بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دوره دکتری مهندسی عمران- هیدرولیک

مطالعه آزمایشگاهی پایداری هیدرولیکی موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر

محمد نوید مقیم

استاد راهنما:

دکتر مهدی شفیعی‌فر

اساتید مشاور:

دکتر وحید چگینی

مهندس پیمان آق‌تومان

پاییز ۱۳۸۸

چکیده

در این تحقیق با انجام مطالعه آزمایشگاهی دو بعدی بر روی موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر به بررسی پارامترهای مؤثر بر پایداری هیدرولیکی موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر پرداخته شد. آزمایشها در سه سری با سه هدف متفاوت انجام گرفتند. آزمایشهای سری اول، با هدف بررسی اثر پارامترهای محیطی و سازه‌ای بر پایداری هیدرولیکی و تغییر شکل موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر، آزمایشهای سری دوم با هدف بررسی مکانیسم‌ها و چگونگی رفتار موج‌شکن سکویی در برابر موج توسط تزریق مواد مایع رنگی در میدان جریان و آزمایشهای سری سوم به‌منظور اندازه‌گیری و مقایسه نیروی ناشی از موج بر قطعات سنگی در ترازهای متفاوت، قبل و بعد از تغییر شکل سازه انجام شدند.
عرض فرسایش یافته سکوی موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر، نقش بسیار مهمی در پایداری هیدرولیکی و چگونگی تغییر شکل این سازه‌ها دارد. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای محیطی شامل ارتفاع موج، پریود موج، تعداد موج برخوردی (مدت طوفان) و عمق آب پای سازه و پارامترهای سازه‌ای شامل عرض اولیه سکو و تراز سکو از سطح ایستابی بر مقدار عرض فرسایش یافته سکو با استفاده از آزمایشهای سری اول تحت اثر امواج نامنظم با طیف انرژی موج JONSWAP مورد بررسی قرار گرفتند. پارامتر بی‌بعد جدید برای در نظرگیری اثر همزمان ارتفاع و پریود موج معرفی شد و سپس با استفاده از این پارامتر بی‌بعد، رابطه مناسبی برای عرض سکوی فرسایش یافته با در نظر گرفتن پارامترهای محیطی و سازه‌ای مؤثر، ارایه گردید. نتایج بدست آمده از این رابطه در مقایسه با روابط سایر پژوهشگران در این زمینه، همبستگی بسیار مناسبی با مقادیر آزمایشگاهی تحقیق حاضر و همچنین سایر پژوهشگران نشان دادند.
مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده در آزمایشهای سری دوم، دیدگاه کلی در مورد مکانیسم‌ها، رفتار جریان داخل و خارج سازه و چگونگی تأثیر آنها در تغییر شکل سازه نشان دادند. آزمایشهای اندازه‌گیری نیرو بر قطعه‌های آرمور مصنوعی در ترازهای متفاوت، قبل و بعد از تغییر شکل تحت اثر امواج منظم در آزمایشهای سری سوم نشان دادند که بیشترین مقدار نیروی وارده به قطعه‌های آرمور مصنوعی جایگذاری شده در سازه مربوط به موقعیت بالای سطح ایستابی و در جهت موازی شیب و به سمت بالا است. همچنین برای موقعیتهای مکانی زیر سطح ایستابی، نیروی وارد بر قطعه‌های آرمور مصنوعی در موقعیتهای مکانی بالاتر، بزرگتر از موقعیتهای مکانی پایین‌تر هستند. با مقایسه نیروهای اندازه‌گیری شده در نواحی اطراف سطح ایستابی قبل و بعد از تغییر شکل سازه مشخص شد که نیروی وارد شده قبل از تغییر شکل به‌مراتب بیشتر از مقدار نیروی ایجاد شده بعد از تغییر شکل سازه است.

کلمات کلیدی: موج نامنظم، موج منظم، موج‌شکن سکویی، شکل‌پذیر، مدل آزمایشگاهی، فرسایش سکو، نیرو.

فهرست مطالب

صفحه

فصل اول: مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- تاریخچه موج‌شکن‌های توده سنگی ۳

