می‌نمایم.

تعمیرنامه

اینجانب **علی مولائی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی عددی رفتار اندرکنش موج شکن و شمع تحت بارگذاری دینامیکی تحت راهنمایی دکتر رضا نادری و دکتر فرشید جندقی علائی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

موج‌شکن‌ها سازه‌هایی هستند که بنادر و سواحل را در مقابل امواج و جریان‌های ساحلی محافظت می‌کنند. استفاده از موج‌شکن به عنوان یکی از اجزای جداناپذیر در بنادر به منظور مقابله با نیروهای وارده از طرف امواج و همچنین فراهم نمودن محیطی امن جهت بارگیری و تخلیه کشتی‌ها الزامی است. موج‌شکن‌های توده‌سنگی به واسطه‌ی دلایل اقتصادی پرکاربردترین موج‌شکن‌ها می‌باشد.

امروزه در بنادر پالایشگاهی این احتمال وجود دارد که خط لوله انتقال محصولات نفتی با بخشی از موج‌شکن تعبیه شده برای حفاظت از بندر تداخل داشته باشد که این مسئله عدم قطعیت‌هایی را پیرامون اندرکنش لرزه‌ای این مجموعه به همراه دارد، نمونه‌ای از این وضعیت در طراحی خطوط انتقال بندر پتروشیمی پارس جنوبی مشاهده می‌شود. در این بندر به منظور انتقال محصولات نفتی به محل اسکله‌های بارگیری، خط لوله از روی تاج موج‌شکن توده‌سنگی عبور کرده است.

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار **Abaqus** به مدل‌سازی موج‌شکن پارس جنوبی پرداختیم. در ابتدا میزان نشست موج‌شکن تحت بار استاتیکی و دینامیکی (زلزله) مورد بررسی قرار گرفت، سپس با توجه به حساسیت خط لوله عبوری نسبت به نشست در زمان زلزله نشست تکیه‌گاه خط لوله بوسیله کوبیدن شمع در مقطع موج‌شکن بررسی شده است. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف هندسه شمع نظیر طول و سطح مقطع شمع مدل‌هایی با طول و سطح مقطع مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی‌ها نشان داد اندرکنش موج‌شکن و شمع موجب بروز برخی پیچیدگی‌ها در رفتار لرزه‌ای موج‌شکن می‌شود و استفاده از سیستم موج‌شکن - شمع منجر به بهبود رفتار لرزه‌ای موج‌شکن پارس جنوبی خواهد شد.

کلمات کلیدی: اندرکنش لرزه‌ای، موج‌شکن توده سنگی، زلزله، شمع، جابجایی

فهرست مطالب

۵	فهرست جداول
۷	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ ضرورت انجام تحقیق
۵	۳-۱ اهداف تحقیق
۵	۴-۱ فصل بندی پایان نامه
۷	فصل ۲ موج شکن توده سنگی
۸	۱-۲ مقدمه
۹	۲-۲ تقسیم بندی موج شکن ها
۹	۱-۲-۲ تقسیم بندی موج شکن ها از نظر ساختمان
۱۱	۲-۲-۲ تقسیم بندی موج شکن ها از نظر موقعیت قرار گیری
۱۷	۳-۲ مطالعات ژئوتکنیکی مورد نیاز
۱۷	۱-۳-۲ مطالعات ژئوتکنیکی در ساختگاه موج شکن
۱۸	۴-۲ ارزیابی اثرات زیست محیطی احداث موج شکن
۱۹	۵-۲ انواع خرابی های موج شکن
۲۰	۱-۵-۲ عوامل موثر در تخریب موج شکن ها
۲۲	۶-۲ مزایا و معایب موج شکن توده سنگی

۷-۲ دامنه ی کاربرد موج شکن های توده سنگی در ایران ۲۳

فصل ۳ روش های طراحی موج شکن ۲۹

۱-۳ مقدمه ۳۰

۲-۳ پارامترهای حاکم در طراحی موج شکن های توده سنگی ۳۱

۱-۲-۳ پارامترهای محیطی ۳۱

۲-۲-۳ پارامترهای هیدرولیکی ۳۳

۳-۲-۳ پارامترهای سازه ای: ۳۴

۳-۳ طراحی ساختاری موج شکن ۳۷

۱-۳-۳ نیروهای امواج ۳۸

۲-۳-۳ محاسبه نیروی زلزله ۴۰

فصل ۴ پیشینه تحقیق ۴۱

۱-۴ مقدمه ۴۲

۲-۴ مطالعه انجام شده توسط مموس و همکاران (۱۹۹۳ میلادی) ۴۶

۳-۴ مطالعه انجام شده توسط ژانگ و ژه (۱۹۹۶ میلادی) ۴۷

۴-۴ مطالعه انجام شده توسط مموس و همکاران (۲۰۰۰ میلادی) ۴۷

۵-۴ مطالعه انجام شده توسط کیارا و همکاران (۲۰۰۱ میلادی) ۴۹

۴-۶ ضوابط لرزه ای PIANC (۲۰۰۱ میلادی) ۵۰

۷-۴ مطالعه انجام شده توسط سید و همکاران (۲۰۰۳ میلادی) ۵۲

۸-۴ مطالعه انجام شده توسط مموس و همکاران (۲۰۰۳ میلادی) ۵۲

۹-۴ مطالعه انجام شده توسط یوکسل (۲۰۰۴ میلادی) ۵۶

۱۰-۴ مطالعه انجام شده توسط یوکسل و همکاران (۲۰۰۷ میلادی) ۵۷

۱۱-۴ مطالعه انجام شده توسط جعفریان و همکاران (۲۰۱۰ میلادی) ۵۹

- ۶۱.....مطالعه انجام شده توسط سیهان و یوکسل (۲۰۱۱ میلادی).....
- ۶۴.....مطالعه انجام شده توسط یانگ و جین (۲۰۱۵ میلادی).....
- ۶۶.....مطالعه انجام شده توسط چادری (۲۰۱۷ میلادی).....
- ۶۸.....مطالعه انجام شده توسط جعفریان و همکاران (۲۰۱۸ میلادی).....
- ۷۰.....نتیجه‌گیری ۱۶-۴.....

فصل ۵ مدل‌سازی عددی

۷۳

- ۷۴.....۱-۵ مقدمه.....
- ۷۵.....۲-۵ مطالعه موردی.....
- ۷۵.....۱-۲-۵ کاربرد مطالعات موردی در مسائل ژئوتکنیکی.....
- ۷۶.....۳-۵ موج‌شکن‌های پارس جنوبی.....
- ۷۸.....۱-۳-۵ بررسی مقطع موج‌شکن.....
- ۸۳.....۲-۳-۵ خصوصیات ژئوتکنیکی بستر دریا در محل موج‌شکن‌ها.....
- ۸۴.....۳-۳-۵ خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های موج‌شکن.....
- ۸۵.....۴-۵ صحت‌سنجی.....
- ۹۰.....۵-۵ مدل‌سازی عددی.....
- ۹۰.....۱-۵-۵ ساخت هندسه مدل.....
- ۹۱.....۲-۵-۵ انتخاب روش‌های اجزاء محدود.....
- ۹۱.....۵-۵-۳ المان‌های مش بندی.....
- ۹۴.....۴-۵-۵ مدل رفتاری مصالح.....
- ۹۵.....۵-۵-۵ اندرکنش موج‌شکن و شمع.....
- ۹۶.....۶-۵-۵ مراحل بارگذاری.....
- ۹۷.....۷-۵-۵ شرایط تکیه‌گاهی.....

۶-۵ نتایج مدل سازی ۹۹

۱-۶-۵ مدل موج شکن بدون شمع ۹۹

۲-۶-۵ مدل اجرا شده در بندر پارس جنوبی (شمع با طول ۴۶/۸ متر) ۱۰۱

۷-۵ بررسی اثر طول شمع ۱۰۵

۱-۷-۵ شمع با طول ۳۶/۸ متر ۱۰۵

۲-۷-۵ شمع با طول ۵۰/۸ متر ۱۰۹

۳-۷-۵ مقایسه نشست خط لوله در صورت عدم حضور شمع و همراه شمع ۱۱۲

۸-۵ بررسی ابعاد سطح مقطع شمع ۱۱۴

۱-۸-۵ شمع با قطر ۳۴ اینچ ۱۱۴

۲-۸-۵ شمع با قطر ۵۲ اینچ ۱۱۷

۹-۵ معیار سنجش خسارت در موج شکن توده سنگی ۱۲۰

۱۲۳ فصل ۶ نتایج و پیشنهادات

۱-۶ نتایج کلی ۱۲۴

۲-۶ پیشنهادات ۱۲۷

۱۲۸ مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- انواع سازه ای موج شکن ها. ۱۰
- جدول ۲-۲- تفاوت های بین موج شکن و سد خاکی ۱۵
- جدول ۳-۲- اثرات زیست محیطی احداث موج شکن ۱۸
- جدول ۱-۴- پژوهش های انجام شده توسط محققین ۴۴
- جدول ۲-۴- جدول احتمال گسیختگی و تخریب ۶ موج شکن توده سنگی ۴۵
- جدول ۳-۴- شرایط بار ورودی آزمایش ۶۲
- جدول ۱-۵- مشخصات نهایی وزن سنگ برای لایه های مختلف ۷۹
- جدول ۲-۵- خواص فولاد ۸۳
- جدول ۳-۵- مشخصات پارامترهای لایه های بستر دریا ۸۴
- جدول ۴-۵- پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های موج شکن ۸۴
- جدول ۵-۵- پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی بخش های مختلف موج شکن ۸۸
- جدول ۶-۵- سطح خسارت در موج شکن با طول شمع متفاوت و قطر ثابت ۴۲ اینچ ۱۲۱
- جدول ۷-۵- سطح خسارت در موج شکن با شمع به طول ثابت ۴۶/۸ متر و قطر متفاوت ۱۲۲
- جدول ۱-۶- میزان نشست خط لوله برای شمع هایی با طول متفاوت و سطح مقطع یکسان ۱۲۵
- جدول ۲-۶- میزان نشست خط لوله برای شمع هایی با قطر متفاوت و طول ثابت ۱۲۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- انواع موج‌شکن‌های شیب دار (توده‌سنگی) ۱۴
- شکل ۲-۲- سطح مقطع مرسوم موج‌شکن توده‌سنگی می‌شوند. ۱۷
- شکل ۳-۲- عوامل تخریب موج‌شکن‌های توده‌سنگی ۲۲
- شکل ۴-۲- مکانیزم‌های خرابی موج‌شکن توده‌سنگی ۲۲
- شکل ۵-۲- موج‌شکن توده‌سنگی بندر امیرآباد به طول حدوداً ۱۴۲۵ متر واقع در استان مازندران ۲۶
- شکل ۶-۲- موج‌شکن خلیج چابهار به طول ۵۵۰ متر ۲۷
- شکل ۷-۲- موج‌شکن غازیان به طول ۷۵۰ متر و موج‌شکن‌های شرق و غرب جدید بندر انزلی به طول کلی ۲۴۰۰ متر واقع در بندر انزلی ۲۷
- شکل ۱-۳- انواع شکست موج ۳۲
- شکل ۱-۴- ابعاد موج‌شکن توده‌سنگی واقع در سیویتاوجیا ایتالیا ۴۲
- شکل ۲-۴- مقطع عرضی موج‌شکن پاتراس قبل و بعد از شکست ۴۷
- شکل ۳-۴- تغییر شکل‌های ایجاد شده در بدنه موج‌شکن توده‌سنگی بر روی بستر صلب ۴۸
- شکل ۴-۴- تغییر شکل‌های ایجاد شده در بدنه موج‌شکن توده‌سنگی بر روی بستر سست ۴۹
- شکل ۵-۴- توزیع شتاب متوسط برای سد خاکی و موج‌شکن توده‌سنگی ۵۰
- شکل ۶-۴- حالات مرسوم گسیختگی در موج‌شکن‌های توده‌سنگی ۵۱
- شکل ۷-۴- شماتیک حالات محتمل برای وقوع تغییر شکل‌های بزرگ ناشی از روانگرایی یا گسترش جانبی ۵۲
- شکل ۸-۴- نمای کنار از مدل‌های فیزیکی (الف) موج‌شکن توده‌سنگی بر روی بستر صلب، (ب) موج‌شکن توده‌سنگی بر روی بستر سست ۵۳
- شکل ۹-۴- پروفیل فشار متوسط هیدرودینامیکی به دست آمده از آزمایش در موج‌شکنی با ارتفاع ۱۵ متری واقع بر بستر صلب ۵۴
- شکل ۱۰-۴- پروفیل فشار متوسط هیدرودینامیکی به دست آمده از آزمایش در موج‌شکنی با ارتفاع ۱۵ متری واقع بر بستر سست ۵۴
- شکل ۱۱-۴- پروفیل بزرگنمایی شتاب متوسط به دست آمده از آزمایش آزمایشگاهی در موج‌شکنی با ارتفاع ۱۵ متری واقع بر بستر صلب ۵۵
- شکل ۱۲-۴- پروفیل بزرگنمایی شتاب متوسط به دست آمده از آزمایش آزمایشگاهی در موج‌شکنی با ارتفاع ۱۵ متری واقع بر بستر سست ۵۵
- شکل ۱۳-۴- مقادیر نشست موج‌شکن توده‌سنگی واقع در بندر ماهیگیری کارامورسل ارگلی در کشور ترکیه در اثر زلزله از میت (۱۹۹۹ میلادی)، مقادیر به متر هستند ۵۶
- شکل ۱۴-۴- مقایسه مقطع اولیه و نهایی برای نمونه با دامنه ۳ میلی متر و فرکانس ۱۲ هرتز ۵۷

- شکل ۴-۱۵- تغییرات نشست تاج موج‌شکن ۵۸
- شکل ۴-۱۶- تغییرات وابسته به زمان برای دامنه ۳ میلی متر و فرکانس ۱۲ هرتز ۵۸
- شکل ۴-۱۷- محل قرارگیری و سطح مقطع موج‌شکن ۶۰
- شکل ۴-۱۸- بارگذاری لرزه‌ای بم ، بندرعباس و سوزا مقیاس شده با $0.15g$ ۶۰
- شکل ۴-۱۹- سطح مقطع طولی میز لرزه‌ای (ابعاد به میلیمتر هستند) ۶۱
- شکل ۴-۲۰- سطح مقطع ابتدایی و پایانی مدل آزمایشگاهی برای بارگذاری ارتعاشی با دامنه ۳ میلیمتر و فرکانس ۶ هرتز در آب ۶۳
- شکل ۴-۲۱- مش بندی المان محدود ۶۳
- شکل ۴-۲۲- سطح تخریب نسبت به شتاب در موج‌شکن مستغرق ۶۴
- شکل ۴-۲۳- مجموعه موج‌شکن ، فونداسیون و آب دریا ۶۵
- شکل ۴-۲۴- الف) فونداسیون بدون مسلح کننده قبل بار زلزله ، ب) فونداسیون بدون مسلح کننده بعد بار زلزله ج) فونداسیون با مسلح کننده بعد بار زلزله ۶۷
- شکل ۴-۲۵- تاثیر مسلح کننده روی جابه جایی افقی موج‌شکن در طول زلزله ۶۷
- شکل ۴-۲۶- تاثیر مسلح کننده روی نشست موج‌شکن در طول زلزله ۶۸
- شکل ۴-۲۷- الف) مقطع موج‌شکن قبل بهسازی ، ب) مقطع موج‌شکن با ستون‌های سنگی ۶۹
- شکل ۴-۲۸- تغییرات نسبت فشار آب حفره ای در واحد زمان ، نقاط ۱۲۲ و ۱۲۴ (عمق ۲ متر و ۵ متر) زیر موج‌شکن بدون ستون سنگی و موج‌شکن با ستون سنگی ۶۹
- شکل ۴-۲۹- الف) جابجایی قائم ، ب) جابجایی افقی تاج موج‌شکن تحت زلزله السنترو با شتاب $0.15g$ ۷۰
- شکل ۵-۱- موقعیت بندر عسلویه در استان بوشهر ۷۷
- شکل ۵-۲- پلان موقعیت بندر پتروشیمی پارس جنوبی ۷۷
- شکل ۵-۳- منحنی شتاب‌نگاشت زلزله El-Centro مقیاس شده با شتاب حداکثر $0.42g$ ۸۰
- شکل ۵-۴- مقطع هندسی موج‌شکن غربی ۸۱
- شکل ۵-۵- مقطع شمع و قاب فولادی ۸۳
- شکل ۵-۶- ابعاد موج‌شکن مورد استفاده در پژوهش ۸۶
- شکل ۵-۷- نمودار تاریخچه زمانی مورد استفاده جهت اعمال بار لرزه‌ای ۸۶
- شکل ۵-۸- مدل موج‌شکن ۸۷
- شکل ۵-۹- شبکه المان‌های مدل ۸۷
- شکل ۵-۱۰- مقایسه جابجایی قائم بدست آمده در آباکوس با مدل آزمایشگاهی ۸۸
- شکل ۵-۱۱- نمودار جابجایی افقی در میانه تاج و شیب‌های راست و چپ موج‌شکن در نرم‌افزار آباکوس ۸۹

- شکل ۵-۱۲- نمودار جابجایی افقی در میانه تاج و شیب‌های راست و چپ موج‌شکن در مدل آزمایشگاهی
 ۸۹.....
- شکل ۵-۱۳- هندسه موج‌شکن پارس جنوبی
 ۹۰.....
- شکل ۵-۱۴- هندسه شمع‌های فولادی
 ۹۱.....
- شکل ۵-۱۵- طیف سری فوریه جهت تعیین فرکانس غالب بار زلزله (نرم‌افزار Seisemosignal)
 ۹۳.....
- شکل ۵-۱۶- شبکه المان‌های موج‌شکن
 ۹۳.....
- شکل ۵-۱۷- شبکه المان‌های شمع
 ۹۴.....
- شکل ۵-۱۸- استفاده از المان نیمه بینهایت در مرزهای جانبی در راستای X
 ۹۸.....
- شکل ۵-۱۹- کانتور نشست موج‌شکن پس از تحلیل استاتیکی
 ۱۰۰.....
- شکل ۵-۲۰- کانتور نشست موج‌شکن پس از تحلیل دینامیکی
 ۱۰۰.....
- شکل ۵-۲۱- نمودار جابجایی قائم میانه تاج موج‌شکن در اثر زلزله
 ۱۰۱.....
- شکل ۵-۲۲- مدل موج‌شکن و شمع با طول ۴۶/۸ متر
 ۱۰۲.....
- شکل ۵-۲۳- کانتور نشست مجموعه موج‌شکن و شمع پس از تحلیل استاتیکی
 ۱۰۲.....
- شکل ۵-۲۴- کانتور نشست مجموعه موج‌شکن و شمع پس از تحلیل دینامیکی
 ۱۰۳.....
- شکل ۵-۲۵- تنش ایجاد شده در شمع‌ها پس از اعمال بار دینامیکی
 ۱۰۳.....
- شکل ۵-۲۶- تغییر شکل ایجاد شده در مجموعه موج‌شکن و شمع پس از اعمال بار دینامیکی زلزله
 ۱۰۴.....
- شکل ۵-۲۷- نمودار جابجایی نقطه میانی تاج موج‌شکن تحت بار زلزله (شمع با طول ۴۶/۸ متر)
 ۱۰۴.....
- شکل ۵-۲۸- نمودار جابجایی قائم نقطه میانی تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله (حضور شمع با طول
 ۴۶/۸ متر)
 ۱۰۵.....
- شکل ۵-۲۹- مدل موج‌شکن و شمع با طول ۳۶/۸ متر
 ۱۰۶.....
- شکل ۵-۳۰- کانتور نشست مجموعه موج‌شکن و شمع با طول ۳۶/۸ متر پس از تحلیل استاتیکی
 ۱۰۶.....
- شکل ۵-۳۱- کانتور نشست مجموعه موج‌شکن و شمع با طول ۳۶/۸ متر پس از تحلیل دینامیکی
 ۱۰۷.....
- شکل ۵-۳۲- تغییر شکل ایجاد شده در مقطع موج‌شکن و شمع با طول ۳۶/۸ متر پس از اعمال بار
 دینامیکی زلزله
 ۱۰۷.....
- شکل ۵-۳۳- نمودار جابجایی نقطه میانی تاج موج‌شکن تحت بار زلزله (شمع با طول ۳۶/۸ متر)
 ۱۰۸.....
- شکل ۵-۳۴- نمودار جابجایی قائم نقطه میانی تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله (شمع با طول ۳۶/۸ متر)

 ۱۰۸.....
- شکل ۵-۳۵- مدل موج‌شکن و شمع با طول ۵۰/۸ متر
 ۱۰۹.....
- شکل ۵-۳۶- کانتور نشست مجموعه موج‌شکن و شمع با طول ۵۰/۸ متر پس از تحلیل استاتیکی
 ۱۱۰.....
- شکل ۵-۳۷- کانتور نشست مجموعه موج‌شکن و شمع با طول ۵۰/۸ متر پس از تحلیل دینامیکی
 ۱۱۰.....
- شکل ۵-۳۸- تغییر شکل ایجاد شده در مقطع موج‌شکن و شمع با طول ۵۰/۸ متر پس از اعمال بار
 دینامیکی زلزله
 ۱۱۱.....

- شکل ۵-۳۹- نمودار جابجایی نقطه میانی تاج موج‌شکن تحت بار زلزله (شمع با طول ۵۰/۸ متر)..... ۱۱۱
- شکل ۵-۴۰- نمودار جابجایی قائم نقطه میانی تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله (شمع با طول ۵۰/۸ متر) ۱۱۲.....
- شکل ۵-۴۱- مقایسه نشست قائم تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله برای حالت‌های بدون شمع ، شمع با طول ۳۶/۸ متر، شمع با طول ۴۶/۸ متر و شمع با طول ۵۰/۸ متر..... ۱۱۳
- شکل ۵-۴۲- کانتور نشست مجموعه موج‌شکن و شمع با قطر ۳۴ اینچ پس از تحلیل استاتیکی..... ۱۱۴
- شکل ۵-۴۳- کانتور نشست مجموعه موج‌شکن و شمع با قطر ۳۴ اینچ پس از تحلیل دینامیکی..... ۱۱۵
- شکل ۵-۴۴- تغییر شکل ایجاد شده در مقطع موج‌شکن و شمع به قطر ۳۴ اینچ پس از اعمال بار..... ۱۱۵
- شکل ۵-۴۵- نمودار جابجایی نقطه میانی تاج موج‌شکن تحت بار زلزله (شمع با قطر ۳۴ اینچ)..... ۱۱۶
- شکل ۵-۴۶- نمودار جابجایی قائم نقطه میانی تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله (شمع با قطر ۳۴ اینچ) ۱۱۶.....
- شکل ۵-۴۷- کانتور نشست مجموعه موج‌شکن و شمع با قطر ۵۲ اینچ پس از تحلیل استاتیکی..... ۱۱۷
- شکل ۵-۴۸- کانتور نشست مجموعه موج‌شکن و شمع با قطر ۵۲ اینچ پس از تحلیل دینامیکی..... ۱۱۷
- شکل ۵-۴۹- تغییر شکل ایجاد شده در مقطع موج‌شکن و شمع به قطر ۵۲ اینچ پس از اعمال بار دینامیکی زلزله..... ۱۱۸
- شکل ۵-۵۰- نمودار جابجایی قائم نقطه میانی تاج موج‌شکن تحت بار زلزله (شمع با قطر ۵۲ اینچ)..... ۱۱۸
- شکل ۵-۵۱- نمودار جابجایی قائم نقطه میانی تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله (شمع با قطر ۵۲ اینچ) ۱۱۹.....
- شکل ۵-۵۲- مقایسه نشست قائم خط لوله تحت بار زلزله برای حالت‌های شمع با قطر ۳۴ اینچ، شمع با قطر ۴۲ اینچ و شمع با قطر ۵۲ اینچ..... ۱۱۹

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ مقدمه

موج‌شکن‌ها سازه‌هایی هستند که بنادر و سواحل را در مقابل امواج و جریان‌های ساحلی محافظت می‌کنند. استفاده از موج‌شکن به عنوان یکی از اجزای جداناپذیر در بنادر به منظور مقابله با نیروهای وارده از طرف امواج و همچنین فراهم نمودن محیطی امن جهت بارگیری و تخلیه کشتی‌ها الزامی است. عملکرد اصلی این سازه‌ها کاهش ارتفاع موج و جلوگیری از نفوذ امواج به محدوده ساحل بوده و در بنادر تجاری، نظامی، صیادی و سواحل گردشگری مورد استفاده قرار می‌گیرند (حسینی، ۱۳۹۵).

در بنادر نفتی و پالایشگاهی موج‌شکن‌ها علاوه بر حفاظت از ساحل ممکن است با توجه به ضرورت، به عنوان تکیه گاه خطوط لوله نفتی مورد استفاده قرار بگیرند، اما از آنجایی که خط لوله عبوری از روی تاج موج‌شکن نسبت به نشست حساس می‌باشد لذا تخمین میزان نشست در زمان زلزله حائز اهمیت است و باید به دنبال راهکاری برای کاهش میزان نشست خطوط لوله عبوری از روی تاج موج‌شکن باشیم. استفاده از شمع‌های فولادی راهکاری است که در بندر پتروشیمی پارس جنوبی مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش اندرکنش لرزه‌ای موج‌شکن‌های بندر پارس جنوبی و شمع‌های عبوری از بدنه موج‌شکن مورد بررسی قرار گرفت.

طراحی موج‌شکن‌ها باید براساس فهم کامل عملکرد یک سیستم پیچیده طبیعی (دریا-ساحل) با سازه‌های مصنوعی (موج‌شکن‌ها) صورت بگیرد. اصولاً کار طراحی شامل مدلسازی‌های فیزیکی گسترده‌ای می‌باشد که ممکن است پرهزینه و وقت‌گیر باشند. تا پیش از این ابعاد پیچیده رفتاری موج‌شکن‌ها برای مدلسازی‌های دقیق عددی بسیار چالش برانگیز قلمداد می‌شدند. این مورد بخصوص برای موج‌شکن‌های توده‌سنگی که از توده‌های سنگ و یا بتن بسیار بزرگ تشکیل شده‌اند و جریان آب از درون سازه آن‌ها رخ می‌دهد وجود دارد. اما با پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی‌های کامپیوتری بخصوص در مورد معادلات حرکت سیال و گرافیک‌های کامپیوتری، اختلاف بین روش‌های عددی و آزمایشگاهی بسیار کم شده است (Dentale and Donnarumma, 2012).

در کشور ما بیشترین مطالعه برای ساخت سازه‌های دریایی به خصوص موج‌شکن‌ها، مطالعه از طریق ساخت مدل فیزیکی می‌باشد و به مدلسازی‌های عددی توجه کمتری می‌شود. در صورتی که امروزه در سطح جهانی، مطالعات عددی به دلیل انعطاف‌پذیری، کم هزینه بودن و عدم نیاز به مقیاس مدل، بیشتر مورد توجه می‌باشند و سرمایه‌گذاری بسیار زیادی در این بخش صورت می‌گیرد. لذا این نیاز احساس می‌شود که همگام با ساخت پروژه‌های مهم در کشور، مطالعات عددی نیز صورت پذیرد تا نتایجی قابل قبول و مستند به دست بیاید و سازه در برابر حوادث احتمالی مقاوم سازی شود.

در آیین‌نامه طراحی موج‌شکن‌ها، نیروی غالب عمدتاً نیروی امواج دریا می‌باشد، و به مسئله نیروی جانبی مربوط به زلزله کمتر توجه شده است. از آنجایی که سواحل طولانی در شمال و جنوب کشور در معرض خطر نسبی زلزله قرار دارند، در نتیجه به دلیل لرزه‌خیزی این مناطق، یکی از نیروهای عمده در طراحی سازه‌های ساحلی، نیروی زلزله می‌باشد، که باید مورد توجه قرار گیرد (عفتی، ۱۳۸۷)

۱-۲ ضرورت انجام تحقیق

تا حدود ۵۰ سال گذشته، موج‌شکن‌های توده‌سنگی را صرفاً در آب‌های کم‌عمق می‌ساختند، اما در طی سال‌های اخیر افزایش تبادل کالا، لزوم گسترش بندر و وسعت آن‌ها و افزایش ابعاد شناورها، باعث شده موج‌شکن‌ها در اعماق بیشتر و مکان‌های خیلی باز ساخته شوند و این امر منجر به افزایش ارتفاع امواج و مطرح شدن مسائل طراحی و اجرایی شده است. در این راستا انواع موج‌شکن‌ها از نظر سازه و پایداری مورد توجه قرار گرفته‌اند.

همانند بسیاری از سازه‌های دریایی و فراساحلی، موج‌شکن‌ها به طور کلی تحت تاثیر دو نیروی عمده هستند، یک بار چرخه‌ای وارده از طرف امواج دریا و دیگری بار چرخه‌ای وارده از طرف زلزله. با اینکه بار امواج و بار زلزله ماهیت چرخه‌ای دارند اما تأثیرگذاری متفاوتی روی سازه دارند. بار زلزله یک بار چرخه‌ای با مدت زمان اعمال کوتاه و شدت بسیار زیاد می‌باشد این درحالیست که بار ناشی از امواج دریا یک بار چرخه‌ای با مدت زمان اعمال طولانی و شدت پایین است و لذا سازه‌ها تحت تاثیر این دو

بار می‌توانند رفتار متفاوتی از خود نشان دهند. بر این اساس عموماً در طراحی‌ها بایستی اثر هر دو بر روی سازه‌های فراساحلی مورد بررسی قرار گیرد. اگرچه در ابتدا باور بر آن بود که در طراحی موج‌شکن‌ها اثر امواج دریا اثر غالب است و عموماً موج‌شکن‌ها برای تحمل بار امواج دریا طراحی می‌کردند و اثر زلزله را نادیده می‌گرفتند، اما با گذشت زمان و مشاهدات میدانی این فرضیه به اثبات رسید که مانند بسیاری از سازه‌های ژئوتکنیکی در مورد موج‌شکن‌ها نیز پایداری لرزه‌ای مجموعه‌ی موج‌شکن و بستر نقش بسیاری را در پایداری کلی موج‌شکن ایفا می‌نماید و لذا ارزیابی عملکرد لرزه‌ای موج‌شکن‌ها یکی از مسائل مهم و غیر قابل اجتناب می‌باشد. البته لازم به توضیح است که به طور کلی تاثیر بارگذاری لرزه‌ای بر بستر موج‌شکن‌های توده‌سنگی نسبت به تاثیر آن بر بدنه‌ی موج‌شکن اغلب مهم‌تر می‌باشد. در مجموع می‌توان بیان کرد که می‌بایست موج‌شکن هم برای بار لرزه‌ای و هم برای امواج دریا طراحی و کنترل گردد تا میزان ریسک پروژه تا جای ممکن کاهش پیدا کند. البته لازم به توضیح این نکته است که از آنجایی که موج لرزه‌ای بیشینه هرگز با موج آب بحرانی بر سازه وارد نمی‌شوند بنابراین بررسی‌ها و محاسبات همواره به دو صورت انجام می‌شود (نشریه ۵-۳۰۰):

- بررسی‌های رفتاری تحت بار لرزه‌ای

- بررسی‌های رفتاری تحت بار امواج دریا

اگرچه بحث احداث موج‌شکن‌ها و خسارات لرزه‌ای احتمالی وارده به آنها مطلب جدید نیست و در صورت نیاز به سادگی می‌توان اقدام به ترمیم موج‌شکن‌های توده‌سنگی نمود، اما اهمیت بالای پروژه در آن است که در صورتی که به واسطه تخریب لرزه‌ای موج‌شکن توده‌سنگی متداخل با پایه‌های نفتی کوچکترین نقصی در عملکرد سیستم انتقال فرآورده‌های نفتی از پالایشگاه به اسکله رخ دهد در کنار بروز آلودگی‌های شدید زیست محیطی، خسارات اقتصادی قابل توجهی نیز وارد خواهند شد.

۱-۳ اهداف تحقیق

موج شکن‌ها جهت حفاظت سواحل و سازه‌های دریایی ساخته می‌شوند و لذا از جهت نگهداری سواحل از اهمیت خاصی برخوردار هستند. اگرچه بحث ساخت موج شکن‌های توده‌سنگی در نواحی بندری مبحث جدیدی نیست اما از آنجایی که تاکنون مورد مشابهی در سطح جهان وجود ندارد که در آن پایه‌های شمع انتقال خطوط لوله از داخل بدنه‌ی موج شکن توده‌سنگی عبور کند لذا هدف اصلی از این پژوهش بررسی اندرکنش میان موج شکن توده‌سنگی - شمع - بستر، با تمرکز بر روی میزان تغییر شکل‌های لرزه‌ای احتمالی در بدنه‌ی موج شکن توده‌سنگی و شمع می‌باشد.

۱-۴ فصل بندی پایان نامه

برای رسیدن به اهداف ذکر شده، مطالعات انجام شده در این پژوهش در قالب شش فصل به شرح زیر تدوین و ارائه شده است.

فصل اول: مقدمه:

ضمن تعریف مسأله و بیان ابعاد آن، پیرامون اهمیت و لزوم انجام این پژوهش سخن به میان می‌آید.

فصل دوم: موج شکن‌های توده سنگی

در این فصل به طور خلاصه به معرفی موج شکن‌های توده‌سنگی پرداخته می‌شود.

فصل سوم: روش‌های طراحی موج شکن

در این فصل نخست به پارامترهای مؤثر در طراحی موج شکن‌ها پرداخته می‌شود، سپس به نیروهای

وارد بر موج شکن بیان می‌گردد.

فصل چهارم: پیشینه تحقیق

نتایج مطالعات انجام پذیرفته از سوی سایر پژوهشگران در زمینه‌ی مدلسازی موج شکن‌های

توده‌سنگی تحت بار دینامیکی زلزله در این فصل مورد بحث قرار گرفته است.

فصل پنجم:

در این فصل نخست به معرفی موج‌شکن‌های پارس جنوبی پرداخته شده، سپس به منظور بررسی عملکرد صحیح نرم‌افزار صحت‌سنجی انجام شده و در ادامه نحوه‌ی مدل‌سازی و انتخاب روش مناسب برای مدل‌سازی موج‌شکن و شمع بیان شده است. در پایان نیز نتایج مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل ششم:

در فصل ششم و آخرین فصل از این پایان‌نامه، نتیجه‌گیری و پیشنهادات لازم ارائه شده است.

فصل ۲ موج شکن توده سنگی

۲-۱ مقدمه

مناطق ساحلی هر کشور، از جمله منابع ارزشمند ملی هر کشوری به حساب می‌آیند. مجاورت با آب‌های آزاد، نه تنها یک امتیاز بی نظیر حمل و نقل‌های آسان و ارزان را به همراه دارد، بلکه مجموعه‌ای از استعدادهای متنوع برای فعالیتهای اقتصادی، فرهنگی، نظامی و... را نیز عرضه می‌دارد. بحث حفاظت ساحلی از دیرباز همواره مورد توجه قرار داشته است و به این منظور گزینه‌های مختلفی مورد آزمون قرار گرفته است که در این میان احداث موج‌شکن، بهسازی و تسلیح ساحل و ایجاد برم‌های مستغرق امروزه به مواردی پرکاربرد بدل گشته‌اند (Rahimi and Baziar, 2015). موج‌شکن‌ها سازه‌هایی هستند که جهت ایجاد آرامش در بندرگاه، تأمین ورود امن کشتی‌ها به آبراهه‌ها و بنادر، کاهش انرژی ناشی از امواج و حفاظت از سواحل در مقابل فرسایش ناشی از امواج ساخته می‌شوند. استفاده از این مدل موج‌شکن‌ها در نوع سنتی آن‌ها به ۲۰۰۰ سال پیش برمی‌گردد که در سواحل مصر مورد استفاده بوده‌اند. این مدل از موج‌شکن توده‌سنگی سنتی بصورت ساده، با ریختن سنگ به داخل دریا ساخته می‌شدند که با هربار برخورد امواج به این توده سنگ، علاوه بر شکستن موج، آرایش جدیدی به خود می‌گرفتند و این نیم‌رخ به نیم‌رخ پایدار تبدیل می‌شد. امروزه انواع مختلفی از موج‌شکن‌ها بسته به نیاز، شرایط پروژه و مصالح در دسترس مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این میان موج‌شکن‌های توده‌سنگی به دلیل سهولت پروسه‌ی ساخت‌وساز و هزینه‌ی اجرایی پایین‌تر در مقایسه با سایر گزینه‌های موجود به یکی از پرکاربردترین و گسترده‌ترین انواع موجود در سطح جهان می‌باشند.

۲-۲ تقسیم‌بندی موج‌شکن‌ها

موج‌شکن‌ها را از نظر ساختمان و موقعیت قرارگیری می‌توان به انواع مختلفی دسته‌بندی کرد که

در زیر به صورت خلاصه توضیح داده شده است (ذوالفقاری‌فر، ۱۳۹۵)

۲-۲-۱ تقسیم‌بندی موج‌شکن‌ها از نظر ساختمان

در حالت کلی می‌توان موج‌شکن‌ها را از نظر نوع ساختمان به صورت زیر نیز تقسیم‌بندی نمود:

- سازه‌های توده‌سنگی که معمولاً دارای وجوه شیبدار می‌باشند.
- سازه‌های با وجه قائم که عمدتاً سازه‌های صندوقه‌ای هستند.
- سازه‌های مرکب که ترکیبی از دو نوع بالا می‌باشند.
- موج‌شکن‌های شناور
- موج‌شکن‌های خاص

هرچند اغلب موج‌شکن‌ها و سازه‌های حفاظتی دارای ارتفاعی بیشتر از بالاترین تراز آب هستند، ولی در بعضی شرایط ممکن است ارتفاع سازه پایین‌تر از تراز آب قرار گیرد و تاج سازه زیر آب باشد. موج‌شکن‌های اخیر که عمدتاً برای حفاظت ساحل بکار می‌روند موج‌شکن مستغرق یا ریف نامیده می‌شوند. از میان انواع موج‌شکن‌ها به لحاظ شکل هندسی و مصالح بکار برده شده، موج‌شکن‌های توده‌سنگی از متداولترین انواع آن‌ها می‌باشند.

موج‌شکن‌های توده‌سنگی به طور کلی از یک شیروانی خاکی - سنگی تشکیل شده‌اند و سطح مقطع مورد استفاده در آنها شبیه مقطع سدهای خاکی احداث شده بر روی خشکی می‌باشد، لذا ارزیابی عملکرد و پایداری موج‌شکن‌های توده‌سنگی، همانند ارزیابی پایداری شیروانی‌ها وظیفه‌ای چالش‌برانگیز در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. موج‌شکن‌های توده‌سنگی از سه قسمت هسته، لایه میانی یا لایه فیلتر و لایه حفاظ یا لایه آرمور تشکیل می‌شوند. برای ساختن قسمت هسته موج‌شکن از دانه‌های ریز و منابع

مناسب استخراج شده در خروجی معدن استفاده می‌شود. هسته نقش پرکنندگی و ایجاد شیب لازم و نیز پی لازم برای لایه آرمور را برعهده دارد. جایگاه هسته در موج‌شکن از بستر دریا تا بالاتر از تراز ایستایی آب می‌باشد. سنگ‌های میانی یا لایه فیلتر از طریق مصالح با قطر اسمی متوسط بین سنگ‌های لایه آرمور و سنگ‌های تشکیل دهنده هسته، جهت ممانعت از فرار مصالح هسته و جلوگیری از نشست مصالح لایه آرمور به داخل هسته اجرا می‌شود. با توجه به ابعاد مصالح هسته و آرمور، امکان استفاده بیش از یک لایه میانی وجود دارد. لایه آرمور جزو مهمترین لایه مقامت در برابر امواج دریا بوده و امواج را درهم می‌شکند، که برای تشکیل آن از مصالح سنگین که عمل مقاومت را انجام دهد استفاده می‌شود. بعضی اوقات سنگ‌های به این ابعاد بزرگ یافت نمی‌شود که برای جبران آن از بتن‌های پیش ساخته استفاده خواهد شد، که معمولاً سنگ یا قطعات پیش ساخته بتنی برای عمل مقاومت باید وزنی در حدود ۲۰ الی ۳۰ تن داشته باشند (Dentale and Donnarumm, 2012). همانگونه که در بالا بیان شد، موج‌شکن‌ها را می‌توان از دیدگاه‌های مختلفی از جمله شکل هندسی و مصالح به کار برده شده دسته بندی نمود که جدول (۱-۲) متداول ترین دسته بندی موجود را که بر اساس ساختار سازه ای موج‌شکن‌ها می‌باشد ارائه می‌نماید.

جدول ۱-۲- انواع سازه ای موج‌شکن‌ها (Takahashi 2002).

زیرشاخه‌ها	دسته بندی
<p>موج‌شکن توده‌سنگی همگن</p> <p>موج‌شکن توده‌سنگی چند لایه (غیرهمگن)</p> <p>موج‌شکن توده‌سنگی دارای لایه‌های تقویتی</p> <p>موج‌شکن توده‌سنگی مجهز به بلوک‌های بتنی</p> <p>موج‌شکن توده‌سنگی با قابلیت شکل پذیری مجدد^۱ (برم)</p> <p>موج‌شکن‌های تپه ای^۲ (مستغرق)</p>	<p>نوع شیبدار (توده‌سنگی)</p>

^۱ Reshaping rubble mound breakwaters

^۲ Reef breakwaters

<p>موج شکن های بتنی مونولیت^۱ موج شکن های بلوک بنایی^۲ موج شکن های بلوک سلولی^۳ موج شکن های بتنی کیسونی^۴</p>	<p>نوع قائم (کامپوزیت و کامپوزیت افقی)</p>
<p>موج شکن های دیواره ی آب بند دار موج شکن های شمع فولادی دار موج شکن های صفحه ای افقی موج شکن های شناور موج شکن های پنوماتیک موج شکن های هیدرولیک</p>	<p>نوع ویژه (غیر وزنی)</p>

۲-۲-۲ تقسیم بندی موج شکن ها از نظر موقعیت قرار گیری

به طور کلی موج شکن ها را از نظر موقعیت قرار گیری می توان به دو دسته متصل به ساحل و جدا از ساحل تقسیم کرد (ذوالفقاری فر، ۱۳۹۵).

- موج شکن های متصل به ساحل: در حالت اتصال به ساحل، برای حفاظت ساحل، بندر خارجی و در مواردی بندر داخلی، لنگرگاه و یا حوضچه در برابر امواج مورد استفاده قرار می گیرد. این سازه با کاستن از انرژی امواج، ارتفاع آن را در ناحیه بندر کاهش می دهد و منطقه حفاظت شده ای برای پهلوگیری و مهار کشتی ها و بارگیری و باراندازی آنها و دیگر تأسیسات بندر به وجود می آورد.
- موج شکن های جدا از ساحل: موج شکن جدا از ساحل عمدتاً برای حفاظت ساحل از اثر موج یا تسونامی ساخته می شود. در این حالت این سازه برای حفظ پایداری یک سازه محافظ ساحل نظیر دیوار ساحلی یا برای کاستن از فرسایش ساحل و یا برای اهداف نظیر آن به کار می رود. معمولاً موج شکن دور از ساحل به صورت سازه منقطع است که تعیین فواصل

^۱ Monolith concrete breakwaters

^۲ Block masonry breakwaters

^۳ Cellular block breakwaters

^۴ Curtain wall breakwaters

بین قسمت‌های مختلف آن و طول آن‌ها با توجه به نیاز طرح و بر اساس بررسی‌های انجام

شده روی مدل هیدرولیکی مشخص می‌شود.

روش‌های دیگر تقسیم بندی موج‌شکن‌ها را می‌توان بر اساس مصالح به کاررفته در آن‌ها و یا نوع

سازه تقسیم بندی کرد، سنگ طبیعی و بتن و یا ترکیبی از آنها در بیش از ۹۵٪ موج‌شکن‌هایی که

تاکنون ساخته شده اند به کاررفته است.

