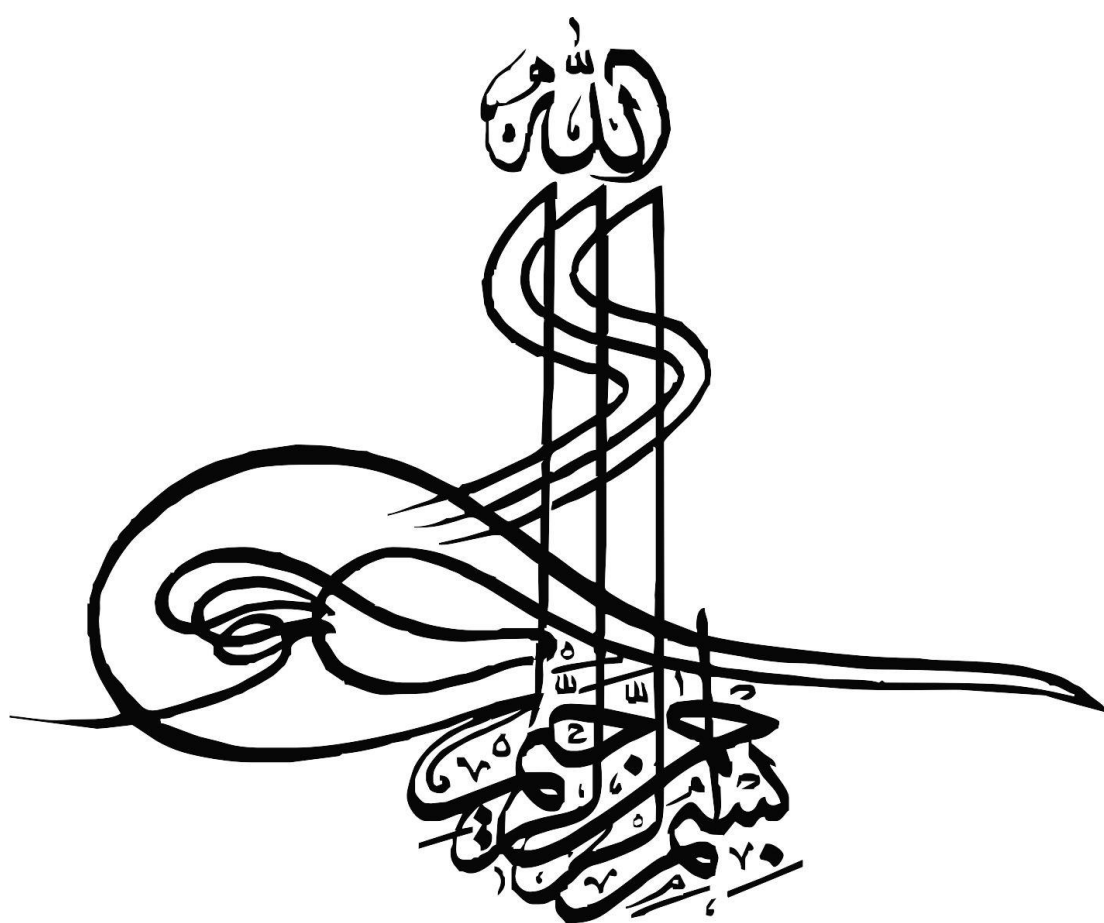






دانشکده عمران

گروه مهندسی عمران – گرایش سازه های هیدرولیکی

مدل سازی روگذری موج با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH)

محمد رضا نائیج

اساتید راهنما :

دکتر رامین امینی و دکتر امیرعباس عابدینی

استاد مشاور :

دکتر عجمی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

بسمه تعالی

فرم شماره (۶)

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمدرضا نایب رسته عمران گرایش سازه های هیدرولیک تحت عنوان: مدلسازی رو گذری موج با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده که در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۱۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : بسیار خوب امتیاز ۱۸/۱۸) ☒ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸) ۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴) ۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما اول	دکتر رامین امینی	استاد یار	
۲- استاد راهنما دوم	امیر عباس عابدینی	استاد یار	
۳- استاد مشاور	دکتر مهدی عجمی	استاد یار	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استاد یار	
۵- استاد ممتحن	دکتر احمد احمدی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن	دکتر سعید گلپای	استاد یار	

رئیس دانشکده : دکتر احمد احمدی

تقدیم به

استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم

سبزترین نگاه زندگی ام، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم، در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره ای از دریای بی کران
مهربانی تان را سپاس نتوانم بگویم.

امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما.

ره آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم. باشد که حاصل
تلاشم، نسیم گونه غبار خستگی تان را بزدايد.

بوسه بر دستان پر مهرتان

تقدیر و تشکر

سپاس و ستایش خدای را که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمر و فرصتی عطا نمود تا بدان، بنده‌ی ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید.

دلسوزی، تلاش و کوشش اساتید ارجمند آقایان دکتر امینی، دکتر عابدینی و دکتر عجمی در تعلیم و تربیت و انتقال معلومات و تجربیات ارزشمند در کنار برقراری رابطه صمیمی و دوستانه با دانشجویان حقیقتاً قابل ستایش است. این جانب بر خود وظیفه میدانم در کسوت شاگردی از زحمات و خدمات ارزشمند این اساتید گران قدر تقدیر و تشکر نمایم.

تعهد نامه

اینجانب محمدرضا نائیج دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی روگذری موج با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH) تحت راهنمایی دکتر رامین امینی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای 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

در این تحقیق مدل عددی که قادر به مدل سازی مسئله روگذری امواج آب با هر شرایط اولیه دلخواه باشد، با بهره گیری از روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده (SPH) تهیه شده است. روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده، روش لاگرانژی و بدون شبکه ی مبتنی بر ذرات بوده که قادر به مدل سازی عددی جریان امواج دارای تغییر شکل های زیاد با دقت بالا است. برای تخمین و مدل سازی میزان روگذری موج بر روی دیوارهای ساحلی، دایک ها و دیگر سازه های حفاظت ساحلی تاکنون از روش های مختلفی استفاده شده است. در این تحقیق برای رفع نقایص و افزایش دقت این مدل سازی ها، این پدیده با استفاده از روش SPH مدل سازی شده است. برای شبیه سازی جریان های با سطح آزاد در معادلات ناویر - استوکس به فرم لاگرانژی، ذرات سیال با استفاده از روش عددی در گام های زمانی متعدد دنبال می شوند. در این تحقیق ابتدا مسئله بالاروی موج منفرد با استفاده از مدل عددی، با یک مدل آزمایشگاهی صحت سنجی شد و تطابق خوبی بین مدل آزمایشگاهی و مدل حاضر حاصل گردید. سپس، مسئله روگذری موج منفرد مدل سازی و نتایج آن با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است. باید به این نکته اشاره کرد که ذرات تا 0.006 متر کوچک شدند و در برخی مدل ها بیش از 30000 ذره وجود دارد که باعث شده نتایج دقیق تر شوند. نتایج به دست آمده نشان می دهد که مدل SPH حاضر، مدلی مناسب برای شبیه سازی مسائل پیچیده ی مکانیک سیالات با شرایط مرزی سطح آزاد می باشد.

کلمات کلیدی: روش بدون شبکه بندی، SPH، روگذری امواج، بالاروی، ناویر - استوکس

فهرست مطالب

فصل اول - مقدمه

- ۱-۱- مقدمه..... ۲
- ۲-۱- تعریف موج..... ۲
- ۱-۲-۱- مشخصات امواج..... ۳
- ۳-۱- مدل سازی موج..... ۵
- ۱-۳-۱- روش تحلیلی..... ۶
- ۲-۳-۱- روش آزمایشگاهی..... ۶
- ۳-۳-۱- روش تجربی..... ۷
- ۴-۳-۱- روش عددی..... ۷
- ۱-۴-۳-۱- جایگاه روش های عددی..... ۷
- ۲-۴-۳-۱- تقسیم بندی روش های عددی در تحلیل امواج..... ۸
- ۳-۴-۳-۱- فرآیند حل مسئله در روش های عددی..... ۹
- ۴-۴-۳-۱- انتخاب روش مناسب برای مدل سازی عددی..... ۱۰
- ۴-۱- روگذری موج..... ۱۱
- ۱-۴-۱- اهمیت مسئله..... ۱۲
- ۲-۴-۱- هدف از پژوهش..... ۱۴
- ۵-۱- ساختار پایان نامه..... ۱۵

فصل دوم - مروری بر ادبیات فنی

- ۱-۲- مقدمه..... ۱۶
- ۲-۲- روش های مختلف مدل سازی بالاروی و روگذری امواج..... ۱۶

۱۶.....	۱-۲-۲- روابط تحلیلی.....
۱۶.....	۱-۱-۲-۲- روابط پیشنهادی Shiigai و Kono.....
۱۸.....	۲-۱-۲-۲- روابط پیشنهادی Horikawa و Yamamoto.....
۱۸.....	۱-۲-۱-۲-۲- محاسبه ارتفاع بالاروی موج در امواج شکننا.....
۲۰.....	۲-۲-۱-۲-۲- محاسبه دبی روگذری موج در امواج شکننا.....
۲۱.....	۲-۲-۲- روابط تجربی.....
۲۱.....	۱-۲-۲-۲- رابطه روگذری Van der Meer and Janssen.....
۲۲.....	۲-۲-۲-۲- رابطه روگذری Owen.....
۲۳.....	۳-۲-۲-۲- رابطه روگذری Reis and Hedges.....
۲۴.....	۳-۲-۲- روابط عددی.....
۳۴.....	۳-۲- جمع بندی.....
فصل سوم - معادلات حاکم و مدل سازی روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده ی تراکم پذیر	
۳۶.....	۳-۱- مقدمه.....
۳۶.....	۳-۲- مبانی روش هیدرودینامیک ذرات هموار استاندارد SPH.....
۴۰.....	۳-۳- توابع وزن SPH.....
۴۵.....	۴-۳- محاسبه مقدار مشتق اول تابع با استفاده از روش SPH.....
۴۶.....	۵-۳- محاسبه مقدار مشتق مراتب بالاتر با استفاده از روش SPH.....
۴۸.....	۶-۳- فرمول بندی SPH برای معادلات ناویر- استوکس.....
۵۰.....	۷-۳- سطح آزاد.....
۵۲.....	۸-۳- مرزهای جامد.....
۵۳.....	۹-۳- جستجوی ذرات هم جوار.....