۱-۳- انواع موج‌شکن‌های توده‌سنگی ۴

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق ۸

۱-۵- اهداف تحقیق ۹

۱-۶- معرفی ساختار رساله ۹

فصل دوم: پارامترهای حاکم و مسایل مطرح در طراحی موج‌شکن‌های سکویی

۲-۱- مقدمه ۱۱

۲-۲- فرایندهای مطرح شده در پایداری سازه‌های توده‌سنگی ۱۳

۲-۳- پارامترهای حاکم در طراحی موج‌شکن‌های توده سنگی ۱۵

۲-۳-۱- پارامترهای محیطی (مربوط به موج) ۱۵

۲-۳-۲- پارامترهای هیدرولیکی ۱۷

۲-۳-۲-۱- بالاروی و پایین آمدگی موج ۱۸

۲-۳-۲-۲- سرریزی موج ۱۸

۲-۳-۲-۳- بازتاب امواج ۱۹

۲-۳-۲-۴- عبور امواج ۱۹

۲-۳-۳- پارامترهای سازه‌ای ۱۹

۲-۳-۳-۱- پارامترهای سازه‌ای مربوط به موج ۲۰

۲-۳-۳-۲- پارامترهای سازه‌ای مربوط به سنگ ۲۱

۲-۳-۳-۳- پارامترهای سازه‌ای مربوط به مقطع عرضی ۲۱

۲-۳-۳-۴- پارامترهای سازه‌ای مرتبط با واکنش سازه ۲۲

۲-۴- محاسبه پایداری هیدرولیکی وجه جلویی لایه آرمور ۲۳

۲-۵- موج‌شکن‌های توده‌سنگی شکل‌پذیر ۲۴

۲-۶- چگونگی و روند شکل‌گیری موج‌شکن‌های شکل‌پذیر سکویی ۲۹

۲-۷- ارزیابی عملکرد موج‌شکن‌های سکویی در برابر امواج ۳۰

۲-۸- حالات حدی طراحی موج‌شکن‌های شکل‌پذیر سکویی برای پایداری هیدرولیکی ۳۱

فهرست مطالب **صفحه**

۲-۹- معرفی انواع موج‌شکن‌های توده‌سنگی سکویی ۳۳
۲-۹-۱- موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر ۳۳
۲-۹-۲- موج‌شکن‌های سکویی غیر قابل تغییر شکل ۳۴
۲-۹-۳- موج‌شکن‌های سکویی چند لایه ۳۴
۲-۱۰- روشهای اجرایی ۳۵
۲-۱۱- مصالح معدن مورد نیاز ۳۶
۲-۱۲- مصالح ریزدانه ۳۶
۲-۱۳- مسایل مطرح در طراحی موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر ۳۷

فصل سوم: مروری بر مطالعات انجام شده بر پایداری هیدرولیکی موج‌شکن‌های سکویی
۳-۱- مقدمه ۳۸
۳-۲- روشهای موجود برای ارزیابی پایداری و تخمین عرض فرسایش یافته سکو ۳۹
۳-۲-۱- Hall و Kao (۱۹۹۱) ۴۰
۳-۲-۲- Tørum (۱۹۹۸) ۴۰
۳-۲-۳- Tørum و همکاران (۲۰۰۳) ۴۰
۳-۲-۴- Sayao (۲۰۰۰) ۴۱
۳-۲-۵- Lissev و Daskalov (۲۰۰۰) ۴۲
۳-۲-۶- Rao و همکاران (۲۰۰۴) ۴۳
۳-۲-۷- Lyke Andersen (۲۰۰۶) ۴۳
۳-۲-۸- Sigurdarson و همکاران (۲۰۰۷) ۴۵
۳-۲-۹- Van der Meer (۱۹۸۸) ۴۶
۳-۲-۱۰- Norton و Holmes (۱۹۹۲) ۴۷
۳-۲-۱۱- Van Gent (۱۹۹۵) ۴۸
۳-۲-۱۲- بهلولی (۱۳۷۹) ۵۰
۳-۲-۱۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کارهای انجام شده ۵۱
۳-۳- بررسی پارامترهای مؤثر بر پایداری هیدرولیکی موج‌شکن‌های سکویی ۵۲
۳-۳-۱- اثر ارتفاع و پریود موج ۵۳
۳-۳-۲- اثر تعداد امواج ۵۴

فهرست مطالب

صفحه

۳-۳-۳- شیب اولیه سازه (شیب بالایی و پایینی سکو) ۵۴
۳-۳-۴- عمق آب در پای سازه ۵۴
۳-۳-۵- ارتفاع تراز سکو از سطح ایستابی ۵۵
۳-۳-۶- عرض اولیه سکوی موج‌شکن ۵۶
۳-۳-۷- دانه‌بندی سنگها در لایه آرمور ۵۶
۳-۳-۸- نفوذپذیری سازه ۵۸
۳-۳-۹- قطر اسمی دانه‌های آرمور ۵۹
۳-۳-۱۰- زاویه برخورد موج به سازه ۵۹

فصل چهارم: شرح تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام کار

۴-۱- مقدمه ۶۰
۴-۲- آزمایشهای سری اول ۶۱
۴-۲-۱- انجام تحلیل ابعادی و مشخص نمودن پارامترهای بی‌بعد ۶۱
۴-۲-۲- تعیین محدوده تغییرات پارامترهای مورد مطالعه در بحث پایداری ۶۳
۴-۲-۲-۱- انتخاب پریودهای امواج ۶۳
۴-۲-۲-۲- تعیین ارتفاع سازه (H_t) ۶۴
۴-۲-۲-۳- تعیین عمق آب پای سازه ۶۵
۴-۲-۲-۴- تعیین ارتفاع امواج ۶۶
۴-۲-۲-۵- تعیین وزن مصالح لایه آرمور ۶۶
۴-۲-۲-۶- انتخاب تراز سکو از سطح ایستابی ۶۷
۴-۲-۲-۷- انتخاب عرض سکو ۶۷
۴-۲-۳- کنترل صحت مدلسازی ۶۹
۴-۲-۴- طراحی مقطع اولیه مدل آزمایشگاهی ۶۹
۴-۲-۵- تهیه و دانه‌بندی مصالح مورد نیاز ۷۰
۴-۲-۵-۱- تعیین محدوده دانه‌بندی لایه آرمور و حجم مصالح مورد نیاز ۷۰
۴-۲-۵-۲- محاسبات و تعیین محدوده لایه فیلتر ۷۲
۴-۲-۵-۳- محاسبات لایه هسته ۷۳
۴-۲-۵-۴- شکستن و توزین مصالح مورد نیاز برای لایه آرمور و فیلتر ۷۴
۴-۲-۶- شرح چگونگی انجام آزمایشها ۷۴
۴-۲-۶-۱- ابزارهای مورد استفاده در آزمایشها ۷۵