انتخاب نوع موج‌شکن عموماً با توجه به عوامل زیر صورت می‌گیرد:

- در دسترس بود مصالح در سایت اجرای موج‌شکن یا نزدیکی آن
- عمق آب در محل احداث موج‌شکن
- شرایط بستر
- عملکرد مورد انتظار از موج‌شکن در بندر
- شرایط محیطی (جوی)
- ماشین آلات مناسب و در دسترس برای ساخت موج‌شکن (ناصری زاده، ۱۳۸۳)

از میان انواع موج‌شکن‌های موجود، موج‌شکن‌های توده‌سنگی به دلیل سهولت اجرا و هزینه‌ی اجرایی

به مراتب پایین‌تر، متداول‌ترین انواع موج‌شکن در سطح جهان می‌باشند. همان گونه که در جدول (۲-۱)

(۱) قابل مشاهده است، موج‌شکن‌های توده‌سنگی به گروه‌های مختلفی تقسیم می‌شوند که انواع

موج‌شکن‌های شیب دار (توده‌سنگی) متداول در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.

در میان موج‌شکن‌های توده‌سنگی، یکی از متداول‌ترین آن‌ها، نوعی است که در آن سنگ‌ها به صورت

تصادفی (نامنظم) در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند (شکل ۲-۱-الف). موج‌شکن‌های توده‌سنگی چند لایه

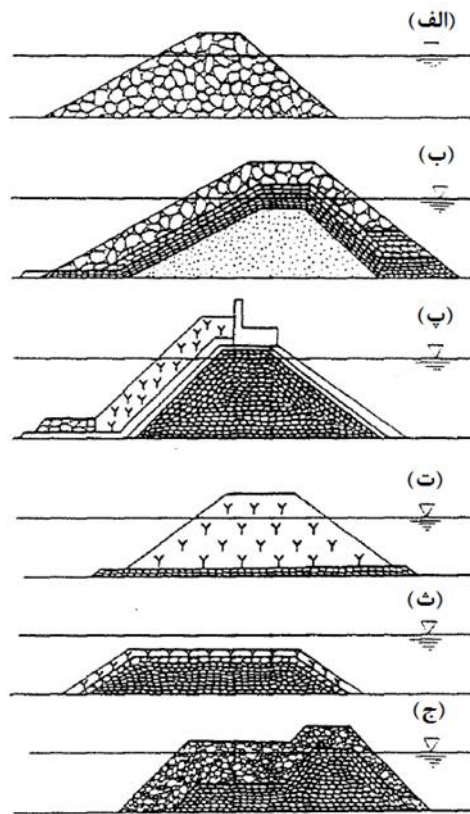
که همانند سدهای خاکی دارای بخشی تحت عنوان هسته هستند، به منظور افزایش پایداری و کاهش

انتقال موج و همچنین کاهش هزینه‌ی مصالح مورد نیاز، توسعه پیدا کردند (شکل ۲-۱-ب). پایداری

لایه‌ی آرمور با استفاده از قطعات بتنی با شکل‌های هندسی خاصی افزایش یابد (شکل ۲-۱-پ)، البته

استفاده یا عدم استفاده از این بلوک‌ها تا حدودی وابسته به مسیر دسترسی به موج‌شکن می‌باشد. امروزه

انواعی از موج‌شکن‌های شیب دار که کاملاً با استفاده از قطعات بتنی احداث می‌شوند در بحث حفاظت ساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۲-۱-ت). اگرچه با استفاده از این موج‌شکن‌ها انتقال امواج به میزان قابل توجهی کاهش نمی‌یابد اما روش احداث ساده‌ی آن و نفوذپذیری نسبتاً بالای بدنه‌ی موج‌شکن در این حالت از مزیت‌های چنین موج‌شکنی می‌باشد. موج‌شکن‌های تپه‌ای یا مستغرق (شکل ۲-۱-ث) عموماً به منظور حفاظت ساحل در نواحی گردشگری و به گونه‌ای که به ظاهر و زیبایی نمای ساحل و دریا لطمه‌ای وارد نسازد استفاده می‌شود. موج‌شکن‌های با قابلیت شکل‌پذیری مجدد (شکل ۲-۱-ج) از مفهوم ساده‌ی تعادل بین شیروانی یک توده‌ی سنگی و عملکرد امواج بهره می‌برد. به بیان ساده‌تر، توده‌ی سنگی یک شیروانی S شکل را به وجود می‌آورد تا پایداری خود را در برابر امواج حفظ کند. این موج‌شکن، یک برم در جلوی خود دارد که در نهایت در نتیجه‌ی تاثیر امواج مجدداً شکل می‌گیرد و به همین دلیل است که این نوع از موج‌شکن‌ها را موج‌شکن‌های دارای برم و یا موج‌شکن‌هایی با پایداری دینامیکی نیز می‌نامند (Takahashi 2002).



شکل ۱-۲- انواع موج شکن های شیب دار (توده سنگی) (Takahashi 2002).

همان گونه که از شکل های ارائه شده نیز به خوبی دیده می شود میان بدنه ی موج شکن های توده سنگی و سدهای خاکی شباهت های غیر قابل انکاری وجود دارد، اما این شباهت ها نباید باعث شود که اینگونه برداشت کنیم که به دلیل فیزیک مشابه رفتار مشابهی خواهند داشت (اشتباهی که تا قرن بیستم میلادی به شدت رایج بود). لازم به ذکر است که علیرغم شباهت های فراوان ظاهری میان سدهای خاکی و موج شکن های توده سنگی، تفاوت هایی اساسی میان این دو سازه ی ژئوتکنیکی وجود دارد (جدول ۲-۲). به این ترتیب و با توجه به تفاوت های آشکار بین موج شکن های توده سنگی و سدهای خاکی، تصور آن که رفتار این دو سازه ی ژئوتکنیکی مشابه یکدیگر باشد تصوری نادرست بوده و شاید بهتر باشد بین این دو سازه ی ژئوتکنیکی تفاوت قائل شد (رحیمی، ۱۳۹۵).

جدول ۲-۲- تفاوت‌های بین موج‌شکن و سد خاکی (رحیمی، ۱۳۹۵)

تفاوت	موج‌شکن توده‌سنگی	سد خاکی
وضعیت اشباع بدنه	مصالح بدنه در بسیاری از موارد کاملاً در وضعیت اشباع است (در دو طرف موج‌شکن سطح آب بالاست)	بدنه عموماً نیمه اشباع است (تنها در بالا دست سد سطح آب بالاست)
وضعیت بستر	عموماً سست	عموماً سفت (در صورت سست بودن از روش‌های بهسازی بستر استفاده می‌شود)
وضعیت نفوذپذیری	عموماً بالا	عموماً بشدت پایین
بار ناشی از امواج	متغییر از مقادیر بسیار پایین تا امواج سونامی	محدود است به توپوگرافی مخزن

شیروانی‌های خاکی چه به صورت طبیعی باشند و چه توسط انسان احداث شده باشند، به صورت‌های گوناگون دچار ناپایداری می‌شوند. بدون تردید فهم دلایل ناپایداری شیروانی برای پیش بینی تغییرات در خصوصیات خاک در طی زمان، شرایط بارگذاری، شرایط نشست که شیروانی در معرض آن قرار دارد، در بحث طراحی و ارزیابی عملکرد اهمیت ویژه‌ای دارد.

به طور عمومی موج‌شکن‌های توده‌سنگی از چند لایه تشکیل می‌شوند (Palmer and Christian, 1998).

- کف‌بند حفاظتی^۱: این لایه به منظور تأمین پایداری سازه‌ی موج‌شکن توده‌سنگی و جلوگیری از فرسایش ناشی از آبشستگی در ناحیه‌ی تماس با بستر دریا مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- لایه‌ی محافظ^۲ (آرمور): این لایه از قطعات سنگی دارای وزن بیشتر نسبت به سایر لایه‌ها و یا با استفاده از قطعات بتنی ساخته می‌شوند و خارجی‌ترین لایه‌ی موج‌شکن توده‌سنگی می‌باشند

^۱ Scour Protection Layer

^۲ Armor

و نقش مقاومت در برابر امواج را دارد.

- لایه‌ی محافظ ثانویه^۱: همانند لایه‌ی آرمور قطعات سنگی با وزن بالا در این لایه استفاده می‌شود. این لایه در صورت بالا بودن سطح آبشستگی احتمالی، احداث می‌گردد. لازم به توضیح است که وزن و ابعاد قطعات سنگی تشکیل دهنده‌ی این لایه نسبت به لایه‌ی محافظ اصلی کمتر می‌باشد.
- پنجه^۲: پنجه‌ی سنگریزه‌ای به منظور پشتیبانی از لایه‌ی محافظ اصلی و ثانویه استفاده می‌شود و معمولاً از جنس مصالح به کار رفته در سایت این دو لایه می‌باشد. عرض پنجه معمولاً باید به اندازه‌ی باشد که بتوان حداقل ۵ سنگ (از مصالح تشکیل دهنده‌ی پنجه) در آن جای گیرد.
- زیر لایه^۳: این لایه در نقش لایه‌ی مابین لایه‌ی محافظ و هسته بوده و ساز و کاری مشابه لایه فیلتر در سدهای خاکی دارد. به بیان دیگر وظیفه‌ی زیرلایه نگهداری مصالح تشکیل دهنده‌ی هسته و تأمین اساس برای لایه‌ی آرمور می‌باشد. بدیهی است که ابعاد سنگدانه‌های مورد استفاده در احداث فیلتر، مطابق انتظار، در حد فاصل ابعاد سنگدانه‌های تشکیل دهنده‌ی لایه‌ی محافظ ثانویه و هسته باشد.
- هسته^۴: این لایه بیشترین حجم عملیات خاکی احداث موج‌شکن را به خود اختصاص می‌دهد. هسته نقش بدنه‌ی اصلی موج‌شکن را بر عهده دارد و وظیفه‌ی آن کاهش موج عبوری می‌باشد. لازم به توضیح است که در احداث هسته‌ی موج‌شکن‌های توده‌سنگی بر خلاف سدهای خاکی نیازی به استفاده از مصالحی با نفوذ پذیری پایین نمی‌باشد و معمولاً خاک‌هایی دارای شن و ماسه (بسته به کاربری مورد نیاز) برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمولاً دانه بندی مصالح مورد استفاده در هسته یکنواخت بوده و میزان مصالح ریزدانه‌ی موجود در آن

^۱ Secondary Armor

^۲ Toe

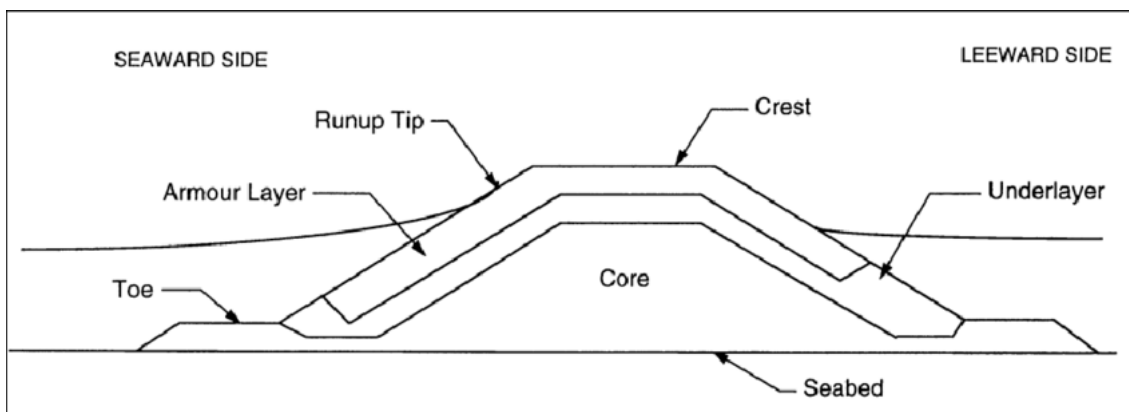
^۳ Underlaye

^۴ Core

کمتر از ۱ درصد کل مصالح می‌باشد.

- حفاظ وجه پشت^۱: این لایه در صورت نیاز برای حفاظت از هسته در مقابل امواج سر ریز شده از موج‌شکن ساخته می‌شود.
- تاج بتنی^۲: این بخش در صورت نیاز به منظور تامین راه دسترسی و کاهش حجم سرریزی امواج احداث می‌گردد.

بر اساس شرایط پروژه لایه‌های مورد استفاده جهت ساخت موج‌شکن می‌تواند متفاوت باشد. در شکل (۲-۲) سطح مقطع مرسوم موج‌شکن توده سنگی نمایش داده شده است.



شکل ۲-۲- سطح مقطع مرسوم موج‌شکن توده سنگی می‌شوند (Palmer and Christian, 1998).

۳-۲ مطالعات ژئوتکنیکی مورد نیاز

به طور کلی در بحث طراحی موج‌شکن‌ها، طراح بایستی پس از انجام مطالعات ژئوتکنیک در ساختگاه موج‌شکن با در نظر داشتن عوامل محیطی مخرب به طراحی موج‌شکن توده سنگی اقدام کند (نشریه ۵-۳۰۰).

۱-۳-۲ مطالعات ژئوتکنیکی در ساختگاه موج‌شکن

^۱ Backside Armour

^۲ Crest

وضعیت ژئوتکنیکی در تعیین ظرفیت باربری سازه‌ها و میزان نشست آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد. وجود سواحل صخره‌ای یا مرجانی، شیب‌های تند و شرایط خاص در شکل بستر بر انتخاب نوع سازه‌های حفاظتی تأثیر مستقیم می‌گذارد. مطالعه ژئوتکنیکی می‌بایست شامل موارد زیر باشد:

۱. تعیین مشخصه‌های خاک و صخره‌ها
۲. جمع آوری داده‌های موجود در مورد مصالح محلی در دسترس
۳. محاسبه فشار زمین و مقاومت زمین
۴. بررسی‌های زیرسطحی به منظور بررسی وضعیت توپوگرافی بستر دریا

مطالعات ژئوتکنیکی در ساختگاه موج‌شکن به دو روش زیر انجام می‌شود:

۱. عملیات نمونه برداری در خشکی

۲. عملیات نمونه برداری از بستر دریا

در کشور ایران معمولاً مطالعات ژئوتکنیکی در ساختگاه با انجام ۲ گمانه در ساحل خشکی و حداقل ۵ نمونه گیری سطحی در بستر دریا انجام می‌گیرد.

۲-۴ ارزیابی اثرات زیست محیطی احداث موج‌شکن

احداث موج‌شکن در یک منطقه بر محیط زیست اطراف اثر می‌گذارد. در جدول (۲-۳) آثار و پیامدهای زیست محیطی موج‌شکن در مرحله ساخت و مرحله بهره‌برداری شرح داده شده است.

جدول ۲-۳- اثرات زیست محیطی احداث موج‌شکن (وفایی، ۱۳۹۰)

ریز فعالیت‌ها	آثار زیست محیطی	کوتاه مدت	بلند مدت	اجتناب ناپذیر	اجتناب پذیر	پیامدهای زیست محیطی
انفجار در معدن، استحصال سنگ از معدن توسط ادوات مربوطه، حمل آن توسط کامیون به محل احداث موج‌شکن	انتشار صدای ناشی از تجهیزات انتشار آلاینده‌های هوا	✓	✓	✓		آلودگی هوا، آلودگی خاک، از بین رفتن پوشش گیاهی منطقه، اثر روانی بر زندگی مردم، تخریب

زیستگاه‌های جانوری، از بین رفتن و مهاجرت برخی از گونه‌های جانوری، تغییر سیمای طبیعی زمین					بروز خطرات ناشی از عملیات تولید پساب آلوده به روغن	
آلودگی هوا، آلودگی صوتی، تغییر در محل تخم ریزی ماهی‌ها و مهاجرت برخی از ماهی‌ها		✓		✓	انتشار صدای ناشی از تجهیزات انتشار آلاینده‌های هوا بروز خطرات ناشی از عملیات	استفاده از کامیون، جرثقیل، بیل مکانیکی جهت استقرار مغزه، فیلتر و آرمور جهت احداث موج‌شکن
آلودگی دریا اثر بر لاکپشته‌ها، از بین رفتن بخشی از کفزیان، تغییر در محل تخم ریزی ماهیان و مهاجرت برخی از ماهی‌ها، تغییر در توپوگرافی کف بستر، تغییر در چشم انداز ساحل		✓		✓	ایجاد کدورت تخریب و تغییر در کف بستر	ریختن مغزه آرمور و فیلتر جهت ساخت موج‌شکن
آلودگی دریا، اثر بر لاکپشته‌ها، از بین رفتن بخشی از کفزیان، تغییر در محل تخم ریزی ماهیان و مهاجرت برخی از ماهی‌ها		✓		✓	نشت مواد سوختی	ایجاد مکانی جهت سوختگیری قایق‌ها لنج‌ها و کشتی‌ها
آلودگی دریا، از بین رفتن بخشی از کفزیان، تغییر در محل تخم ریزی ماهیان و مهاجرت برخی از ماهی‌ها، تغییر در چشم انداز ساحل		✓	✓	✓	انتشار آلاینده‌های هیدروکربنی و نفت در دریا تولید پساب آلوده به روغن تولید زباله و ضایعات	عبور و مرور و ازدحام لنج‌ها، قایق‌ها، شناورها و انسان‌ها در منطقه در زمان بهره برداری

۲-۵ انواع خرابی‌های موج‌شکن

خسارات وارد شده به یک موج‌شکن را می‌توان از لطمه‌های جزئی تا خسارات کلی که در آن، سازه دیگر کارایی مورد نیاز را نخواهد داشت در نظر گرفت. بارگذاری بر روی موج‌شکن و عکس‌العمل آن به ارتفاع موج وارده و مکان قرارگیری قطعات سنگی یا بتنی در سازه وابسته می‌باشد. پاسخ سازه تحت تاثیر بارهای وارده و مشخصات سیستم بتن قرار دارد. بارگذاری‌ها به طور اساسی به وسیله شرایط

مرزی (هیدرولیکی و ژئوتکنیکی) تعیین می‌شوند. هم‌چنین بارگذاری تا اندازه‌ای از سازه موج‌شکن (به طور مثال نفوذپذیری سازه) تاثیر می‌پذیرد. سیستم موج‌شکن با واکنش‌های سازه‌ای و هیدرولیکی نشان می‌دهد که تخریب موج‌شکن به شرایط بارگذاری و پاسخ سازه بستگی دارد و زمانی که پاسخ از یک مقدار معلومی بیشتر شود، شکست اتفاق می‌افتد. شکست یک سازه ممکن است در مدت ساخت سازه و یا هنگامی که سازه در حال بهره‌برداری است رخ دهد (Oumeraci, et al. 2001).

انواع خرابی موج‌شکن را می‌توان به صورت زیر طبقه بندی کرد:

- نشست (Settlement)
- سر زبری (Overtopping)
- لغزش شیب خارجی (slip circle Outer Slope)
- سر زبری موج (wave Overtopping)
- روانگرایی (Liquefaction)
- لغزش شیب داخلی (slip circle Inner Slope)
- عدم پایداری‌های موضعی (Micro Instability)
- برخورد کشتی (Ship Collision)
- رگاب (Piping)
- شکستگی بدنه (Erosion Outer Slap)
- لغزش (Sliding)
- شستگی پنجه (Erosion Force Shore)
- چرخش (Tilting)

۲-۵-۱ عوامل موثر در تخریب موج‌شکن‌ها

یک طراح همواره بایستی در نظر داشته باشد که رفتار سازه‌های خاکی به طور کلی از تقابل میزان کاهش مقاومت برشی خاک و میزان افزایش تنش برشی وارده بر آن نشأت می‌گیرد. برخی از دلایل کاهش مقاومت برشی خاک عبارتند از:

- افزایش فشار آب منفذی (به عنوان مثال ناشی از وقوع زلزله)
- ترک خوردگی (ناشی از اثرات زیست محیطی و تنش‌های کشتی)

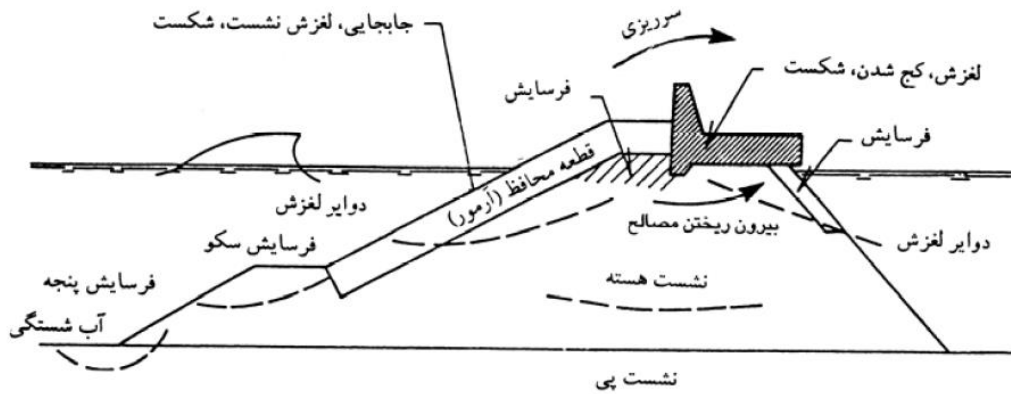
- تورم
 - خروج نمک و املاح از خاک
 - رفتار کرنش نرم شونده
 - بارگذاری چرخه‌ای ناشی از امواج دریا یا امواج لرزه‌ای (در شرایطی که به عنوان مثال منجر به وقوع روانگرایی شود).
- از طرفی برخی از دلایل افزایش تنش برشی وارده بر سازه‌ی ژئوتکنیکی عبارتند از (رحیمی و فلاح، ۱۳۹۵):

- بار اضافی موثر بر شیروانی خاکی
 - تجمع آب در ترک‌های به وجود آمده در بدنه‌ی شیروانی
 - افزایش وزن مخصوص خاک (به عنوان مثال ناشی از خیس شدن)
 - عملیات خاکبرداری در پنجه‌ی شیروانی خاکی
 - افت سطح آب در محل احداث شیروانی خاکی (به عنوان مثال ناشی از جزر و مد با پمپاژ آب)
 - زلزله یا دیگر انواع بارهای دینامیکی
- البته لازم به ذکر است که در مورد موج‌شکن‌های توده‌سنگی در کنار موارد فوق عوامل دیگری نیز می‌توانند زمینه ساز تخریب سازه‌ای موج‌شکن گردند. به طور کلی مهمترین عوامل تخریب سازه‌ای موج‌شکن‌ها عبارتند از:

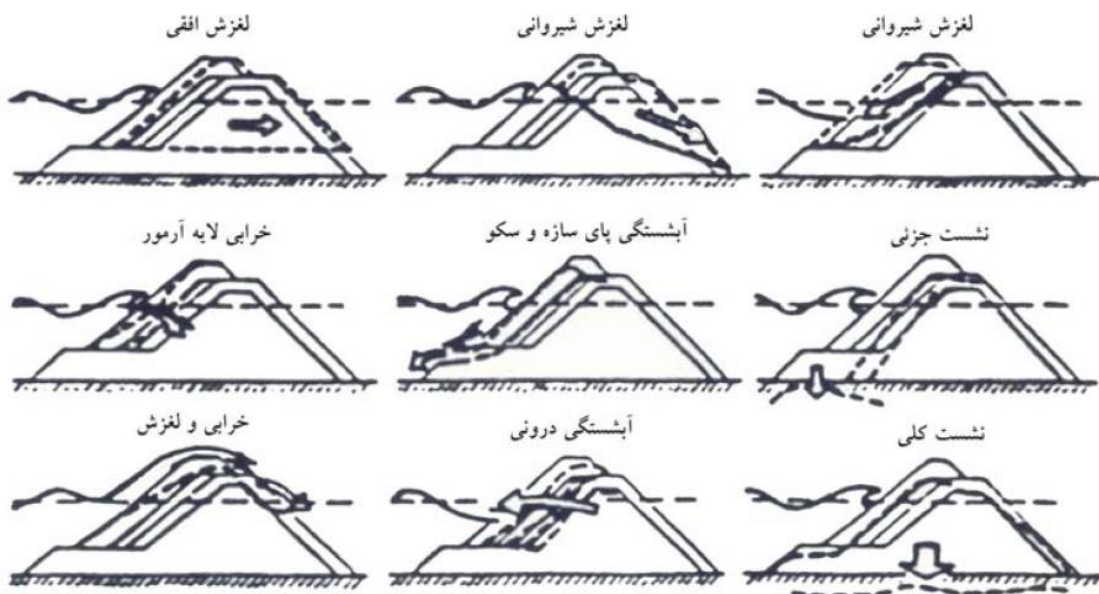
- تخمین کمتر از حد واقعی موج طرح
- در نظر گرفتن تمرکز موضعی امواج به میزان کمتر از حد واقعی
- مناسب نبودن روش‌های طراحی و عدم کفایت دانش موجود درباره رفتار سازه
- عدم انجام آزمایش‌های مدل هیدرولیکی به تعداد کافی و تفسیر نتایج آزمایش‌های انجام

شده

- ناپایداری ژئوتکنیکی سازه یا پی آن
- کنترل یا نظارت ناکافی بر احداث سازه
- استفاده از مصالح نامرغوب یا عدم بررسی دقیق مسائلی نظیر خوردگی، پوسیدگی و هوازدگی



شکل ۲-۳- عوامل تخریب موج شکن های توده سنگی (نشریه شماره ۵-۳۰۰)



شکل ۲-۴- مکانیزم های خرابی موج شکن توده سنگی (نشریه شماره ۵-۳۰۰)

۶-۲ مزایا و معایب موج شکن توده سنگی

مزایای این موج شکن را به صورت کلی و خلاصه می توان در موارد زیر ارائه کرد (نصیری راد، ۱۳۹۱):

- سهولت در اجرا و امکان استفاده از ماشین‌آلات نسبتاً ساده
 - امکان بکارگیری و احداث این نوع موج‌شکن‌ها در بسترهای سست
 - سهولت و هزینه پایین تعمیر و نگهداری این نوع موج‌شکن‌ها
 - صرفه اقتصادی در ساخت این نوع موج‌شکن‌ها در مناطقی که دارای منابع سنگی غنی هستند. (نسبت به سایر موج‌شکن‌ها)
- معایب این نوع از موج‌شکن‌ها به صورت کلی عبارتند از:
- نسبت به افزایش عمق آب در محل اجرای موج‌شکن، حجم قابل ملاحظه‌ای مصالح مورد نیاز است.
 - در مناطقی که انرژی وارده از امواج دریا زیاد باشد و به ویژه در محدوده‌ای که پدیده‌ی شکست موج رخ می‌دهد، نیاز به تأمین سنگ‌هایی با ابعاد و اوزان بسیار بزرگ و سنگین می‌باشد که این امر خود مشکلاتی را در رابطه با مسائل اجرایی به دنبال خواهد داشت.
 - به علت شیبدار بودن بدنه‌ی موج‌شکن، امکان استفاده از قسمت داخلی موج‌شکن به عنوان پهلوگیر، بدون احداث اسکله وجود ندارد.
 - امکان پراکندگی و جابجایی سنگ‌های لایه‌ی حفاظ موج‌شکن وجود دارد که باعث افزایش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری می‌شود.
 - هنگام اجرای لایه‌ی مغزه مقدار زیادی از مصالح شسته می‌شود، خصوصاً در مواردی که دریا ناآرام باشد.

۷-۲ دامنه‌ی کاربرد موج‌شکن‌های توده‌سنگی در ایران

موج‌شکن‌ها از یک قرن پیش در ایران مورد استفاده قرار می‌گرفتند. اولین موج‌شکن شناخته شده‌ی ایران از جنس کیسون‌های چوبی در غازیان بندر انزلی و به طول ۲۰۰ متر ساخته شده است که البته از جزییات زمان احداث آن اطلاعات دقیقی موجود نیست. این موج‌شکن به دلیل تخریب شدید در قالب

قراردادی میان دولت‌های ایران و روسیه در سال ۱۲۷۴ هجری شمسی با موج‌شکنی به طول ۷۵۰ متر جایگزین شد که احداث این موج‌شکن در سال ۱۲۹۳ هجری شمسی به پایان رسید. با گذشت زمان، امروزه تعداد قابل توجهی از موج‌شکن‌ها در سواحل بنادر شمالی و جنوبی کشور ایران احداث شده و یا در دست احداث می‌باشند که این مسئله اهمیت بالای طراحی صحیح و بدون اشتباه این سازه‌های ژئوتکنیکی را نشان می‌دهد. البته لازم به ذکر است با توجه به شرایط جغرافیایی کشور ایران، تمایل بیشتر موجود نسبت به استخراج منابع نفت و گاز در خلیج فارس و دریای عمان (به لطف عمق کمتر آب) و بالطبع احداث بیشتر تأسیسات مرتبط در سواحل جنوبی و دامنه‌ی بیشتر روابط تجاری به لطف دسترسی به آبهای آزاد متعاقباً بنادر بیشتری در سواحل جنوبی ایران ایجاد شده‌اند (Rahimi, et al. 2016).

برخی از موج‌شکن‌های احداث شده در سواحل ایران به شرح زیر می‌باشند:

موج‌شکن بندر صیادی کنارک: این بندر در ۴۰ کیلومتری غرب چابهار و در مقابل شهر کوچک کنارک احداث شده است. در ساخت این موج‌شکن از قطعات سنگی بدست آمده از معدن فلات پزم استفاده شده است.

موج‌شکن بندر صیادی پزم: این بندر در شرق خلیج پزم (۴۵ کیلومتری غرب چابهار) و در پناه پوزه طبیعی آن قرار گرفته است و دارای موج‌شکنی به طول تقریبی ۴۲۰ متر می‌باشد. این موج‌شکن از نوع سنگی - بتنی بوده و در احداث آن از قطعات سنگ رسوبی متخلخل (لوماشل) استفاده شده است.

موج‌شکن توده‌سنگی بندر شهید بهشتی: جهت دسترسی به اسکله‌های بندر بزرگ تجاری چابهار یک راه با بدنه خرده سنگی به طول ۳۰۰ متر ساخته شده که در ساخت آن از سنگ‌های لوماشل متخلخل معدن تیس به کار رفته است.

موج‌شکن بندر شهید کلانتری: این بندر در بخش شرقی خلیج چابهار واقع است و دارای موج‌شکنی به طول ۶۰۰ متر می‌باشد. در احداث این موج‌شکن از ماسه سنگ‌های استخراج شده از معدن پیر سهراب در ۸۰ کیلومتری شمال شرق چابهار استفاده شده و در بخش انتهایی این موج‌شکن، بلوک‌های

بتنی مکعبی شکل به وزن تقریبی ۱۴ تن کار گذاشته شده است.

موجشکن بندر صیادی تیس: این بندر در ۱۰ کیلومتری شمال چابهار قرار گرفته و دارای موجشکنی به طول تقریبی ۴۵۰ متر می‌باشد. سنگ‌های مصرفی در احداث این موجشکن از نوع لوماشل می‌باشند. موجشکن بندر رمین: این بندر در ۱۲ کیلومتری شرق چابهار واقع شده و دارای موجشکنی به طول تقریبی ۶۰۰ متر می‌باشد. این موجشکن از نوع سنگی - بتنی می‌باشد که قطعات سنگ از نوع لوماشل متخلخل می‌باشند. همچنین در بخشی از موجشکن که در تماس با منطقه جزر و مدی دریا قرار گرفته از بلوک‌های بتنی استفاده شده است.

موجشکن بندر بریس: بندر مزبور در ۷۰ کیلومتری شرق چابهار و در پناه پوزه‌ی طبیعی مارنی قرار دارد که روی آن را لایه‌ای از سنگ‌های متخلخل رسوبی (لوماشل) پوشانده است. برای ساخت این بندر و حوضچه آرامش آن دو موجشکن ساخته شده که طول بازوی اصلی در حدود ۵۰۰ متر می‌باشد. در احداث این موجشکن‌ها از قطعات سنگی رسوبی متخلخل (لوماشل) استفاده شده است.

موجشکن غازیان: طول این موجشکن که واقع در بندرانزلی می‌باشد ۷۵۰ متر بوده و احداث آن به منظور حفاظت ساحل از امواج دریا در سال ۱۹۱۴ میلادی پایان پذیرفت. ساختمان موجشکن در قسمت شرقی به عرض ۶ متر بوده و به منظور احداث آن ابتدا از دو طرف تیرهای چوبی به طول ۱۲ متر به طور مایل برای صندوق بندی کوبیده شده و توسط پیچ و مهره‌های بلند به یکدیگر متصل گردیده و در ادامه در داخل کیسون‌های ایجاد شده عملیات بتن ریزی صورت پذیرفته و سپس قطعات سنگی بر روی این کیسون‌های بتنی قرار داده شده اند.

موجشکن بندر امیر آباد: این موجشکن سنگی که احداث آن در سال ۱۳۹۲ شمسی در بندر صیادی امیر آباد در استان مازندران خاتمه یافت به منظور ایجاد حوضچه‌ی آرامش جهت پهلوگیری قایق‌ها و کشتی‌های صیادی و رونق صنعت شیلات در محدوده‌ی مذکور احداث گردید. سازه‌ی این موجشکن دارای یک بازوی اصلی به طول تقریبی ۹۲۷ متر و یک بازوی فرعی به طول ۴۹۸ متر می‌باشد و همان گونه که گفته شد بدنه‌ی آن کاملاً از قطعات سنگی ساخته شده است.

همانند بسیاری از کشورهای دیگر، در کشور ایران نیز موج‌شکن‌های توده‌سنگی در مقایسه با سایر انواع موج‌شکن‌های موجود بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حال حاضر برخی از بزرگترین موج‌شکن‌های توده‌سنگی احداث شده در کشور ایران در نواحی بندری چابهار و انزلی قرار دارند (شکل‌های ۲-۵ تا ۲-۷).

اگرچه در ابتدا، بیشتر موج‌شکن‌ها در کشور ایران با هدف حفاظت ساحل از امواج دریا ساخته می‌شدند، اما در سال‌های اخیر شاهد ساخت موج‌شکن‌های چند منظوره نظیر موج‌شکن توده‌سنگی آب شیرین‌کن بندر کنارک چابهار (به طول ۲/۱ کیلومتر) و موج‌شکن توده‌سنگی و چند منظوره‌ی جد (به طول ۱/۲ کیلومتر) در سطح کشور بوده‌ایم که نشان دهنده‌ی تغییر نگرش کلاسیک به مقوله‌ی ضرورت استفاده از موج‌شکن‌ها می‌باشد.



شکل ۲-۵- موج‌شکن توده‌سنگی بندر امیرآباد به طول حدوداً ۱۴۲۵ متر واقع در استان مازندران



شکل ۲-۶- موج شکن خلیج چابهار به طول ۵۵۰ متر



شکل ۲-۷- موج شکن غازیان به طول ۷۵۰ متر و موج شکن های شرق و غرب جدید بندر انزلی به طول کلی ۲۴۰۰ متر واقع در بندر انزلی

فصل ۳ روش های طراحی موج شکن

۳-۱ مقدمه

هدف اصلی طراحی، سنجش ابعاد و اندازه‌های سطح مقطع است. این محاسبات به طور سنتی برگرفته از فرمول‌ها و دستور العمل‌های داده شده توسط آیین‌نامه طراحی بندر و سازه‌های دریایی ایران (نشریه شماره ۳۰۰)، انجمن بین‌المللی زیرساخت‌های حمل و نقل آبی (PIANC)، آیین‌نامه سازه‌های دریایی ژاپن (OCDI) و مهندسی ارتش ایالات متحده آمریکا است.

طراحی موج‌شکن‌های سنگی، یکی از متداول‌ترین موارد طراحی در سازه‌های دریایی و ساحلی می‌باشد. موج‌شکن سنگی از قدیمی‌ترین انواع موج‌شکن‌ها می‌باشد و در کشور ما نیز با توجه به منابع متعدد سنگ‌های با کیفیت مناسب (مهندسی) استفاده از موج‌شکن‌های سنگی رواج دارد. علی‌رغم اینکه در ظاهر، اجزاء پیچیده‌ای در طراحی موج‌شکن سنگی وجود ندارد، اما با توجه به حجم بالای عملیات خاکی، نیازمند طراحی دقیق موج‌شکن‌های سنگی و بهینه‌سازی طراحی موج‌شکن سنگی می‌باشیم. به عبارت دیگر مقطع یک موج‌شکن سنگی باید با دقت و براساس محاسبات و بررسی‌های دقیق شرایط جوی منطقه باشد تا بتواند عملکردی ایمن را در طرف ساحل ایجاد کرده و از طرفی هزینه‌های اجرای طرح نیز بهینه گردد. یکی دیگر از موارد مهم در طراحی موج‌شکن‌های سنگی میزان امتداد این موج‌شکن‌ها به سمت دریا، زاویه موج‌شکن از ساحل به دریا، محل باز شو موج‌شکن برای بندر، دستک‌های فرعی موج‌شکن و ... می‌باشد که در صورت عدم طراحی صحیح هر یک از این قسمت‌ها، کاربری آتی بندر با مشکلات رسوب، طوفان و ... مواجه خواهد شد.

۲-۳ پارامترهای حاکم در طراحی موج شکن های توده سنگی

به طور کلی پارامترهای حاکم در طراحی موج شکن های توده سنگی به سه دسته زیر تقسیم می شوند (Van der Meer, 1995):

۱. پارامترهای محیطی (مربوط به امواج)

۲. پارامترهای هیدرولیکی

۳. پارامترهای سازه ای

۱-۲-۳ پارامترهای محیطی

برخورد موج به موج شکن شیب دار منجر به پدیده فیزیکی بسیار پیچیده ای شامل شکست موج و ایجاد جریان در محیط متخلخل می شود. زمانی که موج به شیب وجه جلویی سازه می رسد در اثر کاهش عمق آب و افزایش تیزی موج، شکست موج اتفاق می افتد.

از جمله پارامترهای مربوط به موج (پارامترهای محیطی) می توان به عواملی نظیر ارتفاع موج وارده (H)، دوره تناوب موج (T)، زاویه انتشار موج (β) و عمق آب (d) اشاره نمود. معمولاً اثر ارتفاع و دوره تناوب موج با استفاده از پارامتر تیزی موج بیان می گردد. این پارامتر بی بعد در واقع نسبت ارتفاع موج به طول موج است. در شرایطی که طول موج در آب عمیق با پارامتر L_0 بیان شود، پارامتر تیزی موج در آب عمیق بصورت زیر تعریف می شود:

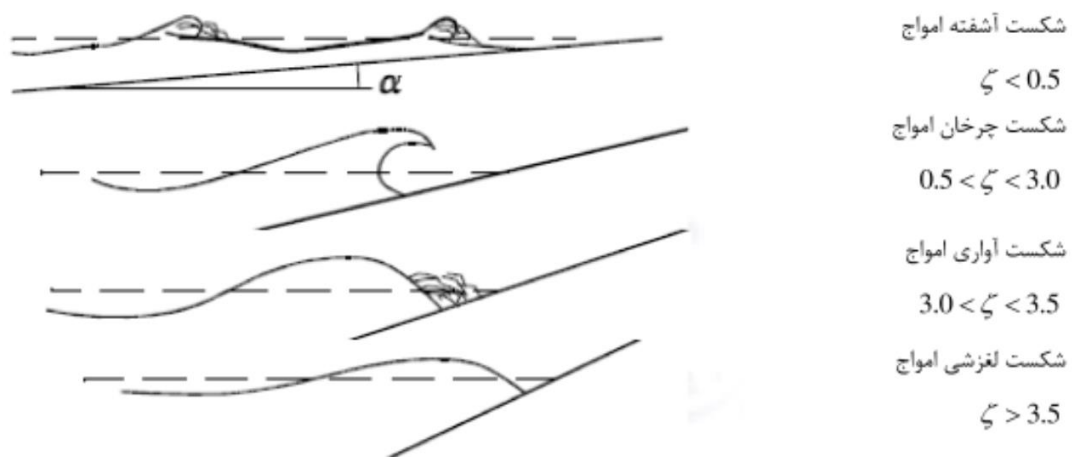
$$S_0 = \frac{H}{L_0} = \frac{2\pi H}{gT^2} \quad (1-3)$$

که در آن g شتاب ثقل است. تیزی موج با استفاده از H_s و T_m یا T_p در رابطه (۱-۳) به ترتیب S_{0m} و S_{0p} نشان داده می شود.

مفیدترین پارامتر برای نمایش اثر موج بر روی شیب و برخی پیامدهای ناشی از آن، پارامتر تشابه شکست موج، ζ است. این پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\zeta = \frac{\tan \alpha}{S^{0.5}} \quad (2-3)$$

$\tan \alpha$ شیب سازه است. از پارامتر تشابه شکست موج برای تعیین نوع شکست موج بر روی شیب ساحل و یا شیب سازه استفاده می‌شود. به طور کلی چهار نوع اصلی برای شکست امواج وجود دارد. این چهار نوع عبارتند از: آشفته، چرخان، آواری و لغزشی. شکل (۱-۳) انواع این شکست‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳- انواع شکست موج (Burcharth and Hughes, 2006)

در شکست اول یعنی شکست آشفته، تاج موج دچار ناپایداری می‌شود و به شکل آبشار پایین می‌ریزد. این ریزش بر روی وجه روبه رو به ساحل موج صورت می‌پذیرد به نحوی که آنرا بصورت کف آلود در می‌آورد. برای امواج با تیزی زیاد بر روی شیب ملایم، شکست از نوع چرخان می‌باشد. از مشخصه‌های اصلی این نوع شکست موج، شیرجه زدن تاج موج به سمت جلو و سپس برخورد داخل حوضیض موج برگشتی است. در شکست آواری تاج موج پایداری خود را حفظ می‌کند تا اینکه پس از نزدیکی موج به ساحل، بخش زیرین وجه رو به ساحل موج به تدریج تیزتر شده و سرانجام ناپایدار می‌گردد و در این حالت تاج موج نیز فرو می‌ریزد به نحوی که منجر به آشفته‌گی نامنظم سطح آب می‌شود. برای امواج با تیزی کم و بروی شیب تند، امواج از نوع لغزشی اتفاق می‌افتد. از مشخصه‌های اصلی این نوع امواج غلتیدن موج بر

روی شیب، اتلاف انرژی کمتر نسبت به حالت چرخان و تراز بالا روی بیشتر نسبت به حالت چرخان است. (عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی، ۱۳۸۴).

۳-۲-۲ پارامترهای هیدرولیکی

در حالت کلی واکنش‌های هیدرولیکی شامل چهار واکنش بالا روی و پایین روی امواج، سرریزی امواج، بازتاب امواج و عبور امواج هستند. که در ادامه به طور مختصر شرح داده خواهند شد. فعالیت موج بر روی سازه توده سنگی موجب نوسان تراز آب در محدوده قائمی که معمولاً بیش از ارتفاع امواج تابشی است، می‌گردد. ترازهای حدی که در هر برخورد موج حاصل می‌شوند، بالا روی و پایین روی موج نامیده می‌شوند، این ترازها نسبت به سطح ایستایی تعریف شده و از جمله متغیرهای مهم طراحی می‌باشند. (چگینی، ۱۳۷۸).

منظور از روگذری موج مقداری از آب دریا است که از روی تاج سازه‌های ساحلی عبور کرده و به پشت تاج آنها می‌رسد. روگذری بیش از اندازه امواج می‌تواند سبب آسیب رساندن به افراد و ایجاد خسارت در وسایل نقلیه و تجهیزات روی موج شکن یا نزدیک آن شود. بنابراین روگذری موج نباید از حد مجاز در طراحی بیشتر باشد (چگینی، ۱۳۷۸).

پدیده بازتاب امواج تقریباً در تمام سازه‌های ساحلی (موج‌شکن) رخ می‌دهد و بخشی از انرژی موج برخوردی با سازه از آن منعکس می‌شود. میزان بازتاب موج از سازه عمدتاً به میزان تخلخل و شیب سازه مربوط می‌شود به طوری که در سازه‌های نفوذ ناپذیر و شیب‌های تند تقریباً صد درصد انرژی موج تابشی وارد بر سازه از آن منعکس شده و هر چه نفوذپذیری سازه بیشتر و شیب آن‌ها ملایم تر شود میزان بازتاب امواج نیز کمتر می‌باشد (چگینی، ۱۳۷۸).