۱۰-۳- محدودیت گام زمانی..... ۵۵

۱۱-۳- جمع بندی..... ۵۶

فصل چهارم - صحت سنجی مدل عددی و شبیه سازی مسائل بالاروی و روگذری موج

۴-۱- مقدمه..... ۵۸

۴-۲- کدهای SPHYSICS و نرم افزار شبیه ساز ParaView..... ۵۸

۴-۳- مسئله بالاروی موج..... ۶۰

۴-۳-۱- توصیف مسئله..... ۶۰

۴-۳-۲- پارامترهای مدل سازی مسئله..... ۶۰

۴-۳-۳- نتایج مدل سازی مسئله..... ۶۲

۴-۴- مسئله روگذری موج..... ۷۲

۴-۴-۱- توصیف مسئله..... ۷۲

۴-۳-۲- پارامترهای مدل سازی مسئله..... ۷۳

۴-۳-۳- نتایج مدل سازی مسئله..... ۷۴

۴-۵- برخی خطاها و مشکلات مدل سازی..... ۸۶

۴-۶- جمع بندی..... ۸۷

فصل پنجم - نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری..... ۸۹

۵-۲- پیشنهادها برای تحقیقات آتی..... ۹۱

فهرست منابع و مراجع..... ۹۶

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱ : مشخصات موج..... ۴
- شکل ۲-۱ : مثالی از یک شکل محتمل موجی که ثبت شده است..... ۵
- شکل ۳-۱ : دیاگرام برخورد موج به سازه و روگذری از آن..... ۱۱
- شکل ۴-۱ : روگذری موج شدید در دیوار ساحلی samphire hoe در انگلیس..... ۱۲
- شکل ۱-۲ : زاویه شیب فرضی..... ۱۸
- شکل ۲-۲ : شکل واقعی و فرض شده پروفایل خیزش..... ۲۰
- شکل ۳-۲ : پروفیل سطح آب و بردارهای سرعت در آب..... ۲۹
- شکل ۱-۳ : نمایش دامنه تأثیر تابع هموارساز W و دامنه مسئله..... ۳۸
- شکل ۲-۳ : ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نمایش کیفی تخصیص مقدار وزن به آن‌ها..... ۳۹
- شکل ۳-۳ : ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نمایش کیفی تخصیص مقدار وزن به آن‌ها..... ۳۹
- شکل ۴-۳ : تابع هموارساز Lucy و مشتق اول آن..... ۴۱
- شکل ۵-۳ : تابع هموارساز گاوسی و مشتق اول..... ۴۲
- شکل ۶-۳ : تابع هموارساز Cubic Spline و مشتق اول آن..... ۴۳
- شکل ۷-۳ : تابع هموارساز درجه پنج و مشتق اول آن..... ۴۳
- شکل ۸-۳ : تابع هموارساز درجه دو و مشتق اول آن..... ۴۴
- شکل ۹-۳ : تابع هموارساز درجه پنج و مشتق اول آن..... ۴۵
- شکل ۱۰-۳ : محل قرارگیری یک ذره مجازی سیال در آن سوی مرز سطح آزاد..... ۵۱
- شکل ۱۱-۳ : رفتار دیواره مرزی- رابطه بین ذرات درونی، مجازی و دیواره..... ۵۳
- شکل ۱۲-۳ : برای جستجوی ذرات داخل یک سلول تنها نیمی از سلول‌های مجاور جستجو می‌شود..... ۵۵
- شکل ۱-۴ : شرایط هندسی اولیه مسئله بالاروی موج منفرد در ساحل با شیب ۰.۱۰۷ رادیان..... ۶۲
- شکل ۲-۴ : موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله بالاروی موج منفرد از ساحل..... ۶۳
- شکل ۳-۴ : نتایج آزمایشگاهی بالاروی موج منفرد برای ۲۱ حالت با عمق و ارتفاع های مختلف..... ۶۷
- شکل ۴-۴ : نتایج مدل حاضر برای بالاروی موج منفرد برای ۲۱ حالت با عمق و ارتفاع های مختلف..... ۶۸
- شکل ۵-۴ : مقایسه نتایج بالاروی موج از ساحل با مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی..... ۶۹

شکل ۶-۴ : نمودار رابطه $R/d = ۲.۰۱۱۱(H/d)^{۰.۶۷۴۹}$	۷۰
شکل ۷-۴ : نمودار رابطه $R/d = ۰.۳۹۴۲(H/d)^۲ + ۱.۷۰۷۱(H/d) + ۰.۳۱۲$	۷۰
شکل ۸-۴ : شرایط هندسی اولیه‌ی مسئله‌ی روگذری موج منفرد در ساحل	۷۴
شکل ۹-۴ : موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی روگذری موج منفرد از ساحل	۷۶
شکل ۱۰-۴ : مقایسه‌ی نتایج روگذری موج از ساحل برای $d = ۲۱$ و $Z = ۶.۲$ سانتیمتر	۸۲
شکل ۱۱-۴ : مقایسه‌ی نتایج روگذری موج از ساحل برای $d = ۲۱$ و $Z = ۱۴.۶$ سانتیمتر	۸۳
شکل ۱۲-۴ : مقایسه‌ی نتایج روگذری موج از ساحل برای $d = ۲۶$ و $Z = ۹.۱$ سانتیمتر	۸۴
شکل ۱۳-۴ : مقایسه‌ی نتایج روگذری موج از ساحل برای $d = ۲۶$ و $Z = ۱۷.۵$ سانتیمتر	۸۵

فهرست جدول ها

جدول ۱-۲ : مقادیر تجربی ضرایب a و b در معادله $(۲-۲۴)$	۲۲
جدول ۱-۴ : مقادیر آزمایشگاهی برای بالاروی موج منفرد	۶۶
جدول ۲-۴ : مقادیر مدل حاضر برای بالاروی موج منفرد	۶۷
جدول ۳-۴ : مقادیر خطای نتایج مدل حاضر و روابط ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی برای بالاروی موج منفرد	۷۱
جدول ۴-۴ : حالت های مختلف روگذری موج	۷۵
جدول ۵-۴ : نتایج آزمایشگاهی و مدل حاضر برای روگذری موج منفرد	۸۱

فصل اول:

مقدمه

۱-۱- مقدمه

مسائل مهندسی از جمله سیستم‌های دینامیک سیالات مانند جریان و موج، می‌تواند در طبیعت شکل بسیار پیچیده‌ای به خود گیرد. از این رو برای تحلیل آن‌ها باید به مدل‌های دقیقی دست یافت. این مدل‌ها باید شرایط و ویژگی‌های مهم سیستم را در بر داشته باشند؛ اما تعیین فرمول‌های حاکم به تنهایی کافی نیست. چالش اصلی در چگونگی حل آن‌هاست. 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^۱ است که امواج آب نمونه‌ای از آن می‌باشد. امواج آب از جمله بااهمیت‌ترین 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 اعمال‌شده 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 اعمال‌شده 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 [۵۶].

^۱ Free surface flows

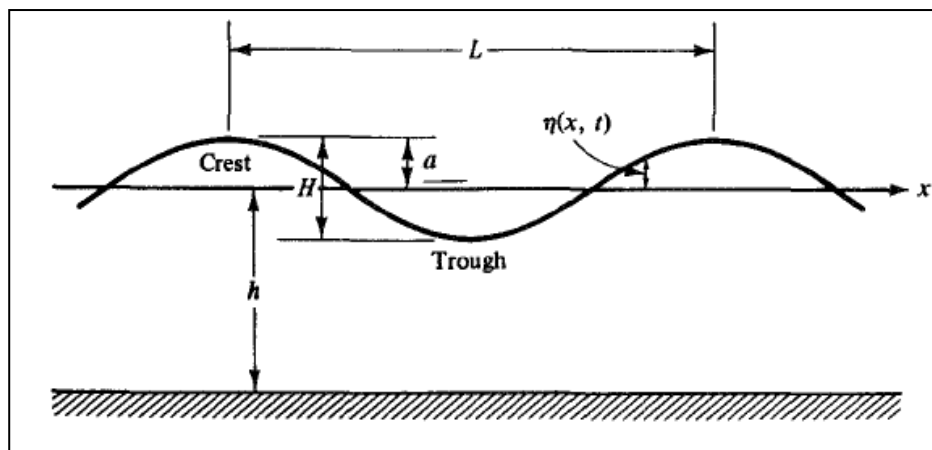
بسته به اندازه نیروهای اعمال شده روی آب، امواج در همه‌ی اندازه‌ها و شکل‌ها تشکیل می‌شوند. یک نمونه‌ی ساده ایجاد امواج با اندازه‌های مختلف در اثر برخورد یک سنگ کوچک و یا بزرگ با سطح آب می‌باشد. به علاوه، سرعت‌های برخورد مختلف، امواج با اندازه‌های متفاوت ایجاد می‌کنند که نشان‌دهنده‌ی اهمیت نیروهای فشاری 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 به دست می‌دهد. برای مثال، هرچه موج طولانی‌تر باشد، اثر ثقل (شامل اثرات زمین، ماه و خورشید) نسبت به کشش سطحی مهم‌تر است [۵۶].

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، سکوه‌های 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 [۵۶].

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 منتشرشده در جهت X نشان داده شده است. طول موج (L)، فاصله‌ی افقی بین دو تاج موج متوالی (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 [۵۶].