فهرست مطالب

صفحه

۴-۲-۶-۱-۱- فلوم موج ۷۵
۴-۲-۶-۱-۲- پاروهای مولد موج ۷۶
۴-۲-۶-۱-۳- واحد سخت افزار سیستم مولد موج ۷۷
۴-۲-۶-۱-۴- واحد نرم افزار سیستم مولد موج ۷۸
۴-۲-۶-۱-۵- حسگرهای ارتفاع سنج موج ۷۸
۴-۲-۶-۱-۶- دستگاه نیم‌رخ برداری ۷۹
۴-۲-۶-۱-۷- پمپ‌های تخلیه و آبگیری ۸۰
۴-۲-۶-۲- برپایی مدل آزمایشگاهی داخل فلوم موج ۸۰
۴-۲-۶-۳- تعیین محل حسگرها برای شروع انجام آزمایشها ۸۲
۴-۲-۶-۳-۱- حسگر اندازه‌گیری ارتفاع امواج تابشی ۸۲
۴-۲-۶-۳-۲- حسگرهای اندازه‌گیری ضریب بازتاب ۸۳
۴-۲-۶-۴- چگونگی انجام آزمایشها ۸۴
۴-۲-۶-۴-۱- برپایی سازه ۸۵
۴-۲-۶-۴-۲- نیمرخ برداری اولیه ۸۵
۴-۲-۶-۴-۳- کالیبراسیون حسگرها ۸۵
۴-۲-۶-۴-۴- تنظیم تراز سطح آب ۸۶
۴-۲-۶-۴-۵- انجام آزمایش (تولید امواج) و ثبت نوسانات سطح آب ۸۶
۴-۲-۶-۴-۶- تخلیه آب و نیم‌رخ برداری ثانویه ۸۷
۴-۳- آزمایشهای سری دوم ۸۷
۴-۴- آزمایشهای سری سوم ۹۰
۴-۴-۱- مشخصات فلوم موج ۹۱
۴-۴-۲- شرح دستگاه نیروسنج و چگونگی انجام آزمایشها ۹۱

فصل پنجم: مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیل مکانیسم عملکرد موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر

۵-۱- مقدمه ۹۵
۵-۲- مدلسازی نیروهای مؤثر در جابجایی سنگهای لایه آرمور ۹۵
۵-۲-۱- مودهای جابجایی ۹۵
۵-۲-۲- مدلسازی نیروهای مؤثر بر تغییر مکان سنگدانه‌ها ۹۶
۵-۲-۲-۱- نیروهای ناشی از جریان خارجی ۹۸
۵-۲-۲-۲- نیروهای ناشی از جریان داخلی ۹۸

فهرست مطالب

صفحه

۵-۳- نیروهای اندازه‌گیری شده بر قطعات آرمور مصنوعی ۹۹
۵-۴- بررسی جریان ایجاد شده بر روی سازه و نحوه تأثیر آن بر سازه ۱۰۵
۵-۵- بررسی جریان ایجاد شده داخل سازه و چگونگی تأثیر آن بر سازه ۱۰۸
۵-۶- تغییر شکل سازه و ایجاد نیم‌رخ S شکل به تعادل رسیده ۱۱۰
۵-۶-۱- بررسی شروع تغییر شکل سازه ۱۱۰
۵-۶-۲- بررسی ادامه تغییر شکل سازه ۱۱۲
۵-۷- توزیع سایزبندی مصالح بر روی شیب سازه ۱۱۳
۵-۸- نتیجه‌گیری ۱۱۴

فصل ششم: تحلیل و بررسی پایداری موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر
۶-۱- مقدمه ۱۱۶
۶-۲- تعیین مدت زمان تعادل ۱۱۷
۶-۳- تأثیر عرض اولیه سکوی موج‌شکن سکویی بر پایداری سازه ۱۱۹
۶-۴- تأثیر ارتفاع و پریود موج بر پایداری موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر ۱۲۳
۶-۴-۱- تأثیر ارتفاع موج بر پایداری سازه ۱۲۳
۶-۴-۲- تأثیر پریود موج بر پایداری سازه ۱۲۵
۶-۴-۳- معرفی پارامتر بی‌بعد جدید برای در نظرگیری همزمان اثر ارتفاع و پریود موج بر روی سازه ۱۲۸
۶-۵- تأثیر تعداد موج (مدت طوفان) بر پایداری و تغییر شکل سازه ۱۳۴
۶-۶- تأثیر تراز سکو از سطح ایستابی بر تغییر شکل سازه ۱۳۷
۶-۷- تأثیر عمق آب پای سازه بر تغییر شکل سازه ۱۴۲
۶-۸- فرمول جدید برای تخمین عرض فرسایش یافته سکو ۱۴۵
۶-۹- ارزیابی فرمول جدید بدست آمده با نتایج سایرین ۱۴۸

فصل هفتم: نتایج و پیشنهادات
۷-۱- مقدمه ۱۵۷
۷-۲- نتیجه‌گیری ۱۵۷
۷-۲-۱- نتایج مربوط به مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیل نیروهای اندازه‌گیری شده بر قطعه‌های آرمور مصنوعی ۱۵۷
۷-۲-۲- نتایج بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر پایداری موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر ۱۶۰

فهرست مطالب

صفحه

۷-۳- پیشنهادات جهت انجام تحقیقات بیشتر و ادامه کار ۱۶۳

منابع ۱۶۵

پیوست الف

پیوست ب

واژه نامه

فهرست جداول

صفحه

جدول ۲-۱- مقادیر برای لایه S_d آرمور طراحی شده به ضخامت $2D_{n50}$ (Van der Meer، ۱۹۹۳) ۲۳

