دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده‌ی مهندسی عمران

پایان نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد

مهندسی آب- گرایش هیدرولیک

مدل‌سازی عددی موج با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH)

نگارنده:

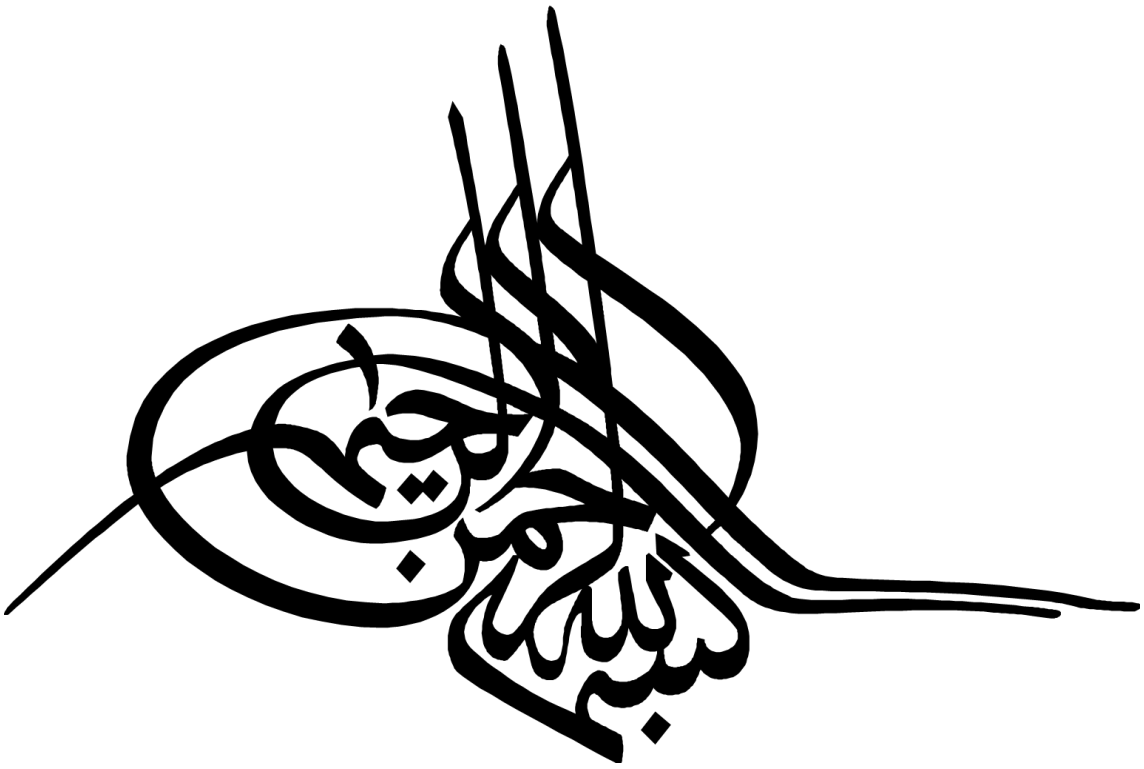
رسول معمارزاده

۸۸۰۰۳۳۴

استاد راهنما:

دکتر کورش حجازی

زمستان ۱۳۹۰


بسم الله الرحمن الرحيم

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه: مدل‌سازی عددی موج با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH)

استاد راهنما: دکتر کورش حجازی
نام دانشجو: رسول معمارزاده
شماره دانشجویی: ۸۸۰۰۳۳۴

این‌جانب **رسول معمارزاده** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران – آب گرایش هیدرولیک دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات انجام گرفته در این پایان‌نامه توسط شخص این‌جانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تایید می‌باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع استفاده شده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم مطالب مندرج در پایان نامه برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط این‌جانب و یا فرد دیگری در هیچ‌جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو
تاریخ

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱. حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی ازآن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲. کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیم به

پیشگاه قطب علم و عالم امکان، و یگانه منجی عالم بشریت،

حضرت ولی عصر« عجل الله تعالی فرجه شریف»

و

پدر و مادر بزرگوارم که در کلیه ی مراحل زندگی همواره مشوق و

پشتیبانم، به ویژه در عرصه ی کسب دانش بوده اند.

تقدیر و تشکر

پروردگار منان را به بزرگی و رحمتش سپاسگزارم، که در تمامی لحظات زندگی و در طول این تحقیق لطف او شامل حال من بوده است؛

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر حجازی که دلسوزانه راهنما و مشوق من در طول انجام این تحقیق بوده اند، کمال تشکر و سپاس را دارم؛

از پدر و مادر مهربانم که زحمات زیادی را در طول زندگی برای من متحمل شده و می شوند، سپاسگزاری می نمایم.