گاهی انرژی موج در موج شکن های تاج کوتاه به ناحیه پشت آن انتقال می‌یابد که این پدیده را عبور موج می‌نامند. عبور موج در سازه‌های توده‌سنگی در اثر سرریزی سازه و یا عبور امواج با دوره تناوب بلند

از میان سازه نفوذپذیر است. البته در برخی حالات عبور موج از ترکیب دو وضعیت فوق پدید می‌آید. تعیین میزان عبور موج در طراحی موج‌شکن‌های تاج کوتاه که به منظور حفاظت از سواحل احداث می‌شوند و یا طراحی موج‌شکن‌های مورد استفاده در بنادر که در آنها عبور امواج دوره تناوب بلند، موجب حرکت کشتی‌ها و یا سایر اجسام شناور در پشت آنها می‌شوند، دارای اهمیت است. میزان عبور در موج‌شکن‌های تاج کوتاه به هندسه سازه (ارتفاع آزاد تاج، عرض تاج و عمق آب)، نفوذپذیری سازه و شرایط موج (ارتفاع و دوره تناوب موج) بستگی دارد.

۳-۲-۳ پارامترهای سازه‌ای:

پارامترهای سازه‌ای به چهار دسته زیر قابل تفکیک می‌باشند (Van der Meer, 1995):

پارامترهای سازه‌ای وابسته به موج

پارامترهای سازه‌ای وابسته به سنگ

پارامترهای سازه‌ای وابسته به مقطع عرضی

پارامترهای سازه‌ای وابسته به واکنش سازه‌ها

۳-۲-۳-۱ پارامترهای سازه‌ای وابسته به امواج

از مهم‌ترین پارامترهای بی‌بعد که ارتباط بین امواج و سازه را نشان می‌دهد، عدد پایداری است که با N_n و H_0 نشان داده می‌شود. عدد پایداری از یک نسبت کیفی ساده بین نیروهای محرک (نیروهای ناشی از حرکت آب^۱ و نیروهای بالا برنده^۲) و نیروی مقاوم بدست می‌آیند:

$$\frac{F_D + F_L}{F_G} \approx \frac{\rho_w D_{n50} u^2}{(\rho_s - \rho_w) g D_{n50}^3} \cdot K = \frac{u^2}{g \Delta D_{n50}} \quad (3-3)$$

^۱ Drag Force

^۲ Lift Force

در رابطه بالا K تابع صحت سنجی بدون بعد نامیده می‌شود. با فرض آن که سرعت به صورت $u = \sqrt{2gh}$ در نظر گرفته شود، داریم:

$$\frac{F_D + F_L}{F_G} \approx \frac{2gH}{g\Delta D_{n50}} \cdot K = \frac{H}{\Delta D_{n50}} \cdot k_2 \quad (۴-۳)$$

$$N_n = \frac{H_n}{\Delta D_{n50}} \quad (۵-۳)$$

در این رابطه H_n میانگین n موج بلند رسیده به موج شکن است. عموماً از H_S که بیانگر میانگین یک سوم از بلندترین امواج رسیده به موج شکن است برای محاسبه عدد پایداری N_S استفاده می‌شود. D_{n50} نیز قطر متوسط سنگ‌های به کار رفته در موج شکن است، که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D_{n50} = \left(\frac{W_{50}}{\rho_s g} \right)^{1/3} \quad (۶-۳)$$

W_{50} وزن میانگین سنگ آرمور معادل با جرم ۵۰ درصد منحنی توزیع جرم لایه آرمور است. ρ_s نیز جرم مخصوص سنگ‌های آرمور می‌باشد. Δ نیز چگالی نسبی سنگ‌های آرمور است که طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \quad (۷-۳)$$

که در آن ρ_w جرم مخصوص آب می‌باشد. پارامتر تشابه شکست نیز از جمله پارامترهای مهم دیگری است که شیب موج شکن را به تیزی موج مربوط می‌کند و بیشتر در موج شکن‌های توده‌سنگی سنتی کاربرد دارد. از دیگر پارامترهای مهمی که در موج شکن‌های توده سنگی شکل پذیر استفاده می‌شود T_0 می‌باشد که طول موج را به اندازه سنگ‌ها مرتبط می‌سازد و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$T_0 = \sqrt{\frac{g}{D_{n50}}} T_m \quad (۸-۳)$$

T_m دوره تناوب میانگین امواج می‌باشد.

۲-۳-۲-۳ پارامترهای سازه‌ای وابسته به سنگ

پارامترهای مربوط به سنگ‌ها مرتبط با مقاومت سازه در مقابل نیروهای وارده می‌باشد. D_{n50} اندازه متوسط سنگ‌های به کار رفته در موج‌شکن از مهمترین پارامترهای سازه‌ای است. هر چه اندازه D_{n50} بیشتر باشد نیروی مقاوم سازه نیز بیشتر خواهد بود. عرض دانه بندی سنگ‌های به کار رفته نیز از جمله موارد مهم سازه‌ای است که بیشتر در موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر مطرح می‌شود. پارامتر مناسب برای بیان عرض دانه بندی ضریب دانه بندی است که به صورت $f_g = D_{n85}/D_{n15}$ تعریف می‌شود. D_{n85} و D_{n15} به ترتیب قطرهای متناظر با درصد‌های ۸۵ و ۱۵ منحنی دانبندی سنگ‌ها می‌باشد.

۳-۳-۲-۳ پارامترهای سازه‌ای وابسته به مقطع عرضی

پارامترهای سازه‌ای مربوط به مقطع عرضی، معرف شکل هندسی سازه می‌باشند. این پارامترها ابعاد مقطع عرضی سازه مورد نظر و ضخامت لایه‌های مختلف سنگی به کار رفته در سازه را مشخص می‌کنند. از جمله پارامترهای تاثیرگذار در پایداری سازه‌های موج‌شکن، نفوذپذیری سازه P است. مقدار نفوذپذیری سازه به ضخامت لایه آرمور، فیلتر و هسته بستگی دارد. مقادیر نفوذپذیری برای سازه‌ها با آرایش‌های مختلف توسط (Van der Meer, 1995) بیان شده است. پایین ترین مقدار نفوذپذیری مربوط به سازه‌ای با یک لایه آرمور به ضخامت اسمی D_{n50} بر روی یک هسته نفوذناپذیر (ماسه یا رسی) و یک لایه فیلتر باریک است و با مقدار $P = 0/1$ مشخص می‌شود. بیشترین مقدار نفوذپذیری هم مربوط به سازه همگن متشکل از سنگ‌های آرمور بوده است و با $P = 0/6$ مشخص می‌شود.

۳-۲-۳-۴ پارامترهای سازه ای وابسته به واکنش سازه

با یورش امواج به موج شکن‌ها بخش‌هایی از انرژی امواج به صورت بازتاب و عبور امواج مستهلک می‌شوند، بخش باقی‌مانده آن نیز به موج شکن وارد می‌شود که می‌بایست توان تحمل این مقدار انرژی را داشته باشد. با این حال، موج شکن‌های توده‌سنگی در مقابل انرژی وارد شده از خود پاسخ نشان می‌دهند و آسیب می‌بینند. از آنجایی که پایداری هیدرولیکی لایه آرمور در شیب جلویی سازه برای سازه‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است، پاسخ سازه‌های مختلف نیز متفاوت است. از جمله رایج‌ترین پارامترهای آسیب برای موج شکن‌های توده‌سنگی سنتی، پارامتر آسیب (S) است که اولین بار توسط (Broderick, 1983) معرفی شد. پارامتر آسیب (S) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S = \frac{-A}{D_{n50}^2} \quad (9-3)$$

در این رابطه $-A$ سطح فرسایش یافته سازه در اطراف آب را نشان می‌دهد. $S = 2-3$ به معنای عدم آسیب به موج شکن است، $S = 8$ به معنای تخریب موج شکن می‌باشد.

۳-۳ طراحی ساختاری موج شکن

همانگونه که گفته شد موج شکن‌ها معمولاً شامل یک هسته می‌باشند که از خرده‌های سنگ شکسته تشکیل شده و توسط یک یا چند لایه میانی به پوشش حفاظ متصل می‌گردند. تخریب اینگونه سازه‌ها اغلب ناشی از حذف یا آسیب قطعات حفاظتی، گذرامواج از تاج و آبشستگی پنجه آن‌ها، از دست رفتن مصالح هسته و در بعضی موارد مشکلات حاصل از پی آن‌ها می‌باشد. قطعات حفاظتی یا لایه محافظ اغلب از تکه‌های بزرگ سنگ یا واحدهای پیش ساخته بتنی که به شکل‌های گوناگون ساخته می‌شوند، می‌باشد. اکثر فرمول‌های طراحی برای اینگونه سازه‌ها فقط برای لایه محافظ داده شده است و بقیه

آن‌ها نسبت به این لایه سنجیده می‌شوند. در زیر به چند نمونه از این روابط اشاره می‌کنیم (چگینی، ۱۳۷۸).

رابطه ایری‌بارن:

$$W = \frac{mH^3 \rho_a}{\Delta^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (10-3)$$

رابطه هادسن:

$$W = \frac{\rho_a H^3}{K_D \Delta^3 \cot \theta} \quad (11-3)$$

که در آن ρ_a = جرم مخصوص لایه آرمور، H = ارتفاع موج طرح، = ارتفاع موج طرح، K_D = ضریب پایداری، m = ضریب جنس سنگ، θ = شیب طرفین، $\Delta = \rho_a / \rho - 1$ چگالی نسبی قطعه آرمور می‌باشد.

۳-۳-۱ نیروهای امواج

از آنجا که موج‌شکن‌ها امتدادی نزدیک به عمود بر خط ساحلی دارند، معمولاً قله امواج منطقه با زاویه‌ای حدود ۹۰ درجه نسبت به محور امتداد موج‌شکن به آن برخورد می‌نماید. موج‌شکن باید برای هر جهت محتمل برخورد موج به آن و اثرات انعکاس موج طراحی گردد. بطور کلی با توجه به مشخصات موج طرح و شرایط شیب بستر و عمق آب طراحی امواج می‌تواند بصورت یکی از سه حالت شکسته (Non breaking)، در حال شکست (breaking) و یا شکسته (broken) به سازه موج شکن برخورددار نمایند (چگینی، ۱۳۷۸). برای تعیین امواج ناشکنا و شکننا می‌توان از معیار نسبت ارتفاع موج به عمق آب استفاده کرد. شرط شکسته موج را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\frac{H}{D} = (0.8 - 0.9) \quad (12-3)$$

که در آن $H =$ ارتفاع موج طرح و $d =$ عمق آب می‌باشد (PIANC 2001).

در طراحی ساختاری موج‌شکن‌ها تعیین ارتفاع مشخصه موج H_s (Significant) در اعماق طراحی مورد نظر با دوره بازگشت ۲۰ تا ۵۰ سال با توجه به ملاحظات اقتصادی و اجتماعی ضرورت دارد. همچنین بسته به انعطاف پذیری سازه موج شکن، ارتفاع موج طرح (H) انتخاب می‌باشد. معمولاً $(H > 0.6 H_s)$.

۳-۱-۳-۱ محاسبه نیروهای موج ناشکنا با روش Miche-Rundgren

توزیع های فشار تاج و ناو یک موج در پای دیوار قائم وقتی تاج موج در پای دیوار است، فشار از صفر در سطح آزاد آب تا $\gamma d + P_1$ در بستر افزایش می‌یابد، به طوری که P_1 به طور تقریبی برابر است با (چگینی، ۱۳۷۸):

$$P_1 = \left(\frac{1+c_r}{2}\right) \frac{\gamma H_i}{\cosh(2\pi d / L)} \quad (13-3)$$

که در آن $\gamma =$ وزن مخصوص آب، $d =$ عمق آب، $L =$ طول موج، $c_r =$ ضریب انعکاس موج و $H_i =$ ارتفاع موج می‌باشد.

نمودارهایی توسط Miche-Rundgren تنظیم شده که امکان تعیین دقیقتر نیروها و ولنگرهای حاصل از موج ناشکنا در پای دیوار را فراهم می‌آورد.

۳-۱-۳-۲ روش Minikin برای محاسبه نیروهای موج شکنا

در این روش فشار حداکثر عمل کننده در سطح آزاد آب به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_m = 101\gamma \frac{H_b d_s}{L_D D} (D + d_s) \quad (14-3)$$

که در آن P_m = فشار دینامیکی حداکثر، H_b = ارتفاع موج شکنا، γ = وزن مخصوص آب، d_s = عمق آب در پنجه دیوار، D = عمق به فاصله‌ی یک طول موج از جلوی دیوار و L_D = طول موج در عمق D آب می‌باشد (چگینی، ۱۳۷۸).

۳-۱-۳-۳ محاسبه نیروی امواج شکسته

گاهی سازه‌های ساحلی در جایی واقع می‌شوند که امواج حتی در شرایط طوفان شدید و مد قبل از برخورد با سازه می‌شکنند. می‌توان فشارهای موج وارد بر دیوار را به طور تقریبی به صورت زیر بدست آورد:

$$P_m = \frac{\gamma c^2}{2g} = \frac{\gamma d_b}{2} \quad (۱۵-۳)$$

که در رابطه فوق $c = \sqrt{g \times d_b}$ ، سرعت انتشار موج ، d_b = عمق آب در محل شکست موج، γ = وزن مخصوص آب می‌باشد (چگینی، ۱۳۷۸).

۲-۳-۳ محاسبه نیروی زلزله

براساس رابطه Westergaard (1933) باردینامیکی وارد بر سازه در آب‌های آزاد را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود (PIANC 2001):

$$F_{dw} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H_w^2 \quad (۱۶-۳)$$

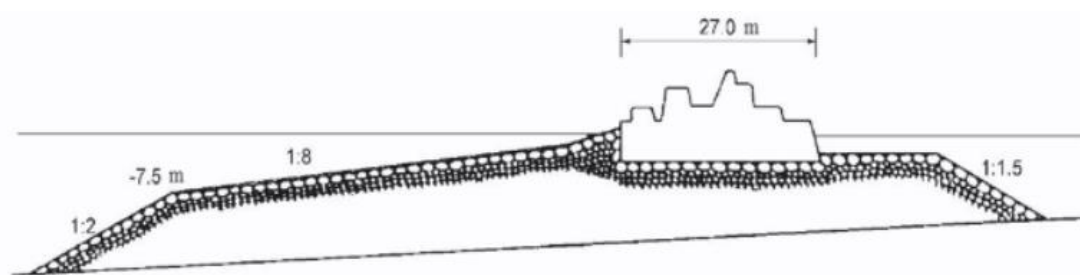
که در آن γ_w = وزن مخصوص آب، H_w = عمق آب مقابل سازه، k_h = ضریب معادل شتاب زلزله می‌باشد. نقطه اثر این نیرو در $0.4H_w$ از پای سازه می‌باشد.

فصل ۲۴ پیشینه تحقیق

۴-۱ مقدمه

اولین موج‌شکن در عصر مفرغ ساخته شده است (حدود ۴۵۰۰ سال پیش). محققین در هنگام کاوش در شهر باستانی آتلانتیس واقع در یونان بقایای این موج‌شکن زیبا را به نام مینوآن در زیر آب یافتند. در ۳۵۰۰ سال پیش (در زمان هرود شاه) بندر قدیمی سباستوس در فلسطین اشغالی با هزینه زیاد ساخته شد. یکی از موج‌شکن‌های این بندر ۶۰۰ متر طول و پاشنه‌ی آن تا ۵۰ متر عرض دارد. بر روی این موج‌شکن برج‌ها و اتاق‌های زیادی برای ملوانان ساخته شده بود.

یکی از اولین موج‌شکن‌های موجود که تا حدودی به موج‌شکن‌های امروزی شبیه است بیش از ۲۰۰۰ سال پیش از میلاد مسیح به دستور اسکندر مقدونی در شهر اسکندریه در کشور مصر، به منظور اتصال جزیره‌ی فاروس به این شهر در راستای ایجاد یک بندرگاه و به کمک مصالح بنایی و سنگ ساخته شد. نمونه‌ای دیگر، موج‌شکن توده‌سنگی ساخته شده در سیویتاویچیا^۱ در کشور ایتالیا می‌باشد که قدمتش به سال ۵۳ میلادی باز می‌گردد (شکل ۴-۱) و به عنوان قدیمی‌ترین موج‌شکن توده‌سنگی پابرجا در جهان شناخته می‌شود.



شکل ۴-۱- ابعاد موج‌شکن توده‌سنگی واقع در سیویتاویچیا ایتالیا

استفاده از موج‌شکن‌ها تاریخچه‌ای طولانی دارد، اما در دوره‌ای این کاربرد به دست فراموشی سپرده شد تا اینکه سرانجام از نیمه‌ی دوم قرن ۱۸ میلادی که مصادف بود با دوران رنسانس و در نتیجه‌ی انقلاب صنعتی اروپا، استفاده از موج‌شکن‌های مدرن و امروزی شروع شد.

^۱ Civitavecchia

در سال ۱۸۲۸ ساخت موجشکن توده‌سنگی دلاور^۱ در آمریکا آغاز شد این پروژه در سال ۱۸۶۹ به اتمام رسید. طول سازه این موجشکن ۱۶۰۶ متر بود که هنوزم پابرجاست. موجشکن چربورگ^۲ که عملیات احداث آن در بندر چربورگ واقع در فرانسه در سال ۱۷۵۰ میلادی آغاز گردید و موجشکن پلیموث^۳ واقع در بندر پلیموث که عملیات احداث آن در کشور انگلستان و در سال ۱۸۱۲ میلادی آغاز گشت، به عنوان دو موجشکن پیشتاز و بسیار با اهمیت شناخته می‌شوند. این دو موجشکن از آن جهت مهم بودند که مشکلات اجرایی ایجاد شده در حین عملیات ساخت آنها باعث شد تا مهندسان اقدام به تغییر در طرح بدنه‌ی آن نمایند و سطح مقطع‌هایی که این موجشکن‌ها در پایان به خود گرفتند به الگویی برای مهندسان برای طراحی موجشکن‌های توده‌سنگی در سرتاسر جهان تبدیل شد، بویژه موجشکن چربورگ با طول ۳۸۰۰ متر که در ابتدا به صورت یک موجشکن کیسونی طراحی شده بود اما در ادامه به دلیل مشکلات دسترسی به مصالح، دشواری اجرا و مشکلات مالی متوقف گردید و در نهایت با تغییر طرح از موجشکن کیسونی به موجشکن توده‌سنگی این پروژه ادامه یافت و در سال ۱۸۵۰ میلادی عملیات ساخت این موجشکن به پایان رسید. در جریان ساخت این موجشکن برای اولین بار استفاده از لایه‌ی تقویتی با قطعات سنگی درشت و سنگین مورد بحث قرار گرفت. (Edge and Magoon, 2001) اگرچه استفاده از موجشکن‌ها به منظور حفاظت ساحلی به دلیل هزینه‌ی بالای ساخت آنها و همچنین برخی دشواری‌ها در زمینه‌ی احداث و نگهداری همواره مخالفان و منتقدانی را داشته است اما استفاده از آنها در سرتاسر نقاط جهان از دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی به میزان چشمگیری رشد یافته است (Dally and Pope, 1986).

تاکنون محققین بسیاری سعی کرده‌اند تا معیاری صحیح را برای طراحی موجشکن‌ها با در نظر گرفتن مشخصه‌های فیزیکی و شرایط محیطی ارائه نمایند، در جدول (۴-۱) به طور خلاصه اسامی محققین و زمینه فعالیت آنها آمده است.

^۱ Delaware

^۲ Cherbourg

^۳ Plymouth

جدول ۱-۴- پژوهش‌های انجام شده توسط محققین

اسامی محققین	زمینه پژوهش
(Shinohara and Tsubaki, 1967), (Horikawa and koizumi, 1974) , (Harlow 1980) , (Bottin 1982) , (Rosen and Vajada, 1982) , (Suh and Dalrymple, 1987) , (Gomes 2009)	مدل‌های فیزیکی
(Perlin 1979) , (Kraus 1983) , (Matsuoka and Ozawa, 1983) , (Mimura and Shimizu, 1983) , (Suh 1985) , (Memos and protonotarios, 1993) , (Memos and Bounckovalas, 2000)	مدل‌های عددی
(Toyoshima 1982) , (Fried 1976) , (Walker 1980) , (Dally and Pope, 1986) , (Memos and protonotarios, 1993) , (Moselhi 1988) , (Takahashi , 2002)	بررسی موج‌شکن‌های موجود

تا پیش از دهه‌ی ۹۰ میلادی موارد معدودی از گسیختگی موج‌شکن‌ها گزارش شده بود (Baird, 1980 ؛ Harlow, 1980 ؛ zen, 1985 ؛ Silvester, 1989).

اگرچه بحث تأثیر زلزله بر روی پایداری سازه‌ها بر هیچ کسی پوشیده نبود اما در مورد موج‌شکن‌های توده‌سنگی، همانگونه که در جدول (۴-۲) نیز مشاهده می‌شود، از آنجایی که در طول سالیان متمادی هیچ گونه تخریبی به واسطه‌ی زلزله مشاهده نشده بود لذا در میان مهندسان طراح نگرشی ایجاد شده بود که بر اساس آن امواج دریا را بسیار مهم‌تر از امواج لرزه‌ای می‌پنداشتند، بنابراین طراحی‌ها به سمتی رفت که موج‌شکن‌ها را برای مقابله با امواج طوفان طراحی می‌شدند و فرض بر این بود که موج‌شکنی که در برابر بار طوفان مقاومت کند در برابر زلزله نیز پایدار خواهد بود. در نتیجه تنها تعداد معدودی از پژوهشگران جنبه‌های رفتار لرزه‌ای چنین سازه‌هایی را مورد بررسی قرار دادند که آن‌ها نیز بیشتر به

برآورد فشارهای هیدرودینامیکی به وجود آمده بوده در زمان زلزله پرداختند که اکثراً ماهیتی صرفاً تحلیلی یا عددی داشتند (Westgaard, 1933 ؛ Wang, 1978 ؛ Chupra and Gopta, 1981). از طرفی پژوهش‌های انجام شده بیشتر از آن که بر روی موج‌شکن‌ها متمرکز باشند به سدها می‌پرداختند و از میان تمامی موارد ذکر شده تنها وانگ و همکارانش (۱۹۷۸) بودند که به طور تخصصی به موج‌شکن‌های توده‌سنگی پرداخته بودند. در واقع در آن دوره بیشتر پژوهش‌های صورت پذیرفته بر روی برطرف نمودن عدم قطعیت‌های موجود پیرامون پارامترهای مورد استفاده در تحلیل و طراحی موج‌شکن‌ها متمرکز داشتند.

جدول ۴-۲- جدول احتمال گسیختگی و تخریب ۶ موج‌شکن توده‌سنگی (Bruun and Johannesson, 1976)

Akranes (ایسلند)	Tripoli (یونان)	Sines (پرتغال)	St.Cyprian (اسپانیا)	Bilbao (اسپانیا)	Arzew el Djedid (الجزیره)	عامل احتمالی
-	•	•	•	•	•	داده‌های ناکافی در مورد امواج
-	•	•	•	•	•	مدل‌های هیدرولیکی ناکافی
•	•	•	•	•	•	قطعات تقویتی بیش از حد کوچک یا بیش از حد ضعیف
-	-	-	-	-	•	لایه هسته ناکافی
-	-	-	-	-	•	عدم تعبیه پنجه
-	-	-	•	-	•	ساخت و ساز نامناسب و غیر اصولی

همان‌طور که بیان شد ابتدا طراحان موج‌شکن‌های توده‌سنگی را برای تحمل بارهای چرخه‌ای امواج دریا طراحی می‌کردند. شاید یکی از نقاط عطف در تحلیل و طراحی موج‌شکن‌های توده‌سنگی در سال ۱۹۸۴ میلادی و تخریب موج‌شکن پاتراس در کشور یونان در اثر مجموعه‌ای از زمین لرزه‌هایی با بزرگای

۳/۵ تا ۴/۵ ریشتر بود. فاصله‌ی کانونی^۱ قوی‌ترین لرزه‌های رخ داده با بزرگای ۴/۴ و ۴/۵ ریشتر از محل قرارگیری موج‌شکن پاتراس به ترتیب بین ۹ تا ۱۱ کیلومتر و فاصله‌ی مرکز دو زلزله‌ی مذکور نیز به ترتیب ۷ و ۸ کیلومتر بود (Memos and protonotarios, 1993). این زلزله باعث شد تا بحث اهمیت تحلیل لرزه‌ای موج‌شکن‌ها مورد بازبینی قرار گیرد و محققین مختلفی به این مبحث توجه نمایند. البته در کنار موج‌شکن پاتراس، موارد دیگری از تخریب لرزه‌ای موج‌شکن‌ها نیز گزارش شده است (Zhang, 1996؛ Yuksel, 2003؛ Sumer, 2007). در ادامه مطالعات انجام شده توسط محققین در رابطه با رفتار لرزه‌ای موج‌شکن‌ها بیان شده است.

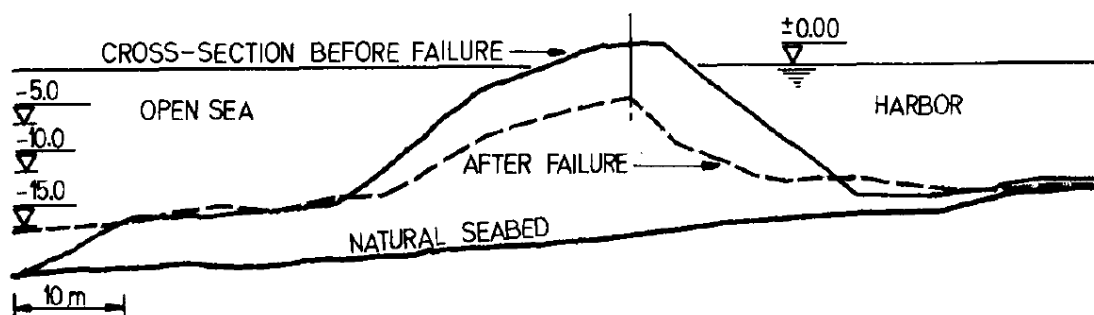
۲-۴ مطالعه انجام شده توسط مموس و همکاران (۱۹۹۳)

میلاادی

در سال ۱۹۹۳ میلاادی مموس و همکارانش با در نظر گرفتن مشخصات لرزه‌ای، مشخصات خاک بستر و تغییر شکل‌های رخ داده در بدنه‌ی موج‌شکن پاتراس در اثر بار لرزه‌ای چگونگی تخریب موج‌شکن مذکور را مورد بررسی قرار دادند. بستر این موج‌شکن از یک لایه رس نرم به عمق تقریباً ۳۵ متر که بر روی یک لایه رس نسبتاً سفت قرار دارد تشکیل شده بود. مشاهدات اولیه حاکی از آن بود که در اثر اعمال بار لرزه‌ای به بدنه‌ی این موج‌شکن، بخش‌هایی از آن دچار نشست‌های بین ۳ تا ۴ متر شده و موجبات گسیختگی این موج‌شکن را فراهم ساخته است (شکل ۴-۲).

با بررسی‌های تکمیلی انجام شده در این پژوهش مشخص شد که احتمالاً اعمال بار لرزه‌ای در کنار شرایط بستر سست عوامل اصلی بروز این گسیختگی بوده است. اطلاعات تکمیلی در این زمینه در گزارش تفصیلی مموس (۱۹۹۹ میلادی) ارائه شده است.

^۱ Hypocentral distance



شکل ۴-۲- مقطع عرضی موج شکن پاتراس قبل و بعد از شکست (Memos and Protonotarios, 1993)

۳-۴ مطالعه انجام شده توسط ژانگ و ژه (۱۹۹۶ میلادی)

ژانگ و ژه (۱۹۹۶ میلادی) در پژوهشی تحت عنوان « بررسی علت‌های شکست موج شکن توده‌سنگی » با مطالعه برخی از موج شکن‌هایی که دچار گسیختگی جزئی یا کلی شده بودند به بررسی تأثیر وضعیت بستر موج شکن بر روی رفتار موج شکن پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در صورتی بستر موج شکن دچار روانگرایی شود، این روانگرایی باعث کاهش چشمگیر ظرفیت بستر شده و احتمالاً باعث گسیختگی موج شکن خواهد شد.

۴-۴ مطالعه انجام شده توسط مموس و همکاران (۲۰۰۰)

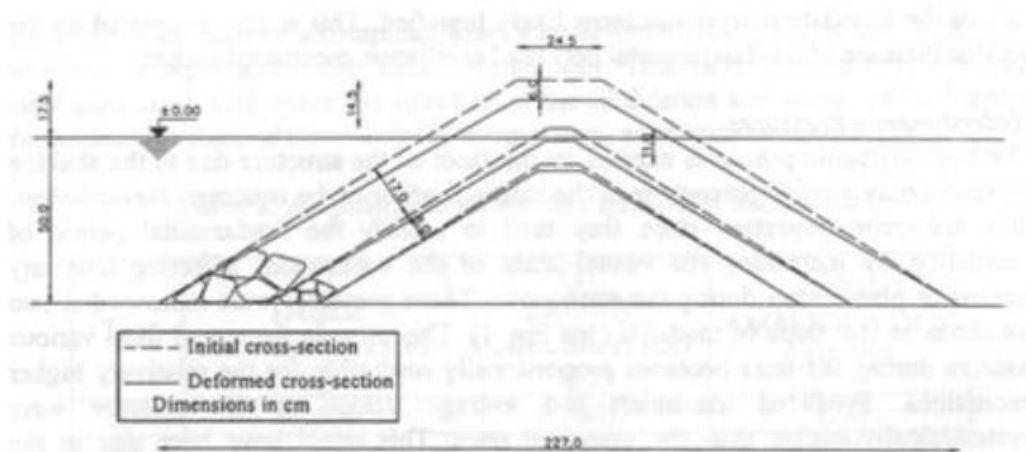
(میلادی)

مموس و همکارانش (۲۰۰۰ میلادی) پایداری لرزه‌ای موج شکن‌های توده‌سنگی واقع بر بسترهای صلب و سست ماسه‌ای با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی را مورد بررسی قرار دادند. به این منظور در ابتدا با توجه به ضوابط سرس^۱ (۱۹۸۴) سطح مقطع موج شکن براساس شرایط ژئوتکنیکی کشور یونان طراحی شده و سپس مدل‌های آزمایشگاهی ساخته شده به کمک میز لرزه‌ای با یک درجه ی آزادی طی چندین آزمایش تکراری تحت تحریک قرار گرفتند تا صحت نتایج و تکرارپذیری

^۱ CERC

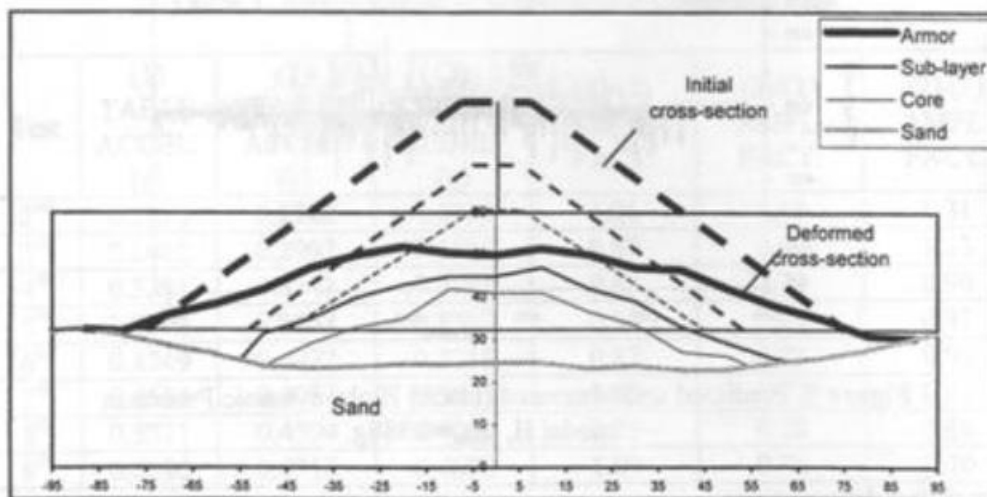
آنها مورد تأیید قرار گیرد. در آزمایش‌های انجام شده، تحریک‌هایی با شتاب‌های متغیر بیشینه‌ای (a_{max}) از ۰/۱۵۷g تا ۱/۴۱۸g و از ۰/۰۶۳g تا ۱/۵۵۳g به ترتیب به نمونه‌ی با بستر صلب و نمونه‌ی با بستر سست اعمال شد.

تغییر شکل‌های رخ داده در بدنه‌ی موج‌شکن واقع بر بستر صلب و سست به ترتیب در شکل‌های (۳-۴) و (۴-۴) نشان داده شده است. مقادیر نشان داده شده به صورت میانگین تغییر شکل‌های رخ داده در ۲۰ آزمایش تکراری برای نمونه با بستر سست و ۱۸ آزمایش برای نمونه‌ی با بستر صلب می‌باشند. نتایج به دست آمده در نمونه با بستر صلب نشان می‌دهد که تاج موج‌شکن به میزان ۹ درصد از کل ارتفاع سطح مقطع سازه دچار نشست می‌شود.



شکل ۳-۴- تغییر شکل‌های ایجاد شده در بدنه موج‌شکن توده‌سنگی بر روی بستر صلب (Memos, et al. 2001)

در مقابل، نتایج به دست آمده در نمونه با بستر شکل پذیر نشان می‌داد که تغییر شکل‌های به جای مانده در لایه‌ی آرمور ۱۶/۴ درصد، زیر لایه بین آرمور و هسته ۶/۸ درصد و هسته ۲۴ درصد خواهد بود.



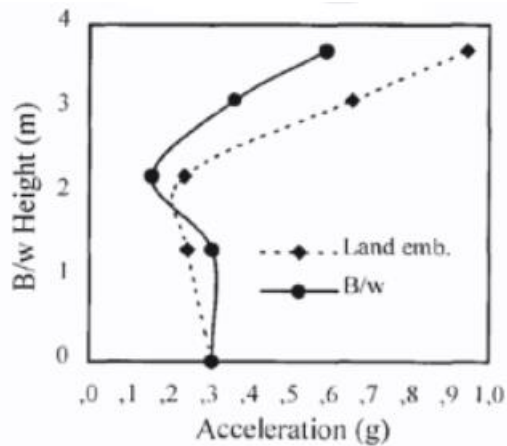
شکل ۴-۴- تغییر شکل‌های ایجاد شده در بدنه موج‌شکن توده‌سنگی بر روی بستر سست (Memos, et al. 2001)

همچنین مقدار نشست بدست آمده در تاج موج‌شکن چیزی در حدود ۱۱/۷ درصد از ارتفاع سازه خواهد بود. ارقامی که در مقایسه با بستر صلب به مراتب بالاتر می‌باشد. آنها بر اساس نتایج به‌دست آمده به این نتیجه رسیدند که تغییر شکل‌های به شدت کم و مقاومت لرزه‌ای بالای مشاهده شده در موج‌شکن واقع بر بستر صلب صرفاً به دلیل صلبیت بستر بوده است و به این ترتیب وضعیت بستر بر روی چگونگی رفتار لرزه‌ای موج‌شکن نقشی اساسی و تعیین کننده‌ای خواهد داشت. همچنین آنها بیان نمودند که روانگرایی در بستر می‌تواند موجب افزایش شدت گسیختگی در موج‌شکن توده‌سنگی به میزان قابل توجهی شود.

۴-۵ مطالعه انجام شده توسط کیارا و همکاران (۲۰۰۱ میلادی)

کیارا و همکارانش (۲۰۰۱ میلادی) با استفاده از میز لرزه‌ای برخی از جنبه‌های رفتار لرزه‌ای موج‌شکن‌های توده‌سنگی مورد بررسی قرار دادند. شتاب پیشینه‌ی تحریک‌های اعمال شده تقریباً از ۱g تا ۱/۵g متغیر بود و دو مدل را (یکی با بستری صلب و یکی با بستر سست ماسه‌ای) بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که چنانچه موج‌شکن‌های توده‌سنگی همانند سدهای خاکی بررسی شوند، به

دلیل در نظر گرفته نشدن اثر میرایی آب اطراف موج‌شکن، مقادیر شتاب بیشتر از مقادیر واقعی به دست خواهد آمد (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵- توزیع شتاب متوسط برای سد خاکی و موج‌شکن توده‌سنگی (Kiara, et al. 2001)

همچنین پژوهش آنها مشخص نمود که در مدل موج‌شکن واقع بر بستر سست مقادیر نشست به ازای شتاب بیشینه ی تحریک ۱g بیش از ۵۰ درصد از ارتفاع کلی موج‌شکن بوده است در حالی که به ازای همین میزان از شتاب تحریک برای مدل موج‌شکن واقع بر روی بستر صلب، نشست در حدود ۱۷ درصد از ارتفاع کل بدست آمده است، که نشان دهنده ی تاثیر قابل توجه وضعیت بستر بر رفتار لرزه‌ای موج‌شکن می‌باشد.

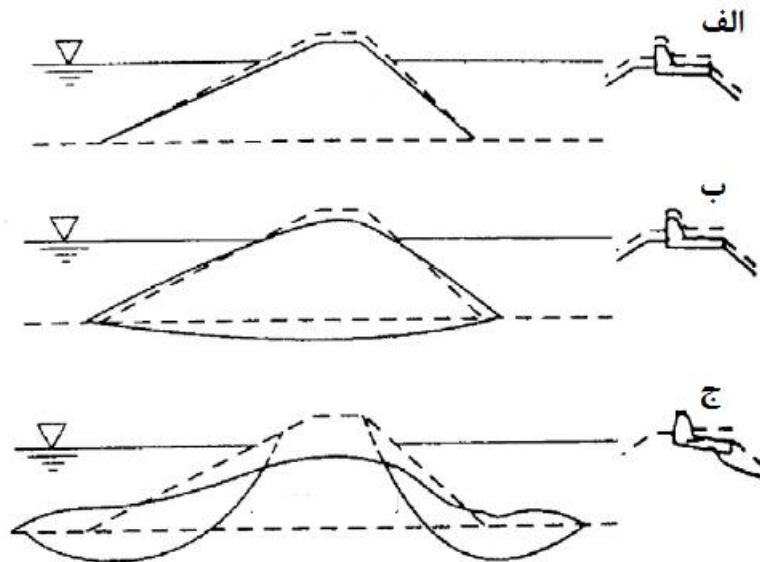
۴-۶ ضوابط لرزه‌ای PIANC (۲۰۰۱ میلادی)

در ضوابط لرزه‌ای PIANC (۲۰۰۱ میلادی) به طور مختصر پیرامون عملکرد لرزه‌ای موج‌شکن‌های توده‌سنگی توضیحاتی داده شده است. در بخش‌هایی از این توضیحات به معرفی حالت‌های احتمالی گسیختگی موج‌شکن‌های توده‌سنگی تحت بارگذاری لرزه‌ای پرداخته شده است و سه حالت عمومی برای این وضعیت ارائه می‌گردد (شکل ۴-۶).

- افت ارتفاع تاج به دلیل لرزش مصالح سنگی که نشست متغیر المان‌های تشکیل دهنده‌ی

سازه‌ی موج‌شکن را به دنبال خواهد داشت (شکل ۴-۶-الف).

- کاهش ارتفاع تاج و گسترش جانبی بدلیل نشست یا روانگرایی بستر موج‌شکن که منجر به نشست متغیر المان‌های تشکیل دهنده‌ی سازه‌ی موج‌شکن خواهد شد (شکل ۴-۶-ب).
- گسیختگی به واسطه‌ی روانگرایی خاک زیرین که در ادامه به کاهش ارتفاع تاج منجر خواهد شد. این کاهش ارتفاع باعث کج شدن و جابجایی المان‌های تشکیل دهنده‌ی سازه‌ی موج‌شکن خواهد شد. (شکل ۴-۶-ج).



شکل ۴-۶- حالات مرسوم گسیختگی در موج‌شکن‌های توده‌سنگی (PIANC 2001)

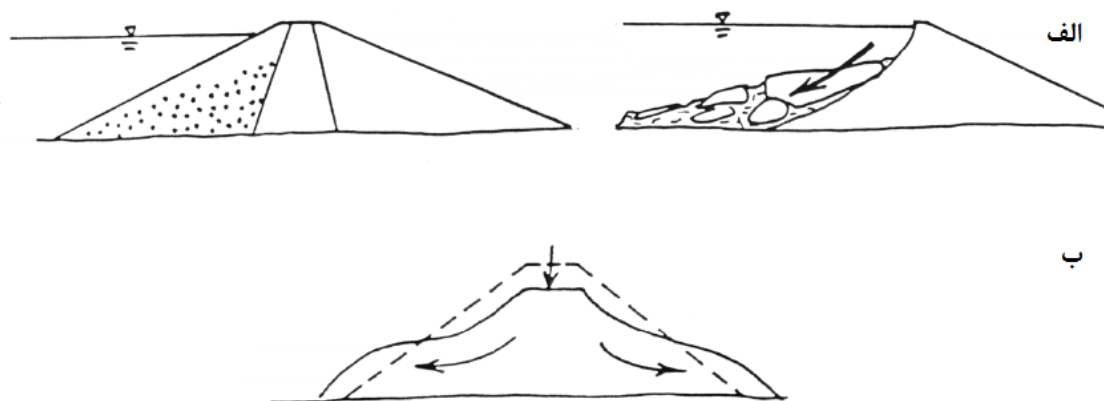
در اینجا توجه به این نکته ضروری است که همانند سدهای خاکی و شیروانی‌ها، وقوع روانگرایی در بستر و یا داخل بدنه‌ی موج‌شکن‌ها نیز به دو طریق می‌تواند موجبات خرابی جزئی یا ناپایداری آنها را ایجاد کند.

۴-۷ مطالعه انجام شده توسط سید و همکاران (۲۰۰۳ میلادی)

سید و همکارانش (۲۰۰۳ میلادی) در گزارش تحلیلی خود، دو وضعیت کلی را برای تخریب سدها و شیروانی‌های خاکی معرفی نمودند:

۱. لغزش چرخشی یا انتقالی در نتیجه تغییر مکان‌های بزرگ و یا گسترش جانبی (شکل ۴-۷ الف)

۲. افتادگی یا تغییر شکل‌های محدود برشی (شکل ۴-۷ ب)



شکل ۴-۷- شماتیک حالات محتمل برای وقوع تغییر شکل‌های بزرگ ناشی از روانگرایی یا گسترش جانبی (Seed, et al. 2003)

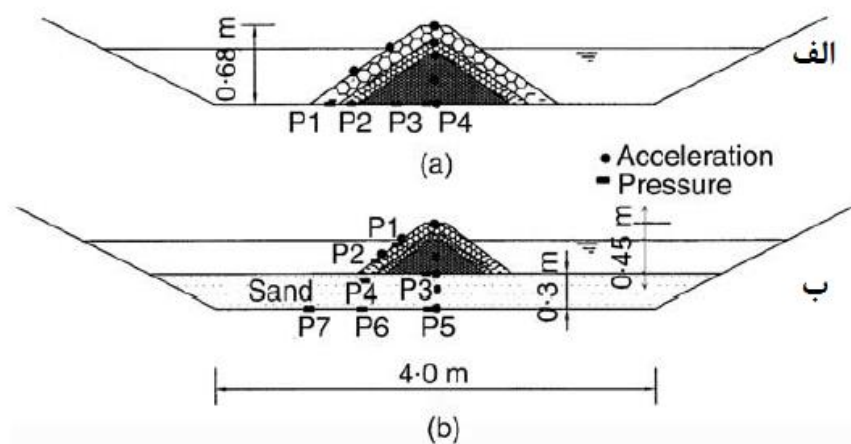
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، وضعیت‌های ارائه شده با حالات ارائه شده در ضوابط لرزه‌ای پیمانک (۲۰۰۱ میلادی) تشابه نسبتاً خوبی دارند، که بیان‌گر این نکته است که با وجود تفاوت‌های بنیادی میان موج‌شکن‌های توده‌سنگی با شیروانی‌های خاکی، هر دو از قواعد نسبتاً مشابهی در بحث تغییر شکل‌ها تبعیت می‌کنند.