جدول ۳-۱- تقسیم‌بندی انواع موج‌شکن‌های سکویی برحسب عدد پایداری (PIANC، ۲۰۰۳) ۳۹

جدول ۳-۲- مشخصات مصالح سازنده مدل آزمایشگاهی Lykke Andersen ۴۵

جدول ۳-۳- محدوده تغییرات پارامترهای بابعد مدل آزمایشگاهی Lykke Andersen ۴۵

جدول ۳-۴- محدوده تغییرات پارامترهای بی‌بعد مدل آزمایشگاهی Lykke Andersen ۴۵

جدول ۳-۵- مطالعات انجام شده بر روی پایداری هیدرولیکی موج‌شکن‌های سکویی ۵۱

جدول ۴-۱- محدوده تغییرات پارامترهای موجود برای بررسی پایداری سازه ۶۸

جدول ۴-۲- محدوده تغییرات پارامترهای بی‌بعد شده ۶۸

جدول ۴-۳- محدوده وزنی محاسبه شده برای لایه آرمور ۷۲

جدول ۴-۴- محدوده دانه‌بندی محاسبه شده برای لایه فیلتر ۷۳

جدول ۴-۵- مشخصات مصالح سازنده موج‌شکن مورد مطالعه ۷۳

جدول ۴-۶- فاصله حسگرها نسبت به یکدیگر ۸۴

جدول ۴-۷- ترکیب امواج بکار رفته در آزمایشهای سری سوم ۹۰

جدول ۶-۱- چیدمان آزمایشهای انجام شده در آزمایشهای سری اول (آزمایشات تکمیلی) ۱۱۷

جدول ۶-۲- آزمایشهای مربوط به تعیین عرض بهینه سکو برای حالتهای بحرانی ۱۲۳

جدول ۶-۳- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای نتایج بدست آمده با استفاده از پارامترهای بی‌بعد متفاوت در برابر داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر ۱۳۱

جدول ۶-۴- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای نتایج بدست آمده با استفاده از پارامترهای متفاوت بی‌بعد در برابر داده‌های آزمایشگاهی Lykke Andersen (۲۰۰۶) ۱۳۳

جدول ۶-۵- تقسیم‌بندی انواع موج‌شکن‌های سکویی برحسب پارامتر بی‌بعد جدید (Moghim et al.، ۲۰۰۹) ۱۳۴

جدول ۶-۶- مقادیر بدست آمده برای ضرایب a_1، b_1 و c_1 ۱۳۶

جدول ۶-۷- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای نتایج بدست آمده از فرمولها در برابر داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر ۱۵۲

جدول ۶-۸- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای نتایج بدست آمده از فرمولها در برابر داده‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط Lykke Andersen ۱۵۴

فهرست شکلها

صفحه

فصل اول: مقدمه و کلیات

شکل ۱-۱- انواع موج‌شکن‌های توده‌سنگی ۷

فصل دوم: پارامترهای حاکم و مسایل مطرح در طراحی موج‌شکن‌های سکویی

شکل ۲-۱- موج‌شکن سکویی ۱۲

شکل ۲-۲- مراحل مختلف ارزیابی واکنش های یک سازه ساحلی (Van der Meer، ۱۹۹۳) ۱۴

شکل ۲-۳- طبقه بندی انواع شکست بر حسب ξ (Battjes، ۱۹۷۴) ۱۷

شکل ۲-۴-الف- جریان آب در یک مقطع دو لایه‌ای از سنگهای محافظ (Hall، ۱۹۹۲) ۲۵

شکل ۲-۴-ب- جریان آب در یک لایه محافظ سکو مانند (Hall، ۱۹۹۲) ۲۶

شکل ۲-۵- توزیع میدان سرعت جریان در محیط متخلخل موج‌شکن توسط مدل عددی (Barends et al.، ۱۹۸۳) ۲۶

شکل ۲-۶- شکل شماتیک از یک جریان پایین‌رونده بر روی شیب سازه (Bruun، ۱۹۷۰) ۲۷

شکل ۲-۷- نیم‌رخ سطح آب روی شیب سازه در حالت ماکزیمم پایین‌روی موج (Bruun، ۱۹۷۰) ۲۸

شکل ۲-۸- شمای کلی از نیم‌رخ موج‌شکن سکویی چندلایه ایسلندی با استفاده از ۶ کلاس سنگی ۳۵

فصل سوم: مروری بر مطالعات انجام شده بر پایداری هیدرولیکی موج‌شکن‌های سکویی

شکل ۳-۱- شمایی از برخی پارامترهای سازه‌ای موج‌شکن سکویی ۳۹

شکل ۳-۲- مقایسه نیم‌رخ اندازه‌گیری شده واقعی با نیم‌رخ محاسبه شده توسط ODIFLOCS (Van Gent، ۱۹۹۵) ۵۰

فصل چهارم: شرح تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام کار

شکل ۴-۱- مقطع عمومی بدست آمده ۷۰

شکل ۴-۲- مصالح دانه‌بندی شده مورد استفاده در آزمایشها ۷۴

شکل ۴-۳- مقطع عرضی و پلان فلوم موج و نحوه استقرار سازه، پاروی مولد موج و حسگرها در آزمایشها ۷۶