همچنین تشکر خود را از جناب آقای دکتر شوبیری که راهنمایی های ارزشمندشان در انجام این تحقیق بسیار مؤثر بود، ابراز می دارم.

چکیده

در این تحقیق مدل عددی دو بعدی نوینی که قادر به مدل‌سازی مسائل مختلف امواج آب با هر شرایط اولیه دلخواه باشد، با بهره‌گیری از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH) تهیه شده است. روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده، روش لاگرانژی و بدون شبکه‌ی مبتنی بر ذرات بوده که قادر به مدل‌سازی عددی جریان امواج دارای تغییر شکل‌های زیاد با دقت بالا است. معادلات حاکم در این مدل (معادلات بقای جرم و مقدار حرکت) با استفاده از روش دو گام جزئی حل شده‌اند. در گام اول معادلات ناویر-استوکس بدون در نظر گرفتن جمله‌ی فشار و ارضای کامل تراکم ناپذیری مورد حل قرار می‌گیرد. در گام بعد، معادله‌ی پواسون برای اعمال جمله‌ی فشار و حاکمیت پیوستگی حل شده، و موقعیت و سرعت دقیق ذرات به دست می‌آید. در این روش جمله‌های انتقال در معادلات ناویر-استوکس به صورت مستقیم محاسبه می‌شوند که باعث حذف خطای پخش عددی می‌گردد. در مدل حاضر از شیوه‌ای جدید برای اختصاص چگالی به ذرات برای انجام محاسبات استفاده شده است. با استفاده از این شیوه، مدل هیدرودینامیک ذرات هموار شده‌ی تراکم ناپذیر (ISPH) حاضر پایدار شد. در ابتدا صحت سنجی مدل عددی تهیه شده با استفاده از مدل‌سازی مسئله‌ی حرکت موج تنها در عمق یکنواخت و مقایسه‌ی نتایج محاسباتی با نتایج تحلیلی صورت گرفته است که مطابقت خوبی بین آن‌ها مشاهده می‌شود. همچنین در این بخش، بر روی همگرایی روش و حساسیت مدل به پارامترهای مربوط بحث انجام شده است.

سپس با استفاده از مدل عددی، مسائل شکست سد و برخورد امواج ناشی از آن با دیواره‌ی پایین دست ، شکست موج تنها در ساحل شیب‌دار و بالاروی آن در ساحل با شیب تند مدل‌سازی و نتایج آن با داده‌های موجود مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل هیدرودینامیک ISPH حاضر، مدلی مناسب برای شبیه سازی مسائل پیچیده‌ی مکانیک سیالات با شرایط مرزی سطح آزاد می‌باشد.

کلمات کلیدی: جریان با سطح آزاد تراکم ناپذیر، هیدرودینامیک ذرات هموار شده، روش گام به گام جزئی، موج تنها، شکست سد.

فهرست مطالب

فصل اول – مقدمه: صفحات ۱ تا ۱۴

۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- تعریف موج ۲
۱-۲-۱- مشخصات امواج ۳
۱-۳- مدل‌سازی موج ۵
۱-۳-۱- مدل‌سازی تحلیلی موج ۶
۱-۳-۲- مدل‌سازی تجربی موج ۶
۱-۳-۳- مدل‌سازی فیزیکی موج ۷
۱-۳-۴- مدل‌سازی عددی موج ۷
۱-۳-۴-۱- مدل‌های طیفی موج ۸
۱-۳-۴-۲- مدل‌های مبتنی بر معادلات شیب ملایم ۸
۱-۳-۴-۳- مدل‌های مبتنی بر معادلات بوسینسک ۹
۱-۳-۴-۴- مدل‌های مبتنی بر معادلات آبهای کم عمق ۱۰
۱-۳-۴-۵- مدل‌های شبه سه بعدی موج با فرض فشار هیدرواستاتیک ۱۰
۱-۳-۴-۶- مدل‌های شبیه ساز کامل سه بعدی امواج آب بدون آشفتگی ۱۱
۱-۳-۴-۷- مدل‌های شبیه ساز کامل سه بعدی امواج آب با آشفتگی یا مدل‌های معادلات ناویر-استوکس ۱۱
۱-۴- انتخاب روش مناسب برای مدل‌سازی عددی ۱۲
۱-۵- شرح موضوع پایان نامه ۱۳
۱-۶- سیمای پایان نامه ۱۴