۴-۸ مطالعه انجام شده توسط مموس و همکاران (۲۰۰۳)

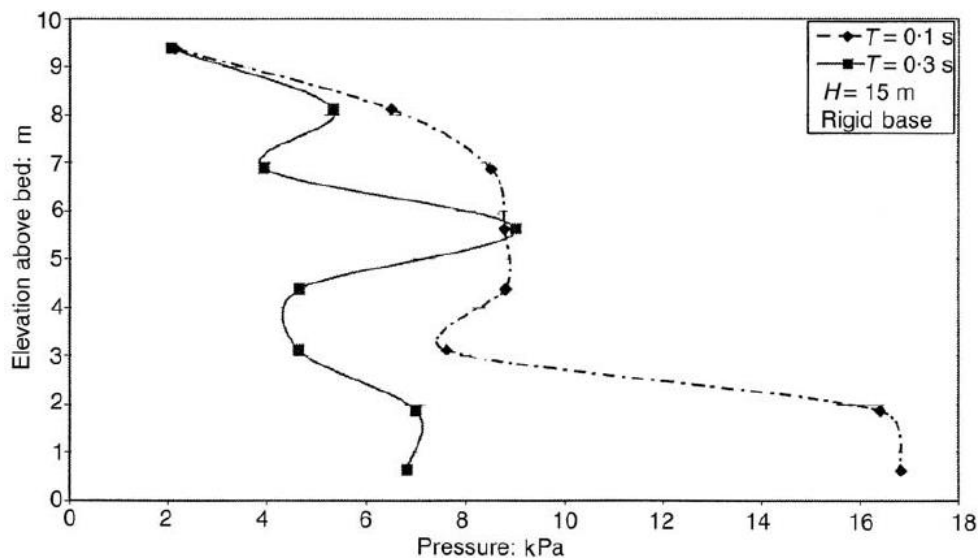
(میلادی)

مموس و همکارانش (۲۰۰۳ میلادی) به منظور توسعه‌ی روشی برای تحلیل لرزه‌ای موج‌شکن با در

نظر گرفتن تاثیر آب احاطه کننده موج شکن بر رفتار آن به تحلیل رفتار لرزه ای موج شکن های توده سنگی پرداختند. در این پژوهش عددی - آزمایشگاهی از میز لرزه ای با ۶ درجه آزادی (سه درجه آزادی برای جابجایی و سه درجه آزادی برای چرخش) استفاده نمودند. ابعاد نمونه مورد استفاده توسط مموس و همکاران در شکل (۸-۴) نشان داده شده است. آنها در این پژوهش دو موج شکن توده سنگی بر روی بستری صلب (به منزله ی بستری سفت) و بستر ماسه ای سست را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج به دست آمده پیرامون فشار هیدرودینامیکی و بزرگنمایی شتاب ثبت شده در آزمایش های آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از تحلیل های عددی نشان دهنده ی دقت قابل قبول روش مورد استفاده در تخمین مقادیر بود. پروفیل فشار متوسط هیدرودینامیکی ثبت شده در آزمایش در مقایسه با روش های برآورد عددی مورد بررسی در شکل های (۹-۴ و ۱۰-۴) ارائه شده است.

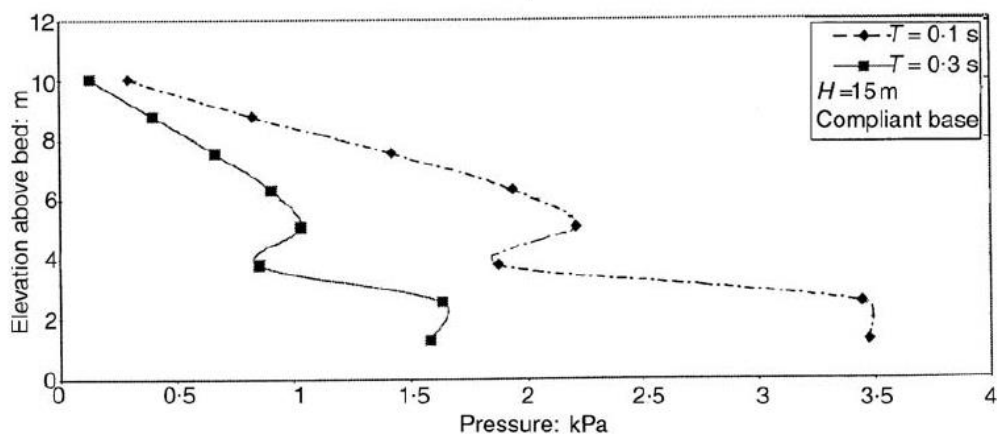


شکل ۸-۴- نمای کنار از مدل های فیزیکی الف) موج شکن توده سنگی بر روی بستری صلب، ب) موج شکن توده سنگی بر روی بستر سست (Memos, et al. 2003)

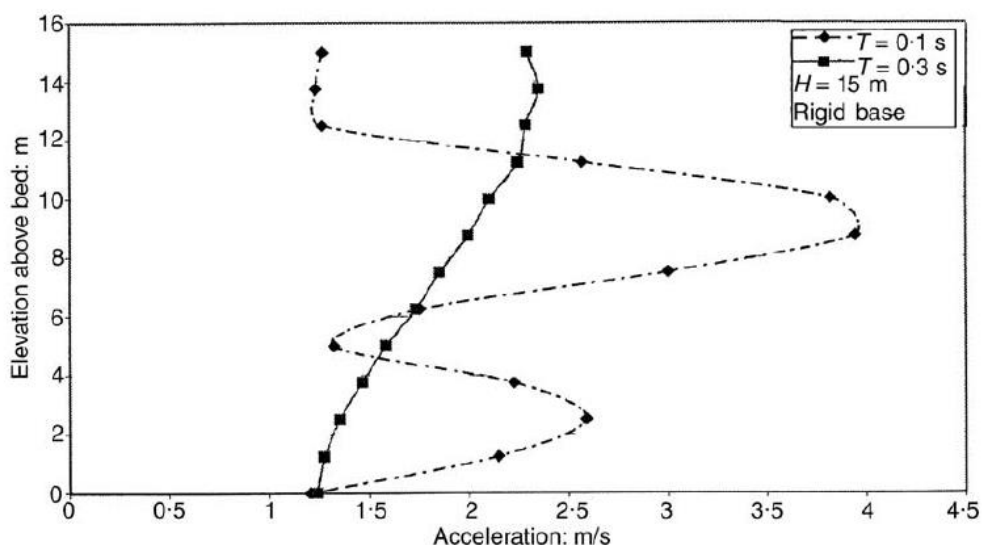


شکل ۴-۹- پروفیل فشار متوسط هیدرودینامیکی به دست آمده از آزمایش در موج شکنی با ارتفاع ۱۵ متری واقع بر بستر صلب (Memos, et al. 2003)

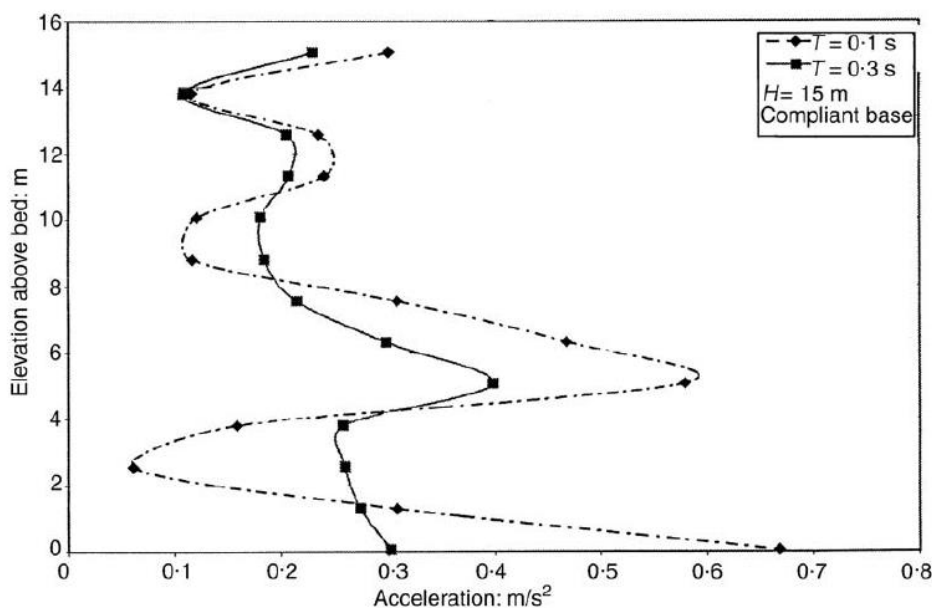
آنها بر مبنای نتایج به دست آمده بیان نمودند که مطابق با انتظار، وضعیت بستر تاثیر بسزایی را بر روی رفتار موج شکن ایجاد می کند. آنها همچنین بیان نمودند که در سازه هایی با ارتفاعی بیشتر از ۵ متر در شرایطی که تشدید رخ ندهد، فرکانس تحریک و فشارهای هیدرودینامیکی همزمان با یکدیگر افزایش می یابند و می توان انتظار مقادیر بیشینه ی فشار متوسط هیدرودینامیکی را در عمقی در حدود ۰/۴ عمق آب داشت.



شکل ۴-۱۰- پروفیل فشار متوسط هیدرودینامیکی به دست آمده از آزمایش در موج شکنی با ارتفاع ۱۵ متری واقع بر بستر سست (Memos, et al. 2003)



شکل ۴-۱۱- پروفیل بزرگنمایی شتاب متوسط به دست آمده از آزمایش آزمایشگاهی در موج شکنی با ارتفاع ۱۵ متری واقع بر بستر صلب (Memos, et al. 2003)

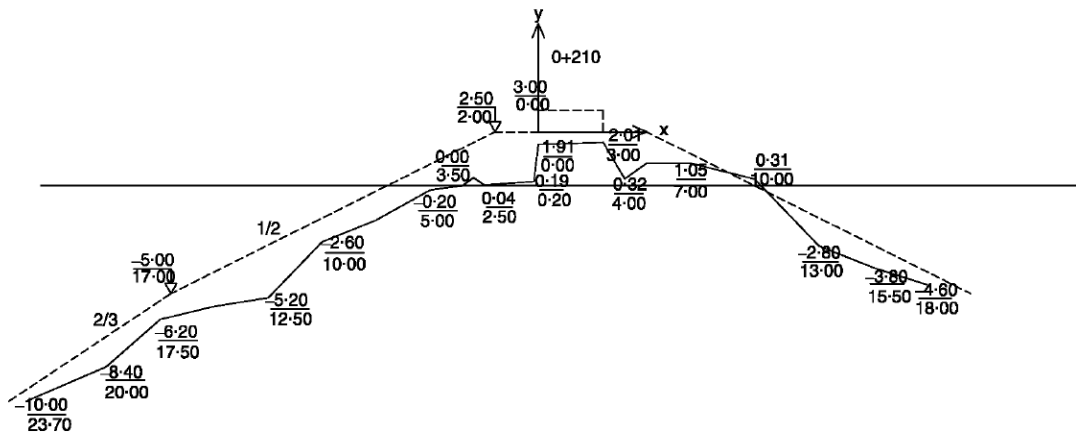


شکل ۴-۱۲- پروفیل بزرگنمایی شتاب متوسط به دست آمده از آزمایش آزمایشگاهی در موج شکنی با ارتفاع ۱۵ متری واقع بر بستر سست (Memos, et al. 2003)

همان طور که تا به اینجا بیان شد، در ابتدا روش‌های تحلیل و طراحی موج شکن‌های توده‌سنگی بر روی کلیه جنبه‌های مرتبط با بحث تنش‌های مختلف موجود در آن‌ها متمرکز بودند، رویه‌ای که به تدریج و به مرور زمان از بخش تنش‌ها به بحث کرنش‌ها و تغییر شکل‌های رخ داده در بستر و بدنه‌ی موج شکن‌های توده‌سنگی تغییر یافت.

۴-۹ مطالعه انجام شده توسط یوکسل (۲۰۰۴ میلادی)

یوکسل و همکارانش (۲۰۰۴ میلادی) خسارات وارده به موج‌شکن توده‌سنگی واقع در بندر ماهیگیری کارامورسل ارگلی در کشور ترکیه در اثر زلزله‌ی ازمیت^۱ (۱۹۹۹ میلادی) مورد بررسی قرار دادند. موج‌شکن بر روی بستری از ماسه‌ی نسبتاً ریزدانه که بر روی لایه‌های از رس لای‌دار سخت قرار گرفته ساخته شده بود. در اثر وقوع زلزله این موج‌شکن دچار کاهش ارتفاع و بروز ترک‌هایی طولی بر روی تاج و لغزش‌هایی در شیروانی‌های خود شده بود. مقادیر نشست رخ داده در این موج‌شکن در حدود ۱/۵ متر تعیین شد (شکل ۴-۱۳). بررسی‌های تکمیلی و تحلیل‌های دینامیکی صورت پذیرفته در این پژوهش نشان داد که حدود ۱/۲ متر از مقدار کلی نشست به واسطه‌ی روانگرایی در بستر این موج‌شکن اتفاق افتاده است.



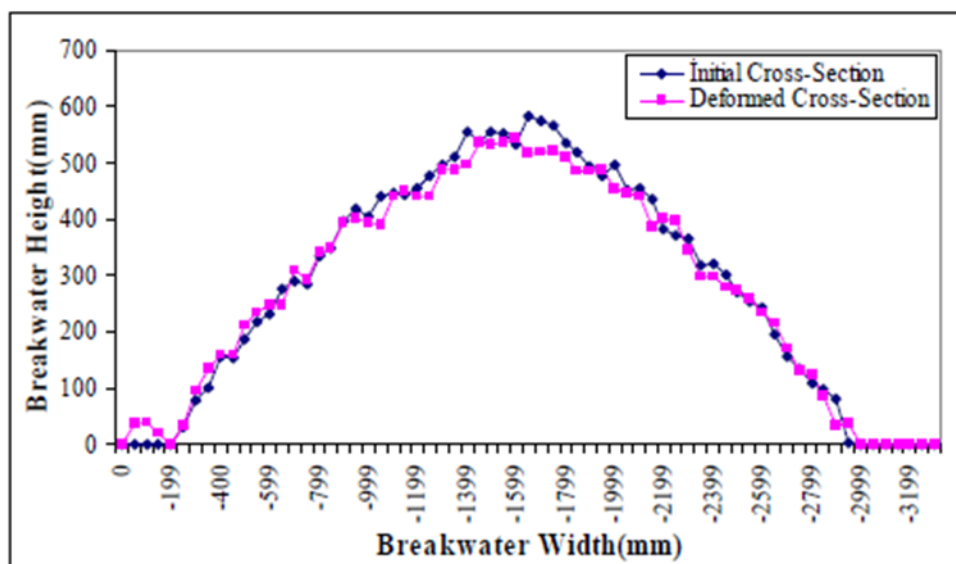
شکل ۴-۱۳- مقادیر نشست موج‌شکن توده‌سنگی واقع در بندر ماهیگیری کارامورسل ارگلی در کشور ترکیه در اثر زلزله ازمیت (۱۹۹۹ میلادی)، مقادیر به متر هستند (Yüksel, et al. 2004).

^۱ Izmit

۴-۱۰ مطالعه انجام شده توسط یوکسل و همکاران (۲۰۰۷)

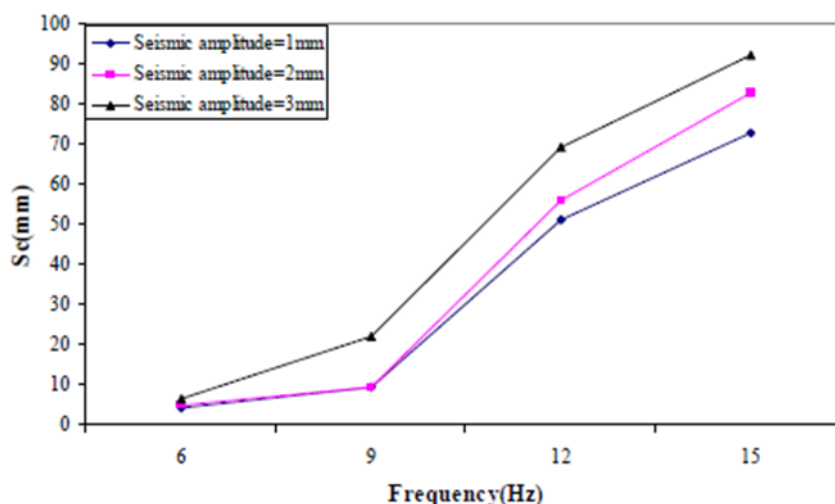
(میلادی)

یوکسل و همکارانش (۲۰۰۷ میلادی) مطالعه آزمایشگاهی برای بررسی رفتار موج شکن توده سنگی تحت بارگذاری لرزه‌ای انجام دادند. برای این آزمایش مخزن لرزه‌ای به ابعاد طولی ۴/۵ ، عرضی ۱ و ارتفاع ۱ متر ساخته شد. موج شکن در مقیاس ۱/۵۰ مدل شد. سایز سنگ‌ها با استفاده فرمول هادسون بدست آمد. در طول آزمایش ۲ شتاب سنج مورد استفاده قرار گرفت. شتاب با دامنه ۰/۰۸g تا ۱g به مدل اعمال گردید. شکل (۴-۱۴) تفاوت بین مقطع اولیه و نهایی موج شکن را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۴- مقایسه مقطع اولیه و نهایی برای نمونه با دامنه ۳ میلی متر و فرکانس ۱۲ هرتز (Yüksel, et al. 2007)

تغییرات مقطع براساس فرکانس‌ها برای دامنه‌های مختلف رسم شد. آنها به این نتیجه رسیدند که نشست با افزایش فرکانس و دامنه زلزله افزایش می یابد (شکل ۴-۱۵).

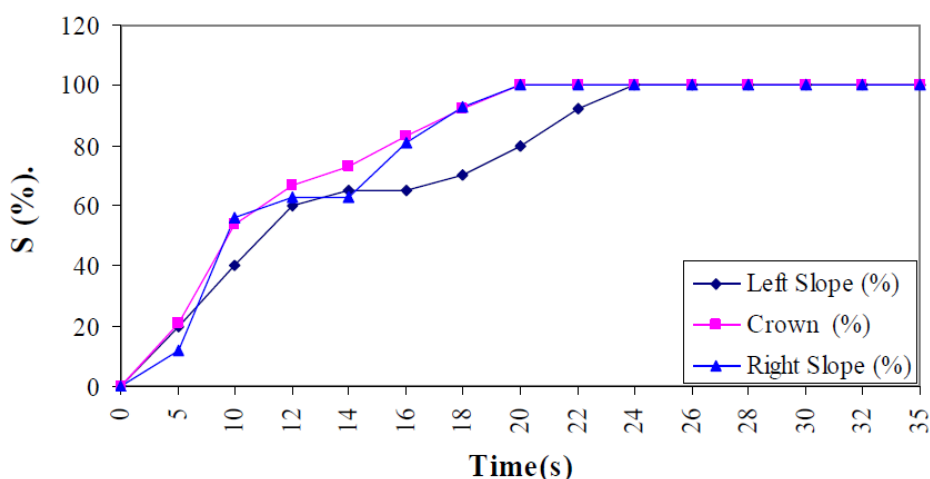


شکل ۴-۱۵- تغییرات نشست تاج موج شکن (Yüksel, et al. 2007)

آن‌ها برای بدست آوردن خسارت وارده به موج شکن از رابطه ارائه شده توسط ون در میر (۱۹۹۷) استفاده کردند، ون در میر آسیب را به وسیله ناحیه فرسایش در اطراف سطح آب تعریف کرد (رابطه ۴-۱). با رسم نمودار زمان برحسب آسیب مشخص شد که ۶۰ درصد آسیب وارده در ۱۰ ثانیه و ۸۰ تا ۹۰ درصد آسیب در ۲۰ ثانیه اول اتفاق می افتد (شکل ۴-۱۶).

$$S = \frac{-A}{D_{n50}^2} \quad (4-1)$$

S سطح آسیب، A- منطقه فرسایش اطراف سطح آب و D_{n50} قطر اسمی سنگ دانه‌ها می باشد.



شکل ۴-۱۶- تغییرات وابسته به زمان برای دامنه ۳ میلی متر و فرکانس ۱۲ هرتز (Yüksel, et al. 2007)

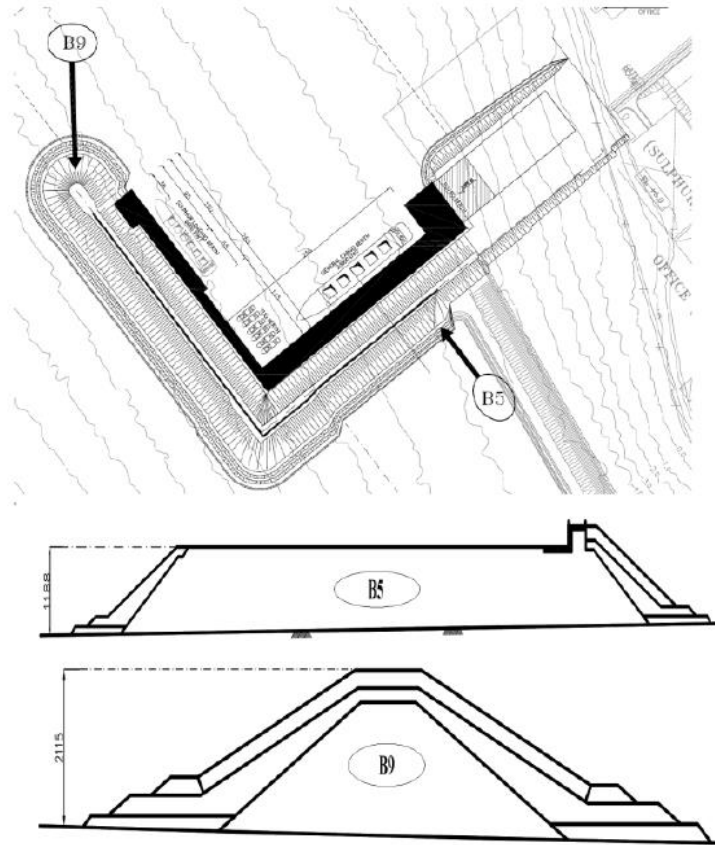
۴-۱۱ مطالعه انجام شده توسط جعفریان و همکاران (۲۰۱۰)

(میلادی)

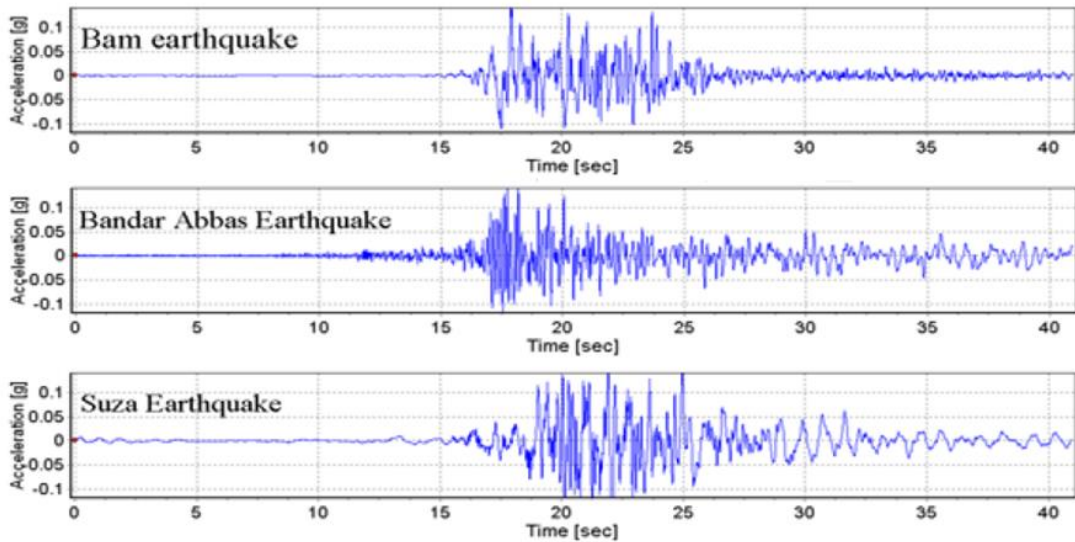
جعفریان و همکاران (۲۰۱۰ میلادی) رفتار لرزه‌ای یک موج‌شکن توده سنگی واقع بر بستری متشکل از لایه‌های خاک لای ماسه‌دار را بررسی کردند (شکل ۴-۱۷). آن‌ها در این پژوهش با فرض رفتار غیر خطی برای مصالح خاکی و به‌کارگیری تحلیل‌های کاملاً غیرخطی در نرم افزار تفاضل محدود FLAC به تخمین تغییر شکل‌های ماندگار موج‌شکن توده‌سنگی پرداختند و برای بارگذاری‌های لرزه‌ای از شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده‌ی مربوط به زمین لرزه‌های بم، بندر عباس و سوزا استفاده نمودند (شکل ۴-۱۸).

آن‌ها دریافتند که اگرچه علی‌رغم حضور خاک با قابلیت روانگرایی در بستر موج‌شکن هیچ‌گونه روانگرایی در جریان بارگذاری لرزه‌ای اتفاق نمی‌افتد (که احتمالاً چنین وضعیتی به دلیل وقوع اتساع در نتیجه‌ی افزایش فشار آب منفذی اضافی در خاک بستر رخ داده است)، اما بایستی انتظار مشاهده‌ی وقوع تغییر شکل‌های بزرگی در بدنه‌ی موج‌شکن را داشت. همچنین مشاهده شد که در صورت وقوع زمین لرزه بخش‌های میانی بدنه‌ی موج‌شکن آسیبی نمی‌بینند و تنها شیروانی‌ها به منظور تحمل بارگذاری‌های لرزه‌ای احتمالی بعدی بایستی ترمیم شوند.

آنها همچنین بیان نمودند، روش‌های تعادل محدود برای تعیین پایداری شیروانی‌ها به دلیل عدم توانایی این روش‌ها در برآورد تاثیر تولید فشار آب منفذی بر رفتار خاک‌های روانگرا نتایج دقیقی را به همراه نخواهد داشت.



شکل ۴-۱۷- محل قرارگیری و سطح مقطع موج شکن (Jafarian and Alielahi, 2010)



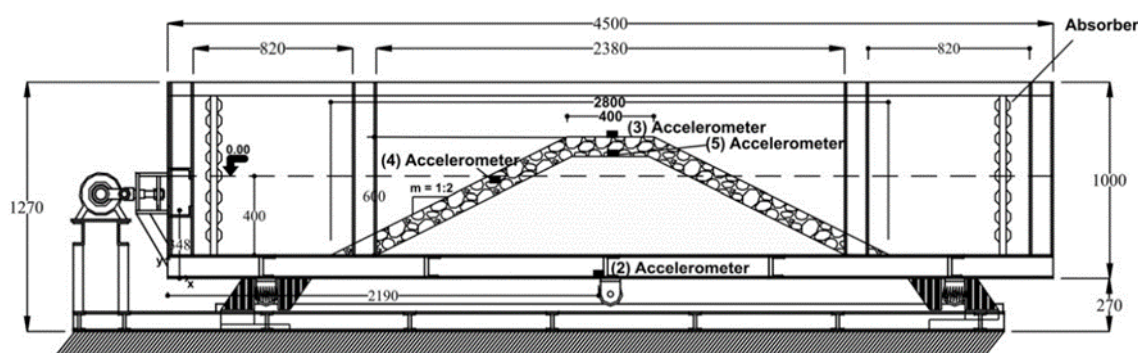
شکل ۴-۱۸- بارگذاری لرزه‌ای بم ، بندرعباس و سوزا مقیاس شده با $0.15g$ (Jafarian and Alielahi, 2010)

۴-۱۲ مطالعه انجام شده توسط سیهان و یوکسل (۲۰۱۱)

(میلادی)

سیهان و یوکسل (۲۰۱۱ میلادی) تغییر شکل‌های رخ داده در موج‌شکن‌های توده‌سنگی تحت بارگذاری چرخه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آنها در شبیه‌سازی آزمایشگاهی - عددی خود تأثیر استفاده یا عدم استفاده از پنجه در احداث موج‌شکن بر روی تغییر شکل‌های لرزه‌ای آن را مورد بررسی قرار دادند و به این منظور از دو مدل آزمایشگاهی با مقیاس ۱:۵۰ استفاده کردند.

آزمایش‌ها به کمک میز لرزه‌ای با یک درجه آزادی انجام شد. در کلیه‌ی آزمایش‌ها بستر موج‌شکن صلب در نظر گرفته شد. ابعاد هندسی، ضخامت لایه‌ها و ابعاد سنگدانه‌ها و لایه‌ی تقویت‌کننده با استفاده از ضوابط سرس^۱ محاسبه شد. ابعاد هندسی مدل آزمایشگاهی در شکل (۴-۱۹) ارائه شده است.



شکل ۴-۱۹- سطح مقطع طولی میز لرزه‌ای (ابعاد به میلیمتر هستند) (Cihan and Yuksel, 2011)

آنها بر این باور بودند، از آنجایی که موج‌شکن‌ها سازه‌هایی طویل هستند، رفتار لرزه‌ای آنها غالباً دویبعدی می‌باشد و لذا نیازی به صرف زمان فراوان برای انجام تحلیل‌های سه بعدی نیست.

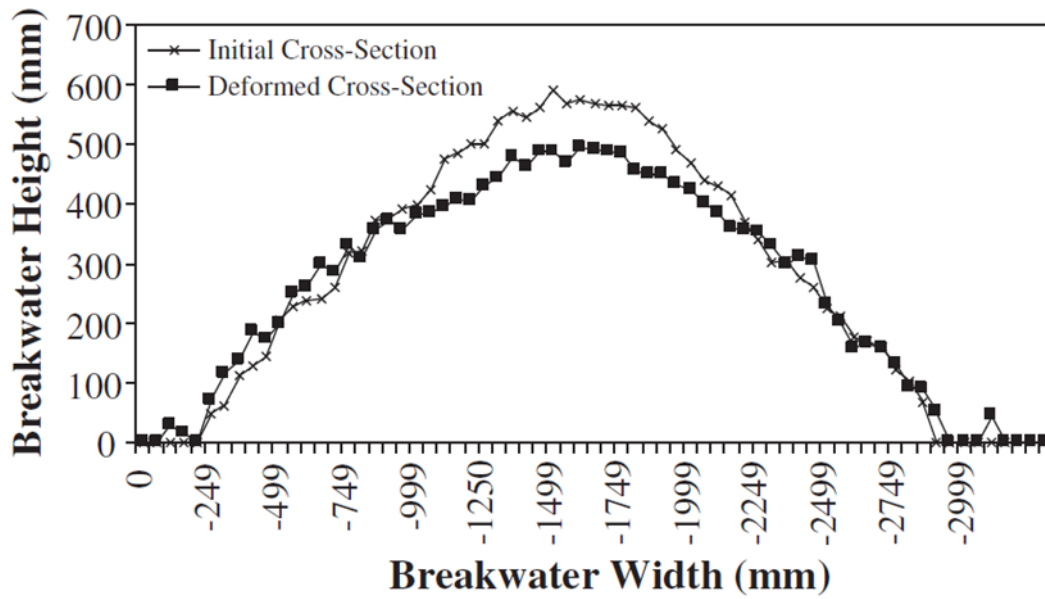
کلیه‌ی نمونه‌ها برای مدت زمان ۳۰ ثانیه تحت بارهایی با مشخصات نمایش داده در جدول زیر قرار گرفته بودند.

^۱ CERC

جدول ۴-۳- شرایط بار ورودی آزمایش (Cihan and Yuksel, 2011)

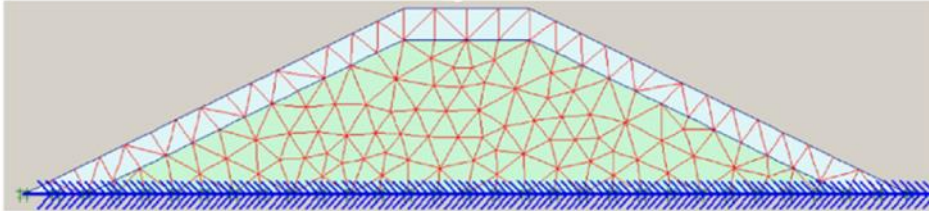
شرایط آزمایش	شتاب چرخه ای برای مدل بدون پنجه a(g)	شتاب چرخه ای برای مدل با پنجه a(g)	فرکانس تحریک f	بزرگنمایی A
۱	۰/۰۹	۰/۰۷۱	۳	۱
۲	۰/۲۰۷	۰/۱۴۱	۴	۱
۳	۰/۴۳۳	۰/۳۸۱	۵	۱
۴	۰/۵۳۰	۰/۴۴۳	۶	۱
۵	۰/۶۶۵	۰/۴۹۳	۷	۱
۶	۰/۱۲۵	۰/۰۹۷	۳	۲
۷	۰/۲۳۳	۰/۲۴۹	۴	۲
۸	۰/۴۴۸	۰/۴۹۷	۵	۲
۹	۰/۵۷۳	۰/۶۵۴	۶	۲
۱۰	۰/۷۴۸	۰/۷۱۷	۷	۲
۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۴۲	۳	۳
۱۲	۰/۲۷۴	۰/۳۲۹	۴	۳
۱۳	۰/۴۷۰	۰/۵۵۰	۵	۳
۱۴	۰/۶۲۹	۰/۷۱۷	۶	۳
۱۵	-	۰/۷۴۸	۷	۳

میزان تغییر شکل‌های رخ داده در سطح مقطع موج‌شکن‌ها برای ارتعاشی با دامنه ۳ میلی‌متر در فرکانس ۶ هرتزی در شکل (۴-۲۰) نمایش داده شده است. آن‌ها در ادامه به شبیه‌سازی عددی موج‌شکن‌های با و بدون پنجه پرداختند و به این منظور از نرم افزار المان محدود PLAXIS بهره بردند. مدل عددی مورد استفاده در شکل (۴-۲۱) نشان داده شده است. در پایان، برآورد میزان خسارت انجام پذیرفت. نتایج به دست آمده برای موج‌شکن‌های دارای پنجه و بدون پنجه به ازای مقادیر متغیر شتاب در شکل (۴-۲۲) نمایش داده شده است (ضریب معرف میزان خسارت سازه ای می‌باشد، در شرایطی که S برابر با ۲ باشد به منزله‌ی عدم خسارت و در حالی که برابر با ۸ باشد به منزله‌ی گسیختگی می‌باشد). همچنین تمامی گسیختگی‌های مشاهده شده در موج‌شکن‌ها در این پژوهش از نوع افتادگی بود.

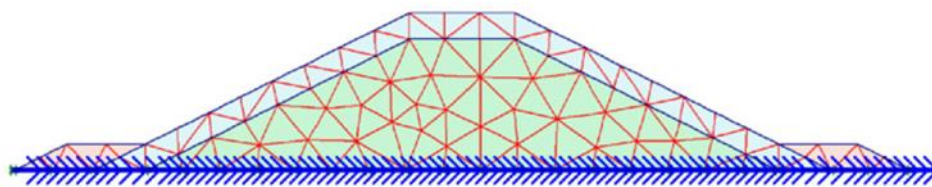


شکل ۴-۲۰- سطح مقطع ابتدایی و پایانی مدل آزمایشگاهی برای بارگذاری ارتعاشی با دامنه ۳ میلیمتر و فرکانس ۶ هرتز در آب (Cihan and Yuksel, 2011)

موج شکن توده سنگی بدون پنجه



موج شکن توده سنگی با پنجه



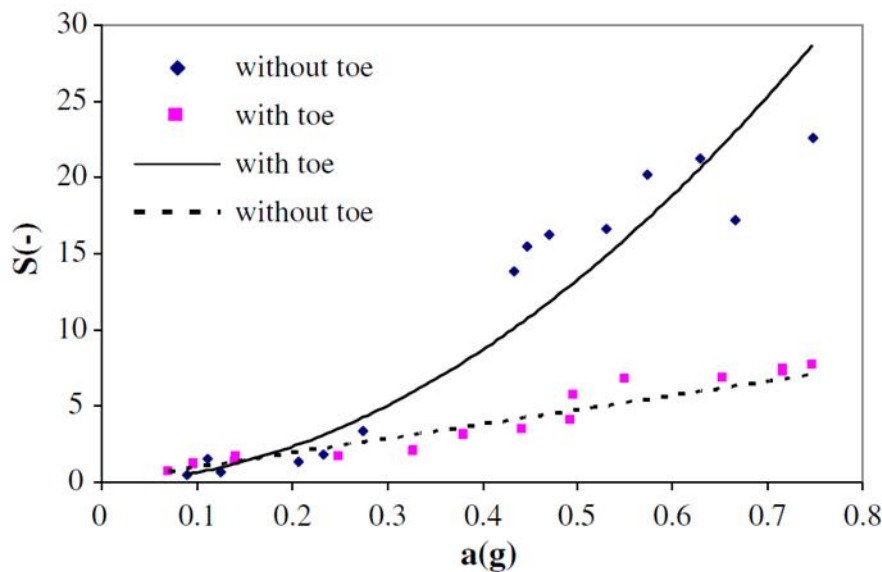
شکل ۴-۲۱- مش بندی المان محدود (Cihan and Yuksel, 2011)

آنها در پایان بارسم نمودار سطح تخریب نسبت به شتاب برای موج شکن با پنجه و موج شکن بدون پنجه به نتایج زیر رسیدند (شکل ۴-۲۲):

۱. سطح تخریب با شتاب تحریک وارده رابطه ی مستقیمی دارد.

۲. استفاده از پنجه نه تنها نقش بسزایی را در کاهش مقادیر تغییر مکان‌های افقی و جلوگیری از وقوع گسترش جانبی دارد بلکه موجب کاهش مقادیر نشست در هنگام اعمال بارهای چرخه‌ای می‌شود.

۳. موج‌شکن‌های دارای پنجه مقاومت لرزه‌ای بهتری را از خود نشان می‌دهند.



شکل ۴-۲۲- سطح تخریب نسبت به شتاب در موج‌شکن مستغرق (Cihan and Yuksel, 2011)

۴-۱۳ مطالعه انجام شده توسط یانگ و جین (۲۰۱۵ میلادی)

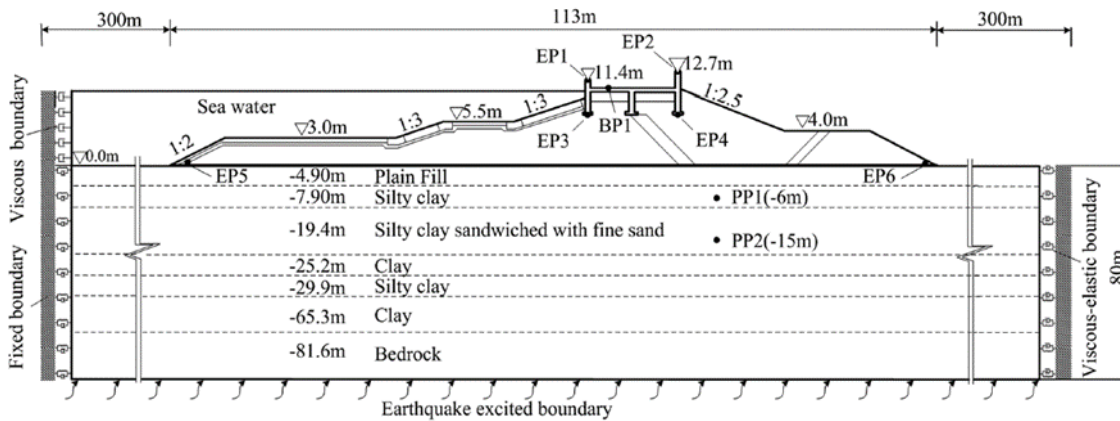
یانگ و جین (۲۰۱۵ میلادی) به بررسی پاسخ دینامیکی و اندرکنش موج‌شکن، فونداسیون و آب دریا بعد از یک موج لرزه‌ای واقعی پرداختند. آنها برای شبیه‌سازی عددی از نرم افزار المان محدود LS-DYNA بهره‌جستند. مجموعه موج‌شکن، فونداسیون و آب دریا در شکل (۴-۲۳) نشان داده شده است. در این پژوهش چهار زلزله متفاوت به مدل اعمال شد. آنها از امواج زلزله ارزینکن^۱، فریولی^۲، کوبه^۳ و

^۱ Erzincan

^۲ Friuli

^۳ Kobe

کوکالی^۱ استفاده کردند. هر دو مؤلفه قائم و افقی برای هر ۴ زلزله اعمال شد. برای جلوگیری از انحراف عددی امواج، فرکانس‌های بالای ۲۰ هرتز را فیلتر نمودند.



شکل ۴-۲۳- مجموعه موج‌شکن، فونداسیون و آب دریا (Yang and Jin, 2016)

تغییر شکل‌های باقی مانده به دو صورت نشست تاج و گسترش جانبی توصیف می‌شود. واضح است که تغییر شکل‌های باقی مانده و جابجایی‌های دینامیکی برای تعیین صحت عملکرد لرزه‌ای موج‌شکن مهم است.

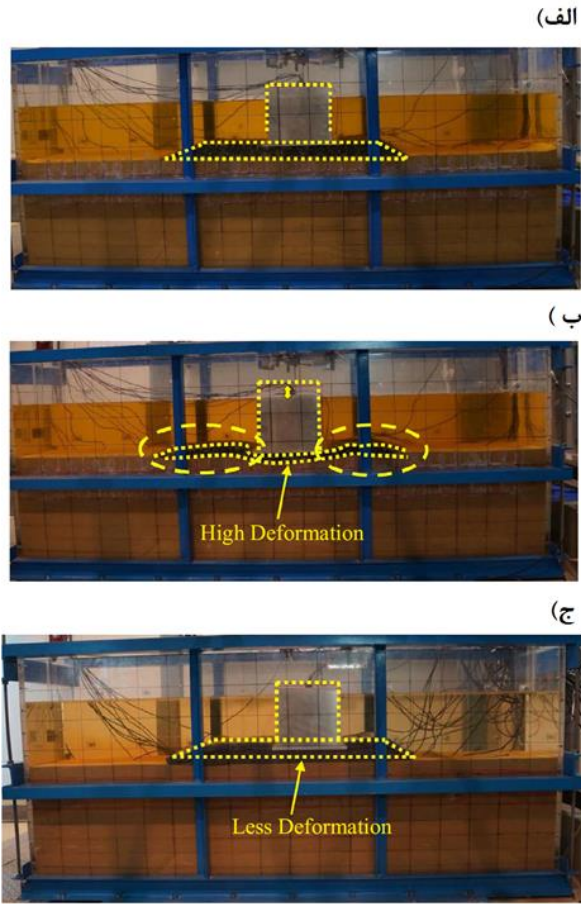
اندرکنش موج‌شکن، آب دریا و فونداسیون تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر جابجایی‌های باقی مانده در موج‌شکن دارد و این جابجایی‌ها را افزایش می‌دهد. تأثیر در جابجایی افقی بیشتر از جابجایی عمودی است. در طول زلزله، مؤلفه قائم به وضوح جابجایی در راستای قائم را افزایش می‌دهد، در حالی که جابجایی‌های افقی به سختی به وسیله مؤلفه قائم تاثیر می‌پذیرند. علاوه بر این مؤلفه عمودی زلزله تاثیر قابل توجهی بر فشار هیدرودینامیکی موج‌شکن دارد.