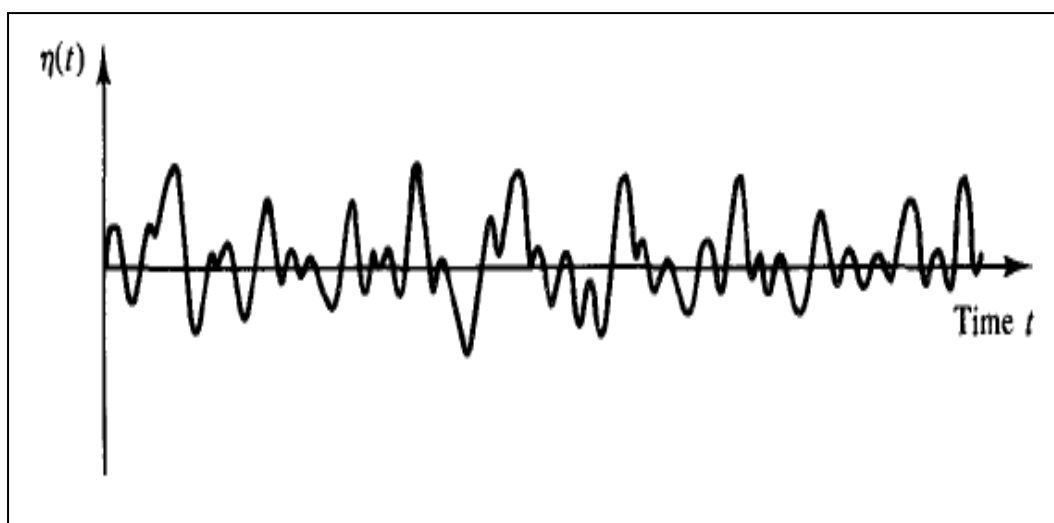


شکل ۱-۱: مشخصات موج. چاپ‌شده از [۵۶].

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 ۲-۱ 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^۱ خیلی منظم‌تر از امواج کوچک یا امواج آب

^۱ Shallow water

عمیق^۱ 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 غیرخطی در آب کم عمق، عموماً تعداد بیشتری از یک موج سینوسی که همگی آن‌ها نیز در یک فاز هستند مورد نیاز است. اگرچه که استفاده از تنها یک موج سینوسی نیز برای بعضی اهداف دقت قابل قبولی را ارائه می‌نماید. این دقت جالب‌توجه 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 غیرخطی 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 غیرخطی است [۵۶].



شکل ۱-۲: مثالی از یک شکل محتمل موجی که ثبت شده است. چاپ شده از [۵۶].

۱-۳- مدل سازی موج

برای مطالعه‌ی موج آب و پارامترهای مؤثر آن باید با استفاده از روش خاصی به مدل سازی آن پردازیم. این روش‌های مدل سازی عبارت‌اند از مدل سازی تحلیلی موج^۲، مدل سازی تجربی موج^۳،

^۱ Deep water

^۲ Analytical wave modeling

^۳ Empirical wave modeling

مدل‌سازی فیزیکی موج^۱ و مدل‌سازی عددی موج^۲. 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.

۱-۳-۱- روش تحلیلی

مدل‌های تئوریک پدیده‌های فیزیکی و به طور خاص در دینامیک و هیدرودینامیک سیالات معمولاً به فرم مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل جزئی یا معمولی ارائه می‌شوند. این معادلات حاکم بر روابط زمان-مکان میان پارامترهای مختلف جریان یا موج هستند. یک مدل تئوریک خوب همیشه بر پایه‌ی معادلات ریاضی دقیق ساخته می‌شود. در هر قسمت از مدل فرضیات و استدلال‌های فیزیکی و ریاضی به گونه‌ای واضح تبیین می‌شوند. چنانچه این معادلات به شیوه‌ای تحلیلی و با استفاده از اصول و روابط فیزیک و ریاضیات حل شوند، فرم ساده‌شده‌ای به دست می‌آید که توسط آن می‌توان رفتار سیستم را به طور دقیق پیش‌بینی نمود. این فرآیند حل معادلات تئوریک به مدل‌سازی تحلیلی مشهور است. روش مدل‌سازی و حل تحلیلی ابزاری قدرتمند در درک پدیده‌های مختلف موج و جریان به حساب می‌آیند. به عنوان نمونه می‌توان از الگوی پخش امواج در اطراف یک سیلندر یادکرد که به صورت تحلیلی و بر اساس تئوری تفرق حاصل می‌شود. هر چند برای اغلب سیستم‌های هیدرودینامیکی می‌توان به صورت نظری روابط حاکم را به دست آورد، اما مواردی که این معادلات به صورت تحلیلی قابل حل باشند، کمتر پیش می‌آید.

۱-۳-۲- روش آزمایشگاهی (مدل‌سازی فیزیکی)

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 کوچک‌شده‌ی نمونه‌ی اصلی شناخته می‌شود، استفاده کرد. خصوصیات موج با اندازه‌گیری روی نمونه‌ی آزمایشگاهی و استفاده از

^۱ Physical wave modeling

^۲ Numerical wave modeling

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 [۱].

۱-۳-۳- روش تجربی (استفاده از داده‌های میدانی)

فرمول‌های تجربی روابط خلاصه‌شده‌ای هستند که با استفاده از داده‌های میدانی سیستم به دست می‌آیند و به دلیل سهولت در طراحی‌های مهندسی به وفور کاربرد دارند. در زمینه‌های دریایی و سواحل می‌توان به فرمول‌هایی اشاره کرد که برای محاسبه‌ی نیروی حاصل از موج بر سازه (رابطه‌ی موريسون)، بالاروی و روگذری و ... توسط افراد مختلف ارائه شده است. محدودیت این روش در کاربرد فرمول‌های ارائه‌شده برای سیستم‌های مختلف است، چرا که داده‌ها معمولاً مربوط به تعداد معدودی سیستم است.

۱-۳-۴- روش عددی

در مدل‌سازی عددی موج از روابط ریاضی برای بیان فیزیک موج و از تقریب‌های عددی برای حل معادلات ریاضی استفاده می‌شود. تفاوت این روش با مدل‌سازی تحلیلی موج در روش به دست آوردن جواب‌ها برای معادلات موج می‌باشد

۱-۳-۴-۱- جایگاه روش‌های عددی

روش‌های ارائه‌شده در حل مسائل دینامیک سیالات معمولاً در ترکیب با یکدیگر می‌توانند بهترین نتایج را در بر داشته باشند. در گذشته روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی به کمک مهندسان در طراحی می‌آمدند. با پیدایش رایانه و پیشرفت آن، توجه به رویکرد عددی بیشتر شد و امروزه به دلیل محدودیت‌هایی که روش‌های دیگر دارند، پیشرفت روزافزون فن آوری‌های دیجیتال و ظهور

نرم‌افزارهای تجاری برای تحلیل عددی دینامیک سیالات، تمایل بیشتری به سمت به‌کارگیری روش‌های عددی وجود دارد. امروزه دینامیک سیالات محاسباتی^۱ یا به طور خلاصه CFD علاوه بر اینکه به طور کاربردی در طراحی‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، موضوع بیش‌ترین مقالات در زمینه دینامیک سیالات است. همچنین می‌توان از CFD به عنوان ابزاری برای پژوهش (از طریق درک فرآیندهای مختلف)، آموزشی (استفاده‌ی آموزشی از بسته‌های نرم‌افزاری) بهره برد [۲].

مزیت‌های استفاده از روش‌های عددی و رایانه‌ای را به طور خلاصه می‌توان در ۶ بخش خلاصه کرد [۲].

- ۱- پیشرفت روش‌های تئوری و ریاضیاتی از طریق مطالعه و بررسی مفصل معادلات حاکم
- ۲- ایفای نقش تکمیلی در کنار روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی
- ۳- کاهش فرضیات ساده کننده در مقایسه با روش‌های تحلیلی
- ۴- کاهش زمان، هزینه و حتی خطرپذیری نسبت به روش‌های آزمایشگاهی
- ۵- مدل‌سازی فرآیندهایی که به شیوه‌ی آزمایشگاهی امکان مدل‌سازی آن‌ها وجود ندارد
- ۶- دستیابی به اطلاعات جامع، مفصل و بصری از ویژگی‌های سیستم مورد بررسی

۱-۳-۴-۲- تقسیم‌بندی روش‌های عددی در تحلیل امواج

مدل‌سازی عددی در مسائل مربوط به امواج را می‌توان به طور کلی بر اساس سطح پیچیدگی آن‌ها به دو دسته تقسیم کرد [۱].

۱- مدل‌های depth-resolved که در آن‌ها از معادلات کلی حاکم بر دینامیک سیالات (معادلات ناویر استوکس یا معادله‌ی لاپلاس) استفاده می‌شوند. این روش‌ها قادرند ویژگی‌های متغیر سیال در عمق را به دست آورند.

۲- مدل‌های depth-averaged که ویژگی‌های سیال در عمق بر اساس فرضیاتی حدس زده می‌شوند. از این رو این نوع مدل‌ها اغلب دو بعدی هستند. استفاده از روش‌های depth-resolved در مقیاس‌های

^۱ Computational Fluid Dynamics

بزرگ از نظر محاسباتی پرهزینه خواهد بود. مدل های طیفی موج (مانند WAM^۱ و SWAN^۲)، مدل هایی که از معادله ی Mild-slope، بوزینسک یا SWE^۳ در امواج استفاده می کنند، از این دسته هستند. مدل های دسته ی دوم در زمره ی CFD قرار نمی گیرند. چرا که از معادلات اساسی دینامیک سیالات پیروی نمی کنند. بررسی بیشتر این نوع روش ها از موضوع تحقیق حاضر خارج است. از این رو مطالبی که در ادامه می آید شامل این دسته از مدل سازی ها نمی شود.

۱-۳-۴-۳- فرآیند حل مسئله در روش های عددی

در مدل سازی عددی محیط پیوسته ی مورد نظر به اجزا کوچک و محدودی قسمت بندی می شود. سپس روابطی میان گره های حاصل از این تقسیم بندی اعمال می شود. به عبارتی نوعی محدودیت به سیستم اعمال می گردد. بدین ترتیب این امکان فراهم می شود که معادلات حاکم که فرمی پیوسته دارند، با کمک تئوری های مختلف تقریب^۴ توابع به فرمی گسسته در آیند. از این طریق مقادیر مختلف مشخصات جریان در هر جزء یا المان تقریب زده می شود. به طور کلی هر روش عددی یا به طور خاص روش های موجود در دینامیک سیالات محاسباتی کم و بیش از روندی به شرح زیر متابعت می کنند [۲].