فصل دوم – مروری بر ادبیات فنی موضوع: صفحات ۱۵ تا ۳۰

۲-۱- مقدمه ۱۶
۲-۲- روش‌های مدل‌سازی عددی امواج ۱۶
۲-۲-۱- روش‌های مبتنی بر شبکه بندی میدان جریان ۱۷
۲-۲-۲- روش‌های ترکیبی مبتنی بر شبکه بندی میدان جریان و ذره ای ۱۹
۲-۲-۳- روش‌های ترکیبی مبتنی بر شبکه بندی میدان جریان به همراه ردیاب سطح آزاد جریان ۲۰
۲-۲-۴- روش‌های بدون شبکه بندی مبتنی بر ذرات ۲۰
۲-۳- معرفی روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH) ۲۱
۲-۴- کاربردهای روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده در اختر فیزیک ۲۱
۲-۵- کاربردهای روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده در مکانیک جامدات ۲۳
۲-۶- کاربردهای روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده در مکانیک سیالات ۲۵
۲-۷- جمع‌بندی ۳۱

فصل سوم - معادلات حاکم و مدل‌سازی روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده‌ی تراکم ناپذیر: صفحات ۳۱ تا ۵۵

۳-۱- مقدمه ۳۳
۳-۲- قانون بقای جرم ۳۳
۳-۳- قانون بقای مقدار حرکت ۳۴
۳-۴- فرمول‌بندی روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده ۳۵
۳-۴-۱- تعریف تابع ۳۵
۳-۴-۲- مشتق فضایی تابع ۳۸
۳-۴-۳- تابع هموار ۳۹
۳-۴-۳-۱- انتخاب تابع هموار مناسب ۴۱
۳-۴-۴- طول هموار ۴۴
۳-۴-۵- پیدا کردن ذرات موجود در ناحیه‌ی تأثیر هر ذره ۴۵
۳-۵- گسسته سازی معادلات حاکم با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده ۴۶
۳-۵-۱- گسسته سازی معادله‌ی مقدار حرکت ۴۶
۳-۶- الگوریتم دو گام جزئی حل معادلات به روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده‌ی تراکم ناپذیر ۴۹
۳-۶-۱- اعمال هندسه و شرایط اولیه‌ی مسئله ۵۰
۳-۶-۲- مرحله‌ی پیش‌بینی ۵۰
۳-۶-۳- مرحله‌ی تصحیح ۵۱
۳-۶-۴- اصلاح سرعت پیش‌بینی شده‌ی ذرات و به دست آوردن سرعت جدید آن‌ها ۵۲
۳-۶-۵- اصلاح موقعیت پیش‌بینی شده‌ی ذرات و به دست آوردن موقعیت جدید آن‌ها ۵۲
۳-۷- شرایط مرزی ۵۲
۳-۷-۱- دیواره‌ی صلب ۵۲
۳-۷-۲- سطح آزاد ۵۳
۳-۸- محدودیت گام زمانی برای کنترل همگرایی مدل ۵۴
۳-۹- ساختار مدل عددی تهیه شده ۵۵
۳-۱۰- جمع‌بندی ۵۵

فصل چهارم – صحت سنجی مدل عددی و شبیه‌سازی مسائل امواج آب: صفحات ۵۶ تا ۸۸

۴-۱- مقدمه ۵۸
۴-۲- مسئله‌ی حرکت موج تنها در عمق یکنواخت ۵۸
۴-۲-۱- توصیف مسئله ۵۸
۴-۲-۲- پارامترهای مدل‌سازی مسئله ۵۹
۴-۲-۳- نتایج مدل‌سازی ۶۰
۴-۲-۴- ارزیابی همگرایی مدل عددی هیدرودینامیک ذرات هموار شده‌ی تراکم ناپذیر ۶۳
۴-۳- مسئله‌ی شکست سد دو بعدی ۶۴
۴-۳-۱- توصیف مسئله ۶۴
۴-۳-۲- پارامترهای مدل‌سازی مسئله ۶۶

۴-۳-۳- نتایج مدل‌سازی مسئله ۶۷
۴-۴- مسئله‌ی شکست موج در ساحل با شیب ملایم ۷۵
۴-۴-۱- توصیف مسئله ۷۵
۴-۴-۲- پارامترهای مدل‌سازی مسئله ۷۶
۴-۴-۳- نتایج مدل‌سازی مسئله ۷۷
۴-۵- مسئله‌ی بالاروی موج از ساحل ۸۳
۴-۵-۱- توصیف مسئله ۸۳
۴-۵-۲- پارامترهای مدل‌سازی مسئله ۸۴
۴-۵-۳- نتایج مدل‌سازی مسئله ۸۴
۴-۶- جمع‌بندی ۸۹