آنها همچنین دریافتند که فرکانس غالب موج لرزه‌ای نقش مهمی در فشار هیدرودینامیکی و همچنین اولین فرکانس طبیعی دریا ایفا می‌کند، به طوری که اندازه فرکانس موج لرزه‌ای نقش کلیدی در جابجایی باقی مانده موج‌شکن بازی می‌کند.

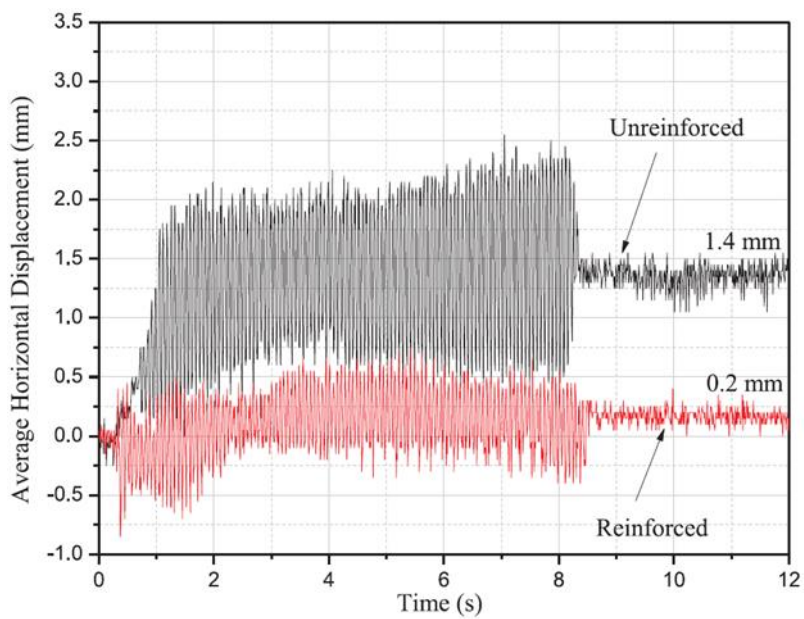
^۱ Kocaeli

۴-۱۴ مطالعه انجام شده توسط چادری (۲۰۱۷ میلادی)

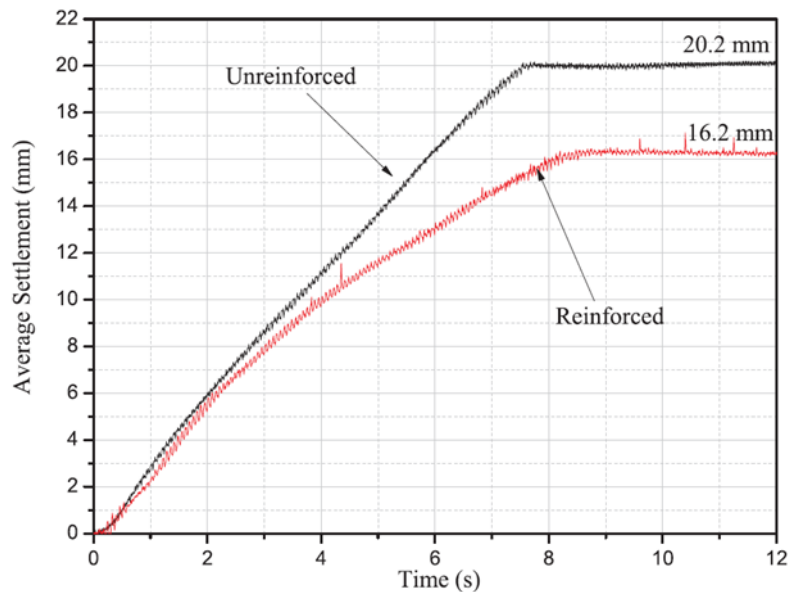
چادری و همکاران (۲۰۱۷ میلادی) به بررسی تاثیر مسلح کننده (پایه‌های تقویتی) بر فونداسیون موج‌شکن تحت بار زلزله پرداختند. برای ارزیابی مسلح کننده‌ها یک موج‌شکن کیسونی را یک بار بدون مسلح کننده و بار دیگر با مسلح کننده در زیر فونداسیون تحت آزمایش قرار دادند (شکل ۴-۲۴). بارهای مختلفی به میزله‌های وارد شد، و نتایج به دست آمده بین فونداسیون بدون مسلح کننده و فونداسیون با مسلح کننده مورد مقایسه قرار گرفت. براساس نتایج بدست آمده جابجایی‌های افقی نمونه با مسلح کننده کمتر از نمونه بدون مسلح کننده در زمان زلزله است (شکل ۴-۲۵). مدت زمان و اندازه شتاب زلزله تاثیر قابل توجهی بر جابه جایی‌های افقی و عمودی موج‌شکن دارد. برای آنها ثابت شد که یکی از دلایل نشست موج‌شکن‌ها حرکت جانبی خاک فونداسیون در طول زلزله است که شمع‌ها این حرکت جانبی را کاهش می دهند. میزان نشست موج‌شکن در دو حالت مسلح شده و بدون مسلح کننده در شکل (۴-۲۶) نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۴- الف) فونداسیون بدون مسلح کننده قبل بار زلزله ، ب) فونداسیون بدون مسلح کننده بعد بار زلزله ج) فونداسیون با مسلح کننده بعد بار زلزله (Chaudhary, 2017)



شکل ۴-۲۵- تاثیر مسلح کننده روی جابه جایی افقی موج شکن در طول زلزله (Chaudhary, 2017)

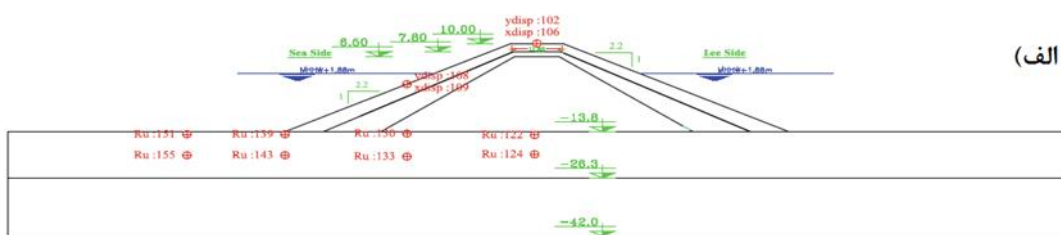


شکل ۴-۲۶- تاثیر مسلح کننده روی نشست موج شکن در طول زلزله (Chaudhary, 2017)

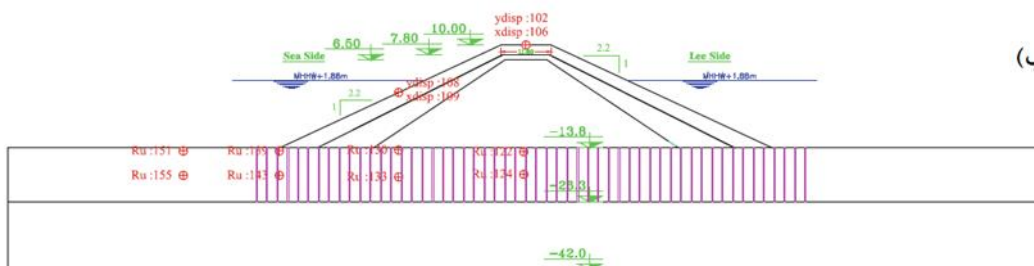
۴-۱۵ مطالعه انجام شده توسط جعفریان و همکاران (۲۰۱۸)

(میلادی)

جعفریان و همکاران (۲۰۱۸ میلادی) به بررسی موج شکن بندر LNG تحت بار زلزله، قبل و بعد بهسازی بستر پرداختند. این موج شکن در ۵۰ کیلومتری شمال غربی عسلویه و ۱۵ کیلومتری جنوب غربی کنگان واقع شده است. موج شکن بر روی لایه ضخیم سیلت با خاصیت روانگرایی قرار گرفته است. با توجه به طراحی موج شکن احتمال وقوع شکست به دلیل روانگرایی لایه سیلتی وجود دارد. بنابراین تحلیل لرزه‌ای به منظور تعیین پتانسیل شکست این سازه در مدت زمان زلزله مورد مطالعه قرار گرفت. تحلیل‌های ژئوتکنیکی نشان داد که ممکن است موج شکن به علت زمین لرزه به طور قابل توجهی دچار آسیب شود. در این پژوهش آسیب ناشی از روانگرایی بر روی موج شکن با استفاده از تحلیل‌های تنش مؤثر غیر خطی به وسیله نرم افزار المان محدود FLAC انجام شده و مکانیسم‌های شکست موج شکن LNG مورد بحث قرار گرفت. در مطالعه حاضر مقطع بحرانی موج شکن در دو حالت قبل بهسازی زمین و در حضور ستون‌های سنگی با قطر ۸۰ سانتی متر و فاصله مرکز به مرکز ۲۴۰ سانتی متر مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴-۲۷).



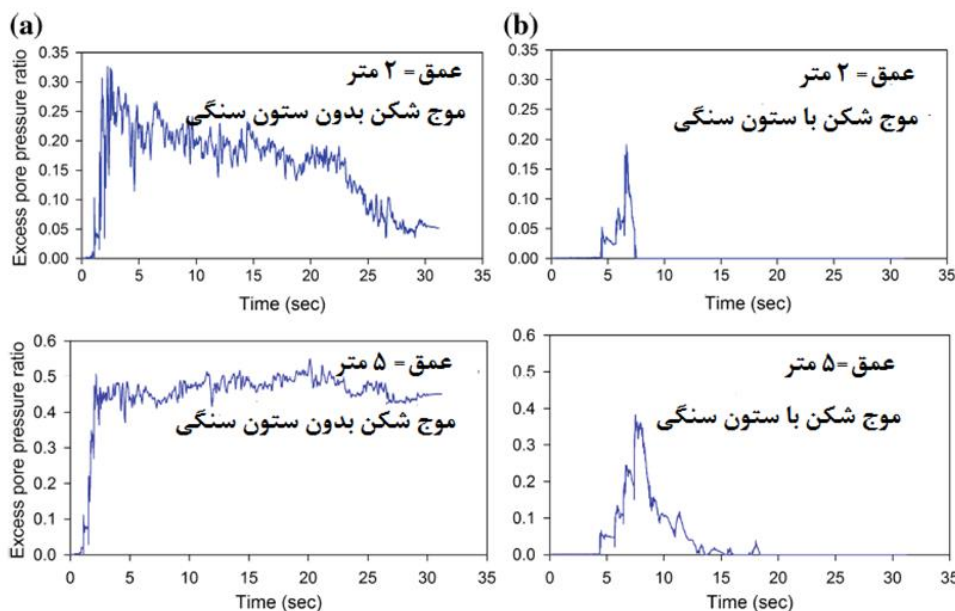
(الف)



(ب)

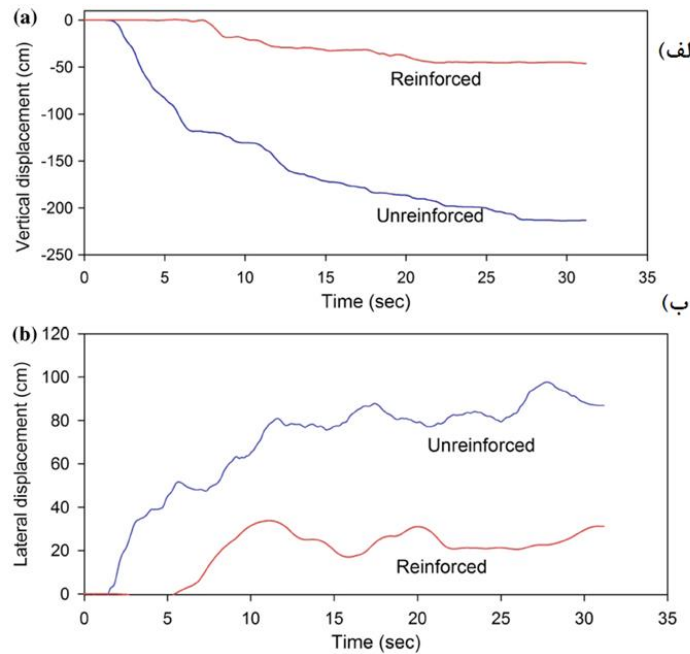
شکل ۴-۲۷- الف) مقطع موج شکن قبل بهسازی ، ب) مقطع موج شکن با ستون های سنگی (Jafarian and Bagheri, 2018)

بررسی فشار آب حفره ای در دو مدل نشان می دهد که ستون سنگی باعث کاهش سریع اضافه فشار آب حفره ای در زمان کوتاهی بعد زلزله می شود، این به این معنی است که خاک می تواند بخش بزرگی از مقاومت خود را بازگرداند (شکل ۴-۲۸).



شکل ۴-۲۸- تغییرات نسبت فشار آب حفره ای در واحد زمان ، نقاط ۱۲۴ و ۱۲۲ (عمق ۲ متر و ۵ متر) زیر موج شکن بدون ستون سنگی و موج شکن با ستون سنگی (Jafarian and Bagheri, 2018)

آنها پس از مقایسه نتایج بدست آمده از دو مدل به این نتیجه رسیدند که میزان نشست و جابجایی افقی در حالت مسلح نسبت به حالت غیر مسلح با کاهش قابل توجهی رو به رو بوده که اثر بخشی این تکنیک را نشان می دهد (شکل ۴-۲۹).



شکل ۴-۲۹- الف) جابجایی قائم، ب) جابجایی افقی تاج موج شکن تحت زلزله السنترو با شتاب $g/15$ (Jafarian and Bagheri, 2018)

۴-۱۶ نتیجه گیری

به طور کلی در این بخش به بررسی پژوهش‌هایی که از گذشته تا حال درباره موج شکن‌های توده‌سنگی و موارد مشابه به موضوع این پایان نامه انجام شده است، پرداختیم. مطالعات صورت پذیرفته پیرامون موج شکن‌های توده‌سنگی به خوبی نشان می دهد که به جنبه‌های مختلف رفتار لرزه‌ای این دسته از سازه‌های ساحلی و یا فراساحلی به خوبی توجه شده است، اما در زمینه‌ی اندرکنش لرزه‌ای مجموعه‌ای متشکل از یک موج شکن توده‌سنگی (و یا هر نوع دیگری از موج شکن‌ها) و یک سازه‌ی ساحلی یا فراساحلی دیگر توجه کمتری شده است. البته شاید علت این مسئله در آن باشد که اصولاً به دلیل پیچیدگی‌های موجود پیرامون رفتار لرزه‌ای موج شکن‌ها و همچنین تفاوت‌های آشکار رفتاری میان موج شکن‌ها توده‌سنگی با سایر سازه‌های ساحلی و فراساحلی، مهندسان از احداث مجموعه‌هایی

متشکل از موج‌شکن‌ها و به عنوان مثال خطوط لوله اجتناب می‌کنند و به همین دلیل احداث چنین مجموعه‌هایی در سطح جهان سابقه نداشته است. با این وجود، مشاهده می‌شود که در پروژه‌ی بندر پتروشیمی پارس جنوبی مسیر قابل توجهی از خطوط لوله حمل مواد نفتی بر روی تکیه‌گاه‌هایی از جنس شمع فولادی که بر روی محور طولی موج‌شکن توده‌سنگی پیش بینی شده قرار گرفته است، که اولین مورد از چنین طرحی در جهان می‌باشد.

فصل ۵. مدل سازی عددی

۵-۱ مقدمه

در این پژوهش از برنامه اجزاء محدود آباکوس جهت مدل‌سازی عددی موج‌شکن و شمع تحت بار دینامیکی زلزله استفاده شده است. مدل‌سازی به صورت سه بعدی می‌باشد. در بررسی رفتار لرزه‌ای موج‌شکن‌های توده‌سنگی در کنار بحث دو بعدی یا سه بعدی بودن مدل‌سازی، بحث خروجی‌های مورد انتظار و روش تحلیل نیز از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. با استناد به متون علمی موجود در زمینه بررسی رفتار لرزه‌ای موج‌شکن‌ها می‌توان دریافت که امروزه در طراحی موج‌شکن‌ها (همانند بسیاری از شاخه‌های مهندسی عمران) روش‌های طراحی بر مبنای عملکرد به عنوان اساس طراحی در نظر گرفته می‌شوند. در واقع طراحی بر مبنای عملکرد، موضوعی است که در سال‌های اخیر در سطح جهان و کشور ما به آن توجه شده است. روش‌های طراحی لرزه‌ای کلاسیک سازه‌ها عموماً طراحی براساس نیرو می‌باشند، نادرستی فرضیات طراحی براساس نیرو از جمله مقادیر مفروض برای سختی اولیه و ضریب کاهش نیرو باعث می‌شود که هنگامی که سازه وارد محدوده غیره‌خطی شود، برش پایه و نیروهای طراحی نادرستی به دست آید. به عبارت دیگر، بسیاری از آیین‌نامه‌های کنونی که بر اساس نیرو تهیه شده‌اند برای طراحی در محدوده ارتجاعی مناسب هستند و طراحی سازه با فرض رفتار (صرفاً) ارتجاعی برای آن، منجر به نتایجی بیش از حد محافظه کارانه و غیر اقتصادی می‌شود، بر همین اساس می‌توان گفت که یک طراحی منطقی و مقرون به صرفه نیازمند سطوحی از عملکرد است که متضمن پذیرش خسارت خواهند بود و تعیین سطح خسارات تنها بر اساس معیار جابجایی قابل تعریف است. لذا تغییر مکان یا به طور دقیق‌تر تغییر شکل، معیار مناسبی جهت تعریف شاخص خسارت و طراحی بر اساس عملکرد است (طباطبایی و معافی، ۱۳۹۸).

به این ترتیب در پژوهش پیش رو به منظور بررسی اندرکنش لرزه‌ای موج‌شکن توده‌سنگی و شمع و برآورد خسارت‌های احتمالی وارده به موج‌شکن به تعیین میزان تغییر شکل‌های به وجود آمده در بدنه

ی موج‌شکن و میزان نشست شمع تحت بارگذاری لرزه‌ای با استفاده از تحلیل عددی سه بعدی پرداخته ایم که در ادامه توضیحات تکمیلی در این زمینه ارائه خواهد شد.

۵-۲ مطالعه موردی

مطالعه‌ی موردی، روشی است که از منابع اطلاعاتی در دسترس برای بررسی نظام‌مند پدیده‌ها یا رویدادها استفاده می‌شود. مطالعات موردی معمولاً هنگامی انجام می‌شوند که پژوهشگر نیازمند فهم یا توصیف یک پدیده است. در تعریف مطالعه موردی می‌توان این‌گونه گفت که مطالعه موردی، یک روش تجربی است که از منابع و شواهد چندگانه برای بررسی واقع‌گرایانه‌ی یک پدیده در شرایطی که مرز بین پدیده و زمینه‌ی آن به وضوح روشن نیست، استفاده می‌شود. البته گاهی مطالعه موردی به عنوان یک روش تحقیق کیفی در نظر گرفته می‌شود، به همین دلیل گاهی به پژوهش کیفی، پژوهش موردی نیز می‌گویند. اگر چه این دو روش مترادف یکدیگر نیستند، اما پژوهش موردی به عنوان یک رویکرد تخصصی در میان پژوهش‌های علمی و مهندسی، به ویژه به عنوان واکنشی به درک محدودیت‌های پژوهش‌های در دست اجرا یا انجام شده، تکامل یافته است.

۵-۲-۱ کاربرد مطالعات موردی در مسائل ژئوتکنیکی

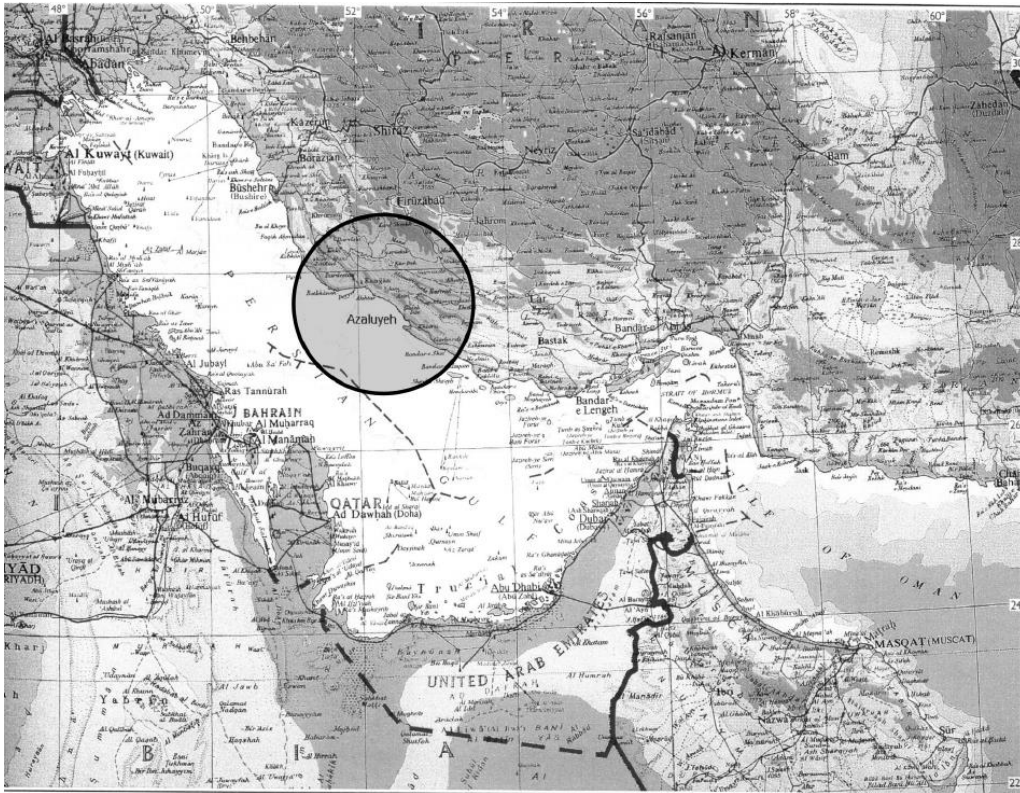
معمولاً طراحان در طراحی و ساخت پروژه‌های ژئوتکنیکی با چالش‌های منحصر بفرد روبرو می‌شوند. عدم امکان پیش‌بینی خطرات طبیعی و یا با منشأ انسانی که سازه و تاسیسات در طول مدت بهره‌برداری با آن مواجه خواهند بود ایجاب می‌کند که طراحی بر پایه قضاوت مهندسی باشد و نه بر پایه قطعیت. اگرچه در برخی از صنایع، مجموعه‌ای از نمونه‌های اولیه قبل از تولید نهایی می‌تواند طراحی و ساخته شود تا مسائل و مشکلات احتمالی برطرف شوند، اما با توجه به ماهیت اغلب پروژه‌های ژئوتکنیک فراساحلی به دلیل تحمیل هزینه‌های گزاف احتمالی، عموماً چنین گزینه‌ای از محبوبیت بسیار پایینی

برخوردار است. بر این اساس، بهترین و مقرون به صرفه ترین راهکار آن است که از موفقیت‌ها و شکست‌های پروژه‌های مختلف درس بگیریم. این مسئله به خوبی اهمیت مطالعات موردی را در مسائل مهندسی آشکار می‌سازد.

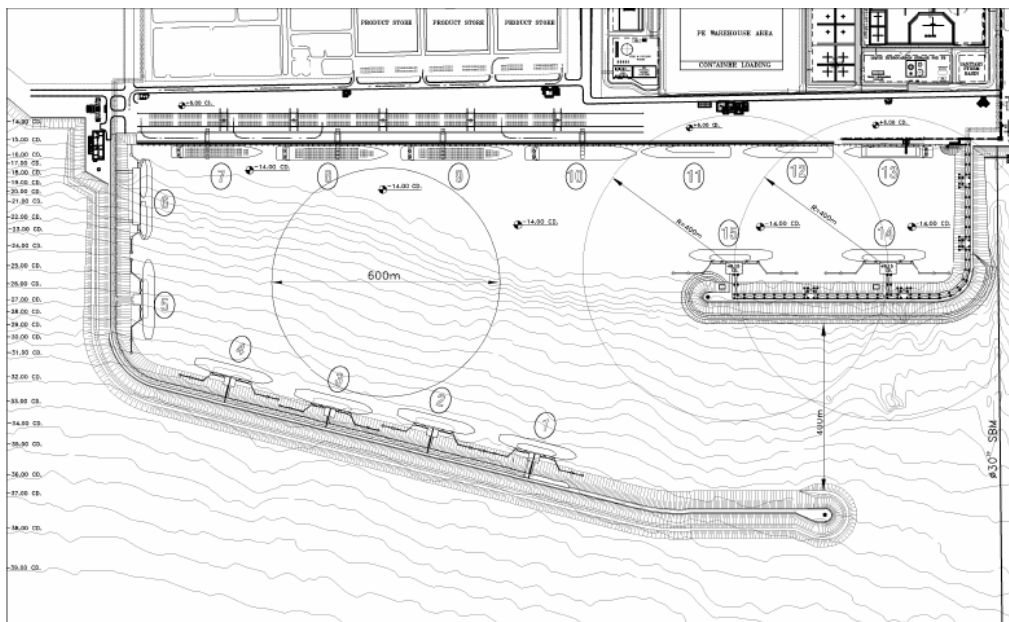
۳-۵ موج‌شکن‌های پارس جنوبی

میدان گازی پارس جنوبی با مساحت ۳ هزار و ۷۰۰ کیلومتر مربع در ۱۰۵ کیلومتری جنوب غربی بندر عسلویه در آب‌های خلیج فارس قرار دارد. بنادر عسلویه و تمبک به ترتیب در ۲۷۰ و ۲۲۰ کیلومتری جنوب شرقی بوشهر به عنوان منطقه ساحلی برای ایجاد تأسیسات خشکی و توسعه مرحله‌ای این میدان انتخاب شده‌اند. این میدان بالغ بر ۱۴ میلیون متر مکعب گاز را به همراه ۱۸ میلیارد بشکه میعانات در لایه‌های مختلف خود جای داده است.

در این بندر دو موج‌شکن با طول کل ۳۷۵۰ متر به منظور حفاظت تأسیسات مجتمع و پهلوگیری کشتی‌ها و بارگیری تولیدات و محصولات پتروشیمی در نظر گرفته شده است. موج‌شکن شرقی با طول ۱۱۰۰ متر و موج‌شکن غربی دارای طول ۲۶۵۰ متر می‌باشد. موقعیت بندر عسلویه و پلان موقعیت بندر پتروشیمی پارس و موج‌شکن‌های غربی و شرقی در شکل‌های (۱-۵ و ۲-۵) نشان داده شده است (صادقپور، ۱۳۸۳).



شکل ۵-۱- موقعیت بندر عسلویه در استان بوشهر (Banijamali and Banijamali 2011)



شکل ۵-۲- پلان موقعیت بندر پتروشیمی پارس جنوبی (Banijamali and Banijamali 2011)

عموماً مسئله‌ی احداث موج‌شکن‌های توده‌سنگی یا پایه‌های نفتی جهت احداث خطوط انتقال میعانان به خودی خود، مطلب جدیدی نمی‌باشند و نمونه‌های مشابهی در سطح جهان از این موارد موجود می‌باشد. در واقع نکته‌ای که پروژه‌ی فعلی را منحصر بفرد می‌سازد نحوه‌ی قرار گیری این دو سازه می‌باشد. به طور کلی مهندسان عمران همواره موج‌شکن‌های توده‌سنگی را به گونه‌ای احداث می‌نمایند که در کنار محافظت از ساحل در برابر امواج طوفان، تا حدودی از خطوط انتقال میعانان نیز حفاظت نمایند، به این ترتیب اصولاً خطوط انتقال میعانان در حد فاصل موج شکن‌های توده‌سنگی و خط ساحلی احداث می‌شوند. در واقع می‌توان گفت که مهندسان عمران در سراسر جهان سعی می‌کنند تا از تداخل موج‌شکن‌ها با سایر سازه‌های ژئوتکنیکی اجتناب ورزند تا درگیر پیچیدگی‌های ناشی از الگوهای رفتاری متفاوت این سازه‌ها نشوند اما در طراحی‌های صورت پذیرفته برای پروژه‌ی احداث موج‌شکن پارس جنوبی، مسیر قابل توجهی از خطوط لوله‌ی انتقال محصولات از پالایشگاه به اسکله بر روی محور تقارن طولی موج شکن توده‌سنگی احداث گردید.

۵-۳-۱ بررسی مقطع موج شکن

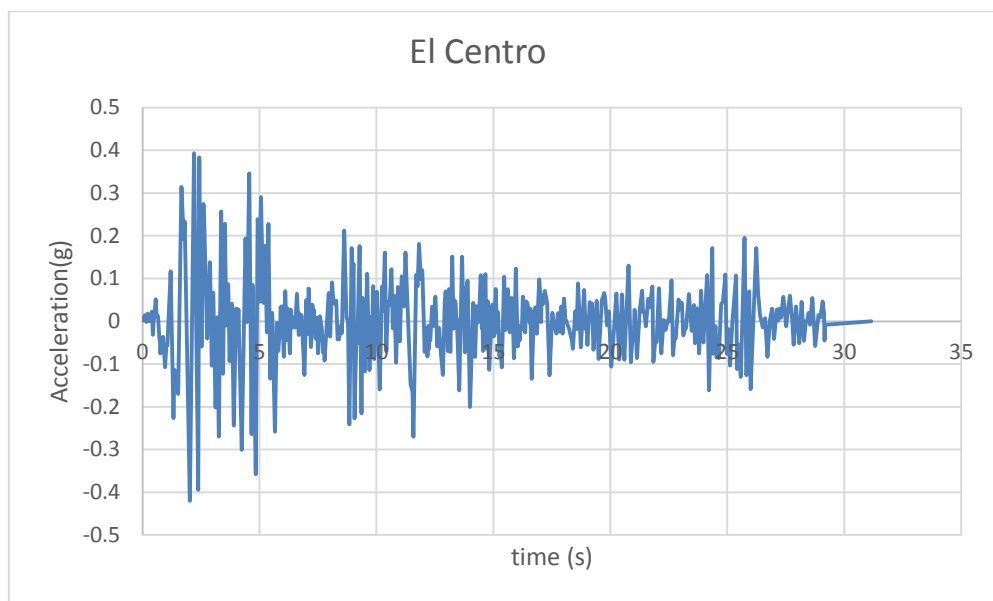
موج‌شکن‌های طراحی شده برای این بندر از نوع سنگریزه‌ای (Rockfill) در نظر گرفته شده است. عمق بستر دریا در محل محور موج شکن در بازوی شرقی حداکثر ۱۸- متر (نسبت به سطح دریا) و در موج شکن غربی حداکثر به ۳۲- می‌رسد، عمق آب و ارتفاع موج‌شکن‌ها در دنیا کم نظیر می‌باشد. براساس ناحیه بندی انجام شده در مقطع موج شکن، مصالح مقطع مورد نظر از ناحیه مغزه، فیلتر و آرمور تشکیل شده است. در مقطع هندسی موج‌شکن، شیب شیروانی در بالای موج‌شکن ۱:۱/۷ و شیب شیروانی قسمت پایینی موج‌شکن ۱:۱/۵ در نظر گرفته شده است. مقطع تیپ موج‌شکن در بازوی غربی در شکل

(۳-۵) نشان داده شده است. محدوده دانه‌بندی برای ناحیه هسته از ۱ تا ۲۰۰ کیلوگرم تعیین شده است. مصالح بدنه سنگریزه‌ای موج‌شکن از معادن قرضه در منطقه که حداکثر در فاصله ۴۰ کیلومتری ساختگاه قرار دارد تأمین شد. مشخصات نهایی وزن سنگ‌دانه‌ها در جدول (۱-۵) آمده است.

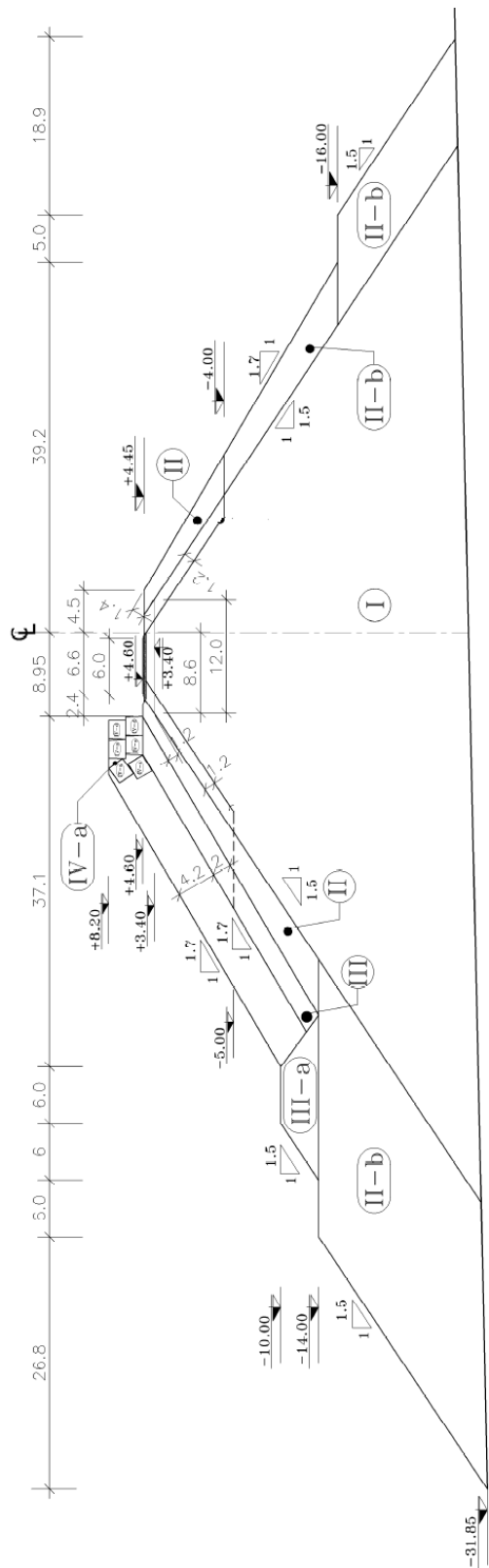
جدول ۱-۵- مشخصات نهایی وزن سنگ برای لایه های مختلف (Banijamali and Banijamali, 2011)

وزن سنگ‌ها (kg)	لایه موج‌شکن
۱۴۰۰۰	آرمور (IV-a)
۱۰۰۰-۳۰۰۰	فیلتر بالایی (III)
۲۰۰۰-۴۰۰۰	پنجه بالایی (III-a)
۲۰۰-۱۰۰۰	فیلتر پایینی (II)
۱۰۰-۵۰۰	پنجه پایینی (II-b)
۲۰۰ تا	هسته (I)

همانگونه که در فصل اول گفته شد عموماً در بررسی رفتار موج شکن ها تحت بارگذاری چرخشی، امواج لرزه‌ای و امواج دریا از یکدیگر تمایز داده می‌شوند. در واقع به دلیل ماهیت متفاوت این دو نوع بار چرخشی می‌توان رفتار متفاوتی را از موج شکن در مقابله با این دو نوع بارگذاری انتظار داشت. همان‌گونه که از عنوان این پژوهش نیز به خوبی مشخص است بحث تاثیر امواج آب دریا بر رفتار موج شکن مورد بحث از حیطة ی این پژوهش خارج بوده و می‌توان این تاثیر را در قالب پژوهش‌های دیگری با استفاده از امواج واقعی ثبت شده ی امواج دریا در محل احداث پروژه ی مورد بحث و بررسی قرار داد. براساس نتایج مطالعات لرزه‌خیزی ساختگاه احداث موج‌شکن آنالیز دینامیکی براساس رکورد زلزله Elcentro مقیاس شده با شتاب حداکثر $0/42g$ انجام گردید (شکل ۵-۳).



شکل ۵-۳- منحنی شتاب‌نگاشت زلزله El-Centro مقیاس شده با شتاب حداکثر $0/42g$



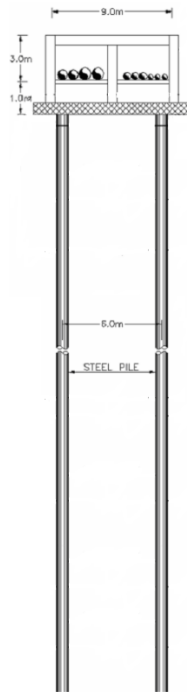
شکل ۴-۵- مقطع هندسی موج شکن غربی (Banijamali and Banijamali, 2011)

در وجه داخلی موج‌شکن‌های این بندر تعدادی اسکله جهت پهلوگیری شناورها در درون حوضچه در نظر گرفته شده و انتقال محصولات نفت و گاز از جمله LPG، از طریق خطوط لوله به محل اسکله‌ها انجام می‌شود. براساس طراحی ارائه شده خط لوله مذکور از طریق تاج موج‌شکن سنگریزه‌ای بایستی به محل اسکله‌های مورد نظر انتقال یابد. مسیر لوله مذکور از چندین خط لوله فولادی با قطرهای ۲ تا ۲۰ اینچ برای انتقال محصولات مختلف تشکیل شده که بر روی یک قاب فولادی به عرض ۹ متر و ارتفاع ۴ متر قرار می‌گیرد. براساس طراحی انجام شده بار قاب فولادی مذکور از طریق تکیه گاه‌هایی با فاصله ۲۵ متر از یکدیگر قرار دارند به سطح فوقانی موج‌شکن سنگریزه‌ای اعمال می‌گردد. براساس مشخصات و جزئیات خط لوله مقدار بار متمرکز اعمال شده از طریق خط لوله به سطح تاج موج‌شکن در محل هر تکیه‌گاه معادل ۳۰۰ تن برآورد شده است.

با توجه به خصوصیات لوله‌های فولادی و مایعات محتوی لوله براساس محدودیت‌های ارائه شده از سوی شرکت مشاور خط لوله، حداکثر نشست‌های قائم تفاضلی در محل دو تکیه‌گاه متوالی خط لوله (با فاصله ۲۵ متر) به ۷۵ میلی‌متر محدود شده است. از این رو یکی از محدودیتهای اصلی در طراحی موج‌شکن سنگریزه‌ای محدودیت نشست تاج موج‌شکن در محل تکیه‌گاه خط لوله می‌باشد.

با توجه به ابعاد قاب فولادی نگهدارنده خط لوله که عرض آن به ۹ متر می‌رسد، در این مرحله دو شمع فولادی با فاصله ۶ متر در مقطع موج‌شکن پیش‌بینی شده است. شمع‌های مورد نظر نسبت به محور قاب نگهدارنده خط لوله به صورت متقارن قرار گرفته و بار قاب فوقانی از طریق سازه سر شمع به شمع‌ها منتقل می‌گردد (شکل ۴-۵).

طراحی شمع‌ها براساس آئین‌نامه API انجام شده و براین اساس شمع‌های مذکور از نوع فولادی با قطر ۴۲ اینچ و ضخامت ۲۶ میلیمتر از فولاد X70 انتخاب شده است. ارتفاع شمع‌های مذکور با توجه به افزایش تدریجی ارتفاع خاکریز موج‌شکن، متغییر بوده و عمق فرورفت آنها معادل ۱۰ متر در بستر دریا تعیین شده است.



شکل ۵-۵- مقطع شمع و قاب فولادی

جدول ۲-۵ - خواص فولاد X70 (Hashemi et al, 2011)

ماده	γ (t/m ³)	E (MPa)	θ	تنش تسلیم MPa
فولاد X70	۷/۸	۲/۱۴ E ۵	۰/۳	۵۲۱

۵-۳-۲ خصوصیات ژئوتکنیکی بستر دریا در محل موج شکن ها

با توجه به مطالعات انجام شده توسط شرکت مشاور ساحل و قضاوت مهندسی انجام گرفته مشخصات

ژئوتکنیکی مورد استفاده در طراحی به قرار زیر انتخاب گردیده است.

جدول ۳-۵- مشخصات پارامترهای لایه‌های بستر دریا (سیفی و فاخر، ۱۳۸۶)

توصیف لایه	ماسه کربناته	شن و ماسه کربناته	ماسه سنگ کربناته
عمق قرار گیری	۰-۱۰	۱۰-۲۴	۲۴-۳۴
طبقه بندی	SP	GP	
میزان تراکم	متراکم	متراکم	ضعیف
$\gamma_d(t/m^3)$	۱/۷	۱/۸۵	۱/۹
$\gamma_s(t/m^3)$	۲	۲/۱	۲/۱
c (KPa)	۰	۰	
φ (°)	۳۸	۴۰	
θ	۰/۳۷	۰/۲۵	۰/۳
E_s (MPa)	۶۰	۱۲۰	۱۵۰

۳-۳-۵ خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های موج شکن

همانطور که گفته شد محل قرضه برای تأمین مصالح خاکی مورد نیاز برای احداث بدنه موج شکن توده‌سنگی مورد بحث از معدنی در فاصله ۴۰ کیلومتری محل احداث پروژه می‌باشد. پارامترهای ژئوتکنیکی برآورده شده برای مصالح تشکیل دهنده بخش‌های مختلف بدنه موج شکن در جدول (۴-۵) آورده شده است.

جدول ۴-۵- پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های موج شکن (Safinia and Banijamali, 1391)

توصیف لایه	$\gamma_s(t/m^3)$	φ (°)	ψ (°)	C (KPa)	E (MPa)	θ
هسته	۱/۹	۳۸	۸	۰	۸۰	۰/۳
فیلتر	۱/۹	۴۴	۱۴	۰	۱۰۰	۰/۳
آرمور	۲/۱	۵۰	۲۰	۰	۵۰۰	۰/۳

اگرچه بحث احداث موج‌شکن‌ها و خسارات لرزه‌ای احتمالی وارده به آن‌ها مطلب جدیدی نیست و در صورت نیاز به سادگی می‌توان اقدام به ترمیم موج‌شکن‌های توده‌سنگی نمود، اما اهمیت بالای پروژه در آن است که در صورتی که به واسطه تخریب لرزه‌ای موج‌شکن توده‌سنگی متداخل با پایه‌های نفتی کوچکترین نقصی در عملکرد سیستم انتقال فرآورده‌های نفتی از پالایشگاه به اسکله رخ دهد در کنار بروز آلودگی‌های شدید زیست محیطی، خسارات اقتصادی قابل توجهی نیز وارد خواهد شد. این مسئله با توجه به عدم قطعیت‌های موجود پیرامون عملکرد ترکیبی از موج‌شکن‌های توده‌سنگی و سایر سازه‌های ژئوتکنیکی در قالب یک مجموعه، ضرورت این ارزیابی را دوچندان می‌نماید، زیرا با توجه به تفاوت صلبیت بالای موجود میان مصالح تشکیل‌دهنده‌ی بدنه‌ی موج‌شکن توده‌سنگی و شمع‌های عبوری از آن، این احتمال می‌رود که تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای، تغییر شکل‌های لرزه‌ای شمع‌ها موجب بروز خسارت سازه‌ای در بدنه‌ی موج‌شکن توده‌سنگی گردد.

بر این اساس در تحقیق فعلی به بررسی عملکرد لرزه‌ای این مجموعه‌ی سازه‌ای با تمرکز بر میزان تغییر شکل‌های رخ داده در هنگام اعمال بارهای لرزه‌ای پرداخته شده است تا میزان خسارات احتمالی به موج‌شکن و پایه‌های شمع برآورد گردد. به این منظور شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام پذیرفته است که در بخش‌های بعدی نتایج بدست آمده ارائه خواهد شد.