۱- تعیین هندسه و محدوده ی جریان معادلات ریاضی حاکم بر سیستم بر حسب متغیرهای میدان

۲- گسسته سازی حوزه حل^۵

۳- تعیین شرایط مرزی و شرایط اولیه

۴- تبدیل معادلات کلی و پیوسته ی سیستم به مجموعه ای از معادلات ساده و قابل حل از طریق

فرآیندهای عددی

۵- ترجمه ی الگوریتم های عددی به کدهای رایانه ای

^۱ Watershed Assessment Model

^۲ acronym for Simulating WAVes Nearshore

^۳ Shallow Water Equation

^۴ Approximation

^۵ Domain discretization

بسته به نوع روش به کار گرفته شده هر یک از مراحل فوق می‌توانند شکل متفاوتی به خود گیرند.

۱-۳-۴- انتخاب روش مناسب برای مدل‌سازی عددی

همان طور که در بخش قبلی بدان اشاره شد، کامل‌ترین مدل‌سازی عددی برای امواج آب، با استفاده از حل معادلات ناویر-استوکس صورت می‌پذیرد که در این تحقیق نیز مدل‌سازی عددی موج بر اساس آن صورت می‌پذیرد. در این مدل عددی فشار غیر هیدرواستاتیک فرض شده (آنچه که در واقعیت نیز وجود دارد) و با شرکت دادن یک مدل آشفتگی مناسب، مدل معادلات ناویر-استوکس قادر به شبیه‌سازی مسائل پیچیده‌ی امواج مثل شکست امواج^۱، اندر کنش جریان و موج^۲ و اندر کنش موج و سازه^۳ خواهد بود. برای تحلیل عددی این معادلات، همانند سایر مدل‌های عددی ذکر شده، باید با استفاده از روش‌های عددی موجود به گسسته سازی مکان و زمان مسئله به تعداد محدودی از مؤلفه‌ها پرداخت و جواب‌های معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی را محاسبه نمود. پیش‌بینی موقعیت سطح آزاد جریان یکی از مراحل مهم در شناخت جریان امواج می‌باشد که انجام این مهم در مواردی که تغییرات زمانی جریان زیاد است، پیچیده می‌باشد. از طرفی پیش‌بینی موقعیت سطح آزاد جریان به وسیله‌ی بسیاری از روش‌های عددی معمول نیز پیچیده و یا حتی غیرممکن می‌باشد. موضوع مورد مطالعه در این پایان‌نامه به کارگیری روش عددی بدون شبکه‌ی هیدرودینامیک ذرات هموار شده^۴ برای مدل‌سازی عددی موج به عنوان جریانی با سطح آزاد می‌باشد. روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH)، روش مبتنی بر ذرات بوده که از یک تابع هموار^۵ برای مدل‌سازی برهم‌کنش بین ذرات استفاده می‌نماید. این روش را می‌توان برای مدل‌سازی جریان موج به کار برده و همچنین مدعی شد که تکنیکی قدرتمند برای مدل‌سازی مسائل دینامیکی مختلف در هیدرولیک می‌باشد.

^۱ Breaking waves

^۲ Wave-current interactions

^۳ Wave-structure interactions

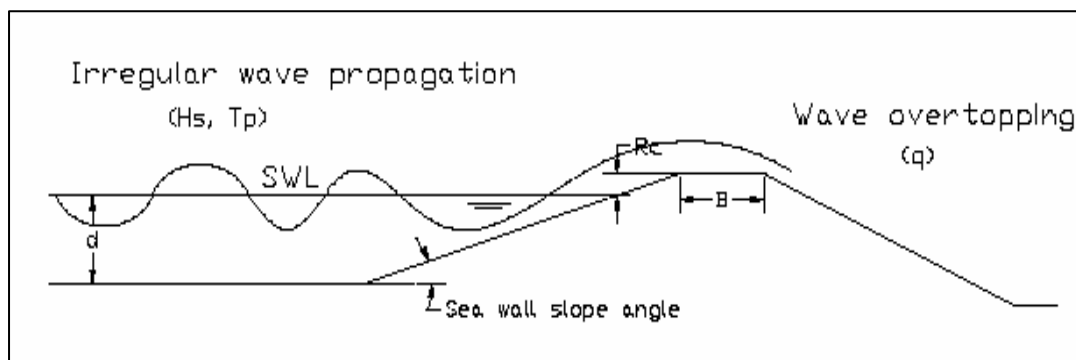
^۴ Smoothed Particle Hydrodynamics

^۵ Smoothing function

نوسانات سریع تراز سطح آب، اندر کنش‌های پیچیده بین آب و اجسام متحرک و امواج بالارونده‌ی ساحلی، قابل مدل‌سازی با استفاده از معادلات ناویر-استوکس و روش SPH است. در فصل دوم مروری بر روش‌های موجود مدل‌سازی عددی جریان‌های با سطح آزاد پرداخته و موقعیت روش SPH در بین آن‌ها شرح داده می‌شود.

۴-۱- روگذری موج^۱

فرایند روگذری موج عبارت است از برخورد موج به سازه، بالاروی^۲ و نهایتاً سرریز جریان آب از سازه می‌باشد. این پدیده عامل بسیاری از تخریب‌ها در سازه‌های ساحلی و دریای آزاده موجود در پسرانه آن‌ها در گذشته و حال بوده است. به دلیل وجود عدم قطعیت در پیش‌بینی تراز طراحی آب و همچنین در تعیین امواج طراحی از یک سو و از سوی دیگر به لحاظ هزینه‌های اقتصادی احداث دریای آزاده بلند، قبول وقوع درصدی روگذری غیرقابل اجتناب است. شکل زیر دیاگرام روگذری موج را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: دیاگرام برخورد موج به سازه و روگذری از آن

پدیده روگذری امواج از سازه‌های ساحلی و موج‌شکن‌ها همواره به عنوان مسئله‌ای که در طراحی تراز این سازه‌ها باید مد نظر قرار بگیرد مطرح بوده است. به دلیل وابستگی میزان روگذری به پارامترهای مختلف و وجود عدم قطعیت‌هایی در ماهیت این پدیده، تخمین دقیق این پدیده در هنگام طراحی میسر نیست. با این وجود تلاش‌های زیادی در جهت مدل‌سازی این پدیده و تخمین دقیق تر

^۱ Wave Overtopping

^۲ Run up

آن انجام شده است. این تحقیقات عمدتاً به دو دسته مدل سازی آزمایشگاهی و مدل سازی عددی قابل دسته بندی است. شکل زیر یک نمونه از پدیده روگذری موج را در دیوار ساحلی Samphire hoe در انگلیس نشان می دهد.



شکل ۴-۱: روگذری موج شدید در دیوار ساحلی samphire hoe در انگلیس

۱-۴-۱ - اهمیت مسئله

روگذری امواج از سازه های ساحلی یکی از مهم ترین رویدادهای هیدرولیکی است که در طراحی این نوع سازه ها در نظر گرفته می شود. پدیده روگذری امواج به ویژه در مورد سازه های حفاظت از شهرها و تأسیسات، نظیر دیوارهای ساحلی و دایک ها اهمیت می یابد چرا که روگذری از این سازه ها می تواند به تخریب سازه و وارد آمدن تلفات یا خسارات مالی بینجامد.

توسعه اسکله ها در سال های اخیر به سرعت افزایش یافته است. آژانس های دولتی درباره افزایش متوسط سطح دریاها ناشی از اثرات گلخانه ای به شدت نگران شده اند. متوسط سطح دریاها پیش بینی می شود تا سال ۲۰۳۰ حدود ۳۰ تا ۱۱۰ سانتی متر افزایش بیابد. حدود نصف جمعیت دنیا در حدود ۲۰۰ کیلومتری اقیانوس ها زندگی می کنند و میلیون ها نفر در منطقه های ساحلی که کمتر از ۵ متر از

تراز سطح دریا فاصله دارد زندگی می کنند. تحت چنین رویدادهایی، ارزیابی دقیق ارتفاع خیزش و یا نرخ روگذری موج برای برنامه ریزی های حفاظت مناطق ساحلی بسیار مهم است [۳].

انگیزش پیش بینی روگذری از سازه های ساحلی مرتبط است با طراحی سازه هایی که از بشر و اموال در برابر نیروهای هولناک اطراف دریا حفاظت می کنند. برای نمونه موج شکن های عمودی یا قلوه سنگی برای حفاظت بندرگاه استفاده می شوند. یکی از سازه های حفاظتی سواحل و بنادر دیوار ساحلی می باشد. دیوارهای ساحلی سازه هایی هستند که تقریباً نزدیک و به موازات خط ساحلی ساخته می شوند و برای جدا کردن یک منطقه خشکی از منطقه آبی مورد استفاده قرار می گیرند. کاربرد این سازه ها انتخاب شکل آن ها را مشخص می سازد. این دیوارها ممکن است به صورت های عمودی و مایل، شیب دار، منحنی محدب و مقعر، پله ای که هر کدام عملکرد به خصوصی دارند ساخته شوند و اگر عملکرد خاصی مد نظر باشد یک ترکیب از مقاطع فوق بکار می رود [۳].

دیوارهای ساحلی معمولاً برای حفاظت ساحل از اثرات ممتد فرسایش و کاهش خطرات ناشی از برخورد امواج می باشد. اثرات واقعی فرسایش را نمی توان به طور دقیق تعیین نمود ولی به وسیله روش هایی میزان فرسایش قابل برآورد خواهد بود [۳].