فصل پنجم – نتیجه گیری و پیشنهادها : صفحات ۹۱ تا ۹۳

۵-۱- جمع‌بندی ۹۱
۵-۲- نتیجه گیری ۹۱
۵-۳- پیشنهادها برای تحقیقات آتی ۹۳

فهرست منابع و مراجع: صفحات ۹۴ تا ۹۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: مشخصات موج ۴
شکل ۱-۲: مثالی از یک شکل محتمل موجی که ثبت شده است ۵
شکل ۲-۱: پیشبینی تشکیل کهکشان با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده ۲۳
شکل ۲-۲: فرآیند شکست در صفحه در حین برخورد ۲۵
شکل ۲-۳: شبیه سازی جریانهای تراکم ناپذیر با روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده ۲۷
شکل ۳-۱: روشهای مختلف تقریب توابع ۳۶
شکل ۳-۲: منحنی تغییرات تابع درونیابی Cubic spline بر حسب q ۴۴
شکل ۳-۳: منحنی تغییرات مشتق تابع درونیابی Cubic spline بر حسب q ۴۴
شکل ۳-۴: استفاده از شبکه بندی مربعی برای پیدا کردن ذرات همسایه‌ی یک ذره‌ی مرکزی ۴۶
شکل ۳-۵: نمودار گردشی مدل هیدرودینامیک ذرات هموار شده‌ی تراکم ناپذیر تهیه شده ۵۶
شکل ۴-۱: شرایط هندسی اولیه‌ی مسئله‌ی حرکت موج تنها در عمق یکنواخت ۵۹
شکل ۴-۲: موقعیت ذرات مسئله‌ی حرکت موج تنها در زمان‌های مختلف و مقایسه با نتایج تحلیلی ۶۱
شکل ۴-۳: میدان فشار محاسبه شده‌ی مسئله‌ی حرکت موج تنها به وسیله‌ی مدل حاضر ۶۲
شکل ۴-۴: میدان سرعت مسئله‌ی حرکت موج تنها در عمق یکنواخت ۶۲
شکل ۴-۵: ارتفاع محاسباتی و تحلیلی موج تنها در عمق یکنواخت ۶۳
شکل ۴-۶: هندسه‌ی مسئله‌ی شکست سد ۶۶
شکل ۴-۷: موقعیت ذرات و میدان فشار مسئله‌ی شکست سد در زمان‌های مختلف و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی .. ۷۲
شکل ۴-۸: نمودار موقعیت نرمال شده‌ی پنجه‌ی ستون آب در مقابل زمان و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و عددی . ۷۳
شکل ۴-۹: میدان سرعت مسئله‌ی شکست سد در زمان‌های مختلف ۷۴
شکل ۴-۱۰: شرایط هندسی اولیه‌ی مسئله‌ی حرکت و شکست موج تنها در ساحل با شیب ۱:۲۰ ..... ۷۶
شکل ۴-۱۱: موقعیت ذرات و میدان فشار مسئله‌ی شکست موج تنها در ساحل با شیب ۱:۲۰ در زمان‌های مختلف و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ۸۱
شکل ۴-۱۲: میدان سرعت مسئله‌ی شکست موج تنها در ساحل با شیب ملایم ۸۳
شکل ۴-۱۳: موقعیت ذرات و میدان فشار مسئله‌ی بالاروی موج تنها از ساحل با شیب ۴۵ درجه در زمانهای مختلف ۸۶
شکل ۴-۱۴: مقایسه‌ی نتایج بالاروی موج از ساحل با مدل حاضر و نتایج تجربی ۸۶
شکل ۴-۱۵: بالاروی محاسبه شده‌ی موج تنها از ساحل با شیب ۱:۲ با مدل حاضر ۸۷
شکل ۴-۱۶: بالاروی محاسبه شده‌ی موج تنها از ساحل با شیب ۱:۴ با مدل حاضر ۸۷
شکل ۴-۱۷: بالاروی محاسبه شده‌ی موج تنها از ساحل با شیب ۱:۸ با مدل حاضر ۸۷
شکل ۴-۱۸: بالاروی محاسبه شده‌ی موج تنها از دیواره‌ی عمودی با مدل حاضر ۸۸
شکل ۴-۱۹: نمودار رابطه‌ی بالاروی موج تنها از ساحل‌های با شیب تند ۸۸

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱: تعدادی از توابع هموار قابل استفاده در مدل‌سازی روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده ۴۲

فصل اول:

مقدمه

۱-۱- مقدمه

شناخت پدیده‌های طبیعی که در نظام خلقت به وقوع می‌پیوندند از دیر باز توجه‌های زیادی را به خود جلب کرده است. از این‌رو تلاش‌های گسترده‌ای به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف در جهان برای شناخت قوانین حاکم بر این پدیده‌ها انجام شده است تا آن‌ها را کنترل کرده و برای تعالی زندگی انسان به‌کار گیرند. اکثر پدیده‌های حاکم در طبیعت به وسیله‌ی معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بیان می‌شوند که به ندرت می‌توان آن‌ها را به طور تحلیلی حل نمود. یکی از این پدیده‌ها، پدیده‌ی جریان با سطح آزاد[1] است که امواج آب نمونه‌ای از آن می‌باشد. امواج آب از جمله با اهمیت‌ترین جریان‌ها در علم هیدرولیک می‌باشد که در اثر اعمال نیروهای خارجی مانند نیروی باد یا سقوط سنگ روی آب در سیال به وجود می‌آید. جریان ناشی از شکست سد، شکست امواج ناشی از سونامی در سواحل و سرریز موج از سازه‌های ساحلی از جمله پدیده‌های مهم مرتبط با جریان امواج آب می‌باشند که می‌توانند باعث وارد آوردن خسارت‌های زیادی شوند.