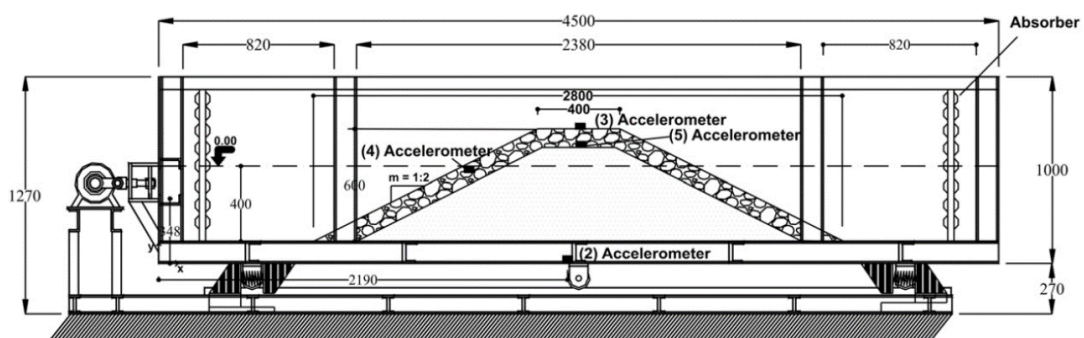
۴-۵ صحت سنجی

همواره یکی از معیارهای سنجش تحقیق‌ها، مقایسه با موارد مشابه پژوهشی دیگر بوده است. در این میان در خصوص مقایسه و بحث، لازم به ذکر است که موضوعاتی دقیقاً مشابه با تحقیق حاضر نمی‌توان ارائه داد. لذا در ادامه این فصل به ارائه نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین که بیشترین وجه تشابه را به این پژوهش دارند، پرداخته شده است.

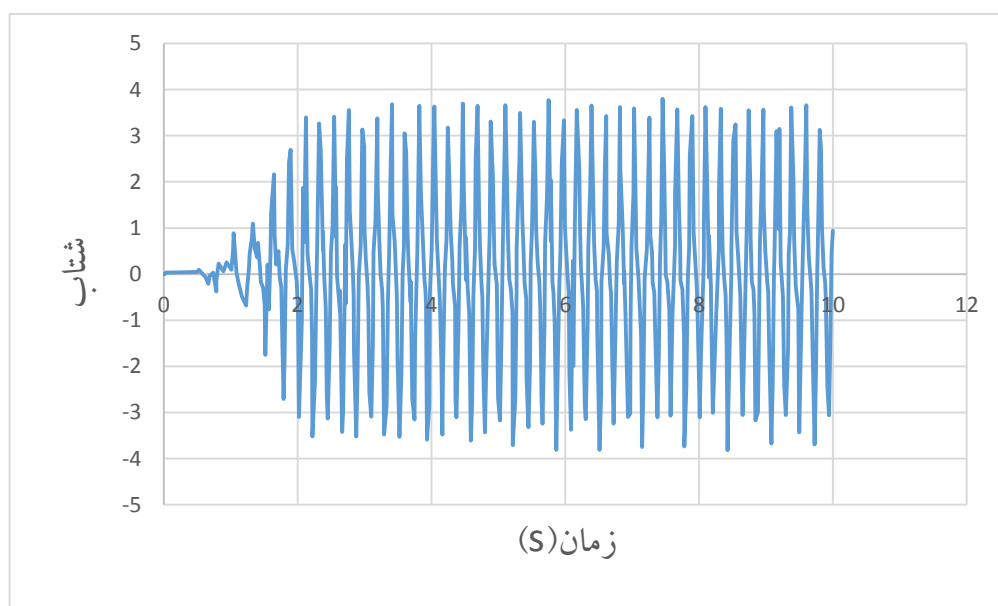
صحت سنجی مدل عددی با استفاده از موج‌شکن مورد بررسی در پژوهش سیهان و یوکسل (۲۰۱۱ میلادی) انجام پذیرفت. آن‌ها به کمک آزمون میز لرزه به بررسی تغییر شکل موج‌شکن‌های توده‌سنگی

پرداختند (شکل ۵-۶). آنها در این پژوهش از دو مدل موج‌شکن بدون پاشنه و پاشنه دار استفاده نمودند و سپس تغییر شکل‌های عمودی مورد انتظار را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند.

ابتدا هندسه و مشخصات مصالح بر اساس مشخصات ارائه شده در پژوهش سیهان و یوکسل (۲۰۱۱) مدلسازی گردید، سپس تعادل استاتیکی مدل بررسی شده و جابجایی‌های افقی و قائم کاذب ناشی از بارگذاری ثقلی به صفر رسید، در ادامه فشار آب در دو طرف موج‌شکن اعمال گردید، طبق پژوهش یوکسل و سیهان سطح آب در دو طرف موج‌شکن ۲۰ سانتی متر پایین‌تر از تاج موج‌شکن قرار دارد. در مرحله بعد بارگذاری لرزه‌ای طبق تاریخچه زمانی نمایش داده شده در شکل (۵-۷) به کف مدل عددی اعمال گردید.



شکل ۵-۶- ابعاد موج‌شکن مورد استفاده در پژوهش (Cihan and Yuksel, 2011)



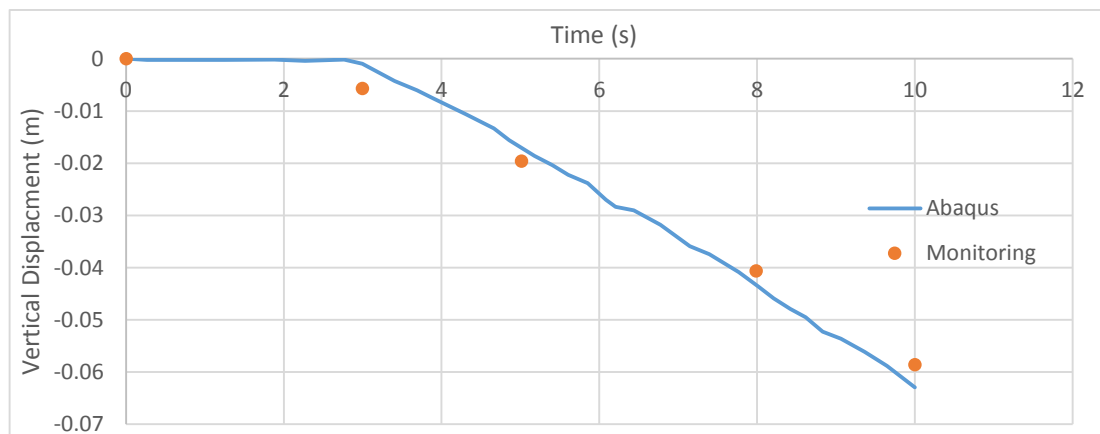
شکل ۵-۷- نمودار تاریخچه زمانی مورد استفاده جهت اعمال بار لرزه‌ای (Cihan and Yuksel, 2011)

استفاده شد. برای معرفی خواص مصالح از تئوری رفتاری موهر کلمب استفاده گردید، که مهم‌ترین پارامترهای لازم برای تعریف این مدل رفتاری (زاویه اصطکاک ، زاویه اتساع و چسبندگی) از پژوهش سیهان و یوکسل (۲۰۱۱ میلادی) استخراج شد (جدول ۵-۵).

جدول ۵-۵- پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی بخش‌های مختلف موج‌شکن (Cihan and Yuksel,) (2011)

لایه	وزن مخصوص اشباع (KN/m^3)	وزن مخصوص خشک (KN/m^3)	ضریب پوآسون	مدول یانگ (KN/m^2)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (KN/m^2)	زاویه اتساع (درجه)
هسته	۱۷۰۰	۱۶۰۰	۰/۲	۱۱۰۰۰۰	۴۱	۰	۱۰
پوسته	۲۰۰۰	۱۸۰۰	۰/۲	۶۵۰۰۰	۴۶	۰	۱۰

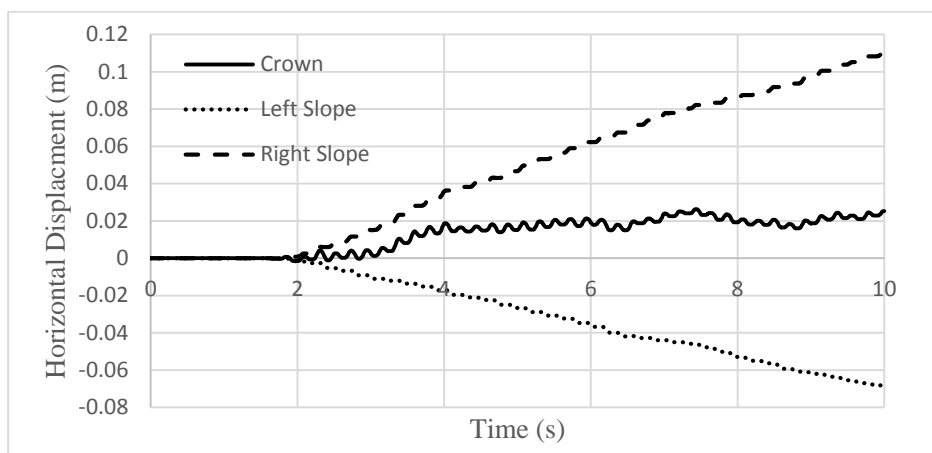
مقایسه میزان جابه جایی قائم درمیانه تاج موج‌شکن:



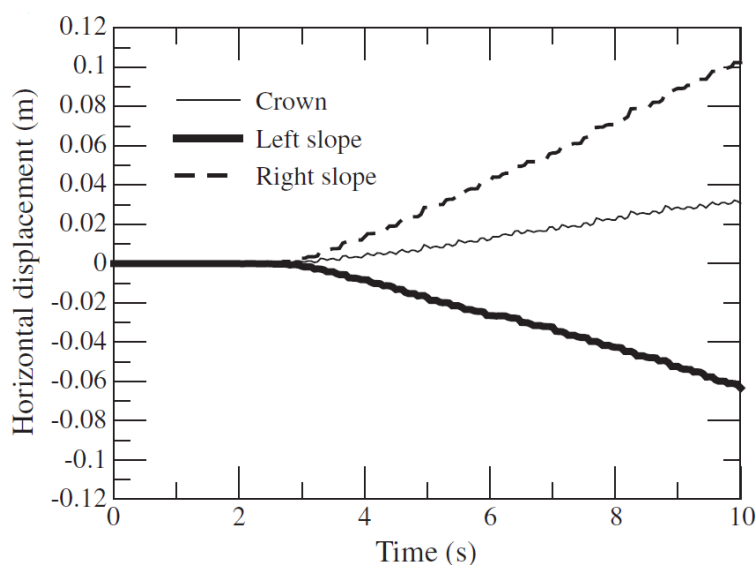
شکل ۵-۱۰- مقایسه جابجایی قائم بدست آمده در آباکوس با مدل آزمایشگاهی (Cihan and Yuksel,) (2011)

همانگونه که از نمودار نمایش داده شده مشاهده می‌شود ، دقت پیش‌بینی جابجایی قائم موج‌شکن با استفاده از مدل ایجاد شده در نرم‌افزار آباکوس در مقایسه با مدل آزمایشگاهی از وضعیت مطلوبی برخوردار است.

مقایسه میزان جابجایی افقی در میانه تاج موج شکن و شیب‌های راست و چپ:



شکل ۱۱-۵- نمودار جابجایی افقی در میانه تاج و شیب‌های راست و چپ موج شکن در نرم افزار آباکوس



شکل ۱۲-۵- نمودار جابجایی افقی در میانه تاج و شیب‌های راست و چپ موج شکن در مدل آزمایشگاهی (Cihan and Yuksel, 2011)

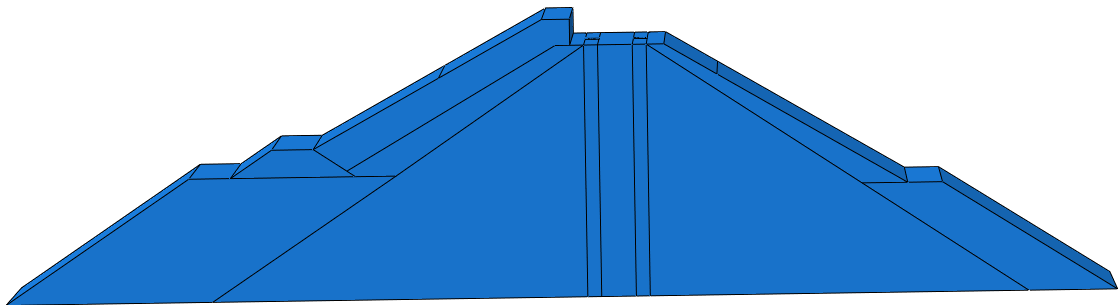
مقایسه نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۱۱-۵ و ۱۲-۵) نشان می‌دهد که دقت پیش‌بینی جابجایی افقی با استفاده از مدل ایجاد شده در نرم‌افزار آباکوس و مدل آزمایشگاهی از وضعیت مطلوبی برخوردار است، که این نشان دهنده قابل قبول بودن روند مدل سازی در این پژوهش می‌باشد.

۵-۵ مدل سازی عددی

در این پژوهش از نرم افزار اجزای محدود آباکوس برای مدلسازی استفاده می کنیم. در ادامه به طور مختصر فرایند مدل سازی توضیح داده شده است.

۵-۵-۱ ساخت هندسه مدل

اولین گام در مدل سازی ساخت هندسه مدل مورد بررسی می باشد. در این پژوهش ۳ پارت برای مدل سازی داریم که شامل پارت موج شکن، پارت بستر دریا و شمع می باشد. موج شکن دارای ۴ لایه اصلی می باشد که بر روی ۳ لایه بستر قرار گرفته است و داخل آن ۲ شمع با مشخصات یکسان قرار دارد. همان گونه که مشاهده می شود در این پژوهش سعی بر آن است تا حد امکان از ساده سازی لایه های موج شکن و لایه های بستر دریا اجتناب گردد تا بدین ترتیب بالاترین دقت ممکن در نتایج حاصل شود.



شکل ۵-۱۳- هندسه موج شکن پارس جنوبی



شکل ۵-۱۴- هندسه شمع های فولادی

۵-۵-۲ انتخاب روش های اجزاء محدود

فاکتورهای اساسی در یک مدل اجزاء محدود، شامل نوع المان های بکار گرفته شده جهت مدل سازی شمع و مصالح موج شکن، سایز مش بندی، مدل رفتاری مورد استفاده در مدل سازی مصالح، اندرکنش بین شمع و موج شکن، شرایط مرزی و گام های بارگذاری می باشد. در ادامه به طور خلاصه به تشریح هرکدام خواهیم پرداخت.

۵-۵-۳ المان های مش بندی

در این پژوهش برای مدل سازی موج شکن، شمع و بستر دریا از المان های ۸ گره ای مکعبی سه بعدی (C3D8R)، که در اکثر مطالعات گذشته بکار برده شده استفاده کردیم.

۵-۳-۱ ابعاد المان‌های مش‌بندی

برای ساخت مدل سه بعدی در محیط نرم‌افزار سعی شد که با اعمال تدابیر خاصی مش منظم و با اندازه مناسبی بدست آید تا تحلیل از حداکثر دقت برخوردار شود. به همین منظور شبکه مش به گونه‌ای طراحی شد تا المان‌های نزدیک به شمع دارای شکل و اندازه مناسب و المان‌های دور از آن بزرگتر شوند. همچنین کوشش شد که تغییر اندازه المان‌ها، ملایم و به تدریج صورت گیرد.

برای دست یافتن به تعداد و ابعاد مش‌های بهینه‌ی مورد استفاده در تحلیل عددی و کاهش درصد خطای حاصل از مش‌بندی و همچنین جلوگیری از صرف زمان زیاد برای تحلیل‌ها، تحلیل حساسیت مش صورت گرفت. در واقع ابعاد مش باید به گونه‌ای باشد که رابطه زیر را ارضاء کند:

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \text{ to } \frac{\lambda}{8} \quad (۱-۵)$$

در این رابطه Δl ابعاد مش‌بندی و λ طول موج مربوط به بالاترین مؤلفه فرکانس است.

طول موج با استفاده از رابطه (۲-۵) بدست می‌آید.

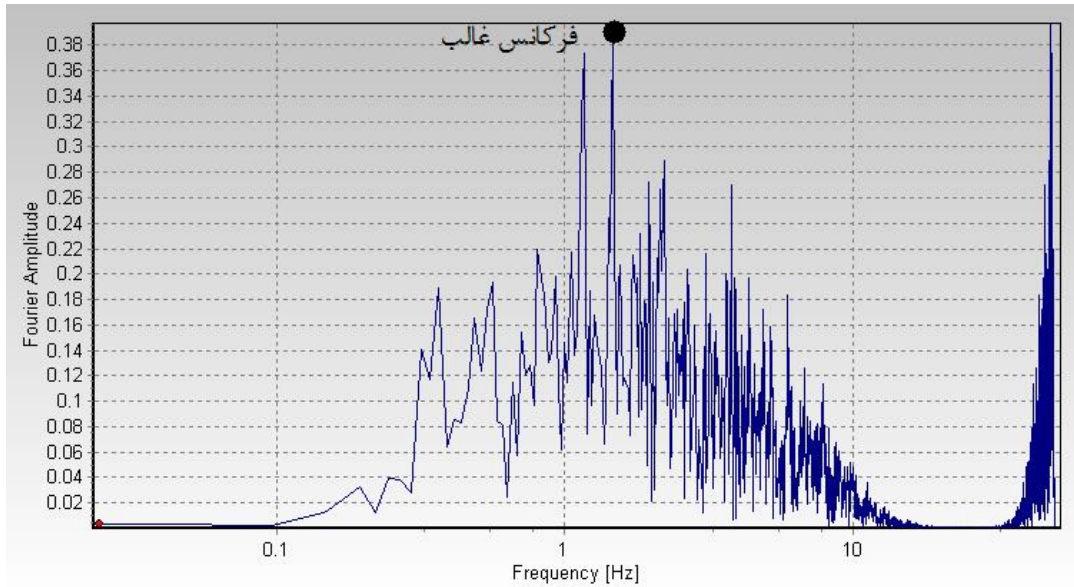
$$\lambda_{\min} = \frac{v_s}{f_{\max}} \quad (۲-۵)$$

در این رابطه v_s و f_{\max} سرعت امواج در مدل و حداکثر فرکانس غالب حاصل از زلزله می‌باشد. سرعت امواج براساس رابطه (۳-۵) بدست می‌آید:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (۳-۵)$$

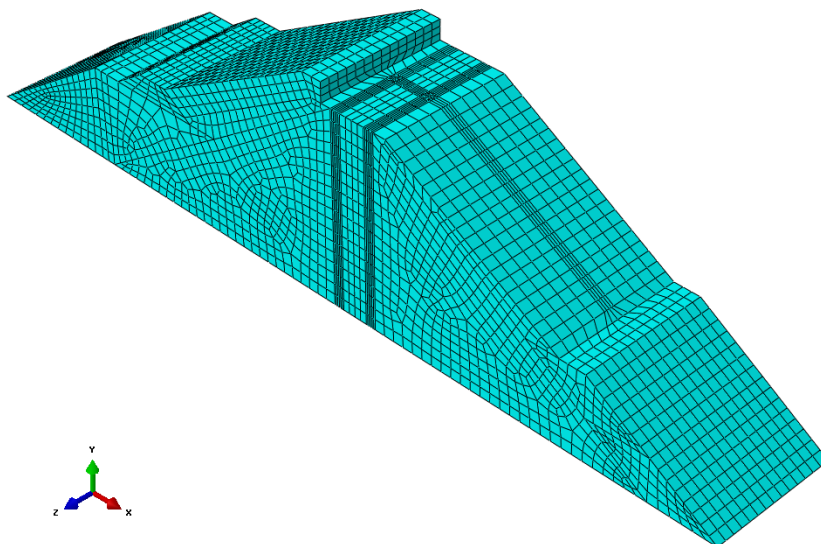
که G و ρ به ترتیب مدول برشی و دانسیته خاک می‌باشند.

برای تعیین حداکثر فرکانس زلزله می‌توان از طیف فوریه دامنه تاریخچه شتاب زلزله استفاده کرد (شکل ۵-۱۵).

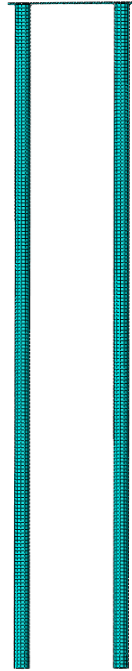


شکل ۵-۱۵- طیف سری فوریه جهت تعیین فرکانس غالب بار زلزله (نرم‌افزار Seisemosignal)

شبکه المان‌های موج‌شکن توده‌سنگی و شمع‌ها در شکل‌های (۵-۱۶ و ۵-۱۷) آمده است.



شکل ۵-۱۶- شبکه المان‌های موج‌شکن



شکل ۵-۱۷- شبکه المان‌های شمع

۵-۴-۵ مدل رفتاری مصالح

اطلاع درست از خصوصیات مصالح برای انجام هرگونه آنالیز دقیق بر روی رفتاری که نسبت به بارهای خارجی نشان می‌دهند، ضروری می‌باشد. در مطالعات مشابه رفتار شمع الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده است.

در بیشتر تحقیقات مسائل اندرکنش خاک و شمع در سال‌های گذشته، مصالح الاستیک خطی برای مدل خاک، در نظر گرفته شده بودند. اما خاک اغلب رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد و لذا باید رفتار پلاستیسیته خاک نیز اعمال شود. مدل رفتاری الاستوپلاستیک، رفتار واقعی خاک را با دقت کافی نشان می‌دهد. برای ارائه رفتار الاستوپلاستیک خاک از معیار موهرکولمب استفاده می‌کنیم. مدل الاستوپلاستیک موهرکولمب، از جمله مهم‌ترین مدل‌هایی است که تاکنون در مورد مصالح خاکی یا

سنگی به کار رفته است و نتایج حاصل از آن نیز با آنچه در طبیعت رخ داده، تطابق نسبتاً خوبی را نشان داده است.

۵-۵-۵ اندرکنش موج شکن و شمع

مدل کردن سطح تماس موج شکن و شمع یکی از قسمت‌های مهم مدل‌سازی اندرکنش می‌باشد. عموماً سطح تماس بین شمع و خاک به دو صورت مدل می‌شود:

۱- به صورت کاملاً به هم چسبیده، به طوری که شمع نسبت به خاک هیچ‌گونه لغزشی ندارد و در واقع تغییر مکان نسبی شمع نسبت به خاک صفر می‌باشد.

۲- به شکل سطح تماس اصطکاکی که امکان لغزش^۱ بین خاک و شمع و همچنین جداافتادگی^۲ بین آنها موجود باشد.

در آباکوس تماس مکانیکی بین دو سطح، برپایه‌ی تماس بین سطوح و تماس بین گره‌ها قابل تعریف است. در اندرکنش براساس گره، تماس بین دو گره براساس المان‌های تماسی صورت می‌پذیرد. این در حالی است که در اندرکنش سطحی، تماس بین دو سطح به صورت مستقیم تعریف می‌شود. در تعریف اندرکنش بر اساس گره‌های تماسی، تعریف اندرکنش نرمال امکان‌پذیر است، این در حالیست که در تعریف اندرکنش براساس تماس بین سطوح علاوه بر اندرکنش نرمال، اندرکنش مماسی (تانژانتی) نیز قابل تعریف است. تعریف اندرکنش بر اساس سطح تماس در مسائل اندرکنش خاک و شمع، توسط محققین در سال‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته است (Balendra, 2005).

در این پژوهش برای تعریف اندرکنش بین موج شکن و شمع از اندرکنش بر اساس سطوح تماسی استفاده می‌کنیم. تعریف این اندرکنش در آباکوس شامل گام‌های زیر می‌باشد:

^۱ Slipping

^۲ gapping

- تعریف سطح تماس

- تعریف سطح اصلی و پیرو

- تعریف خصوصیات مماسی و نرمال بین دو سطح

در تعریف سطح اصلی و پیرو باید گفت که سطح سخت‌تر به عنوان سطح اصلی و سطح نرم‌تر به عنوان سطح پیرو انتخاب می‌شود. در این پژوهش سطح اصلی بدنه شمع و سطح پیرو موج‌شکن می‌باشد.

اندرکنش بین دو سطح بر اساس تماس، از نوع اصطکاکی و عمودی تعریف شده است؛ بطوریکه در تماس اصطکاکی از روش پنالتی با ضرایب اصطکاکی ثابت استفاده شده است. در تماس عمودی سطوح نیز تماس از نوع سخت استفاده شده است. در این نوع تعریف هر فشاری بین سطوحی که در تماس هستند، انتقال پیدا می‌کند. اگر فشار تماسی کاهش یابد یا به صفر برسد امکان جدا شدن سطوح ایجاد می‌شود. سطح‌های جدا شده از هم وقتی فاصله بین آنها کاهش یابد یا به صفر برسد، باهم تماس پیدا می‌کنند.

۵-۵-۶ مراحل بارگذاری

از آنجاییکه پاسخ شمع‌ها به تاریخچه بارگذاری وابسته می‌باشد، شبیه‌سازی شرایط تنش برجا قبل از اعمال بارگذاری لرزه‌ای به مدل ضروری می‌باشد. لذا قبل از اینکه بار زلزله به مدل اعمال شود باید بار گرانش به مدل اعمال گردد و شرایط تنش برجا در مدل ایجاد شود. در این پژوهش، بار گرانش در گام نخست، برای مدل تعریف گردید و همچنین برای جلوگیری از نشست‌های اضافی ناشی از بار گرانش و ایجاد تنش‌های قائم و افقی در بستر دریا، تنش ژئواستاتیکی در میدان تنش نرم افزار آباکوس به مدل اعمال شد. برای تعریف تنش ژئواستاتیکی، تنش عمودی در دو نقطه باید تعیین شود و در نرم افزار اختلاف تفاوت بین دو نقطه به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود. بر اساس رابطه (۴-۵) تنش عمودی (σ_v) در یک نقطه توسط لایه‌های خاک بالاتر از نقطه محاسبه می‌شود.

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_n \cdot h_n \quad (4-5)$$

در رابطه بالا γ_n وزن مخصوص خاک های لایه های بالاتر و h_n ضخامت لایه های خاک با توجه به نقطه مورد نظر می باشد.

بعد از تعیین تنش قائم باید تنش افقی را به نرم افزار معرفی کنیم، برای اینکار کفایت ضریب تنش افقی را در نرم افزار وارد نماییم. تنش افقی از رابطه (5-5) تعیین می شود.

$$\sigma_h = k_0 \sigma_v \quad (5-5)$$

که k_0 ضریب فشار افقی از رابطه (6-5) بدست می آید.

$$k_0 = 1 - \sin \varphi \quad (6-5)$$

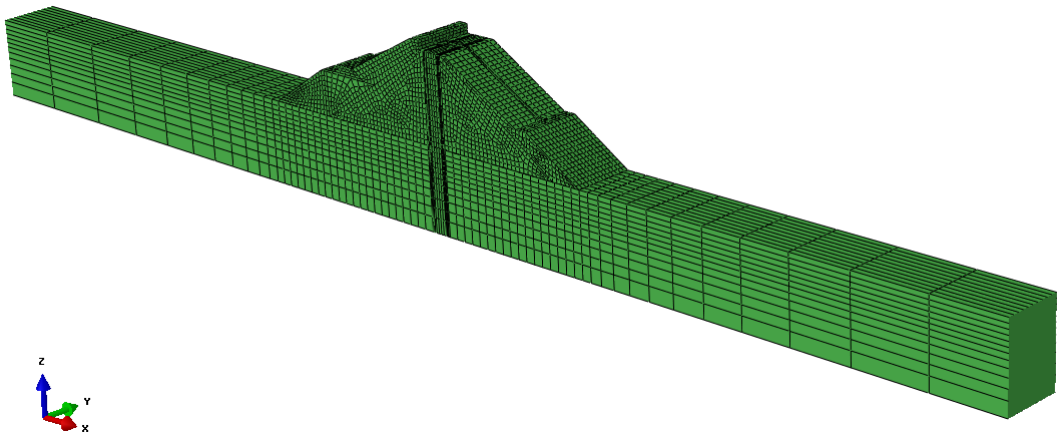
بعد از اعمال نیروی گرانش و تنش های ژئواستاتیکی در گام نخست، بار ۳۰۰ تن به تکیه گاه اعمال می شود تا میزان نشست شمع ها تحت بارگذاری به صفر برسد. سپس گام تحلیل دینامیکی به صورت صریح^۱ تعریف گردید و بار زلزله به صورت تاریخچه زمانی به بستر سنگی اعمال شد.

۵-۵-۷ شرایط تکیه گاهی

شرایط مرزی مورد استفاده، در حالت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی با یکدیگر متفاوت هستند. در تحلیل های استاتیکی، استفاده از مرزهای مقید با فاصله محدود از سازه می تواند دقت مناسب مورد نیاز را تأمین کند. استفاده از این مرز در تحلیل های دینامیکی به دلیل بازتاب امواج تابشی و نادیده گرفتن میرایی تشعشعی نامناسب است. اگر چه در این حالت استفاده از ابعاد زیاد برای بستر به همراه میرایی مصالح می تواند تا حدودی فرض عدم بازگشت امواج تابشی به مرز را محقق کند، ولی به دلیل نیاز به محاسبات زمان بر، علی رغم پیشرفت سرعت محاسبات در عصر کنونی، این رویکرد با دشواری های خاصی

^۱ Explicit

همراه است. میرایی در ابعاد محدود خاک با استفاده از مرزهای جاذب مصنوعی تأمین می‌شود. ماهیت این مرزها جذب انرژی امواج به آنهاست. در این مطالعه از المان‌های نیمه بی‌نهایت به عنوان مرزهای جاذب استفاده کردیم. المان‌های نیمه بی‌نهایت به مرزهای المان محدود متصل می‌شوند. استفاده از المان‌های نیمه بی‌نهایت در مرزهای جانبی مدل سبب می‌شود موج پس از رسیدن به آنها به محیط مجازی بی‌نهایت دور هدایت شود. در واقع استفاده از المان‌های نیمه بی‌نهایت منجر به کاهش محدوده مدل‌سازی شده و حجم محاسبات را به طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. این المان‌ها نمی‌توانند در مرز پایینی مدل قرار گیرند چراکه بارگذاری دینامیکی را با اشکال مواجه می‌سازند.



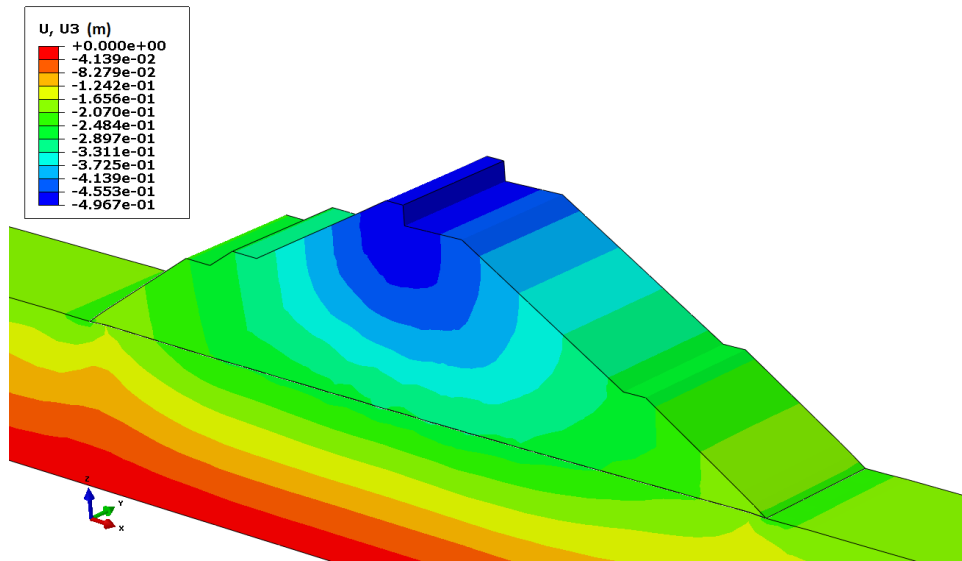
شکل ۵-۱۸- استفاده از المان نیمه بی‌نهایت در مرزهای جانبی در راستای X

۵-۶ نتایج مدل سازی

در این پژوهش نخست موج شکن را بدون در نظر گرفتن شمع های فولادی تحت بار زلزله مدل می کنیم تا میزان نشست خط لوله فولادی و تغییر شکل های ایجاد شده در بدنه موج شکن را بدست آوریم، سپس با قرار دادن شمع های فولادی در بدنه موج شکن میزان نشست را بدست می آوریم. به منظور بررسی اثر طول شمع و سطح مقطع شمع بر روی نشست خط لوله عبوری، شمع هایی با عمق نفوذ و سطح مقطع متفاوت را مدلسازی کرده و نتایج را با مدل اصلی مقایسه می کنیم.

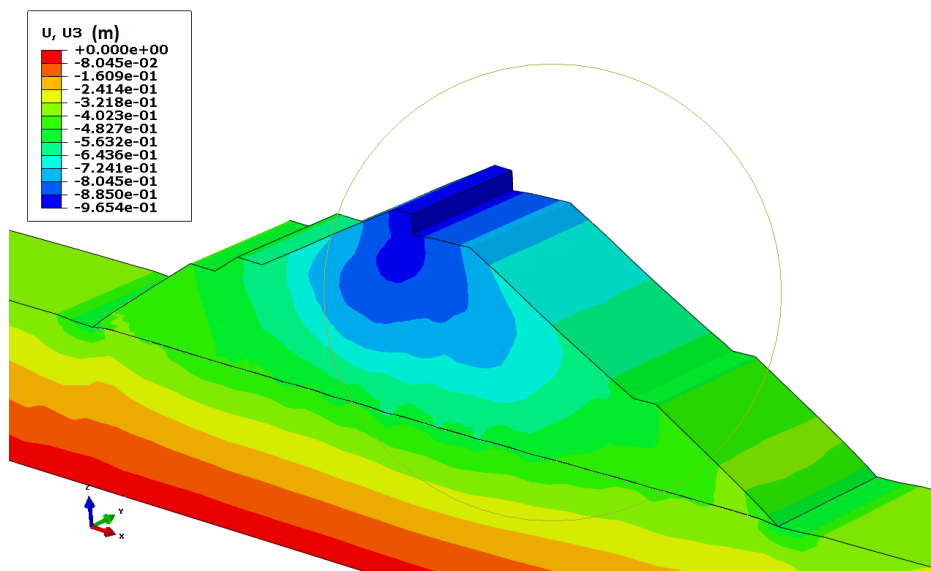
۵-۶-۱ مدل موج شکن بدون شمع

در این مدل موج شکن را بدون در نظر گرفتن شمع های فولادی مورد بررسی قرار دادیم. نخست موج شکن را به صورت استاتیکی تحلیل می کنیم، تحلیل استاتیکی شامل بارگذاری ثقلی، فشار آب حفره ای و وزن خط لوله می باشد. در این مرحله نشست ها و تغییر شکل های موج شکن را در اثر وزن سازه بدست آوریم، زمانی که نشست تحت بار ثقلی ثابت شد مؤلفه افقی شتاب زلزله را به بستر سنگی اعمال می کنیم، در این راستا، مدل تحت بارگذاری لرزه ای مطابق تاریخچه زمانی ارائه شده در شکل (۵-۳) قرار گرفت. در ادامه تصاویر و نمودارهای مربوط به جابجایی قائم موج شکن ارائه شده است.



شکل ۵-۱۹- کانتور نشست موج شکن پس از تحلیل استاتیکی

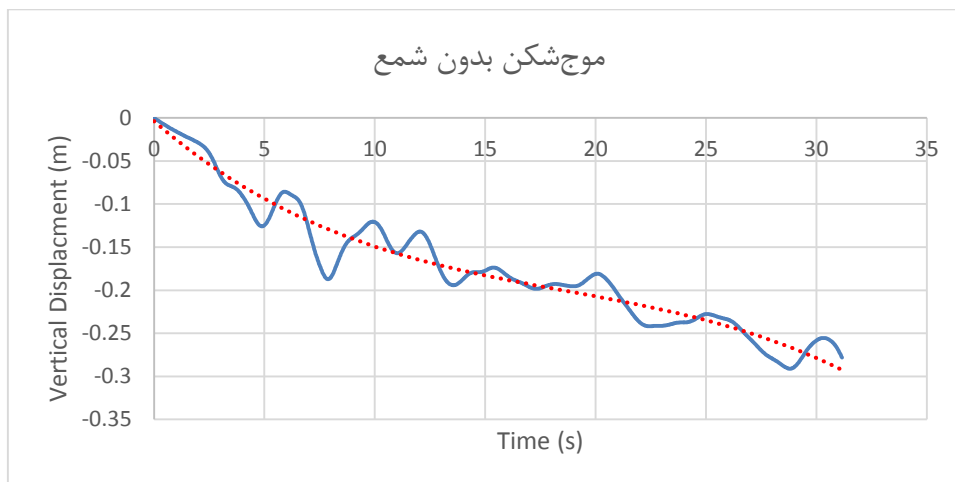
همانطور که گفته شد، ابتدا مدل را به صورت استاتیکی تحلیل می‌کنیم تا میزان نشست‌ها را تحت بار ثقیل بدست آوریم. با توجه به کانتور جابجایی بدست آمده از تحلیل استاتیکی (شکل ۵-۱۹) مشخص است ماکزیمم میزان جابجایی قائم برای تاج موج شکن حدود ۵۰ سانتی‌متر بدست می‌آید. این مقدار نشست به دلیل اعمال نیروی وزن، در نتیجه تراکم بستر و مصالح موج شکن می‌باشد.



شکل ۵-۲۰- کانتور نشست موج شکن پس از تحلیل دینامیکی

پس از اینکه موج شکن به صورت استاتیکی تحلیل شد و میزان نشست را بدست آوردیم، مؤلفه افقی

زلزله به بستر سنگی اعمال شد. شکل (۵-۲۰) کانتور نشست موج شکن را پس از اعمال بار زلزله نشان می دهد. ذکر این نکته اهمیت دارد که مقادیر ارائه شده در کانتور نشست دینامیکی (شکل ۵-۲۰) حاصل جمع مقادیر نشست استاتیکی و نشست تحت بار زلزله می باشد.



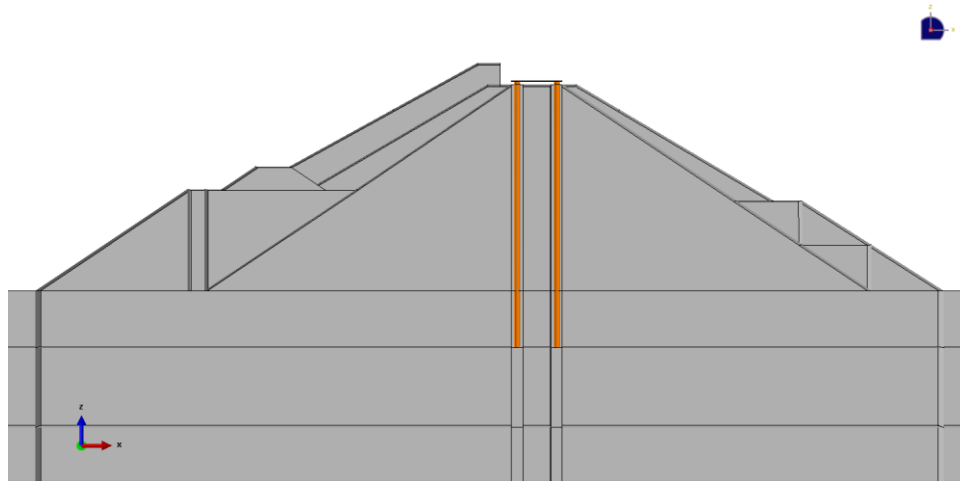
شکل ۵-۲۱- نمودار جابجایی قائم میانه تاج موج شکن در اثر زلزله

بررسی خروجی های مدل هندسی اول نشان می دهد که ماکزیمم جابجایی قائم در میانه ی تاج موج شکن پس از اعمال بار دینامیکی زلزله برابر ۲۹ سانتی متر می باشد. با نشست بستر موج شکن، مصالح موج شکن به سمت بستر حرکت می نمایند و چنین پدیده ای موجب کاهش شیب شیروانی ها ، تراکم ظاهری موج شکن و نشست تاج موج شکن خواهد شد که با تغییر شکل های لرزه ای مورد انتظار از موج شکن توده سنگی در ضوابط PIANC از لحاظ کیفی تطابق کامل دارد (بخش ۴-۶، ضوابط لرزه ای PIANC).

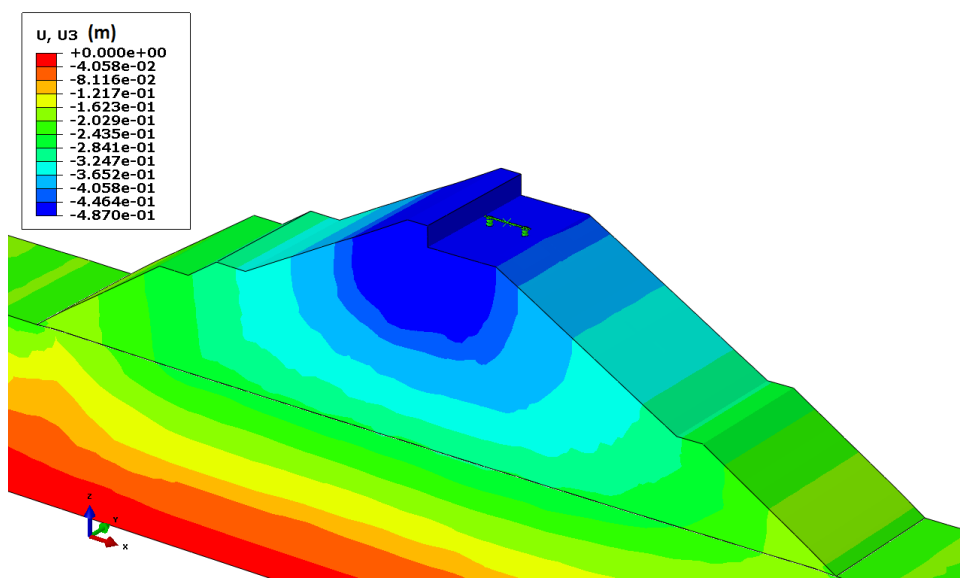
۵-۶-۲ مدل اجرا شده در بندر پارس جنوبی (شمع با طول ۴۶/۸ متر)

همانگونه که بیان شد با توجه به مشخصات فنی موجود از شمع هایی با عمق نفوذ ۱۰ متر (طول ۴۶/۸ متر) و با قطر ۴۲ اینچ و ضخامت ۲۶ میلی متر در موج شکن های پارس جنوبی استفاده شده است (شکل ۵-۲۰). نخست مجموعه موج شکن و شمع را به صورت استاتیکی تحلیل می کنیم سپس شتاب

نگاشت مقیاس شده زلزله Elcentro با حداکثر شتاب $0.42g$ را به مدل اعمال می کنیم. در ادامه نتایج مدلسازی بیان شده است.

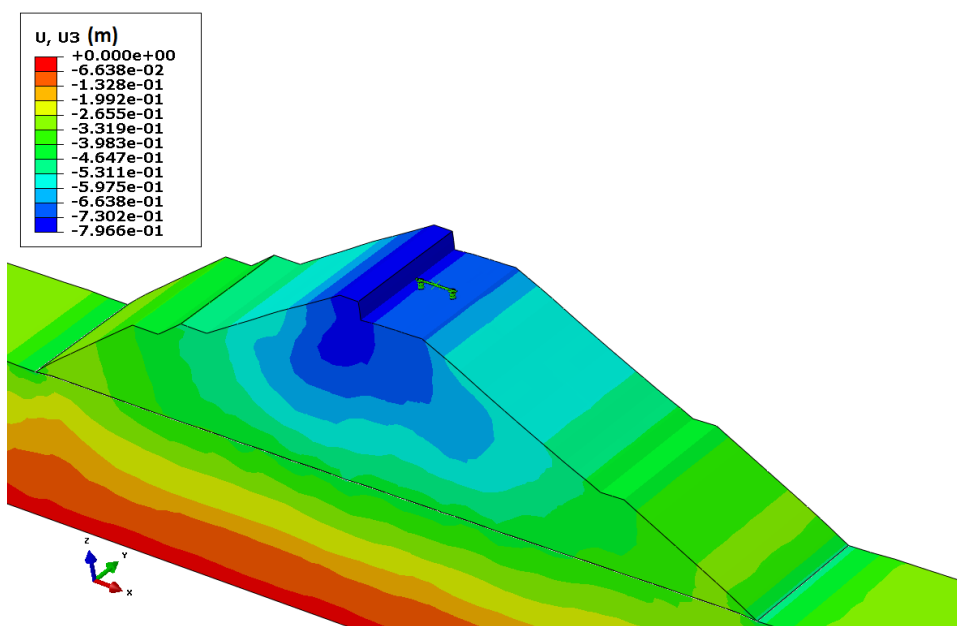


شکل ۵-۲۲- مدل موج شکن و شمع با طول ۴۶/۸ متر



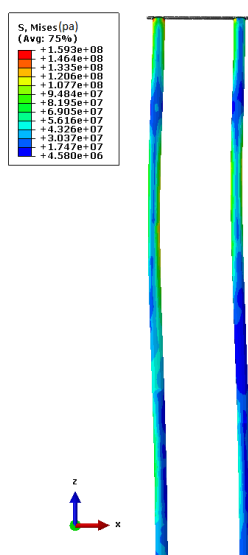
شکل ۵-۲۳- کانتور نشست مجموعه موج شکن و شمع پس از تحلیل استاتیکی

براساس شکل (۵-۲۳) میزان نشست تاج موج شکن در حضور شمع پس از تحلیل استاتیکی حدود ۴۹ سانتی متر است که با نمونه بدون شمع تفاوتی ندارد.