موج شکن ها دور از ساحل نیز همچنین برای حفاظت سواحل و زمین ها استفاده می شوند. یکی از روش های بازیافت اراضی ساحلی و حفاظت این اراضی در مقابل امواج و غرقاب شدن توسط آب دریا، احداث دایکهای ساحلی می باشد. دایکهای اجرا شده عموماً به عنوان سد جذر و مدی برای حفاظت و بازیافت اراضی دلتایی مورد استفاده قرار می گیرند [۳].

در کشور ما نیز دلتاهای زیادی نظیر دلتای رودخانه کارون و رودخانه زهره وجود دارد که امکان بازیافت اراضی آن توسط دایکهای ساحلی وجود دارد. این سازه ها مشابه سدهای خاکی از هسته، فیلتر و پوشش حفاظتی تشکیل می شوند و معمولاً برای پایداری بیشتر شیب دایک را به طور شکسته و توأم با برم یا سکو اجرا می کنند. سکو یا برم نقش مهمی در استهلاک انرژی امواج و در نتیجه کاهش

بالاروی و انعکاس موج از سازه ایفا می‌کند. میزان راندمان استهلاک انرژی توسط برم به موقعیت قرارگیری آن نسبت به تراز سطح آب بستگی دارد.

در واقع تمام این سازه‌ها به منظور جلوگیری از روگذری موج و یا کاهش آن به حداقل مقدار ممکن که می‌تواند منجر به نقص کارکرد سازه شود، ساخته می‌شوند. در اینجا نقص کارکرد سازه اشاره دارد به مقدار قابل توجهی از دبی روگذری که می‌تواند به بشر و یا خود سازه و یا تجهیزات بر روی سازه صدمه بزند.

۱-۴-۲ هدف از پژوهش

جهت تخمین دقیق روگذری مطالعات گوناگونی انجام شده است. این مطالعات عموماً به دو دسته عددی و آزمایشگاهی تقسیم می‌شوند.

در سال‌های اخیر از روش‌های آزمایشگاهی علیرغم قرابت بیشتر با طبیعت پدیده به دلیل هزینه بالای تجهیز آزمایشگاه و نیز دشواری ایجاد شرایطی مشابه آنچه در طبیعت به وقوع می‌پیوندد کمتر استفاده گردیده است. حال آنکه روش‌های عددی علیرغم پیچیدگی‌های آن‌ها، به دلیل آنکه شرایط مختلف موج و اشکال مختلف سازه در آن با تغییرات اندک قابل بررسی است مورد اقبال عمومی محققین قرار گرفته‌اند.

پدیده روگذری امواج به ویژه در طراحی سازه های حفاظت از شهرها و تاسیسات، تظیر دیوارهای ساحلی و دایکها اهمیت زیادی دارد. به دلیل اینکه روگذری از این سازه ها می تواند به تخریب سازه و وارد شدن تلفات و خسارات مالی بینجامد. وجود عدم قطعیت در پیش بینی تراز طراحی آب م همچنین در تعیین امواج طراحی و همچنین هزینه بر بودن احداث سازه های بلند، قبول وقوع درصدی روگذری را غیر قابل اجتناب می سازد. به همین دلیل سعی بر این است که در این پایان نامه، پدیده روگذری موج از سازه های ساحلی به روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH) مدلسازی گردد.

در فصل دوم به صورت تحلیلی مروری بر روش‌های تحلیلی، روابط تجربی و مطالعات و تحقیقات عددی انجام‌شده بر پدیده روگذری که در طی سال‌های اخیر ارائه‌شده می‌پردازیم.

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

در فصل اول این پایان‌نامه به کلیات و اهمیت و لزوم تحقیق در زمینه‌ی مدل‌سازی عددی امواج و روگذری امواج پرداخته‌شده و ساختار کلی پایان‌نامه بیان شده است. در فصل دوم مروری جامع بر ادبیات فنی موضوع انجام شده است. در این فصل مروری بر روش‌های موجود برای مدل‌سازی عددی جریان‌های سطح آزاد پرداخته و جایگاه روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده در بین آن‌ها شرح داده شده است و تحقیقاتی که پژوهشگران در سال‌های اخیر بر روی مدل‌سازی جریان‌های مختلف با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده انجام داده‌اند، مورد بررسی کلی قرار گرفته‌اند. در فصل سوم معادلات حاکم استفاده‌شده در این پایان‌نامه با جزئیات بیان گردیده‌اند. در فصل چهارم صحت و دقت مدل مبتنی بر روش CSPH^۱ با حل مسئله‌ی بالاروی موج تنها در اعماق متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه در این فصل به مسئله‌ی روگذری موج با اعماق و ارتفاع‌های مختلف موج برای نشان دادن دقت و قدرت مدل عددی تهیه‌شده در شبیه‌سازی مسائل مختلف مکانیک سیالات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نهایتاً در فصل پنجم به ارائه‌ی نتایج و پیشنهادها برای تحقیقات آتی پرداخته شده است.

^۱ Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics

فصل دوم:

مروری بر ادبیات فنی

۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به مروری بر روش‌های مختلف مدل‌سازی بالاروی و روگذری امواج پرداخته می‌شود. سپس به بررسی تاریخچه فعالیت‌های انجام‌شده در زمینه‌ی مدل‌سازی عددی روگذری امواج پرداخته شده است. در این بخش تاریخچه‌ی مدل‌های عددی بیان می‌شوند.

۲-۲- روش‌های مختلف مدل‌سازی بالاروی و روگذری امواج

این روش‌ها به سه دسته‌ی روابط تحلیلی، روابط تجربی و روابط عددی تقسیم می‌شوند که در زیر به این روابط اشاره خواهد شد.

۲-۲-۱- روابط تحلیلی

۲-۲-۱-۱- روابط پیشنهادی Kono و Shiigai [۴]

یک فرمول شناخته‌شده که رابطه دبی بر روی یک سرریز لبه تیز را بیان می‌کند به فرم زیر است:

$$q = \frac{2}{3} m \sqrt{2gy}^{\frac{3}{2}} \quad (1-2)$$

که در رابطه بالا q در واحد عرض، m ضریب دبی و y عمق سرریزی می‌باشد. فرمول بالا فقط برای جریان یکنواخت برقرار است، اگر فرض کنیم تغییرات y با توجه به زمان تغییرات شدید ندارد، معادله بالا را می‌توان برای تحلیل روگذری موج به شکل زیر نوشت:

$$y = z(t) - z. \quad (2-2)$$

که $z(t)$ تراز سطح موج بر روی دیوار ساحلی می‌باشد که از تراز سطح آزاد آب اندازه‌گیری می‌شود و z تراز نوک دیوار ساحلی می‌باشد. از ترکیب دو رابطه بالا می‌توان نوشت:

$$q = \frac{2}{3} m \sqrt{2g(z(t) - z)}^{\frac{3}{2}} \quad (3-2)$$

علاوه بر این ما می توانیم $z(t)$ را به صورت زیر بنویسیم:

$$z(t) = z_m F(t) \quad (۴-۲)$$

که $F(t)$ یک معادله بدون بعد بر حسب زمان می باشد، و z_m فاصله عمودی متوسط تراز سطح آب تا تاج موج می باشد. با توجه به روابط بالا داریم:

$$q = \frac{\gamma}{\gamma} m \sqrt{\gamma g (kH.)}^{\frac{\gamma}{\gamma}} \left[F(t) - \frac{Z.}{kH.} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma}} \quad F(t) \geq \frac{Z.}{z_m} \quad (۵-۲)$$

$$q = 0 \quad F(t) < \frac{Z.}{z_m}$$

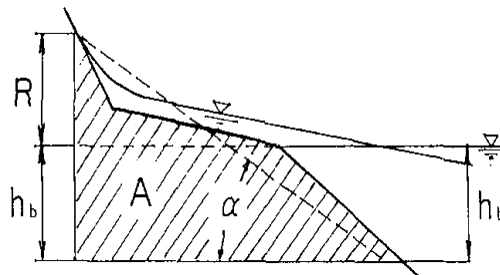
$$k = \frac{z_m}{H.} \quad (۶-۲)$$

اگر K و m در طول یک پریود موج ثابت باشند، از q بر حسب زمان انتگرال گیری می کنیم.

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} q dt = \frac{\gamma}{\gamma} m \sqrt{\gamma g (kH.)}^{\frac{\gamma}{\gamma}} \int_{t_1}^{t_2} \left[F(t) - \frac{Z.}{kH.} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma}} dt \quad (۷-۲)$$

۲-۱-۲-۲- روابط پیشنهادی Yamamoto و Horikawa [۵]

روابط ارائه شده به سازه های ساحلی از جنس شن و یا ماسه ای بدون پوشش حفاظتی می باشند که غالباً به صورت طبیعی شکل گرفته اند ولی قابل تعمیر به دیوار ساحلی می باشند.