۱-۲- تعریف موج

به ندرت می‌توان دید که حجمی از آب در معرض اتمسفر واقع شود ولی موجی در سطح آن تشکیل نشود. این امواج نمادی از نیروهای اعمال شده روی سیال هستند که منجر به تغییر شکل در سطح آن در مقابل عملکرد نیروهای وزن و کشش سطحی می‌شوند (دو نیرویی که باعث قرار گرفتن یک سطح سیال به صورت هموار هستند). بنابراین برای ایجاد امواج نیاز به نیروهایی مانند نیروی اعمال شده توسط یک تندباد یا سقوط یک سنگ روی آب می‌باشد. با ایجاد امواج، نیروهای وزن و کشش سطحی فعال شده و باعث پیشروی امواج می‌شوند [۱].

بسته به اندازه نیروهای اعمال شده روی آب، امواج در همه‌ی اندازه‌ها و شکل‌ها تشکیل می‌شوند. یک نمونه‌ی ساده ایجاد امواج با اندازه‌های مختلف در اثر برخورد یک سنگ کوچک و یا بزرگ با سطح

[1] Free surface flows

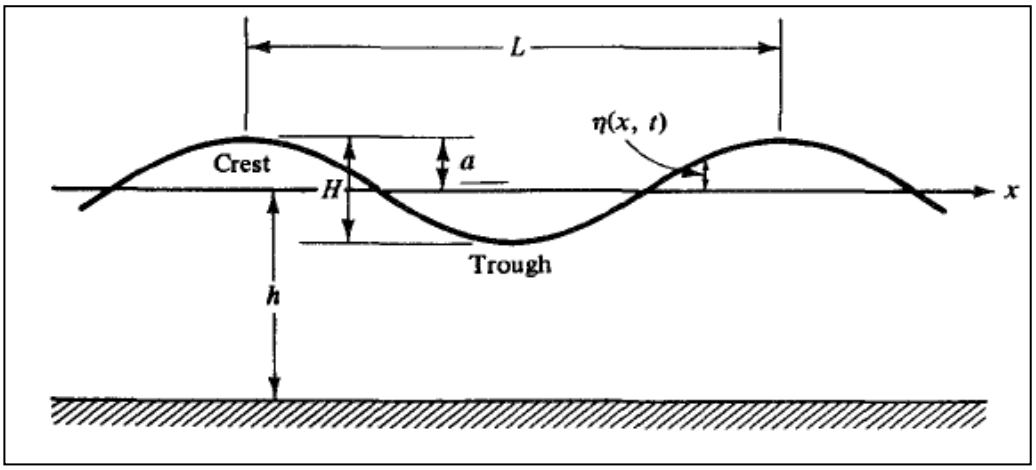
آب می‌باشد. به علاوه، سرعت‌های برخورد مختلف، امواج با اندازه‌های متفاوت ایجاد می‌کنند که نشان دهنده‌ی اهمیت نیروهای فشاری اعمال شده روی سیال و همچنین مقدار سیال جابجا شده است. جاذبه‌ی ماه خورشید و دیگر اجرام سماوی، بلندترین نوع امواج شناخته شده یعنی امواج جزر و مدی را تولید می‌کنند. این امواج نیمی از دور زمین را احاطه کرده و با سرعت‌های زیادی حرکت می‌کنند. در مقابل، طول موج کوتاه‌ترین امواج می‌تواند کمتر از یک سانتیمتر باشد. اندازه‌ی طول موج، ایده‌ای از اندازه نیروهای اعمال شده روی امواج را بدست می‌دهد. برای مثال، هرچه موج طولانی‌تر باشد، اثر ثقل (شامل اثرات زمین، ماه و خورشید) نسبت به کشش سطحی مهم‌تر است [۱].

اهمیت امواج از بسیاری جهات قابل توجه است. هر بنایی که در کنار یک محیط دریایی یا درون آن است، در معرض تأثیر موج قرار دارد. در ساحل، موج می‌تواند منجر به حرکت رسوب در امتداد ساحل شده و یا باعث فرسایش یا ایجاد خسارت به سازه‌ها در طی طوفان شود. در محیط دریایی، سکوهای نفتی باید بدون اینکه خسارت ببینند، بتوانند طوفان‌های سخت را تحمل کنند. برای تأمین این منظور در عمق‌های حفاری کنونی که متجاوز از ۳۰۰ متر است، نیاز به ساخت سازه‌های عظیم و پرهزینه می‌باشد. بر روی آب نیز، همه‌ی کشتی‌ها در معرض برخورد امواج قرار دارند و کشتی‌های بی‌شماری در اثر امواجی که ارتفاع آن‌ها تا ۳۴ متر هم مشاهده شده، غرق شده‌اند. به علاوه، هر کشتی که در آب حرکت می‌کند یک میدان فشار و لذا امواجی را تولید می‌کند که بخش قابل توجهی از مقاومت در برابر کشتی را موجب می‌شوند [۱].