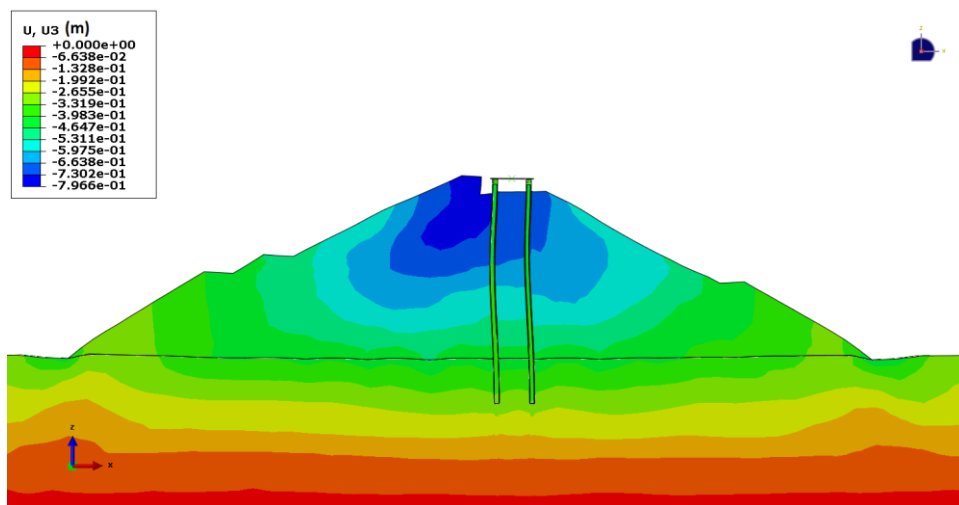
شکل ۵-۲۴- کانتور نشست مجموعه موج شکن و شمع پس از تحلیل دینامیکی

همانند مدل موج شکن بدون شمع، بعد از تحلیل استاتیکی، شتابنگاشت زلزله به بستر سنگی اعمال شد. شکل (۵-۲۴) کانتور جابجایی قائم مجموعه موج شکن و شمع را پس از تحلیل دینامیکی نشان می دهد.

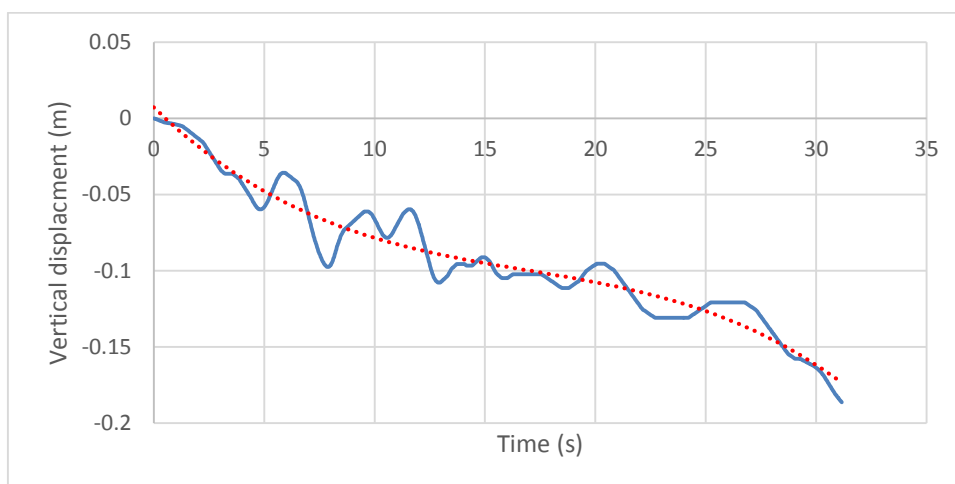


شکل ۵-۲۵- تنش فون میسز در شمع ها پس از اعمال بار دینامیکی

ماکزیمم تنش فون میسز در شمع فولادی مقدار ۱۵۹ مگاپاسکال بدست می آید که از تنش تسلیم فولاد کمتر است. لذا می توان گفت که شمع در زلزله دچار آسیب نمی شود.

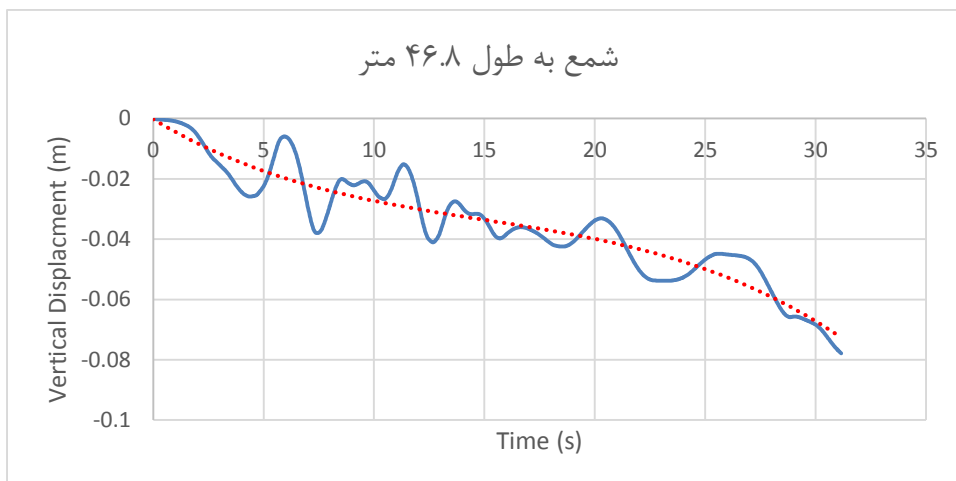


شکل ۵-۲۶- تغییر شکل ایجاد شده در مجموعه موج شکن و شمع پس از اعمال بار دینامیکی زلزله



شکل ۵-۲۷- نمودار جابجایی نقطه میانی تاج موج شکن تحت بار زلزله (شمع با طول ۴۶/۸ متر)

با توجه به نمودار ارائه شده در شکل (۵-۲۷) در صورت حضور شمع در بدنه موج شکن، مقدار نشست قائم تاج موج شکن نسبت به حالتی که موج شکن فاقد شمع است کاهش می یابد. لذا در صورت استفاده از شمع می توان انتظار نشست های به مراتب کمتری را در هنگام وقوع زلزله در بدنه موج شکن داشته باشیم.



شکل ۵-۲۸- نمودار جابجایی قائم نقطه میانی تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله (حضور شمع با طول ۴۶/۸ متر)

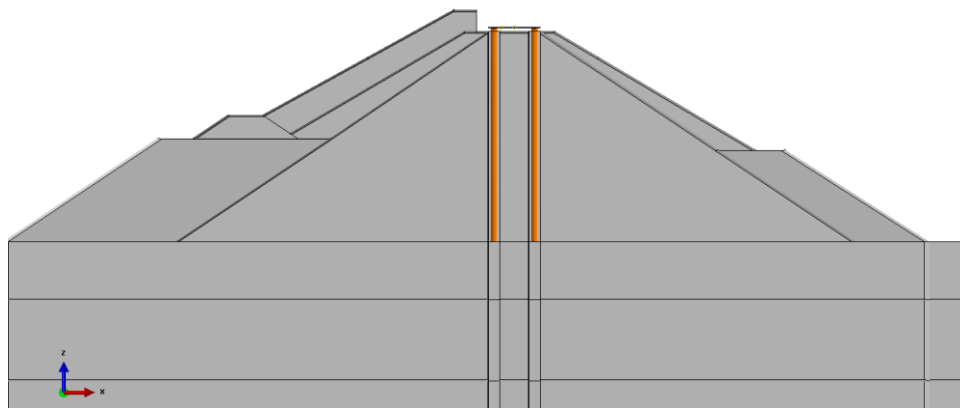
براساس نمودار ارائه شده در شکل (۵-۲۸) چنانچه از شمع‌های فولادی با مشخصات بیان شده استفاده کنیم، میزان نشست قائم تکیه‌گاه خط لوله به ۷۶ میلیمتر کاهش می‌یابد که بسیار نزدیک به مقدار نشست مورد انتظار شرکت مشاور خط لوله انتقال محصولات نفتی می‌باشد.

۵-۷ بررسی اثر طول شمع

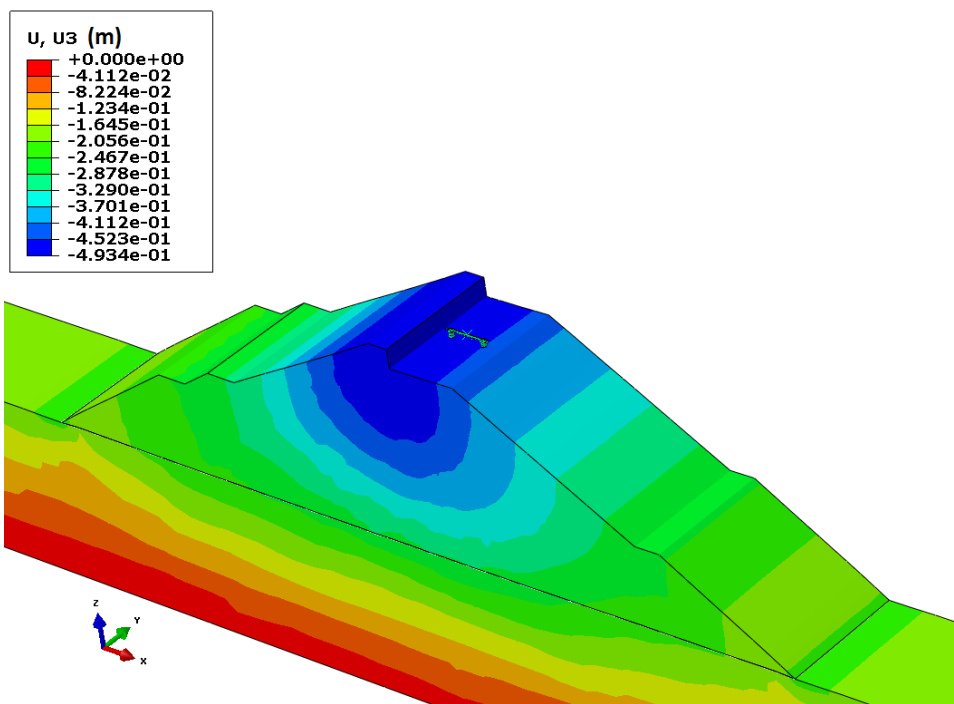
بر اساس طراحی های انجام پذیرفته، شمع های فولادی عبوری از داخل بدنه‌ی موج شکن ۱۰ متر در بستر دریا نفوذ می‌کنند. در این پژوهش به منظور بررسی اثر طول شمع روی میزان نشست، علاوه بر نمونه اجرا شده در موج‌شکن پارس جنوبی شمع‌هایی با عمق نفوذ ۰ (طول ۳۶/۸ متر) و ۱۴ متر (طول ۵۰/۸ متر) در بستر دریا مورد بررسی قرار گرفت.

۵-۷-۱ شمع با طول ۳۶/۸ متر

در این مدل شمع هیچ گونه نفوذی در بستر دریا نخواهد داشت و بار لوله‌ها به وسیله شمع به سطح بستر وارد می‌شود (شکل ۵-۲۹).

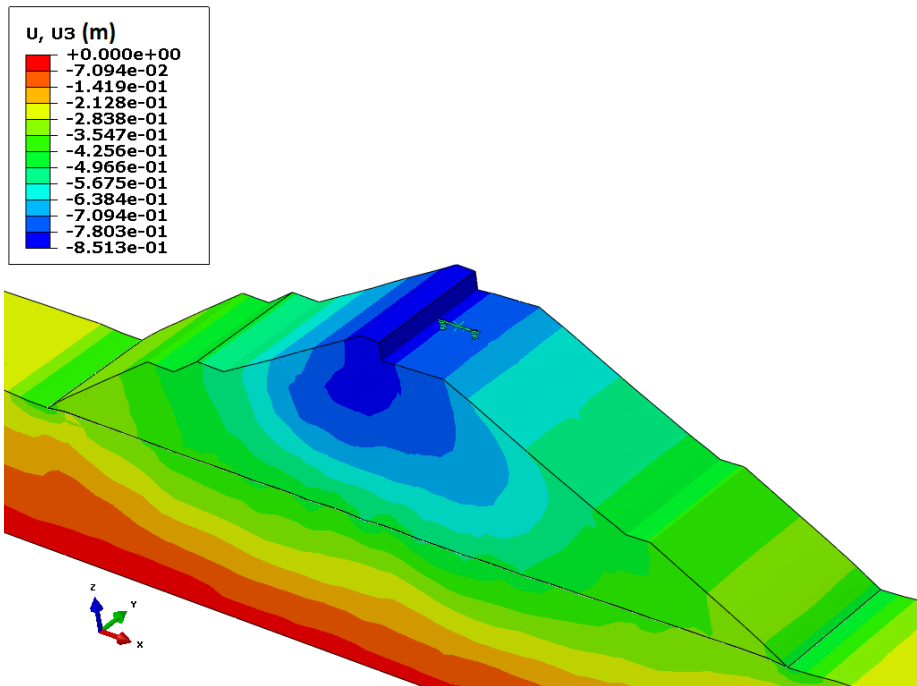


شکل ۵-۲۹- مدل موج شکن و شمع با طول ۳۶/۸ متر



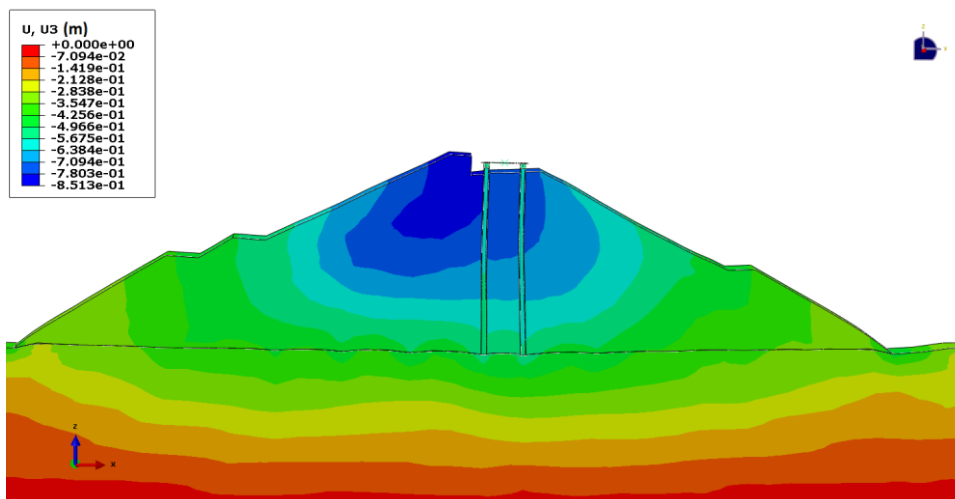
شکل ۵-۳۰- کانتور نشست مجموعه موج شکن و شمع با طول ۳۶/۸ متر پس از تحلیل استاتیکی

ابتدا مدل به صورت استاتیکی تحلیل شد و میزان جابجایی قائم موج شکن و بستر دریا را در ترازهای مختلف بدست آوردیم. همانطور که بیان شد مقدار نشست های بدست آمده در این مرحله تحت تأثیر بارگذاری ثقلی، فشار آب حفره ای و بار وارده از طرف خط لوله به شمع ها می باشد. طبق تحلیل استاتیکی مقدار نشست قائم تاج موج شکن در این مرحله حدود ۴۹ سانتی متر بدست آمد (شکل ۵-۳۰).

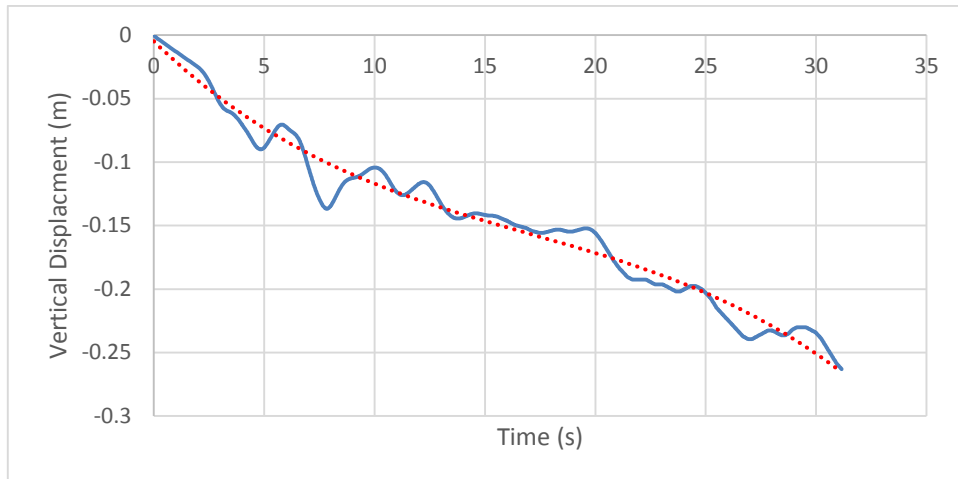


شکل ۵-۳۱- کانتور نشست مجموعه موج شکن و شمع با طول ۳۶/۸ متر پس از تحلیل دینامیکی

پس از این که نشست موج شکن و شمع پس از اعمال بارهای ثقلی، ثابت شد، تحلیل دینامیکی انجام شد. شکل (۵-۳۱) کانتور نشست مجموعه موج شکن و شمع را بعد از اعمال بار زلزله نشان می دهد.

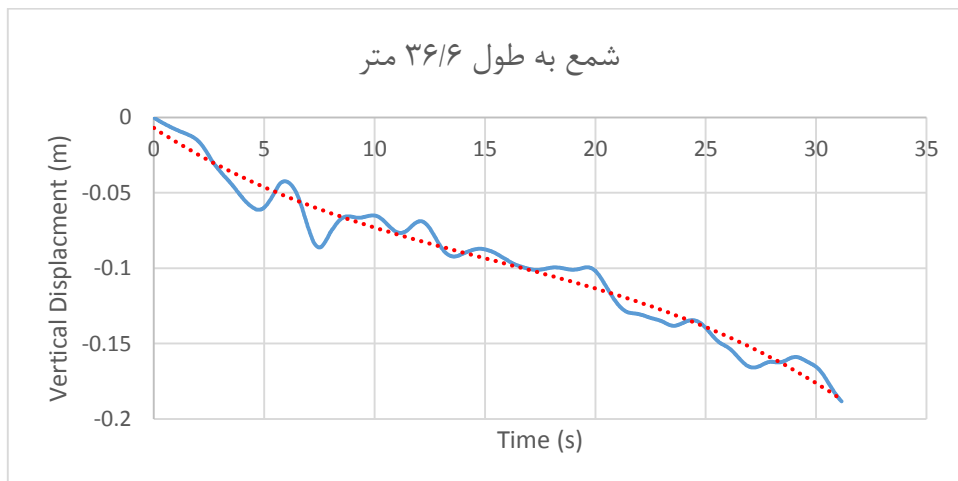


شکل ۵-۳۲- تغییر شکل ایجاد شده در مقطع موج شکن و شمع با طول ۳۶/۸ متر پس از اعمال بار دینامیکی زلزله



شکل ۵-۳۳- نمودار جابجایی نقطه میانی تاج موج‌شکن تحت بار زلزله (شمع با طول ۳۶/۸ متر)

همانطور که از نمودار ارائه شده در شکل (۵-۲۳) مشخص است، چنانچه شمع فقط در بدنه موج‌شکن کوبیده شود و هیچ‌گونه نفوذی در بستر دریا نداشته باشد، تاج موج‌شکن حدود ۲۶ سانتی‌متر نشست خواهد داشت. با مقایسه مقدار نشست تاج موج‌شکن در این حالت با حالتی که شمع در بدنه موج‌شکن قرار نگرفته (شکل ۵-۲۱) می‌توان نتیجه گرفت که چنانچه شمع در بستر دریا نفوذ نکرده باشد وجود شمع تاثیر چندانی بر میزان نشست تاج موج‌شکن نخواهد داشت.



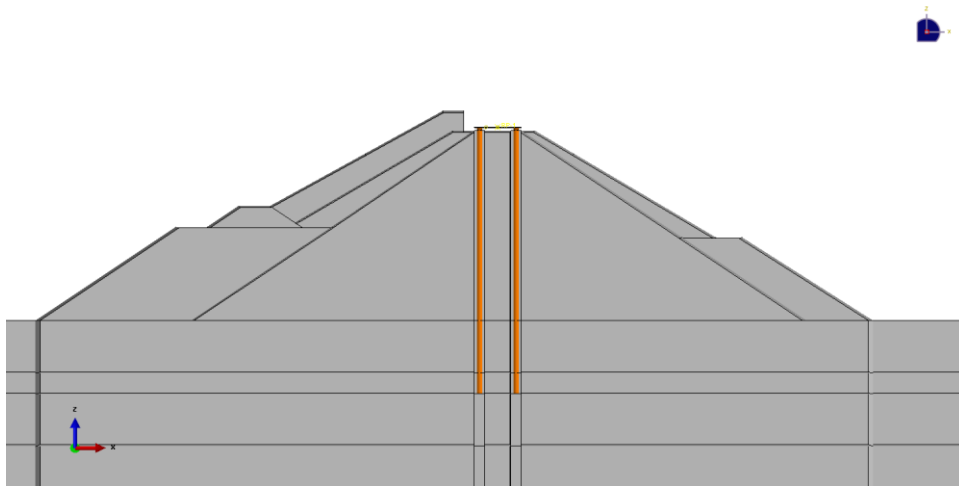
شکل ۵-۳۴- نمودار جابجایی قائم نقطه میانی تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله (شمع با طول ۳۶/۸ متر)

همانطور که از نمودار ارائه شده در شکل (۵-۳۴) پیداست، نشست قائم تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله در حالتی که از شمع‌هایی به طول ۳۶/۸ متر در بدنه موج‌شکن استفاده شود ۱۹ سانتی‌متر می‌باشد

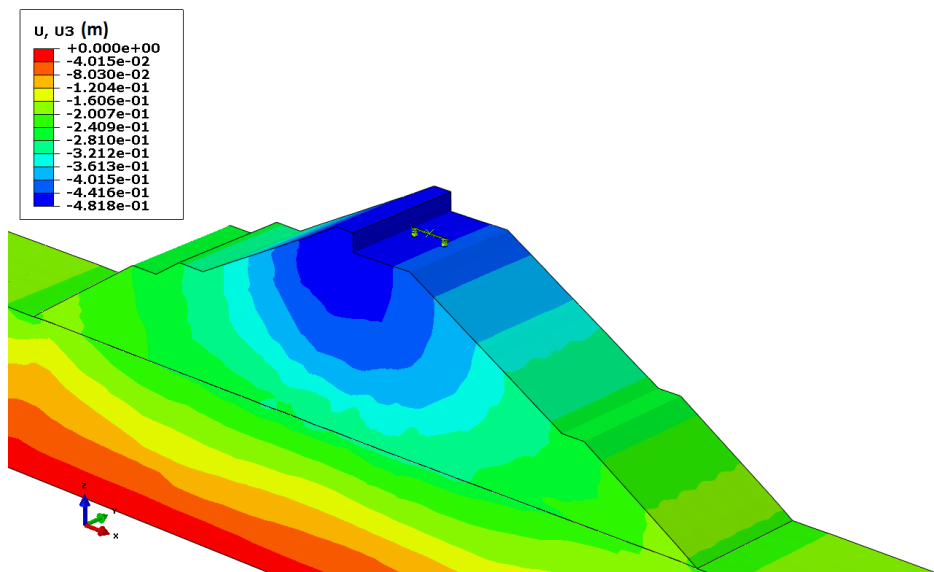
که این میزان نشست بیشتر از مقدار نشست مورد نظر (۷۵ میلی‌متر) است. از آنجایی که در این حالت شمع بر روی بستر قرار گرفته است می‌توان نتیجه گرفت چنانچه تغییر شکل‌های ایجاد شده در شمع‌ها را نادیده بگیریم، میزان نشست بستر موج‌شکن تحت بار زلزله حدود ۱۹ سانتی‌متر می‌باشد.

۵-۷-۲ شمع با طول ۵۰/۸ متر

در این مدل شمع‌های فولادی ۱۴ متر در بستر دریا نفوذ می‌کنند، با توجه به لایه‌بندی بستر و عمق هر لایه، شمع‌ها به طور کامل در لایه ماسه کربناته که دارای عمق ضخامت ۱۰ متر می‌باشد کوبیده می‌شوند و ۴ متر نیز در لایه دوم که از جنس شن و ماسه متراکم است نفوذ می‌کنند. شکل (۵-۳۵) شماتیک نفوذ شمع‌ها در بدنه موج‌شکن و بستر دریا را نشان می‌دهد.

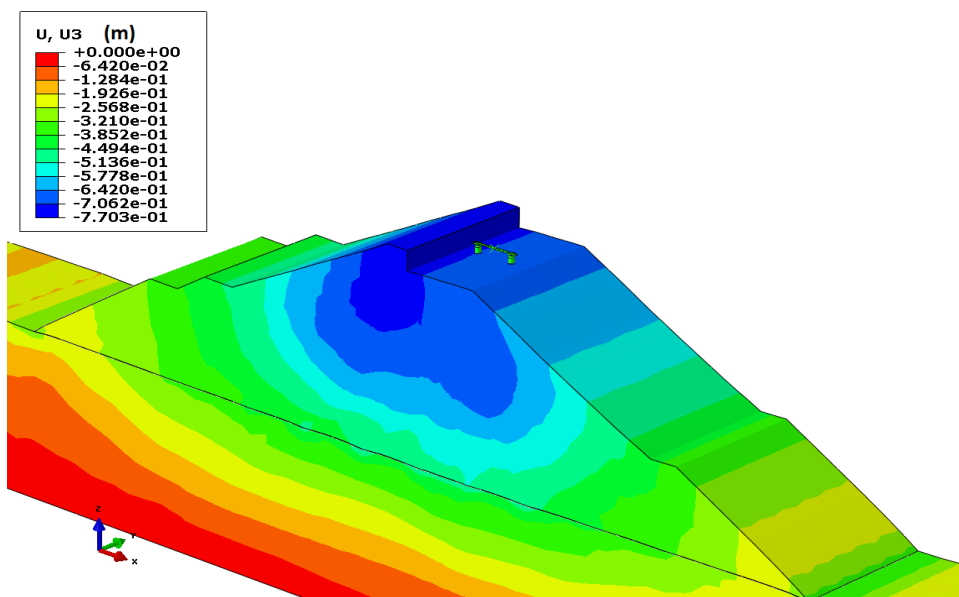


شکل ۵-۳۵- مدل موج‌شکن و شمع با طول ۵۰/۸ متر

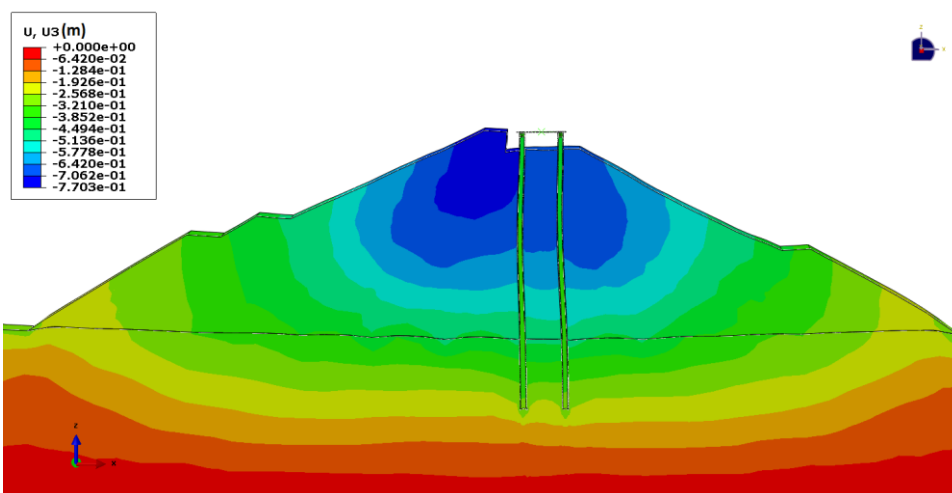


شکل ۵-۳۶- کانتور نشست مجموعه موج شکن و شمع با طول ۵۰/۸ متر پس از تحلیل استاتیکی

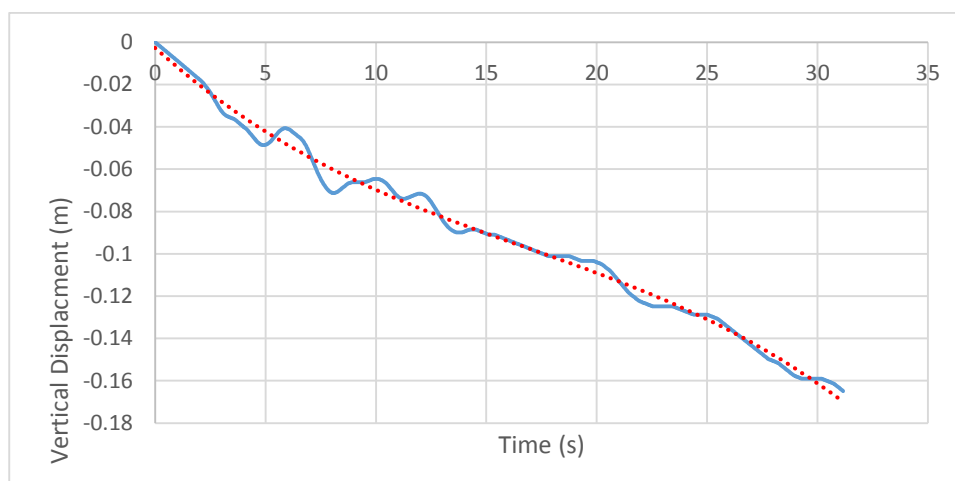
طبق روال گفته شده در قسمت‌های قبل، ابتدا مدل به صورت استاتیکی تحلیل می شود و سپس شتاب‌نگاشت زلزله به بستر سنگی اعمال می شود. شکل‌های (۵-۳۶ و ۵-۳۷) به ترتیب مقدار نشست موج شکن و بستر را پس از تحلیل استاتیکی و تحلیل دینامیکی نشان می دهد.



شکل ۵-۳۷- کانتور نشست مجموعه موج شکن و شمع با طول ۵۰/۸ متر پس از تحلیل دینامیکی

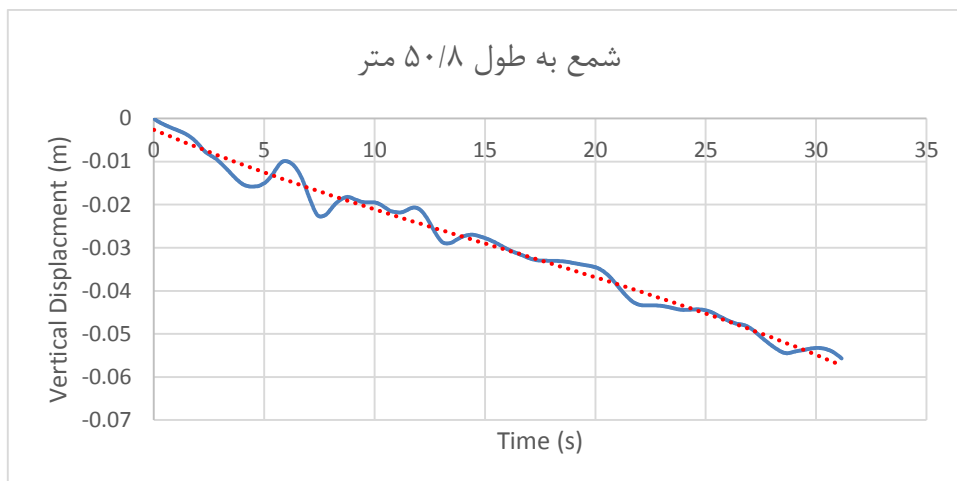


شکل ۵-۳۸- تغییر شکل ایجاد شده در مقطع موج شکن و شمع با طول ۵۰/۸ متر پس از اعمال بار دینامیکی زلزله



شکل ۵-۳۹- نمودار جابجایی نقطه میانی تاج موج شکن تحت بار زلزله (شمع با طول ۵۰/۸ متر)

با توجه به نمودار ارائه شده در شکل (۵-۲۹)، چنانچه شمع‌هایی به طول ۵۰/۸ متر در بدنه موج شکن کوبیده شود، تاج موج شکن حدود ۱۷ سانتی متر دچار نشست می‌شود. به عبارتی می‌توان گفت وجود شمع مانع حرکت مصالح بدنه موج شکن تحت بار زلزله می‌شود.



شکل ۵-۴- نمودار جابجایی قائم نقطه میانی تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله (شمع با طول ۵۰/۸ متر)

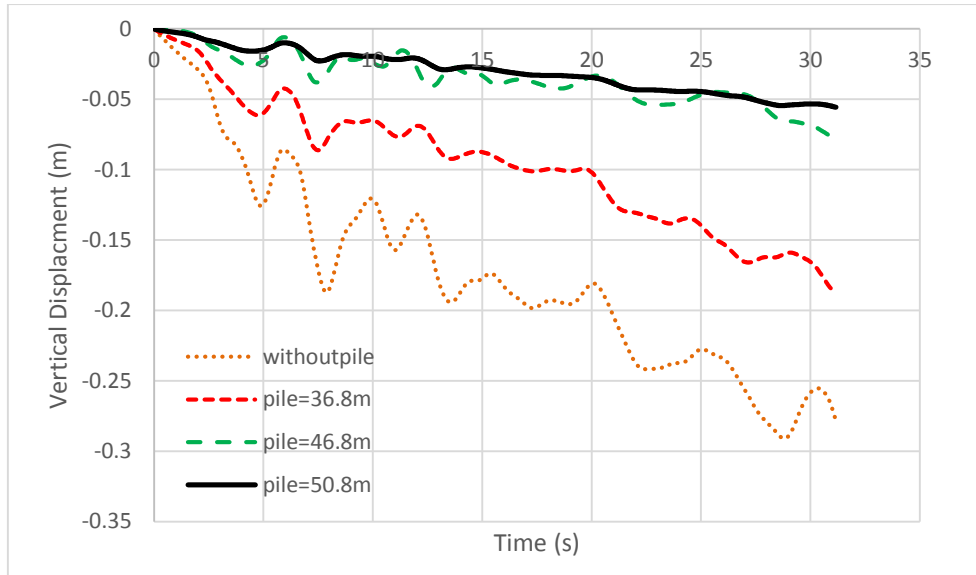
همانطور که از نمودار ارائه شده در شکل (۵-۴) پیداست میزان نشست قائم تکیه‌گاه خط لوله در صورتی که از شمع‌هایی به طول ۵۰/۸ متر در بدنه موج‌شکن استفاده شود، مقدار ۵۵ میلی متر بدست می‌آید. این مقدار کمتر از ماکزیمم نشست پیشنهادی توسط مهندسین مشاور می‌باشد. اگرچه با افزایش عمق نفوذ شمع میزان نشست تحت بار زلزله کاهش می‌یابد، ولی از آنجایی که در تراز ۱۰- متر از بستر دریا با لایه‌ای از شن و ماسه متراکم مواجه هستیم لذا از نظر اجرایی و اقتصادی نفوذ شمع به این لایه توجیه ندارد.

۵-۷-۳ مقایسه نشست خط لوله در صورت عدم حضور شمع و همراه

شمع

در صورت عبور خط لوله از روی تاج موج‌شکن چنانچه از شمع به عنوان تکیه‌گاه خط لوله استفاده نشود، مقدار نشست در طول زلزله ۲۹ سانتی متر بدست می‌آید، این در حالی است که چنانچه از شمع به عنوان تکیه‌گاه استفاده کنیم میزان نشست با توجه به طول شمع‌های به کار برده شده کاهش می‌یابد. همانطور که بیان شد برای بررسی اثر طول شمع‌ها در میزان جابجایی قائم خط لوله، شمع‌هایی به طول ۳۶/۸، ۴۶/۸ و ۵۰/۸ مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه مقایسه جابجایی قائم خط لوله برای

حالت‌های بیان شده آورده شده است (شکل ۵-۴۱).



شکل ۵-۴۱- مقایسه نشست قائم تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله برای حالت‌های بدون شمع، شمع با طول ۳۶/۸ متر، شمع با طول ۴۶/۸ متر و شمع با طول ۵۰/۸ متر

با توجه به شکل (۵-۴۱) می‌توان به نتایج زیر اشاره نمود:

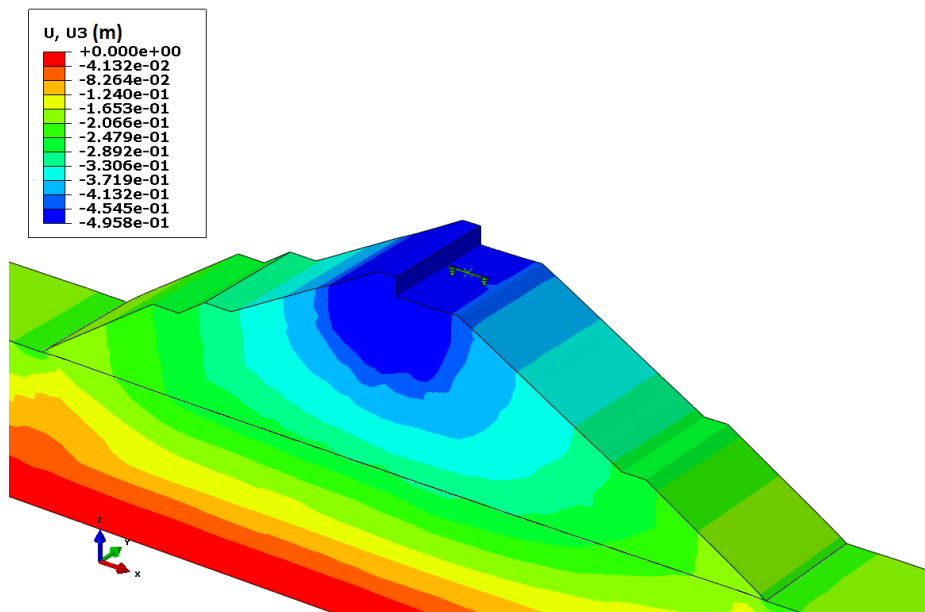
در حالت عدم حضور شمع مقادیر نشست قائم خط لوله فولادی به مراتب بیشتر از حالت حضور شمع می‌باشد. که این مسأله تأثیر مثبت شمع به عنوان تکیه‌گاه خط لوله فولادی را نشان می‌دهد. با افزایش طول شمع میزان جابجایی قائم به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۵-۴۱) با افزایش طول شمع از ۳۶/۸ متر به ۴۶/۸ متر میزان نشست قائم به اندازه ۱۱ سانتی‌متر کاهش می‌یابد. چنانچه از شمع‌هایی به طول ۵۰/۸ متر استفاده کنیم میزان جابجایی قائم نسبت به حالتی که شمع‌ها ۴۶/۸ متر طول دارند ۲ سانتی‌متر بهبود پیدا می‌کند. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان بیان کرد که میزان نشست خط لوله با طول شمع رابطه عکس دارد، به طوری که با افزایش طول شمع میزان نشست کاهش می‌یابد. البته به این نکته نیز باید توجه کرد که با توجه به شرایط لایه‌بندی بستر در محل پروژه و وجود لایه متراکم افزایش بیشتر طول شمع به لحاظ اجرایی و اقتصادی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۵-۸ بررسی ابعاد سطح مقطع شمع

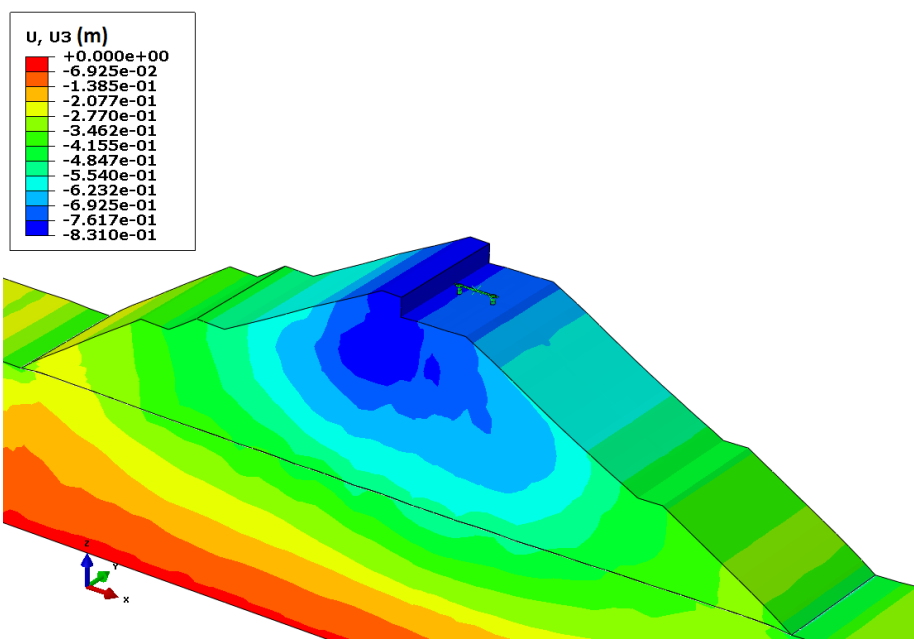
سطح مقطع شمع تابعی از بار وارده از طرف خط لوله ی عبوری از روی آن می باشد و با توجه به عدم تغییر این بار لذا احتمال تغییر سطح مقطع شمع های عبوری از بدنه ی موج شکن بسیار کم می باشد. همان گونه که قبلاً گفته شد شمع های مورد استفاده در این پروژه سطح مقطعی دایره ای با قطر ۴۲ اینچ و ضخامت ۲۶ میلیمتر می باشند. به منظور بررسی تاثیر تغییر احتمالی ابعاد سطح مقطع شمع بر جابجایی قائم خط لوله در هنگام وقوع زلزله، ۲ شمع با قطر ۳۴ اینچ و ۵۲ اینچ با همان ضخامت ۲۶ میلیمتر مدلسازی گردیده و میزان نشست قائم این ۲ با مدل اصلی مقایسه شده است.