شکل ۱-۲: زاویه شیب فرضی

۲-۱-۲-۱- محاسبه ارتفاع بالاروی موج در امواج شکنا

میزان بالاروی موج در شیب سازه‌های حفاظتی که در آن عمق آب با h_b ، ارتفاع بالاروی با R و سطح مقطع حفاظتی از پایین‌ترین نقطه شروع شیب سازه تا تلاقی آن با ماکزیمم بالاروی موج (R) با امتداد افق به دست می‌آید، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{(R+h_b)^2}{2A} \quad (۸-۲)$$

$$R = \frac{(1-K)U_s^2}{2g} \quad (۹-۲)$$

در رابطه بالا k ، ضریب کاهش انرژی است و U_s ، میزان سرعت مایع در خط ساحلی می‌باشد. U_s از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$U_s = c\sqrt{g\eta_s} \cdot \cos\alpha \quad (۱۰-۲)$$

در این رابطه C ، ضریبی است که بستگی به توپوگرافی کف بستر دریا دارد و $\overline{\eta_s}$ بستگی به نحوه قرار گرفتن موج در خط ساحلی دارد. با ترکیب دو رابطه بالا رابطه زیر به دست می‌آید.

$$R = 0.5(1-K)C^2 \cdot \overline{\eta_s} \cdot (\cos\alpha)^2 \quad (۱۱-۲)$$

برای به دست آوردن $\overline{\eta_s}$ می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\overline{\eta_s} = \frac{H_s}{[2.4(\tan\alpha)^{0.2}]} = 0.4(\tan\alpha)^{0.2} H_b \quad (۱۲-۲)$$

در رابطه فوق H_s ، مقدار ارتفاع موج در نزدیک خط ساحلی و H_b ، ارتفاع شکست موج می‌باشد.

$$H_b = (\tan\alpha)^{0.2} \cdot \left(\frac{H_s}{L_s} \right)^{-1/4} \cdot H_s \quad (۱۳-۲)$$

در رابطه فوق H_s ، ارتفاع موج و L_s ، طول موج، با ترکیب روابط بالا، بالاروی موج (R) از رابطه زیر به دست می‌آید:

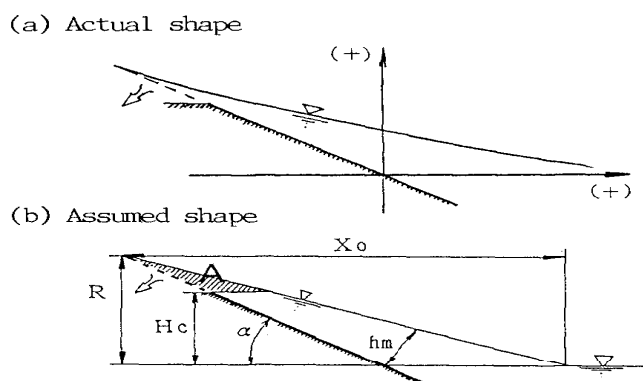
$$R = 0.4(1 - K).C^2.(\cos\alpha)^2(\tan\alpha)^{0.8} \cdot \left(\frac{H}{L_s}\right)^{-1/4} \cdot H. \quad (14-2)$$

برای به دست آوردن ضریب $(1 - K).C^2$ می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$(1 - K).C^2 = 3.125(\tan\alpha)^{-0.2} \quad 1/5 \leq \tan\alpha \leq 1/3 \quad (15-2)$$

۲-۲-۱-۲-۲- محاسبه دبی روگذری موج در امواج شکننا

شکل واقعی بالاروی موج از یک سازه حفاظت ساحلی و پروفایل ناشی از آن در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. در شکل (a) حالت واقعی بالاروی و در شکل (b)، تقسیم‌بندی فرضی که می‌توان برای بالاروی موج در نظر گرفت نشان داده شده است. می‌توان نشان داد میزان دبی روگذری با سطح A که به صورت هاشور خورده در شکل نشان داده شده متناسب است:



شکل ۲-۲: شکل واقعی و فرض شده پروفایل خیزش

مقدار A که سطحی فرضی، بالای تاج دیواره حفاظتی در پروفیل بالاروی موج می‌باشد، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$A = (R - H_c) * \left[\left(\frac{X}{R} \right) - \cot \alpha \right] * \frac{(R - H_c)}{2} \quad (16-2)$$

در این رابطه H_c ارتفاع آزاد سازه حفاظتی بالای تراز آب می باشد.

$$q = C \left[\left(\frac{X}{R} \right) - \cot \alpha \right] * \frac{(R - H_c)}{2} \quad (17-2)$$

در این رابطه C ضریب روگذری می باشد که مقدار این ضریب توسط آزمایش ها و به صورت تجربی به دست می آید. نسبت (X/R) هم با توجه به شکل از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$X = \cot \left[\alpha - \tan^{-1} \left(\frac{h_m \cdot \sin \alpha}{R} \right) \right] \quad (18-2)$$

برای تعیین مقدار h_m می توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$\frac{h_m}{H} = 0.7 \left[\frac{0.375}{\pi^{2/3}} \left(\frac{\tan \alpha}{\sqrt{0.8 H / L}} \right)^{1/2} + 0.8 (\tan \alpha)^{0.6} \right] \quad (19-2)$$

نهایتاً رابطه ارائه شده جهت تعیین ضریب روگذری (C) به شرح زیر می باشد:

$$C = 0.1 \left(\frac{L}{H} \right)^{1/3} \frac{(\cos \theta + \cos \alpha)}{2} \quad (20-2)$$

در رابطه بالا، θ زاویه شیب ساحل (پایین دست) قبل از سازه حفاظتی می باشد.

۲-۲-۲- روابط تجربی

۱-۲-۲-۲- رابطه روگذری Van der Meer and Janssen : [۶]

Van der Meer and Janssen (۱۹۹۵) بین موج های شکسته و غیر شکسته بر روی شیب تمایز

ایجاد کردند.

برای موج‌های شکسته: $\xi_p < 2$

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_s}} \frac{\sqrt{\tan \alpha}}{\xi_p} = 0.06 \exp \left[-0.2R \frac{1}{\gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} \right] \quad (21-2)$$

$$R = \frac{R_c}{\xi_p H_s}, \quad \xi_p = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{S_p}} \quad \text{and} \quad S_p = \frac{\gamma \pi H_s}{g T_p} \quad (22-2)$$

برای موج‌های غیر شکسته: $\xi_p > 2$

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_s}} = 0.2 \exp \left[-2.6 \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} \right] \quad (23-2)$$

ضرایب γ_B و γ_b ، γ_h و γ_r معرفی شده‌اند تا تأثیر سکوهاى زیر موج‌شکن، موج‌شکن سطحی و زبری و زاویه یورش موج به ترتیب در نظر گرفته شود. همه این ضرایب در دامنه ۰/۵ تا ۱ است که به این معنی است که وقتی روگذری بزرگ می‌شود، که ضرایب ۱ شود، که این مورد برای وضعیت بدون سکو، بدون اثر منطقه آب کم عمق^۱ و شیب صاف (بدون زبری و غیرقابل نفوذ) می‌باشد.

۲-۲-۲-۲- رابطه روگذری Owen : [۷]

Owen (۱۹۸۰) یک رابطه‌نمایی بین دبی متوسط بی بعد روگذری (Q) و سطح آزاد^۲ بدون بعد (R) ارائه داده است. او یک سری گسترده‌ای از مدل‌های آزمایشگاهی برای دامنه‌ای از موج‌شکن‌ها که در معرض شرایط مختلف موج‌های تصادفی طراحی شده است، انجام داده است.

فرمول Owen برای موج‌شکن مستقیم صاف غیرقابل نفوذ عبارت است از:

$$Q = \frac{q}{T_m \sqrt{gH_s}} = a \exp(-bR) \quad (24-2)$$

$$R = \frac{R_s}{T_m \sqrt{gH_s}} \quad (25-2)$$

^۱ Shallow foreshore
^۲ Freeboard

جدول ۲-۱ : مقادیر تجربی ضرایب a و b در معادله (۲-۲۴)

شیب دیوار ساحلی	a	b
۱V:۱H	۰.۰۰۷۹۴	۲۰.۱
۱:۱.۵	۰.۰۰۸۸۴	۱۹.۹
۱:۲	۰.۰۰۹۳۹	۲۱.۶
۱:۲.۵	۰.۰۱۰۳۰	۲۴.۵
۱:۳	۰.۰۱۰۹۰	۲۸.۷
۱:۳.۵	۰.۰۱۱۲۰	۳۴.۱
۱:۴	۰.۰۱۱۶۰	۴۱.۰
۱:۴.۵	۰.۰۱۲۰۰	۴۷.۷
۱:۵	۰.۰۱۳۱۰	۵۵.۶

Basley (۱۹۹۹) توصیه کرده است که روشی که به وسیله Owen ارائه شده است، برای تخمین دبی روگذری در موج‌شکن های سکو دار و شیب‌دار ساده و صاف در اطراف خط ساحلی انگلیس استفاده شود [۸].

وقتی که موج‌شکن سطح آزاد صفر دارد، معادلات Owen به طور صحیح پیش‌بینی می‌کند که دبی روگذری محدود است. همچنین این فرمول پیش‌بینی می‌کند اگر ارتفاع آزاد تاج به اندازه کافی بزرگ باشد مقدار دبی در برابر هر مقدار ممکن خیزش محدود است.

۲-۲-۲-۳- رابطه روگذری Reis and Hedges : [۹,۱۰]

آن‌ها سال (۱۹۸۸) مدلی بر اساس رگرسیون در مقابل داده Owen پایه‌گذاری کردند که در معرض محدودیت‌هایی است که اگر سطح آزاد موج‌شکن از خیزش ماکزیمم از سطح موج‌شکن تجاوز کند هیچ روگذری وجود ندارد.

شرایط مرزی فیزیکی مطالعات Reis and Hedges شامل:

- وقتی که موج شکن، سطح آزاد بزرگی داشته باشد، دبی روگذری پیش‌بینی شده می‌بایست صفر شود.

- وقتی که موج شکن، سطح آزاد صفر دارد پس دبی روگذری پیش‌بینی شده می‌بایست بزرگ باشد، اما می‌بایست همچنان محدود باقی بماند.

رابطه Reis and Hedges به این صورت است:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{g(CH_S)^3}} = a \left(1 - \frac{R_c}{CH_S}\right)^b \quad (26-2)$$

که در آن C نسبت خیزش ماکزیمم (R_{umax}) به ارتفاع عمده موج است.

$$C = 1.52 \times (1.35 \times \xi_p) \text{ for } \xi_p < 2 \quad (27-2)$$

ویژگی‌های مهم مدل که در ادامه می‌بینید شامل:

- شرایط مرزی فیزیکی را ارضاء کند، ویژگی که وقتی مدل در نزدیکی این مرزها استفاده می‌شود مهم است.

- این مسئله صریحاً تشخیص می‌دهد که ضریب رگرسیونی (a) به شکل سازه بستگی دارد.

- ضریب (b) به رفتار دقیق سطح آب بر روی صفحه دیوار ساحلی بستگی دارد.

- ضریب (c) خیزش ماکزیمم (R_{Umax}) را به ارتفاع عمده موج^۱ مرتبط می‌کند و می‌تواند اثرات شیب سازه و زبری سطح و تخلخل را در نظر گیرد.