شکل ۴-۴- نمایی از فلوم موج ۷۷

شکل ۴-۵- شمایی از پاروی مولد موج واقع شده در ابتدای فلوم موج ۷۷

شکل ۴-۶- سیستم هیدرولیکی پاورپک ۷۸

شکل ۴-۷- حسگر ارتفاع سنج موج ۷۹

فهرست شکل‌ها

صفحه

شکل ۴-۸- دستگاه نیم‌رخ بردار ۸۰

شکل ۴-۹- ترسیم مقطع مدل سازه بر روی پلکسی گلاس ۸۱

شکل ۴-۱۰- نمایی از مصالح هسته، فیلتر و آرمور اجرا شده برای ساخت مدل موج‌شکن سکویی ۸۱

شکل ۴-۱۱- مدل آزمایشگاهی تکمیل شده موج‌شکن سکویی داخل فلوم موج ۸۱

شکل ۴-۱۲- شمایی از حسگر جلوی سازه برای محاسبه ارتفاع امواج تابشی ۸۲

شکل ۴-۱۳- شمایی از حسگرهای بازتاب ۸۴

شکل ۴-۱۴- عملیات کالیبراسیون حسگرها ۸۶

شکل ۴-۱۵- استفاده از کاوه سوزنی در تنظیم تراز آب ۸۶

شکل ۴-۱۶- عملیات نیمرخ برداری ۸۷

شکل۴-۱۷- نمایی از کنار و جلوی جعبه حاوی دوربین فیلمبرداری به‌منظور ضد آب نمودن آن ۸۸

شکل ۴-۱۸- نمایی از تقسیم‌بندی فلوم و چگونگی اجرای سازه موج‌شکن سکویی در حین اجرا ۸۹

شکل ۴-۱۹- نمایی از چگونگی نصب شلنگهای تزریق بر روی دیواره ۸۹

شکل ۴-۲۰- شمایی از چگونگی ذخیره فیلم ۹۰

شکل ۴-۲۱- مشخصات مدل مقطع موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر ۹۰

شکل ۴-۲۲- قطعه آرمور مصنوعی مکعبی شکل از جنس آلومینیوم ۹۱

شکل ۴-۲۳- شمایی از دستگاه کرنش سنج ۹۲

شکل ۴-۲۴- شمایی از دستگاه نیروسنج ۹۳

شکل ۴-۲۵- شمایی از مجموعه نیروسنج به‌همراه قطعه آرمور مصنوعی ۹۳

شکل ۴-۲۶- موقعیت ارتفاعی و مکان قرارگیری نیروسنج‌ها در داخل سازه ۹۴

شکل ۴-۲۷- نحوه قرارگیری نیروسنج در داخل سازه ۹۴

فصل پنجم: مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیل مکانیسم عملکرد موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر

شکل ۵-۱- مودهای جابجایی سنگدانه‌های لایه آرمور (Burcharth، ۱۹۹۳) ۹۶

شکل ۵-۲- شمایی از نیروهای وارد بر دانه‌های سنگی بر روی شیب سازه ۹۷

شکل ۵-۳- نیروهای اندازه‌گیری شده بر قطعه‌های آرمور مصنوعی قبل از تغییر شکل ($H = ۰/۱۸\ m$ و $T = ۱/۲۱\ s$) ۱۰۰

شکل ۵-۴- نیروهای اندازه‌گیری شده بر قطعه‌های آرمور مصنوعی بعد از تغییر شکل ($H = ۰/۱۸\ m$ و $T = ۱/۲۱\ s$) ۱۰۱

فهرست شکلها

صفحه

شکل ۵-۵- نمودارهای رسم شده در مورد نیروهای وارد بر سازه قبل از تغییر شکل ($H = ۰/۱۸\ m$ و $T = ۱/۲۱\ s$) ۱۰۲

شکل ۵-۶- نمودارهای رسم شده در مورد نیروهای وارد بر سازه بعد از تغییر شکل ($H = ۰/۱۸\ m$ و $T = ۱/۲۱\ s$) ۱۰۳

شکل ۵-۷- نیروی وارد بر قطعه آرمور مصنوعی به‌موازات شیب سازه در طول یک پریود موج (موقعیت B) ۱۰۶

شکل ۵-۸- چگونگی توزیع شکل نیم‌رخ موج روی شیب سازه موج‌شکن ۱۰۷

شکل ۵-۹- میدان سرعت جریان در حین پایین‌روی و شکست موج (Miller and Zeigler، ۱۹۶۴) ۱۰۸

شکل ۵-۱۰- جهت حرکت ماده تزریقی سفید رنگ در هنگام بیشترین تراز پایین‌روی موج برخوردی به سازه ۱۰۸

شکل ۵-۱۱- ناحیه خروج ماده تزریقی سفید رنگ داخل سازه در حالت بیشترین تراز پایین‌روی موج ۱۱۰

شکل ۵-۱۲- نیم‌رخ موج‌شکن سکویی تغییر شکل یافته و چگونگی توزیع سنگها روی آن ۱۱۴

فصل ششم: تحلیل و بررسی پایداری موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر

شکل ۶-۱- مقایسه نیم‌رخ تغییر شکل یافته تحت اثر تعداد امواج متفاوت ($H_s = 0.087\ m$ و $T_{p.} = 1.273\ s$) ۱۱۸

شکل ۶-۲- درصد مساحت فرسایش یافته مصالح در هر تعداد موج نسبت به حالت برخورد ۶۰۰۰ موج ۱۱۹

شکل ۶-۳- مقایسه نیم‌رخ تغییر شکل یافته تحت اثر ۳۰۰۰ موج برای عرض‌های متفاوت سکوی موج‌شکن ($H_s = 0.087\ m$ و $T_p = 1.273\ s$) ۱۲۰