۱-۲-۱- مشخصات امواج

پارامترهای مهم برای توصیف امواج، طول و ارتفاع آن‌ها و عمق آب هستند. همه‌ی پارامترهای دیگر مانند مقادیر سرعت و شتاب ایجاد شده در آب در اثر امواج می‌توانند با استفاده از تئوری از روی این مقادیر به دست آیند. در شکل ۱-۱ یک نمای شماتیک دو بعدی از یک موج منتشر شده در جهت X نشان داده شده است. طول موج (L)، فاصله‌ی افقی بین دو تاج موج متوالی (یا نقاط مرتفع روی موج) و یا به طور معادل فاصله‌ی بین دو قعر موج می‌باشد. طول موج با عمق آب (h) و دوره

تناوب (T) رابطه دارد. دوره تناوب موج (T) مدت زمان مورد نیاز برای عبور دو تاج موج یا دو قعر موج متوالی از یک نقطه مشخص است. بنابراین چون موج فاصله‌ی L را باید در زمان T طی کند لذا سرعت موج (C) به صورت C= L/T تعریف می‌شود. درحالی‌که شکل موج با سرعت C حرکت می‌کند، آبی که موج را شامل می‌شود در جهت موج منتقل نمی‌شود [۱].

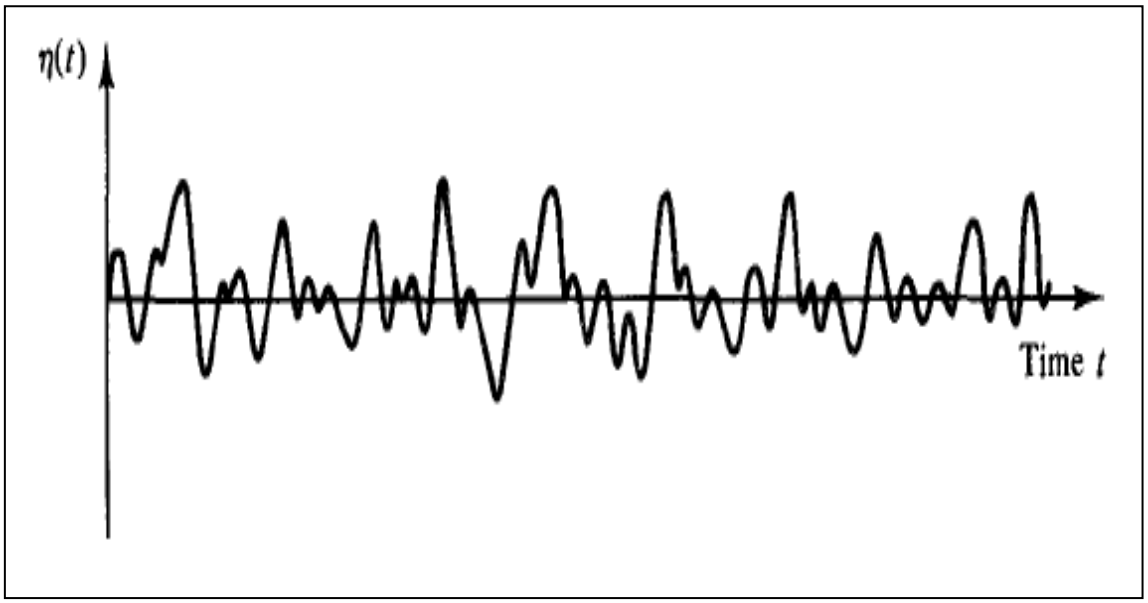


شکل ۱-۱: مشخصات موج. چاپ شده از [۱].

در طبیعت به ندرت مشاهده می‌شود که امواج دقیقاً مشابه هم باشند و همواره در یک جهت حرکت کنند. اگر اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب (η) به صورت تابعی از زمان روی یک سکو در میان اقیانوس صورت گیرد، نموداری مانند شکل ۱-۲ را ثبت می‌نماید. مشاهده می‌گردد که سطح دریا از بر هم نهی تعداد زیادی موج سینوسی که در جهت‌های مختلف حرکت می‌کنند تشکیل شده است. با بر هم نهی امواج سینوسی امکان استفاده از تحلیل فوریه و روش‌های طیفی در توصیف امواج دریا میسر می‌گردد. وضعیت دریا کاملاً تصادفی است و لازم است از روش‌های آماری استفاده شود. اما خوشبختانه، امواج خیلی بزرگ یا امواج آب کم عمق[1] خیلی منظم‌تر از امواج کوچک یا امواج آب عمیق[2] به نظر می‌رسند و خیلی تصادفی نیستند. بنابراین، در این موارد هر موج به راحتی با یک موج سینوسی توصیف می‌شود که به طور متوالی تکرار می‌شود. به علت اثرات غیر خطی در آب کم عمق، عموماً تعداد بیشتری از یک موج سینوسی که همگی آن‌ها نیز در یک فاز هستند مورد نیاز است.