۲-۲-۳- روابط عددی

در دو دهه اخیر، تلاش‌های زیادی برای ایجاد مدل عددی روگذری موج صورت گرفته است. مدل‌های عددی در ابتدا عموماً به مدل‌سازی پدیده روگذری بدون در نظر گرفتن شکست موج

^۱ Significant wave height

می‌پرداختند. نخستین تلاش‌ها در این زمینه در سال ۱۹۸۹ و توسط Kobayashi و Wurjanto صورت گرفت. مدل عددی آن‌ها قادر بود جزئیات هیدرولیکی مربوط به روگذری موج از بالای تاج یک دیوار ساحلی نفوذناپذیر و صاف که بر روی ساحلی شیب‌دار قرار گرفته را پیش‌بینی کند [۱۱].

Maruyama and Hiraishi در سال ۱۹۹۸، یک مدل عددی را برای محاسبه دبی روگذری امواج چند جهته^۱ از یک موج‌شکن قائم ارائه نمودند. فرض اساسی آن‌ها در این مدل این است که دبی روگذری می‌تواند توسط یک رابطه سرریز توصیف شود [۱۲].

به نظر می‌رسد که حتی با قدرت محاسباتی که امروز موجود است، مدل‌سازی عددی فرایند روگذری موج هنوز کار سخت و طاقت‌فرسایی است؛ اما افزایش قدرت محاسباتی رایانه‌ها، موجب خواهد شد که مطالعات فرایند روگذری با جزئیات بیشتری از آنچه که در آزمایش‌ها مدل فیزیکی امکان‌پذیر است، انجام گیرد و طراحی سازه‌هایی که بهتر از سازه‌های امروزی اهداف مورد نظر را تأمین می‌نمایند، آسان خواهد گردید.

روش‌های اشاره‌شده در فوق جهت محاسبه روگذری در امواج ناشکنا بوده است؛ اما چون امواج در نواحی ساحلی عموماً دچار شکست می‌گردند، به مدل‌هایی که توانایی مدل‌سازی عددی روگذری موج در ناحیه شکست را دارند می‌پردازیم. امواج در حال شکست، نقش اساسی را در کلیه فرایندهای نزدیک ساحل ایفا می‌کنند. این امواج باعث ایجاد آشفتگی شدید که با اتلاف انرژی شدیدی نیز همراه است، می‌گردند. در این شرایط، روگذری امواج فرایند پیچیده‌ای است که پدیده‌های خزش، انعکاس موج، شکست موج، آشفتگی و آنچه را که از طبیعت تصادفی امواج باید در نظر گرفت، شامل می‌شود.

Goda در سال (۲۰۰۰) نشان داد که فرمول‌های فعلی که به طور پیچیده‌ای شکست امواج را در آب کم عمق در نظر نمی‌گیرند، ممکن است به طور عمده‌ای دبی‌های روگذری را کمتر از مقدار واقعی

^۱ Multi directional waves

پیش‌بینی کنند. این یافته‌ها توسط Besley و همکاران در سال ۱۹۹۸ و مطالعات عددی Hu و همکاران در سال ۲۰۰۰ مورد حمایت و تأیید قرار گرفت [۱۴,۹,۱۳].

به طور کلی با سه دیدگاه متفاوت می‌توان مسائل دینامیک سیالات را حل کرد.

۱. روش‌های اوپلری که در این روش‌ها یک چارچوب در فضا در نظر گرفته می‌شود و جریان سیال نسبت به این چارچوب بررسی می‌شوند و برای مسائلی که مرزهای جریان تغییر چندانی ندارند مناسب می‌باشند.

۲. روش‌های لاگرانژی که در این روش‌ها دستگاه مختصات همراه با سیال حرکت می‌کند و برای مسائلی که مرزهای جریان تغییر زیادی دارند مناسب می‌باشد.

۳. روش‌های ترکیبی اوپلری و لاگرانژی.

هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایب خاص خود هستند، انتخاب آن‌ها به مشخصات مسئله‌ای که حل می‌شود، بستگی دارد.

Harlow and Welch در سال (۱۹۶۵) روش سلول و علامت گذار (MAC) که نخستین روشی بود که با موفقیت به مسائلی که در آن‌ها سیال دارای حرکات پیچیده سطح آزاد می‌باشند می‌پردازد را ارائه کردند [۱۵].

Schlueter and Austin در سال (۱۹۸۲)، اولین کاربرد مدل SOLA-VOF را در حیطه مهندسی سواحل ارائه نمودند. این مدل، جریان را در لایه آرمور یک موج‌شکن متشکل از سیستم بلوک مستطیلی پیش‌بینی می‌نماید. این مدل شروعی بر شبیه‌سازی امواج و اندر کنش آن‌ها با سازه‌ها در مهندسی سواحل محسوب می‌شود [۱۶].

Wu در سال (۱۹۹۴)، یک مدل مبتنی بر مدل SOLA-VOF را برای شبیه‌سازی سینماتیک امواج، درون و بر روی سازه‌های قائم نفوذپذیر با هندسه مختلف بکار برد. وی فشار کامل و بارگذاری

ناشی از آن را بدون در نظر گرفتن پدیده به دام افتادن هوا در سیال شبیه‌سازی نمود. در این مدل شرایط مرزی انعکاس مشابه مدل SKYLLA به‌کاربرده شده است [۱۷].

Troch در سال (۱۹۹۷) مدل عددی VOF break را بر اساس کد SOLA-VOF ارائه نمود. در این مدل اصلاحاتی در جهت بهبود مدل عددی برای موج درون و روی سازه‌ها انجام شد. در این مدل، معادلات حاکم به منظور شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل یک سازه ساحلی نفوذپذیر، توسعه داده شد. این مدل عددی به وسیله داده‌های آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت [۱۸].

Liu و همکاران (۱۹۹۹)، مدل موج در حال شکست را با افزودن قابلیت شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل و همچنین ایجاد بهبود در مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ که برای توصیف میدان آشفتگی مربوطه به کار می‌رود، توسعه دادند. در این مطالعه آن‌ها توانستند تأثیر میزان تخلخل لایه‌های سنگچین موج‌شکن را بر نرخ روگذری موج بررسی نمایند. این مدل به استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی مقایسه و نتایج قابل قبولی به دست آوردند [۱۹].

Gomez و همکاران در سال (۲۰۰۴) آنالیز روگذری آب لجن دار را با روش SPH مدل‌سازی کردند. تکنیک عددی SPH در تحقیقات (Monaghan ۱۹۹۹, ۲۰۰۰) و (Fontaine ۲۰۰۰) و (Dalrymple ۲۰۰۰) نشان داده است که یک روش کمی مناسب جهت مدل کردن حرکت موج می‌باشد. در این بررسی اثبات شده که این روش حتی می‌تواند پیش‌بینی‌های کمی مناسبی را فراهم نموده و مقایسه یک به یک بین نتایج عددی و تجربی را ممکن سازد. پروفیل‌های امواج که توسط این روش ایجاد شده‌اند، سازگاری کمی مناسبی را در فاز و بزرگی با پروفیل‌های موج تجربی دارند. و به علاوه شکل اصلی مشاهده شده وقتی که یک موج به یک سکوی افقی ضربه می‌زند، به طور موفقیت‌آمیزی باز تولید شده است؛ بنابراین شرایط اولیه جریان، جدایی جریان وقتی به سازه برخورد می‌کند و به حالت اولیه برگشتن بیشتر جریان، با آن‌هایی که در آزمایش‌ها مشاهده شده مطابقت خوبی دارند [۲۰, ۲۱, ۲۲, ۲۳, ۲۴].

Dalrymple and Rogers در سال (۲۰۰۵) مدل عددی از موج آبی را با استفاده از روش SPH مورد بررسی قرار دادند. در بررسی‌های آن‌ها نشان داده شد که مدل JHU SPH همچنان در حال پیشرفت و بهبود می‌باشد و نتایج نشان داد که برای اثبات مفهوم، تحلیل بیشتر و مقایسه‌ی با جزئیات با مدل‌های عددی و داده‌های آزمایشگاهی دیگر نیاز می‌باشد. این روش به تعداد زیادی ذره در شبیه‌سازی برای حل نیاز دارد. به علاوه چون سیال تراکم پذیر است یک سرعت صوت در مدل وجود دارد. نتایج هردوی این فرضیات این است که گام‌های زمانی در این مدل توسط اندازه‌ی ذرات و سرعت صوت دیکته می‌شوند؛ بنابراین گام‌های زمانی اغلب (S ۰.۰۰۰۰۱) می‌باشد و این روش برای آزمایش‌های در مناطق نسبتاً کوچک مناسب است و توسط کدهای بوزینسک بهتر مدل می‌شوند [۲۵].

Shao و همکاران در سال (۲۰۰۶) روگذری موج را با استفاده از روش SPH مدل‌سازی کردند. در این بررسی یک مدل SPH تراکم ناپذیر برای روگذری اتفاقی گذرا و منظم سازه‌های ساحلی مختلف بیان شده است. محاسبات سازگاری مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی دیگر گزارش شده در تحقیقات دارند. این مدل بدون هیچ فرضیاتی که در مورد جریان و شرایط توپوگرافی در نظر گرفته شود، فرم لاگرانژی معادلات ناویر-استوکس را حل می‌کند. آشفتگی در شکست موج با استفاده از یک مقیاس ریز ذره (SPS) که از منظر LES ایجاد می‌شود بررسی می‌شود. این مدل از نظر توپوگرافی در مقایسه با مدل تجربی انعطاف‌پذیرتر می‌باشد. روش SPH تراکم ناپذیر در مقایسه با روش SPH تراکم پذیر (Gomez ۲۰۰۵ , Monaghan ۱۹۹۲) فرمول سخت‌گیرانه تری را اعمال می‌کند؛ بنابراین عدد کورانت کاملاً مبتنی بر سرعت سیال می‌باشند که اجازه می‌دهد گام‌های زمانی Δt به میزان قابل توجهی (۱۲ برابر) بزرگ‌تر از آنچه توسط (Gomez ۲۰۰۵) مورد استفاده قرار گرفت باشند [۲۰، ۲۷، ۲۶].