شکل ۶-۴- مقایسه نیم‌رخ تغییر شکل یافته تحت اثر ۳۰۰۰ موج برای عرض‌های متفاوت سکوی موج‌شکن ($H_s = 0.105\ m$ و $T_p = 1.626\ s$) ۱۲۰

شکل ۶-۵- نمودار Rec بر حسب عرض اولیه سکو (B) برای ترکیبهای مختلف ارتفاع و پریود موج ۱۲۱

شکل ۶-۶- اثر ارتفاع موج بر نیم‌رخ تغییر شکل یافته ۱۲۴

شکل ۶-۷- تأثیر ارتفاع موج بر عرض فرسایش یافته سکو برای سه پریود اوجی موج متفاوت $T_p = (1.273, 1.626 \text{ and } 1.98\ s)$ ۱۲۴

شکل ۶-۸- نمودارهای رسم شده در مورد نیروها برای دو ترکیب موج با پریود یکسان و ارتفاع متفاوت ۱۲۵

شکل ۶-۹- اثر پریود موج بر نیم‌رخ تغییر شکل یافته ۱۲۶

شکل ۶-۱۰- تأثیر پریود موج بر عرض فرسایش یافته سکو برای سه ارتفاع موج متفاوت $H_s = (0.06, 0.082 \text{ and } 0.102\ m)$ ۱۲۷

شکل ۶-۱۱- نمودارهای رسم گردیده نیروها برای دو ترکیب موج با ارتفاع یکسان و پریود متفاوت ۱۲۷

شکل ۶-۱۲- تأثیر عدد پایداری (H_o) بر پارامتر عرض سکوی بی‌بعد شده ($\mathrm{Re}c/D_{n50}$) ۱۲۸

فهرست شکلها

صفحه

شکل ۶-۱۳- تأثیر تیزی موج (S_{om}) بر پارامتر عرض سکوی بی‌بعد شده (Rec/D_{n50}) ۱۲۹

شکل ۶-۱۴- تأثیر پارامتر بی‌بعد H_oT_o بر پارامتر عرض سکوی بی‌بعد شده (Rec/D_{n50}) ۱۲۹

شکل ۶-۱۵- تأثیر پارامتر بی‌بعد $H_o\sqrt{T_o}$ بر پارامتر عرض سکوی بی‌بعد شده (Rec/D_{n50}) ۱۳۲

شکل ۶-۱۶- تأثیر پارامتر بی‌بعد H_oT_o بر پارامتر عرض سکوی بی‌بعد شده (Rec/D_{n50}) برای داده‌های Lykke Andersen ۱۳۳

شکل ۶-۱۷- تأثیر پارامتر بی‌بعد $H_o\sqrt{T_o}$ بر پارامتر عرض سکوی بی‌بعد شده (Rec/D_{n50}) برای داده‌های Lykke Andersen ۱۳۴

شکل ۶-۱۸- تأثیر تعداد موج برخوردی بر مقدار عرض فرسایش یافته بی‌بعد شده ۱۳۶

شکل ۶-۱۹- تغییرات ضریب a_1 برحسب پارامتر $H_o\sqrt{H_o}$ ۱۳۷

شکل ۶-۲۰- اثر ارتفاع سکو از تراز ایستابی بر نیم‌رخ تغییر شکل یافته ($H_s = 0.104\ m$ و $T_{p.} = 1.626\ s$) ۱۳۸

شکل ۶-۲۱- تأثیر تراز سکو از سطح ایستابی بر مقدار عرض فرسایش یافته سکو (Rec) ۱۳۸

شکل ۶-۲۲- تأثیر تراز سکو از سطح ایستابی بر پارامترهای m_{AB}، m_{BS} و m_{RA} ۱۴۰

شکل ۶-۲۳- تأثیر h_b/D_{n50} بر Rec/D_{n50} ۱۴۱

شکل ۶-۲۴- اثر عمق آب پای سازه بر نیم‌رخ تغییر شکل یافته ($H_s = 0.089\ m$ و $T_{p.} = 1.273\ s$) ۱۴۳

شکل ۶-۲۵- تأثیر عمق آب پای سازه بر مقدار عرض فرسایش یافته سکو (Rec) ۱۴۳

شکل ۶-۲۶- تأثیر d/D_{n50} بر Rec/D_{n50} ۱۴۵

شکل ۶-۲۷- مقادیر $f(H_o\sqrt{T_o})$ بر حسب متغیر بی‌بعد $H_o\sqrt{T_o}$ ۱۴۶

شکل ۶-۲۸- عرض فرسایش یافته بی‌بعد محاسبه شده توسط فرمول جدید در برابر داده‌های آزمایشگاهی حاضر ۱۴۸

شکل ۶-۲۹- مقایسه نتایج مشاهداتی و محاسباتی برای داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر به‌صورت مجزا ۱۵۳

شکل ۶-۳۰- مقایسه نتایج مشاهداتی و محاسباتی برای داده‌های آزمایشگاهی Lykke Andersen (۲۰۰۶) به‌صورت مجزا ۱۵۵

شکل ۶-۳۱- مقایسه نتایج مشاهداتی و محاسباتی برای داده‌های آزمایشگاهی Lykke Andersen (۲۰۰۶) به‌صورت یکجا ۱۵۶