[1] Shallow water
[2] Deep water

اگرچه که استفاده از تنها یک موج سینوسی نیز برای بعضی اهداف دقت قابل قبولی را ارائه می‌نماید. این دقت جالب توجه و راحتی کاربرد باعث شده است که تئوری موج خطی یا موج با دامنه کوچک به طور متداول و وسیع مورد استفاده قرار گیرد. امتیازات این تئوری این است که استفاده از آن، بر خلاف تئوری‌های غیر خطی بسیار پیچیده، آسان است و برای به کار بردن اصل بر هم نهی مناسب است. به علاوه، تئوری موج خطی وسیله‌ی مؤثری برای توصیف بعضی از تئوری‌های غیر خطی است [۱].



شکل ۱-۲: مثالی از یک شکل محتمل موجی که ثبت شده است. چاپ شده از [۱].

۱-۳- مدل‌سازی موج

برای مطالعه‌ی موج آب و پارامترهای مؤثر آن باید با استفاده از روش خاصی به مدل‌سازی آن بپردازیم. این روش‌های مدل‌سازی عبارتند از مدل‌سازی تحلیلی موج[۱]، مدل‌سازی تجربی موج[۲]، مدل‌سازی فیزیکی موج[۳] و مدل‌سازی عددی موج[۴]. با وجود مزایا و معایب هر کدام از این روش‌ها، اما هر یک از آن‌ها برای اهداف خاص خود به کار می‌روند. در ادامه با هر یک از این روش‌ها به طور خلاصه آشنا می‌شویم.

[1] Analytical wave modeling
[2] Empirical wave modeling
[3] Physical wave modeling
[4] Numerical wave modeling

۱-۳-۱- مدل‌سازی تحلیلی موج

فیزیک موج در طبیعت ممکن است خیلی پیچیده باشد. با استفاده از تئوری‌های ساده می‌توان این سیستم پیچیده را به شکلی که قابل تحلیل باشد، مدل کرد. این مدل معمولاً با معادلات ریاضی که به دو دسته معادلات دیفرانسیلی با مشتقات جزئی (PDE) و معادلات دیفرانسیلی معمولی (ODE) تقسیم می‌شوند، بیان می‌شود. این معادلات با استنتاج‌های پیچیده ریاضی به دست می‌آیند که هر مرحله از آن فرضیات خاص خود را دارد. بعد از به دست آمدن معادلات، آن‌ها را برای شرایط مشخصی حل کرده و جواب آن برای پیش‌بینی عملکرد دقیق موج به کار گرفته می‌شود. این روش، که به آن مدل‌سازی تحلیلی موج می‌گویند، روش بسیار مناسبی برای درک فیزیک پدیده موج در موارد خاص می‌باشد. هرچند که بیشتر امواج را به صورت تئوری می‌توان فرموله کرد، اما تعداد کمی از این فرمول‌ها را می‌توان به صورت تحلیلی حل نمود و این مهم‌ترین محدودیت برای به کار بردن این نوع مدل‌سازی برای بررسی امواج مختلف می‌باشد [۲].

۱-۳-۲- مدل‌سازی تجربی موج

در این روش مدل‌سازی موج، یک فرمول تجربی که یک رابطه‌ی ساده‌ی ریاضی است و با استفاده از داده‌های میدانی مدل واقعی موجود نوشته شده است، برای نشان دادن عملکرد سیستم به کار می‌رود. به علت آسان بودن مراحل انجام روش‌های تجربی، این روش‌ها به شکل گسترده در طرح‌های مهندسی به کار می‌روند. نمونه‌ای از کاربرد این روش در مدل‌سازی موج، معادله‌ی موریسون[1] می‌باشد که برای تخمین نیروی اعمال شده به سازه از طرف موج به کار می‌رود. از آنجایی که فرمول‌های تجربی بر اساس داده‌های مدل‌های موجود به دست می‌آیند، برای نمونه‌های جدید ممکن است چندان مناسب نباشند [۲].