۵-۸-۱ شمع با قطر ۳۴ اینچ

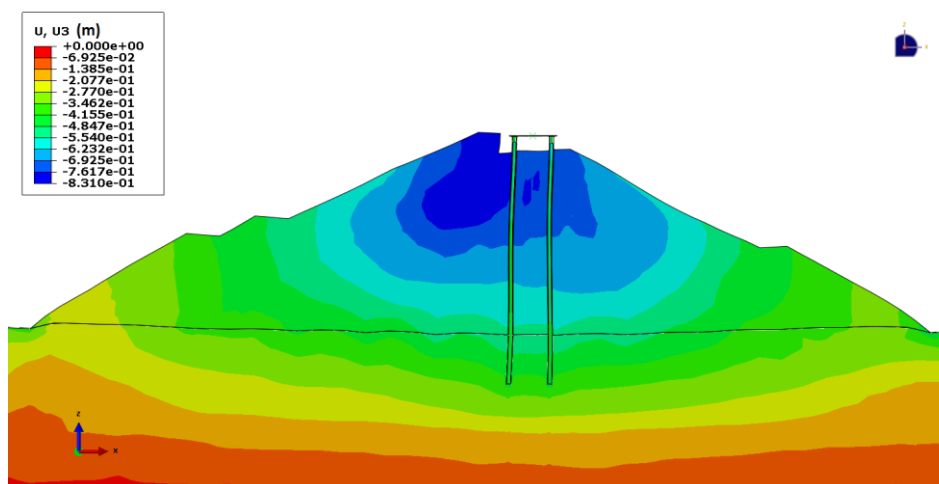
در این مدل شمع هایی با طول ۴۶/۸ متر، قطر ۳۴ اینچ و ضخامت ۲۶ میلیمتر، به عنوان تکیه گاه خط لوله عبوری از روی تاج موج شکن مود بررسی قرار گرفت.



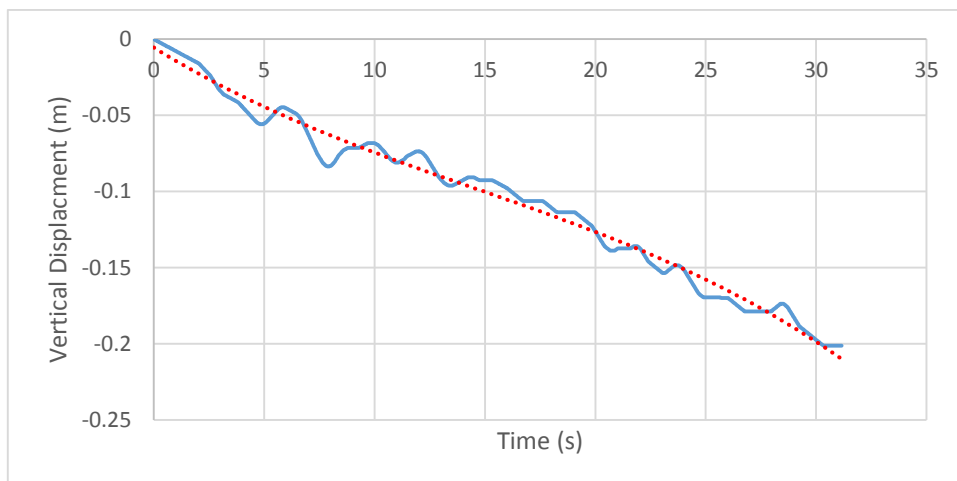
شکل ۵-۴۲- کانطور نشست مجموعه موج شکن و شمع با قطر ۳۴ اینچ پس از تحلیل استاتیکی



شکل ۴۳-۵ - کانتور نشست مجموعه موج شکن و شمع با قطر ۳۴ اینچ پس از تحلیل دینامیکی

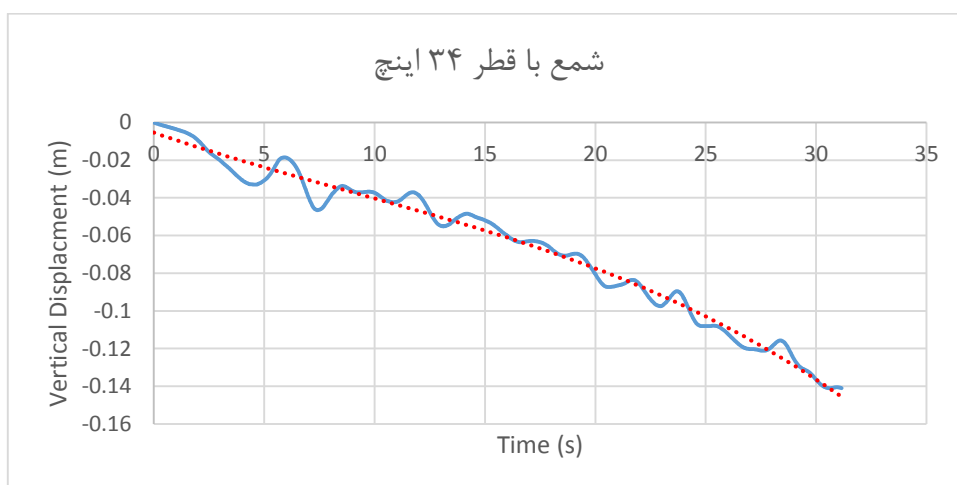


شکل ۴۴-۵ - تغییر شکل ایجاد شده در مقطع موج شکن و شمع به قطر ۳۴ اینچ پس از اعمال بار دینامیکی زلزله



شکل ۵-۴۵- نمودار جابجایی نقطه میانی تاج موج‌شکن تحت بار زلزله (شمع با قطر ۳۴ اینچ)

براساس نمودار ارائه شده در شکل (۵-۴۵) چنانچه از شمع‌هایی به قطر ۳۴ اینچ به عنوان تکیه‌گاه خط لوله استفاده شود، تاج موج‌شکن نشست ۲۰ سانتی‌متری را در زمان اعمال بار زلزله تجربه خواهد کرد.

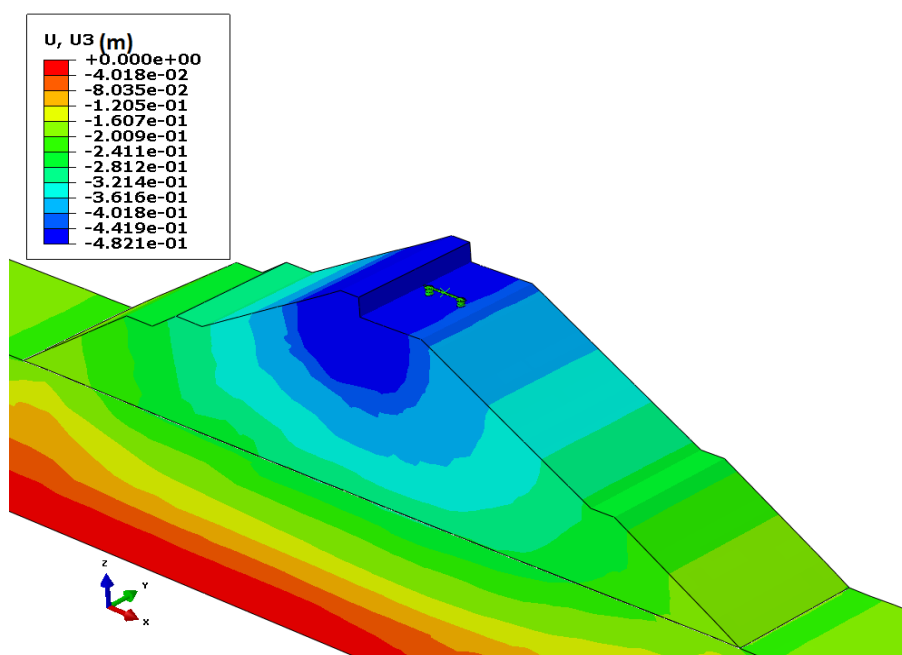


شکل ۵-۴۶- نمودار جابجایی قائم نقطه میانی تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله (شمع با قطر ۳۴ اینچ)

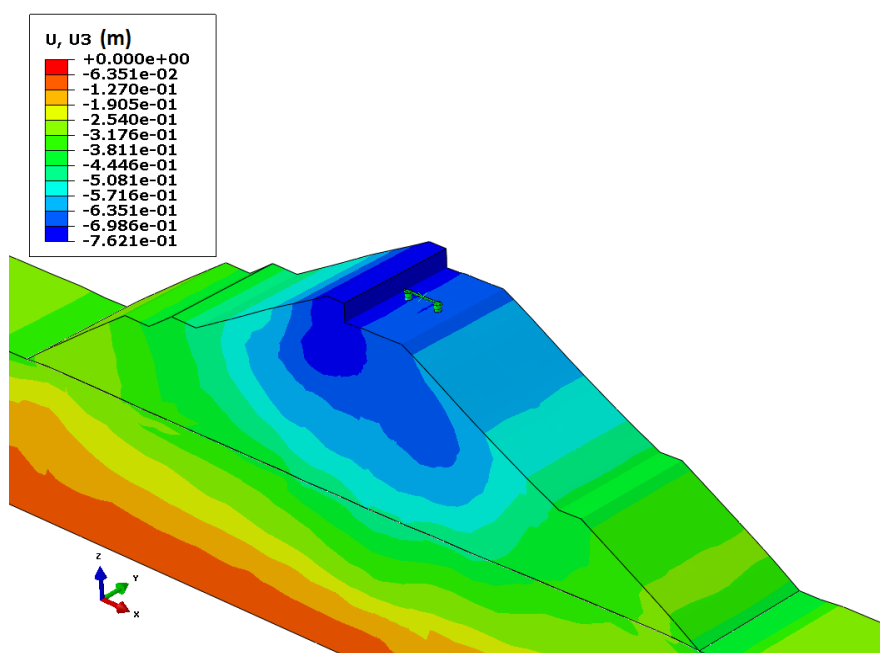
با توجه به نمودار ارائه شده در شکل (۵-۴۶)، میزان نشست قائم تکیه‌گاه خط لوله برای شمع به طول ۴۶/۸ متر و قطر ۳۴ اینچ، ۱۴ سانتی‌متر بدست می‌آید، که این مقدار ۲ برابر مقدار جابجایی قائم بدست آمده برای شمع با طول یکسان و قطر ۴۲ اینچ می‌باشد. در رابطه با شمع به قطر ۳۴ اینچ ذکر این نکته اهمیت دارد که شمع در زمان زلزله دچار شکست نمی‌شود و سالم می‌ماند.

۵-۸-۲ شمع با قطر ۵۲ اینچ

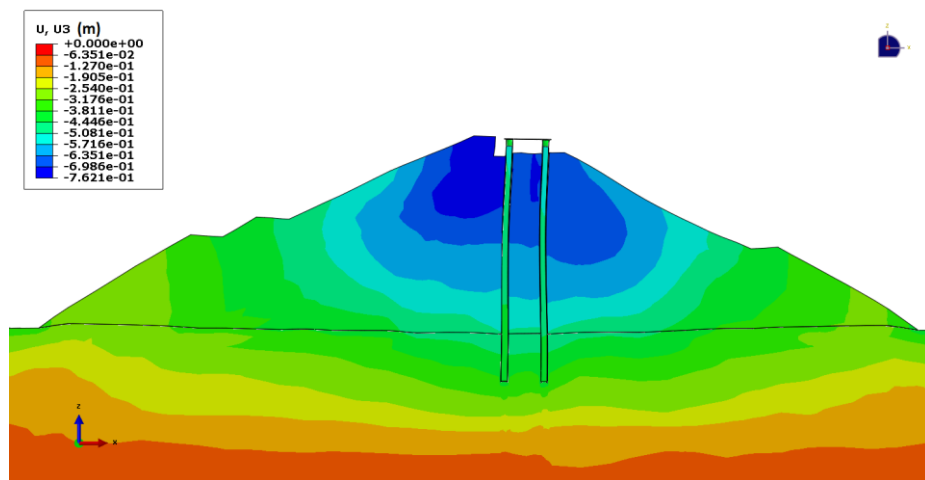
در این مدل شمع‌هایی با طول ۴۶/۸ متر، قطر ۵۲ اینچ و ضخامت ۲۶ میلیمتر، به عنوان تکیه‌گاه خط لوله عبوری از روی تاج موج‌شکن مورد بررسی قرار گرفت.



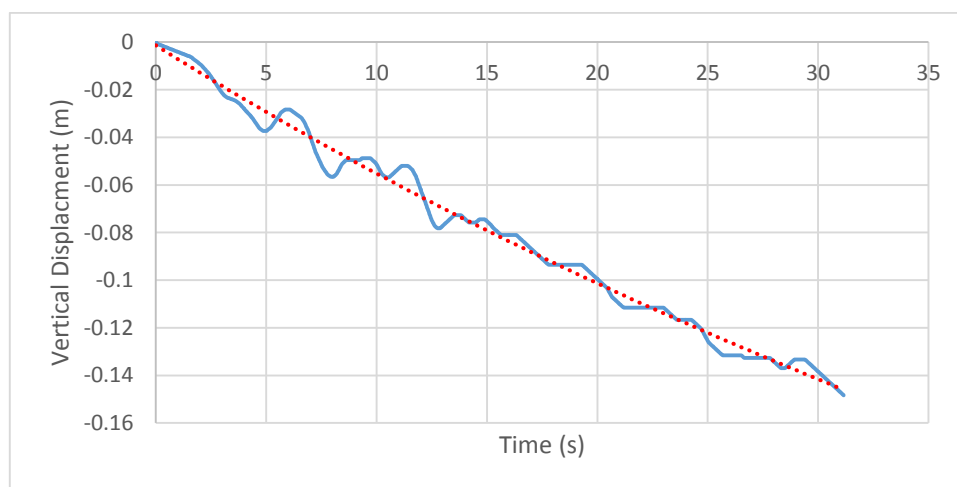
شکل ۵-۴۷- کانتور نشست مجموعه موج‌شکن و شمع با قطر ۵۲ اینچ پس از تحلیل استاتیکی



شکل ۵-۴۸- کانتور نشست مجموعه موج‌شکن و شمع با قطر ۵۲ اینچ پس از تحلیل دینامیکی

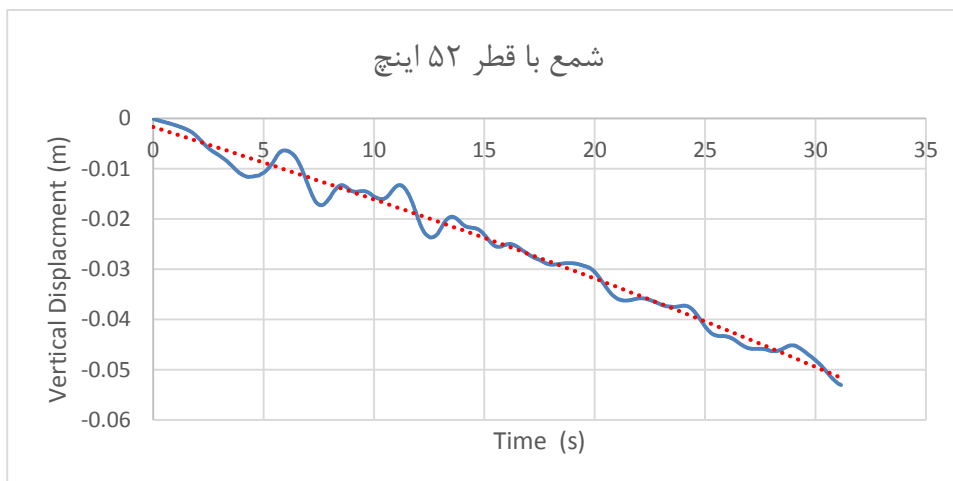


شکل ۵-۴۹- تغییر شکل ایجاد شده در مقطع موج شکن و شمع به قطر ۵۲ اینچ پس از اعمال بار دینامیکی زلزله



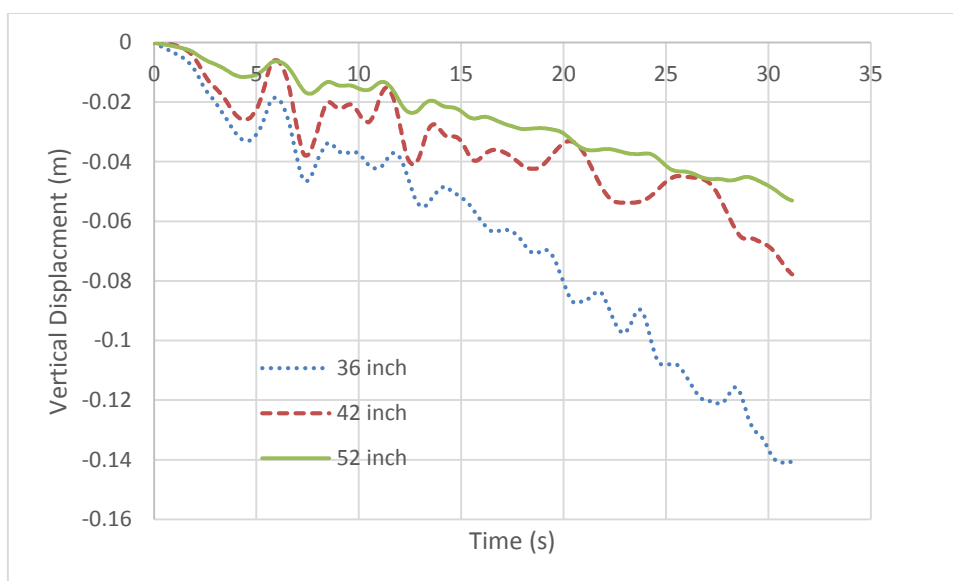
شکل ۵-۵۰- نمودار جابجایی قائم نقطه میانی تاج موج شکن تحت بار زلزله (شمع با قطر ۵۲ اینچ)

براساس نمودار ارائه شده در شکل (۵-۵۰) چنانچه از شمع‌هایی به قطر ۵۲ اینچ به عنوان تکیه‌گاه خط لوله استفاده شود، تاج موج شکن نشست ۱۵ سانتی‌متری را در زمان اعمال بار زلزله تجربه خواهد کرد.



شکل ۵-۵۱- نمودار جابجایی قائم نقطه میانی تکیه‌گاه خط لوله تحت بار زلزله (شمع با قطر ۵۲ اینچ)

همانطور که از نمودار ارائه شده در شکل (۵-۵۱) پیداست، در صورت افزایش قطر شمع فولادی به ۵۲ اینچ نشست تکیه‌گاه خط لوله به مقدار ۵۳ میلی‌متر کاهش پیدا می‌کند که در محدوده‌ی تعیین شده توسط شرکت مشاور خط لوله می‌باشد.



شکل ۵-۵۲- مقایسه نشست قائم خط لوله تحت بار زلزله برای حالت‌های شمع با قطر ۳۴ اینچ، شمع با قطر ۴۲ اینچ و شمع با قطر ۵۲ اینچ

طبق نمودار ارائه شده در شکل (۵-۵۲) با افزایش سطح مقطع شمع میزان نشست قائم کاهش می‌یابد. چنانچه شمع‌هایی با قطر ۳۴ اینچ را جایگزین شمع‌های ۴۲ اینچی کنیم مقدار نشست قائم

خط لوله به میزان ۵۵ درصد افزایش می‌یابد. در صورتی که از شمع هایی با قطر ۵۲ اینچ استفاده شود میزان نشست خط لوله تحت بار لرزه‌ای ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. لذا می‌توان گفت که میزان نشست قائم خط لوله با سطح مقطع شمع رابطه عکس دارد.

۵-۹ معیار سنجش خسارت در موج شکن توده سنگی

همان گونه که بیان شد امروزه طراحی کلیه ی انواع موج شکن ها (توده سنگی و کیسونی) با استفاده از روش های طراحی بر مبنای عملکرد انجام می‌شود و تغییر شکل های رخ داده در بدنه ی موج شکن مناسب ترین معیار جهت تعریف شاخص خسارت در طراحی براساس عملکرد است همان گونه که قبلاً بیان شد سیهان و یوکسل (۲۰۱۱ میلادی) به منظور برآورد میزان خسارت وارده به موج شکن های توده سنگی در هنگام وقوع زلزله، به بررسی تغییر شکل های رخ داده در موج شکن های و توده سنگی تحت بارگذاری چرخه ای پرداختند. آن ها در این تحقیق با استفاده از ضریب S به تعیین میزان خسارت وارده به موج شکن ها ناشی از تغییر شکل های چرخه ای پرداختند. مقدار این ضریب از رابطه ی زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{-A}{D_{n50}^2} \quad (7-5)$$

که در آن A - مساحت فرسایش شده حوالی آب راکد و D_{n50} قطر اسمی سنگدانه ها می‌باشد.

$$D_{n50} = \left(\frac{W_{n50}}{g \cdot \rho_a} \right)^{1/3} \quad (8-5)$$

در رابطه بالا W_{n50} وزن متوسط سنگدانه ها، g شتاب گرانش زمین و ρ_a وزن مخصوص خاک است.

ون در مییر (۱۹۹۵) بیان نمود که چنانچه ضریب S کمتر یا مساوی ۲ باشد به معنی عدم آسیب به موج‌شکن است، بین ۲ تا ۳ به معنی آسیب جزئی و قابل چشم‌پوشی بوده و چنانچه این ضریب برابر ۸ بدست آید به معنی گسیختگی و تخریب کامل موج‌شکن می‌باشد (Van der Meer, 1995).

به این ترتیب و با تعیین قطر سنگدانه‌های تشکیل دهنده‌ی هر لایه از خاک، با تعیین نمودن میزان تغییر شکل‌های بدنه‌ی موج‌شکن پس از اعمال بارگذاری لرزه‌ای تعیین سطح خسارت وارده به بدنه موج‌شکن توده‌سنگی در نتیجه‌ی اندرکنش لرزه‌ای موج‌شکن توده‌سنگی - شمع - بستر امکان‌پذیر می‌گردد.

به منظور درک بهتر از تأثیر افزایش طول شمع و تغییر سطح مقطع شمع بر روی تغییر شکل‌های لرزه‌ای ایجاد شده در موج‌شکن توده‌سنگی مورد مطالعه رابطه (۵-۷) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی در جدول (۵-۶ و ۷-۵) بیان شده است.

جدول ۵-۶- سطح خسارت در موج‌شکن با طول شمع متفاوت و قطر ثابت ۴۲ اینچ

مدل	سطح خسارت
بدون شمع	۳/۷۸
شمع به طول ۳۶/۸ متر	۳/۳۲
شمع به طول ۴۶/۸	۲/۷۳
شمع به طول ۵۰/۸ متر	۲/۶۴

در مورد مدل‌های مورد بررسی در جدول بالا می‌توان گفت:

در حالتی که شمع از بدنه موج‌شکن عبور نکرده باشد و حالتی که از شمع به طول ۳۶/۸ متر استفاده شده، خسارت سازه‌ای را بر بدنه موج‌شکن شاهد خواهیم بود.

با افزایش طول شمع از ۳۶/۸ متر به ۴۶/۸ متر میزان سطح خسارت وارده به موج‌شکن حدود ۲۱

درصد کاهش می‌یابد که این نشان دهنده اثر مثبت استفاده از شمع در رفتار لرزه‌ای موج‌شکن توده‌سنگی می‌باشد. و سطح خسارت وارد شده با طول شمع رابطه عکس دارد.

جدول ۵-۷- سطح خسارت در موج‌شکن با شمع به طول ثابت ۴۶/۸ متر و قطر متفاوت

سطح خسارت	مدل
۲/۹۴	شمع با قطر ۳۴ اینچ
۲/۷۳	شمع با قطر ۴۲ اینچ
۲/۶۳	شمع با قطر ۵۲ اینچ

بر اساس سطح خسارت بدست آمده از رابطه (۵-۷) در هیچ یک از مدل‌های مورد بررسی در جدول (۵-۶) سطح خسارت وارده قابل توجه نبوده است، و همانطور که دیده می‌شود سطح خسارت با افزایش سطح مقطع شمع‌ها کاهش می‌یابد. چنانچه قطر شمع از ۳۴ اینچ به ۴۲ اینچ افزایش یابد، پارامتر سطح خسارت حدود ۸ درصد کاهش خواهد یافت.

فصل ۶ نتایج و مشاهدات

۶-۱ نتایج کلی

در این پژوهش به بررسی نشست موج‌شکن به منظور عبور خطوط لوله انتقال محصولات نفتی از جمله LPG از روی تاج موج‌شکن پرداخته شد. با توجه به محدودیت نشست غیر یکنواخت تکیه‌گاه‌های خط لوله، تخمین میزان نشست تاج موج‌شکن حائز اهمیت می‌باشد. خط لوله فوق نسبت به نشست قائم بسیار حساس بوده و حداکثر نشست مجاز تکیه‌گاه‌های آن از طرف کارشناسان بعضاً به مقادیر ناچیزی در حدود صفر محدود شده است که دست یابی به این مقدار نشست عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد. در نهایت پس از تبادل نظرهای کارشناسی، حداکثر میزان نشست بین دو تکیه‌گاه به فاصله ۲۵ متر به ۷۵ میلی‌متر محدود شده است. طبق مدل‌سازی عددی انجام شده، تاج موج‌شکن در شرایط زلزله حدود ۳۰ سانتی‌متر نشست خواهد داشت (۴ برابر حداکثر مقدار مجاز)، در این شرایط برای کنترل میزان نشست در زمان زلزله، استفاده از شمع به منظور انتقال بار لوله‌ها به لایه‌های تحتانی بستر دریا مورد بررسی قرار گرفت.

در این پژوهش اندرکنش لرزه‌ای موج‌شکن توده‌سنگی و شمع‌های عبوری از آن در پروژه‌ی موج‌شکن‌های توده‌سنگی بندر پارس جنوبی به کمک روش عددی و با استفاده از نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی اثر طول شمع و سطح مقطع شمع براندرکنش لرزه‌ای موج‌شکن و شمع بررسی شد.

بر اساس طراحی‌های انجام پذیرفته در پارس جنوبی، شمع‌های فولادی اجرا شده دارای طول ۴۶/۸ متر، قطر ۴۲ اینچ و ضخامت ۲۶ میلیمتر می‌باشند. در این حالت رفتار موج‌شکن همراه شمع‌های فولادی تحت بار زلزله مورد بررسی قرار گرفت و میزان نشست قائم تکیه‌گاه خط لوله در این حالت در حدود ۷۶ میلیمتر بدست آمد.

به منظور بررسی اثر طول شمع‌ها در میزان نشست خط لوله فولادی علاوه بر مدل‌سازی شمع با طول ۴۶/۸ متر شمع‌هایی با طول ۳۶/۸ متر و ۵۰/۸ متر نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در جدول (۱-۶) ارائه شده است.

جدول ۱-۶- میزان نشست خط لوله برای شمع‌هایی با طول متفاوت و سطح مقطع یکسان

۵۰/۸	۴۲/۸	۳۶/۸	طول شمع (m)
-۰/۰۵۵	-۰/۰۷۶	-۰/۱۸	نشست خط لوله (m)

به منظور بررسی اثر سطح مقطع شمع در میزان نشست خط لوله فولادی شمع‌هایی با قطر ۳۴ و ۵۲ اینچ مدل‌سازی شد. نتایج بدست آمده در جدول (۲-۶) ارائه شده است.

جدول ۲-۶- میزان نشست خط لوله برای شمع‌هایی با قطر متفاوت و طول ثابت

۵۲	۴۲	۳۴	قطر شمع (inch)
-۰/۰۵۲	-۰/۰۷۶	-۰/۱۴	نشست خط لوله (m)

در نهایت از ضریب سنجش خسارت (S)، به عنوان معیار خسارت وارد شده به موج‌شکن در هر حالت استفاده شد.

برمبنای مدل‌سازی‌های انجام پذیرفته و تحلیل‌های انجام گرفته نتایج زیر قابل استنتاج می‌باشد:

تداخل سیستم موج‌شکن و شمع باعث کاهش نشست ایجاد شده در تاج موج‌شکن می‌شود. به طوری که میزان نشست با طول شمع رابطه عکس دارد.

استفاده از شمع‌های فولادی به عنوان تکیه‌گاه تاثیر قابل توجهی در کنترل نشست خط لوله عبوری از روی تاج موج‌شکن دارد.

در مدل‌های عددی مورد بررسی میزان نشست خط لوله تحت بار زلزله با طول شمع رابطه عکس دارد به طوری که با افزایش طول شمع‌ها، مقدار نشست کاهش می‌یابد.

میزان نشست خط لوله تحت بار زلزله با قطر شمع‌های فولادی رابطه عکس دارد، یعنی با افزایش قطر شمع‌ها میزان نشست کاهش می‌یابد. اگرچه بر مبنای برآورد صورت گرفته افزایش سطح مقطع منجر به کاهشی تا ۳۵ درصد در نشست شمع‌ها خواهد شد، اما از دیدگاه اقتصادی و اجرایی، سطح مقطع شمع‌ها فقط و فقط تابعی از بار وارده از طرف خط لوله‌ی عبوری از روی آن به شمع می‌باشد. در بحث تحلیل رفتار لرزه‌ای موج‌شکن توده‌سنگی، عبور شمع از بدنه موج‌شکن تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش خسارت وارد شده به بدنه موج‌شکن دارد. به طوری که میزان خسارت وارده تا حدود ۳۰ درصد برای شمع با طول ۵۰/۸ متر کاهش می‌یابد.

اگرچه در مدل‌های مورد بررسی مقادیر نشست و تغییر شکل‌های موج‌شکن توده سنگی تحت بارگذاری لرزه‌ای مقادیر چشمگیری نبوده اند اما در مواردی مقادیر به دست آمده برای شاخص S حاکی از وقوع خسارت لرزه‌ای در موج شکن ($S > 3$) بوده است.

۶-۲ پیشنهادات

از آنجایی که این پژوهش به صورت مطالعه‌ی موردی انجام پذیرفته است، پارامترهای مربوط به بدنه موج‌شکن مورد بررسی قرار نگرفت، لذا پیشنهاد می‌شود تأثیر پارامترهای هندسی موج‌شکن نظیر ارتفاع موج‌شکن و شیب موج‌شکن در تحلیل لرزه‌ای مورد بررسی قرار گیرد.

تأثیر جنس لایه‌های بستر بر روی نشست موج‌شکن بررسی شود.

در این پژوهش، شمع‌ها به صورت قائم مورد بررسی قرار گرفتند، برای پژوهش‌های بعدی پیشنهاد می‌شود اثر شمع‌های مایل مورد بررسی قرار گیرد.

در پژوهش‌های بعدی اندرکنش موج‌شکن - شمع و سیال آب مورد بررسی قرار گیرد.

در این پژوهش از مدل رفتاری موه‌رکلمب برای مدل‌سازی رفتار مصالح استفاده شد. در پژوهش‌های بعدی از مدل‌های رفتاری متفاوتی برای مصالح استفاده شود.

شمع‌های مورد بررسی در این پژوهش از نوع فولادی بودند، برای پژوهش‌های بعدی می‌توان شمع‌های بتنی را مورد مطالعه قرار داد.

مراج

چگینی، و (۱۳۷۸). راهنمای طراحی موج‌شکن‌ها. سه جلد، کتب مهندسی دریا شرکت جهاد تحقیقات

حسینی، ع و حاجی کندی، ه (۱۳۹۵). مدل‌سازی دینامیکی رفتار لرزه‌ای دیوارهای موج‌شکن‌های نامنظم بتنی ساحلی تحت اثر زلزله.

ذوالفقاری فر، س. ی. و تورنگ، ف. (۱۳۹۵). مروری بر تاریخچه موج شکن ها و انواع آن. همایش سراسری فناوری و تکنولوژی در مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک، گروه آموزش و پژوهش شرکت مهندسی باروگستر پارس.

رحیمی، ا و فلاح، ب (۱۳۹۵). خاکریزهای مستغرق بر بسترهای ریزدانه (مطالعه موردی). انتشارات مینوفر.

سیفی، ح و فاخر، ع (۱۳۸۶). مطالعه محلی رفتار جانبی تک شمع (monopile) در بندر پتروشیمی پارس - عسلویه. نهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، انجمن مهندسی دریایی ایران.

صادقپور، ا و مبرز، ر (۱۳۸۳). آنالیز پایداری و کنترل نشست مقطع موج شکن بندر پتروشیمی پارس. اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه شریف.

عطایی آشتیانی، ب و نجفی جیلانی، ع. ا. "مهندسی سواحل". انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۴

عفتی، م و لشته نشایی، م ا (۱۳۸۷). اثر نیروی امواج و زلزله بر موج‌شکن‌های توده سنگی. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق.

طباطبائی، س.س و معافی مدنی، س.ح (۱۳۹۸). بررسی و مقایسه نتایج طراحی اسکله شمع و عرشه به روش نیروئی و عملکردی. نشریه عمران و پروژه

ناصری زاده، ر. ا و قنبریان، م (۱۳۸۳). اجرای موج شکن های سنگی از طریق دریا. ششمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، سازمان بنادر و کشتی رانی.

نشریه شماره ۵-۳۰۰ (۱۳۸۵). آیین نامه طراحی بنادر و سازه‌های دریایی ایران (موج‌شکن‌ها و سازه‌های

نصیری راد، ک. روش های ساخت موج شکن. انتشارات فدک ایساتیس، ۱۳۹۱.

وفایی، ف. (۱۳۹۰). ارزیابی اثرات زیست محیطی احداث موج شکن صیادی جزیره قشم. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Balendra, S. (2005). "Numerical modeling of dynamic soil-pile-structure interaction".

Banijamali, B. and M. Banijamali (2011). "Basic Design of the Pars Petrochemical Port Breakwaters within a Region of Deep Water and High Seismic Activity." Coastal Engineering Proceedings **1**(32): 36.

Baird, W. F (1980). Report on the damages to the Sines Breakwater, Portugal. Coastal Engineering 1980: 3063-3077.

Bottin, R. R. (1982). Lakeview Park Beach Erosion Study, Ohio, The Station.

Broderick, L. (1983). Riprap stability a progress report. Coastal Structures' 83, ASCE.

Bruun, P. M. and P. Johannesson (1976). "Parameters affecting stability of rubble mounds." Journal of Waterways, Harbors & Coast Eng Div **102**(ASCE 312136).

Burcharth, H. and S. Hughes (2006). Coastal Engineering Manual: Fundamentals of Design, Chapter 5, Part VI, USA.

CERC (1984). "Shore Protection Manuel". U.S. Army of Corp, Vicksburg, USA.

Chaudhary, B. (2017). "Effects of duration and acceleration level of earthquake ground motion on the behavior of unreinforced and reinforced breakwater foundation." Soil Dynamics and Earthquake Engineering **98**: 24-37.

Chopra, A. K. and S. Gupta (1981). "Hydrodynamic and foundation interaction effects in earthquake response of a concrete gravity dam." Journal of the Structural Division **107**(8): 1399-1412.

Cihan, K. and Y. Yuksel (2011). "Deformation of rubble-mound breakwaters under cyclic loads." Coastal Engineering **58**(6): 528-539.

Curren, C. R. and C. E. Chatham Jr (1977). Imperial Beach, California, Design of Structures for Beach Erosion Control; Hydraulic Model Investigation, ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MISS.

Curren, C. R. and C. E. Chatham Jr (1980). Oceanside Harbor and Beach, California, Design of Structures for Harbor Improvement and Beach Erosion Control; Hydraulic Model Investigation, ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS HYDRAULICS LAB.

Dally, W. R. and J. Pope (1986). Detached breakwaters for shore protection, COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER VICKSBURG MS.

Dentale, F. Donnarumma, G, Pugliese Carratelli, E (2012). "Wave Run Up and Reflection on Tridimensional Virtual Breakwater. J Hydrogeol Hydrol Eng 1: 1." of **8**: 2.

Edge B.L., Magoon O.T., Liagre P. Y. and Macquet S. (2001). "Technical Discoveries from the Cherbourg Breakwater", Coastal Engineering 2000: pp. 1678-1687. doi: 10.1061/40549(276)130

Fried, I. (1976). Protection by means of offshore breakwaters. 15 th Coastal Engineering Conference ;Honolulu, HI(USA); 11 July 1976. Proceedings of the 15 th Coastal Engineering Conference held at Honolulu, Hawaii.

Gomes, F. V. Pinto, F.T. Dias, E.B.(2009). "Two-dimensional physical modeling of the northern breakwater of Leixões harbor, Portugal: Case study." Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering **135**(6): 288-295.

Gourvenec, S. and M. Randolph (2011). Offshore geotechnical engineering, CRC Press.

Harlow, E. H. (1980). "Large rubble-mound breakwater failures." Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division **106**(2): 275-278.

Hashemi, S. H. Rezaei, M. Soleimani, V. (2011) " Local damage modeling of ductile fracture in API pipeline steel of grade X65 and X70" 19th Annual Conference on

Mechanical Engineering-ISME2011 10-12 May, 2011, The University of Birjand, Birjand, Iran

Horikawa, K. and C. Koizumi (1974). An experimental study on the function of an offshore breakwater. 29th Annual Conference.

Jafarian, Y. Alielahi, H. Abdollahi, A.S. and Vakili, B. (2010). "Seismic numerical simulation of breakwater on a liquefiable layer: IRAN LNG port", *Electron J Geotech Eng* 15, 1-11.

Jafarian, Y. and M. Bagheri (2018). Earthquake-Induced Deformation of Breakwater on Liquefiable Soil with and Without Remediation: Case Study of Iran LNG Port. Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes Conference, Springer.

Kiara, A. Memos, C. and Tsiachris, A. (2001). "Some Practical Aspects on the Seismic Behavior of RubbleMound Breakwaters". *Ports '01*: pp. 1-10. doi: 10.1061/40555(2001)4.

Kramer, S. (1996). "Geotechnical earthquake engineering Prentice Hall Upper Saddle River 569."

Kraus, N. C. (1983). Applications of a shoreline prediction model. Coastal Structures' 83, ASCE.

Matsuoka, M. and Y. Ozawa (1983). Application of a Numerical Model to Prediction of Shoreline Changes. Coastal Structures' 83, ASCE.

Memos C.D. (1999). "Analysis of rubble-mound breakwaters under seismic loading", Nat. Res. Council of Greece, Final Report, (in Greek).

Memos C.D., Bouckovalas M. and Tsiachris A. (2000). "Stability of Rubble-Mound Breakwaters under Seismic Action". Proceedings of the Conference ASCE, Sydney Australia. PP: 1585-1598

Memos, C.D., Kiara A. and Pavlidis, E. (2003). "Coupled Seismic Response Analysis of Rubble-Mound Breakwater". *Water and Maritime Engineering, ICE*. pp. 23-31.
Memos Constantine, D. and N. Protonotarios John (1993). "Patras breakwater failure due to seismic loading".

Mimura, N. (1983). Laboratory study on the influence of detached breakwater on coastal

change. Coastal Structures '83 ,ASCE.

Moselhi, O. (1988). "Post-Construction Performance of 4.6-km Breakwater." Journal of performance of constructed facilities 2(3): 159-169.

Oumeraci,H.,Kortenhaus,A.,Allsop,N.W.H.,De Groot,M.B.,Grouch,R.S.,Vrijling,J.K. & Voortman,H.G. (2001),"Probabilistic Design Tools for vertical breakwaters", Balkema, Rotterdam.

Palmer, G. N. and C. D. Christian (1998). "Design and construction of rubble mound breakwaters." Transactions of the Institution of Professional Engineers New Zealand: Civil Engineering Section 25(1): 19.

Perlin, M. (1979). Predicting beach planforms in the lee of a breakwater. Coastal Structures' 79, ASCE.

PIANC, A. (2001). Seismic design guidelines for port structures, Balkema Rotterdam, The Netherlands: 474.

Rahimi A., Baziar M.H. and Fallah B. (2016). "Sustainable Development of Offshore Geotechnical Engineering in Southern Caspian" The 18th Marine Industries Conference, Kish Island, Iran, pp. 18-21. http://www.civilica.com/Paper-NSMI18-NSMI18_269.html

Rahimi, A. Baziar, M.H. Khanzadi, M. (2015). "Dredged Material Applications–A Case Study on Shahid Rajaei Port Complex".

Rosen, D. S. and M. Vajda (1982). Sedimentological influences of detached breakwaters . Coastal Engineering 1982: 1930-1949.

Safinia, T. and B. Banijamali (1391). COMPREHENSIVE STUDY OF PIPE-RACK DISPLACEMENTS ON BREAKWATER CRESTS AT PARS PETROCHEMICAL PORT. نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، سازمان بنادر و دریانوردی.

Seed, R. B. Cetin K.O., Moss R.E.S., Kammerer A.M., Wu J., Pestana J.M., Riemer M.F., Sancio R.B., Bray J.D., Kaven R.E. and Faris A. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar: Long Beach, CA.

Shinohara, K. and T. Tsubaki (1967). Model study on the change of shoreline of sandy

beach by the offshore breakwater. Coastal Engineering 1966: 550-563.

Silvester, R. and J. R. Hsu (1989). "Sines revisited." Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 115(3): 327-343.

Suh, K. (1985). Modeling of beach erosion control measures in a spiral wave basin, University of Delaware.

Suh, K. and R. A. Dalrymple (1987)" Offshore breakwaters in laboratory and field." Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 113(2): 105-121.

Takahashi, S. (2002). "Design of vertical breakwaters." PHRI reference document nr. 34.

Toyoshima, O. (1982). Variation of foreshore due to detached breakwaters. Coastal Engineering 1982: 1873-1892.

Van der Meer, J. W. (1995). Conceptual design of rubble mound breakwaters. Advances In Coastal And Ocean Engineering: (Volume 1), World Scientific: 221-315.

Walker, J. R .A detached breakwater system for beach protection. Coastal Engineering 1980: 1968-1987.

Wang, H. Yang, C.V, Lamison C (1978). Loadings on rubble-mound breakwaters due to earthquakes. Coastal Engineering 1978: 2244-2262.

Westegaard, H. (1933). "Water pressure on dams during earthquakes." Trans Amer Soc Civ Engng 98: 418.

Yang, X. and X. Jin (2016). "Dynamic analysis of a rubble-mound breakwater subject to earthquake including seawater–structure–foundation interaction." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment 230(2): 310-326.

Yüksel, Y. Cetin, K.O. Ozguven O. (2004). Seismic response of a rubble mound breakwater in Turkey. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering, Thomas Telford Ltd.

Yuksel, Y., Berilgen, M., Cihan, K., Cevik, E., 2007. The seismic responses of a rubble mound breakwater. In: Franco, L., Tomasicchio, G.R., Lamberti, A. (Eds.), Coastal

Structures 2007, Proceedings of the 5th International Conference: World Scientific, Vol 1, pp. 86–91.

Zen, K. Umehara, Y. (1985). A case study of the wave-induced liquefaction of sand layers under damaged breakwater. Proc 3rd Canadian Conf on marine geotechnical engineering.

Zhang F.G. and Ge Z.J. (1996). "A study on some causes of rubble mound breakwater failure". China Ocean Eng. 10 (4), 473-481.

Abstract

Breakwaters are structures that protect ports and beaches from waves and coastal currents. The use of breakwater as an integral component in ports is essential to counteract the forces coming from the waves and to provide a safe environment for loading and unloading ships. Rubble mound Breakwater is the most commonly used breakwater for economic reasons.

Nowadays, in the oil refinery ports, a pipeline can have some intersections with the protective breakwater, which will lead to some uncertainties about the seismic interaction of this complex and an example of this situation can be seen in the design of pipelines for the Pars petrochemical port. In this port, the pipeline crosses the crest of the rubble mound breakwater to carry oil products to the loading wharf.

In this study, we used Abaqus software to model the South Pars breakwater. Initially, the amount of breakwater subsidence under static and dynamic (earthquake) loads was investigated, Then, considering the sensitivity of the pipeline to the subsidence at the time of the earthquake, the pipeline support subsidence was investigated by pounding the pile at the breakwater. To investigate the effect of different parameters of pile geometry such as pile length and cross-section, models with different lengths and cross-sections were also investigated.

Investigations showed that the interaction of the breakwater and pile causes some complexity in the seismic behavior of the breakwater and the use of pile - breakwater system will improve the seismic behavior of the South Pars breakwater.

Keywords: Seismic interaction, Rubble mound Breakwater, Seismic, Pile, displacement



Shahrood University of
Technology

Faculty of Civil Engineering
Master's Thesis for Geotechnical Engineering

Numerical modeling of interactional behavior breakwater and pile under dynamic loading

By:Ali Molaei

Supervisor:
Dr. Reza Naderi
Dr. Farshid Jandaghi Alaei

January,2020