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
پارامتر تشابه شکست	ζ
چگالی شناوری نسبی قطعه آرمور	Δ
چگالی سنگهای آرمور (چگالی اشباع شده سنگ با سطح خشک)	ρ_a
چگالی آب	ρ_w
زاویه تابش موج	ψ
ویسکوزیته دینامیکی سیال	υ
زاویه شیب پایین سکوی موج‌شکن نسبت به افق	α
گرادیان فشار	$\frac{\partial p}{\partial x}$
سطح فرسایش یافته سازه در مقطع عرضی نسبت به نیم‌رخ اولیه	A_e
عرض اولیه سکوی موج‌شکن	B
ضریب بازتاب	Cr
ضریب نیروی پسا	C_D
ضریب نیروی برآ	C_L
عمق آب پای سازه	d
قطر اسمی سنگی مربوط به جرم متوسط سنگ	D_{n50}
قطر الکی که ۱۵ درصد سنگ‌ها از آن رد شوند	D_{n15}
قطر الکی که ۸۵ درصد سنگ‌ها از آن رد شوند	D_{n85}
درصد خطای نسبی	E
نیروی موازی شیب سازه	F_P
نیروی عمود بر شیب سازه	F_N
نیروی پسا	F_D
نیروی برآ	F_L
نیروی ثقل	F_G
نیروی لختی	F_I
نیروی تراوش	F_s

عنوان	علامت اختصاری
ضریب عمق	f_d
ضریب دانه‌بندی	f_g
فاکتوری برای در نظر گرفتن اثر مدت طوفان	f_N
فاکتوری برای در نظر گرفتن اثر زاویه برخورد موج	f_β
فاکتوری برای در نظر گرفتن اثر عدد پایداری	f_{Ho}
فاکتوری برای در نظر گرفتن اثر دانه‌بندی	$f_{grading}$
شتاب ثقل	g
ارتفاع موج تابشی	H
ارتفاع شاخص موج تابشی	H_s
ارتفاع مشخصه موج تابشی بر اساس تحلیل فرکانسی	H_{mo}
میانگین ارتفاعات دو درصد مرتفعترین امواج	$H_{2\%}$
میانگین ارتفاعات ده درصد مرتفعترین امواج	$H_{1/10}$
عدد پایداری شامل پریود میانگین موج	$H_oT_o = H_o.T_o$
عدد پایداری شامل پریود میانگین موج	$H_o\sqrt{T_o} = H_o.\sqrt{T_o}$
ارتفاع تراز سکو از سطح ایستابی	h_b
ارتفاع نقطه تقاطع نیم‌رخ تغییر شکل یافته نسبت به تراز سطح ایستابی	h_f
فاصله تراز پله زیر آب تا سطح ایستابی	h_s
اختلاف فشار هیدرولیکی	i
عدد ایریباران	I_r
عدد موج	k
طول موج	L
طول موج در آب عمیق	L_o
لنگر مرتبه صفر طیف چگالی انرژی موج	m_o
تعداد موج برخوردی	N
ضریب تخلخل	n
جذر میانگین مربعات نرمالایز شده	$NRMSE$
عدد پایداری	N_S یا H_o
شار انرژی یا توان موج	p

عنوان	علامت اختصاری
ضریب نفوذپذیری	P
درصد سنگهای گرد گوشه در لایه آرمور	P_R
ضریب همبستگی	R
میزان پس‌رفت یا فرسایش سکوی موج‌شکن	Rec
عدد رینولدز	Re
تیزی موج	s
تیزی موج میانگین در آب عمیق	s_{om}
تیزی موج اوج در آب عمیق	s_{op}
پارامتر آسیب	S_d
پریود موج	T
پریود میانگین موج	T_m
پریود اوج موج	T_p
پریود موج بی‌بعد شده	$T_o = T_m\sqrt{g/D_{n50}}$
سرعت جریان	u
سرعت موازی شیب سازه	v_d
سرعت عمود بر شیب سازه	v_s
حجم فضاهای خالی	V_V
حجم کل سنگدانه‌ها	V_S
وزن میانگین سنگ آرمور	W_{50}

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر با توجه به رشد صنعت حمل و نقل دریایی و همچنین نیاز بشر به استفاده بیشتر از منابع دریایی، تلاش گسترده‌ای جهت ساخت بنادر به منظور ایجاد یک منطقه امن و آرام برای پناه دادن به شناورها انجام شده است. یک بندر معمولاً از چندین قسمت مجزا تشکیل می‌شود که هر قسمت دارای وظیفه جداگانه‌ای است. یکی از قسمت‌های مهم بندر، موج‌شکن است. به‌طور کلی، موج‌شکن سازه‌ای است که در برابر امواج سهمگین دریا مقاومت می‌کند و محلی آرام برای پهلوگیری، باراندازی و بارگیری شناورها ایجاد می‌نماید. با توجه به پر هزینه بودن ساخت یک موج‌شکن برای احداث بندر، طراحی صحیح و بهینه این طرحها هم از نظر پایداری و کارآیی و هم از نظر اقتصادی کاملاً ضروری است.

موج‌شکن‌ها از دیدگاه‌های مختلف از جمله شکل هندسی، مصالح بکار برده شده و موقعیت قرارگیری به انواع مختلف دسته‌بندی شده‌اند. از میان انواع موج‌شکن‌ها به لحاظ شکل هندسی و مصالح بکار برده شده، موج‌شکن‌های توده‌سنگی[1] از متداولترین انواع آنها هستند، که آنها را می‌توان به‌صورت زیر تقسیم‌بندی نمود:

[1] - Rubble Mound Breakwater

۱- موج‌شکن‌های توده‌سنگی سنتی (مرسوم)[1].