[1] Morison equation

۱-۳-۳- مدل‌سازی فیزیکی موج

برای شناخت خصوصیات موج در طبیعت، به جای مطالعه روی نمونه‌ی اصلی، می‌توان از یک نمونه‌ی آزمایشگاهی که با ابعاد کوچک‌تر ساخته می‌شود و به عنوان مدل کوچک شده‌ی نمونه‌ی اصلی شناخته می‌شود، استفاده کرد. خصوصیات موج با اندازه گیری روی نمونه‌ی آزمایشگاهی و استفاده از قانون‌های تشابه به نمونه‌ی اصلی بسط داده می‌شود. این روش، مدل‌سازی فیزیکی موج نامیده می‌شود. به دست آوردن بارهای وارده ناشی از امواج بر سازه‌های دور از ساحل، نمونه‌ای عملی از این نوع مدل‌سازی می‌باشد. علیرغم قابلیت‌های خوب این روش، با پیچیده شدن فیزیک موج، با در نظر گرفتن تمامی قوانین تشابه نیز نمی‌توان مدلی که همه‌ی خصوصیات نمونه‌ی اصلی را در نظر بگیرد، طراحی کرد و ساخت [۲].

۱-۳-۴- مدل‌سازی عددی موج

در مدل‌سازی عددی موج از روابط ریاضی برای بیان فیزیک موج و از تقریب‌ها عددی برای حل معادلات ریاضی استفاده می‌شود. تفاوت این روش با مدل‌سازی تحلیلی موج در روش به دست آوردن جواب‌ها برای معادلات موج می‌باشد [۲]. روش‌های تحلیلی با توجه به ماهیت پیچیده‌شان از سابقه‌ی کمتری نسبت به روش‌های تجربی برخوردارند ولی در طی سال‌های اخیر با گسترش علوم ریاضی، فیزیک و رایانه بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این وجود عوامل متعددی سبب می‌شود که بررسی تحلیلی امواج بسیار مشکل باشد که در زیر به تعدادی از این عوامل اشاره می‌شود:

الف –معادلات حاکم عمدتاً غیر خطی می‌باشند.

ب –اعمال شرایط مرزی مشکل است.

ج –دامنه‌ی محاسباتی عمدتاً شکل غیر هندسی دارد و دائم در حال تغییر است.

د-تغییر شکل سطح آزاد جریان ممکن است بسیار شدید باشد.

با این اوصاف روش‌های عددی تنها راه حل در مطالعه ریاضی چنین مسائلی می‌باشند و اصولاً شاخه دینامیک سیالات محاسباتی به همین دلیل گسترش یافته است.

برای مدل‌سازی عددی امواج آب مدل‌های گوناگونی بسط و گسترش پیدا کرده‌اند؛ در ادامه مروری بر تعدادی از مدل‌های تحلیل عددی امواج آب بر پایه‌ی قابلیت‌هایشان انجام می‌شود تا یک دید کلی در مورد مدل‌های عددی امواج آب موجود و معادلاتی که در هرکدام از آن‌ها حل می‌شوند، بدست آید.

۱-۳-۴-۱- مدل‌های طیفی موج[1]

عمومی‌ترین مدل‌های موجی که برای مدل‌سازی حرکت موج‌های با مقیاس بزرگ استفاده می‌شود، مدل طیفی انرژی موج و مدل طیفی جنبش موج می‌باشند. این نوع مدل‌ها بر این فرضیه که وضعیت تصادفی دریا ترکیبی از تعداد نامحدودی از موج‌های خطی می‌باشد که در آن‌ها ارتفاع موج تابعی از بسامد موج و جهت انتشار موج است، استوار می‌باشند. برای یک قطار موج تکی، نرخ تغییرات شار انرژی موج با انتقال انرژی موج بین مؤلفه‌های مختلف موج در جهات مختلف، یعنی همان انکسار موج و مؤلفه‌های مختلف موج با فرکانس‌های مختلف، یعنی همان اندرکنش موج غیر خطی به علاوه انرژی ورودی و اتلاف انرژی متعادل می‌شود. یکی از مدل‌های طیفی انرژی موج معروف، WAM[2] می‌باشد که به وسیله‌ی هاسلمن[3] و همکاران [۳] ابداع شده است و برای مدل‌سازی تغییرات در مقیاس بزرگ ارتفاع موج در اقیانوس‌های عمیق استفاده می‌شود. با استفاده از یک مدل اتمسفری، مدل طیفی انرژی موج قادر به پیش‌بینی اقلیم موج اقیانوس نیز می‌باشد [۲].

۱-۳-۴-۲- مدل‌های مبتنی بر معادلات شیب ملایم[4]

معادلات شیب ملایم بر پایه‌ی فرضیات موج‌های خطی و تغییرات ملایم تراز کف دریا استخراج شده‌اند. از این معادلات می‌توان برای توصیف تفرق و پیچش موج در آب‌های کم عمق و عمیق

[1] Wave spectral models
[2] WAve prediction Model
[3] Hasselmann
[4] Mild-slope equation wave models