۲- موج‌شکن‌های توده‌سنگی شکل‌پذیر[2] .

از میان این موج‌شکن‌ها، موج‌شکن‌های شکل‌پذیر در چند دهه اخیر در بسیاری از نقاط دنیا مورد توجه قرار گرفته‌اند. این سازه‌ها تحت اصابت امواج دریا تغییرشکل می‌یابند و پس از انجام تغییر شکل به حالت پایدار می‌رسند. در اجرای این‌گونه سازه‌ها به‌دلیل مجاز بودن تغییر شکل سازه، می‌توان از محدوده وسیعتری از مصالح استفاده کرد و با توجه به فلسفهٔ عملکرد آنها در مواجهه با امواج دریا از مصالح کوچکتری نیز بهره برد. ایجاد سکو در سازهٔ شکل‌پذیر، منجر به کاهش بیشتر انرژی موج و همچنین کاهش حجم مصالح مصرفی نسبت به موج‌شکن‌های شکل‌پذیر با شیب ساده می‌شود. از مزیت‌های دیگر این نوع موج‌شکن‌ها نسبت به سایر انواع موج‌شکن‌های توده‌سنگی، می‌توان به کاهش بالاروی موج بر روی شیب سازه، اجرای آسان این سازه‌ها با توجه به امکانات محدود، ماشین آلات سبکتر و تجربه‌های پیمانکاران محلی و همچنین به‌دلیل مجاز بودن تغییرشکل این نوع سازه‌ها امکان استفاده بهینه از معادن سنگی در محدودهٔ وسیعتری از مصالح اشاره نمود.

بر اساس کیفیت معادن سنگی کشور ایران، مصالح استخراجی از اکثر معادن جنوبی کشور شامل مصالح ریز دانه زیادی است، که در عمل از این مصالح در هسته موج‌شکن استفاده می‌گردد. بنابر مطلب ذکر شده ضرورت وجود یک لایه فیلتر بین هسته و لایه آرمور در موج‌شکن سکویی، به‌دلیل جلوگیری از کشیده شدن مصالح ریزدانهٔ هسته بر اثر فشارهای منفی ناشی از نوسانات و حرکت سیال درون سازه، توجیه می‌گردد، که منجر به ایجاد سازه‌ای متفاوت با سایر موج‌شکن‌های سکویی در دنیا (موج‌شکن سکویی به سبک ایرانی) خواهد شد. مدل آزمایشگاهی موردنظر به‌منظور بررسی پایداری هیدرولیکی موج‌شکن سکویی در این تحقیق بر اساس مدل سبک ایرانی مدنظر قرار خواهد گرفت.

[1] - Conventional Rubble Mound Breakwaters
[2] - Reshaping Rubble Mound Breakwaters

۱-۲- تاریخچه موج‌شکن‌های توده سنگی

موج‌شکن‌های توده سنگی به‌صورتی که امروزه وجود دارند، طی ۲۵۰ سال گذشته شکل گرفته‌اند. البته شواهدی دال بر ساخت این موج‌شکن‌ها برای حفاظت از سواحل مدیترانه در ۲۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح وجود دارد. اما پیشرفت‌های اخیر در فناوری موج‌شکن‌ها از اوایل قرن نوزدهم میلادی آغاز شد. موج‌شکن‌های توده سنگی در اوایل قرن هجدهم میلادی به‌طور ساده با ریختن سنگ به داخل دریا ساخته می‌شدند، به‌طوری که سنگها در اثر برخورد امواج دوباره آرایش گرفته و نیم‌رخ[1] اولیه به یک نیم‌رخ پایدار تبدیل شد (چگینی، ۱۳۷۷).

با پیشرفت بنادر، لزوم گسترش و وسعت آنها ایجاب می‌کرد که موج‌شکن‌ها در اعماق بیشتر و مکان‌های خیلی باز ساخته شوند. این امر منجر به افزایش ارتفاع امواج طرح و مطرح شدن ارتفاع شاخص طراحی می‌گردید. طراحان با توجه به نیاز احداث سازه‌های موج‌شکن در آب عمیق‌تر و مکان‌های مستقر در معرض امواج بلندتر، دریافتند که باید حجم سنگ مورد نیاز را تا رسیدن به نیم‌رخ پایدار افزایش دهند. استفاده از سنگهای بزرگ در سطح بیرونی سازه، حجم مورد نیاز را تا حد زیادی کاهش می‌داد. پیشرفت‌های حاصله در فناوری بتن در اوایل قرن نوزدهم میلادی، باعث جایگزینی قطعات منشوری شکل بتنی بجای سنگهای بزرگ شد. اما با توجه به لزوم احداث موج‌شکن‌ها در مکان‌های مستقر در معرض امواج سهمگین‌تر، ساخت و جابجایی قطعات بتنی مورد نیاز غیرعملی شد. سرانجام کاربرد قطعات بتنی دارای اشکال نامنظم با پایه‌های چندگانه رواج یافتند. پایداری این قطعات در مقابل حمله موج علاوه بر وزن، در اثر درگیری[2] (جفت شدگی) قطعات مجاور حاصل می‌شود (چگینی، ۱۳۷۷).

طی دهه‌های اخیر، ایده ساخت موج‌شکن‌های شکل‌پذیر (S شکل، غیرسنتی) مطرح گردیده است و در دهه گذشته تمایل به این نوع موج‌شکن‌ها افزایش یافته است. در طراحی این سازه‌ها این عقیده

---

[1] - Profile
[2] - Interlocking