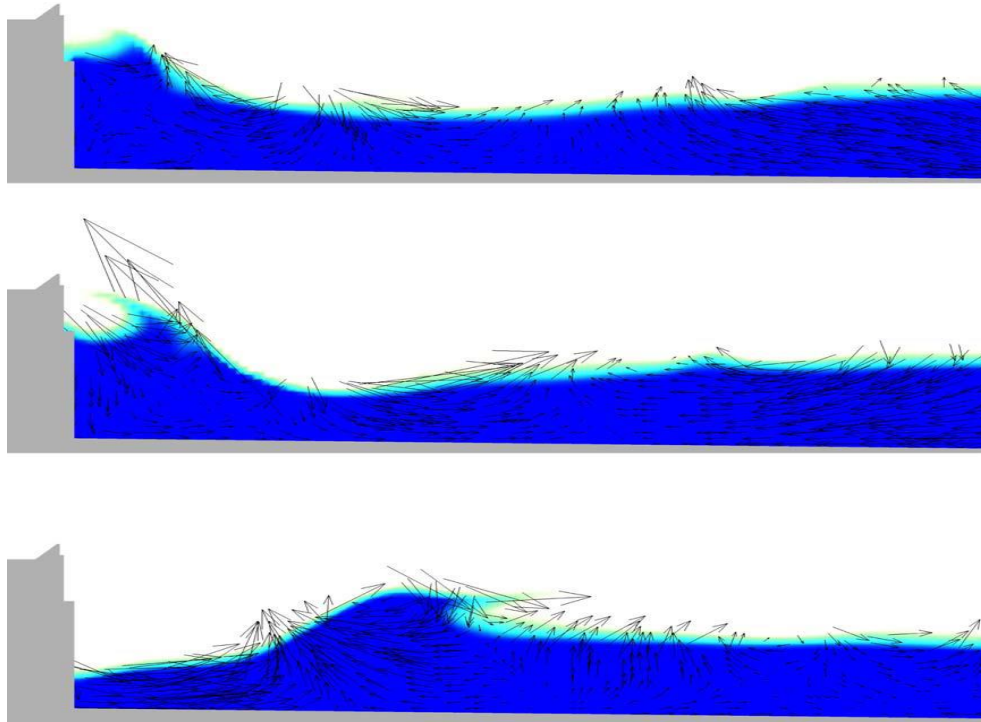
Reeve و همکاران در سال (۲۰۰۷) یک فلوم عددی را جهت ارزیابی مشخصات سرریز ترکیبی و روگذری موج دیوار ساحلی غیرقابل نفوذ مورد استفاده قرار دادند. روش عددی RANS^۱ برای حل معادلات به کار رفت و شامل ایجاد یک رشته‌ی نامنظم از امواج، شبیه‌سازی موج‌شکن و اندر کنش با شیب دیوار نشت ناپذیر بود. مدل عددی اولین بار در برابر مشاهدات تجربی، راه‌حل‌های عددی تقریبی و فرمول طراحی تجربی برای مواردی از جریان و روگذری خالص بررسی شد. فرم معادلات از معادله‌ای که Van der Meer and Janssen برای روگذری موج ارائه دادند می‌باشد اما ضرایب اصلاح شدند. نتایج برای سطح آزاد منفی هنوز داده‌های قابل مقایسه‌ای را فراهم نمی‌کند و امید می‌رود که این تحقیق مطالعات آزمایشگاهی و عددی بیشتری را به دنبال داشته باشد [۲۸].

اخیراً از شبکه‌های مصنوعی برای مدل‌سازی روگذری موج در سازه‌های ساحلی استفاده شده است. به عنوان بخشی از پروژه‌ی CLASH، Verhaeghe و همکاران در سال (۲۰۰۸) مدلی را ایجاد کردند که برای طیف وسیعی از سازه‌های ساحلی از جمله موج‌شکن‌های سکویی قابل استفاده است. هر چند مدل‌های شبکه‌ی مصنوعی دقیق‌تر از مدل‌های تجربی هستند، اما مدل‌های تجربی ساده‌تر و قابل‌درک‌تر از این مدل‌ها هستند و استفاده از آن‌ها ساده‌تر است. در این مطالعه که توسط جعفری و شهیدی در سال (۱۳۸۹) انجام شد، با استفاده از برازش چندگانه، مدلی برای پیش‌بینی دقیق‌تر نرخ روگذری در موج‌شکن‌های سکویی ارائه شد. این مدل بر اساس برازش یک رابطه‌ی خطی چندگانه به داده‌های انتخابی از بانک اطلاعاتی CLASH به دست آمد. نتایج حاصله با مقادیر اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از روابط تجربی مقایسه شده است و نشان داده شد که مدل پیشنهادی دقیق‌تر از روابط آیین‌نامه‌ای قبلی است [۵۷،۲۹].

Ingram و همکاران در سال (۲۰۰۹) تحقیقات عددی در سازه‌های ساحلی را مورد بررسی قرار دادند. تحت مدل‌سازی عددی پروژه CLASH، کد محاسبه سطح آزاد AMAZON-SC که

^۱ Reynolds-averaged Navier-Stokes

معادلات جریان را در هر دو محیط گازی و آبی حل می‌کند، برای فرایندهای روگذری آشفته در اطراف خط ساحلی بریتانیا به کار رفت.



شکل ۲-۳: Samphire Hoe: پروفیل سطح آب و بردارهای سرعت در آب به دست آمده از یک شبیه‌سازی به مقیاس ۱:۴۰ در $t = ۸, ۸.۱, ۸.۵$ ثانیه با نشان دادن شکست موج به عنوان موج بازگشتی در اندر کنش با موج بعدی. به خصوص مدل برای یک مقطع دو بعدی که توسط پاشنه برم تپه سنگی، در Samphire Hoe نزدیک Dover و به ضربه‌ی دیوار به نسبت ۱:۱۰ که به عنوان قسمتی از پروژه‌ی VOWS سرمایه‌گذاری شده آزمایش شد. در این آزمایش سازگاری مناسبی بین حجم‌های متوسط روگذری محاسبه‌شده و حجم‌های روگذری آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌ای که با استفاده از آیین‌نامه روگذری UK به دست آمد، مشاهده شده است. (Basely ۱۹۹۸) [۹,۳۰].

Tuan and Oumeraci در سال (۲۰۱۰) یک مدل عددی را برای بهبود روگذری موج روی دایک‌های دریایی بررسی کردند. آن‌ها از مدل مبتنی بر جریان محافظه‌کارانه برای معادلات غیرخطی آب

کم عمق (NLSW)^۱ و متغیرهای با مرتبه‌ی بالا (TVD)^۲ استفاده کردند. هدف پیش‌بینی حالت هیدرودینامیکی روگذری موج روی دایک و در امتداد شیب داخلی برای مدل‌سازی شکاف دایک دریایی بود. این مدل با ۴ مجموعه داده‌ی آزمایشگاهی روگذری موج روی دایک‌ها صحت‌سنجی شد که دو مجموعه‌ی اول برای صحت‌سنجی عملکرد ترم استوانه در بهبود پیش‌بینی روگذری موج موج‌شکن‌ها می‌باشد. دو مدل دیگر جهت آزمایش عملکرد مدل تحت شرایط پیچیده‌تر، ولی با شرایط هیدرولیکی واقعی تر می‌باشد. نتایج، اثبات می‌کند که این مدل، قوی و قابل‌اعتماد برای پیش‌بینی روگذری روی دایک دریایی می‌باشد [۳۱].

Peng and Zou در سال (۲۰۱۰) توزیع مکانی موج‌های اتفاقی روگذر پشت سازه‌های ساحلی را با استفاده از یک مدل عددی مبتنی بر حل کننده‌ی (RANS) و الگوی حل RANS-VOF بررسی کردند. توزیع مکانی محاسبه‌شده موج‌های روگذر در پشت سازه با اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط Pullen و همکاران (۲۰۰۸) برای یک دیوار عمودی و Andersen And Burcharth (۲۰۰۶) برای یک دایک دریایی با شیب ۱:۲ سازگاری مناسبی داشت [۳۴،۳۳،۳۲].

Webber and Ivings در سال (۲۰۱۰) روگذری مرزی را با استفاده از تئوری آب‌های کم عمق مدل‌سازی کردند. مدل SPLOT راه‌حل‌های عددی قوی‌ای را در مورد مطالعات آب کم عمق (SWE) ارائه می‌کند. این حالت با انواع آزمایش‌های روگذری مقایسه شده است. آزمایش‌های حساسیت متنوعی انجام‌شده‌اند. برای آزمایش‌ها از شبکه‌های ۱۰۰*۱۰۰ استفاده شد که همگرایی مناسبی را نشان می‌دهند. این حالت شبیه‌سازی حدوداً در زمان یک دقیقه با رایانه شخصی معمولی انجام می‌شود، درحالی‌که سلول‌های ۴۰۰*۴۰۰ به میزان قابل‌توجهی طولانی‌تر هستند [۳۵].

شفیعی فر و همکاران در سال (۱۳۹۱) مدل‌سازی لاگرانژی روگذری و بالاروی امواج بر روی سطوح شیب‌دار ساحلی را با استفاده از روش SPH بررسی کردند. در این تحقیق ابتدا با مدل‌سازی

^۱ Nonlinear Shallow Water

^۲ Total Variation Diminishing

سطوح شیب‌دار و امواج تکفام و مقایسه روگذری و بالاروی به دست آمده از مدل با روابط مرسوم صحت‌سنجی شد. در این مقاله با بهره‌گیری از مدل عددی دو بعدی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر با استفاده از کد عددی نوشته‌شده به زبان برنامه‌نویسی فرترن مدل‌سازی‌های مختلفی برای بررسی پدیده‌های مختلف موثر در پدیده‌های بالاروی و روگذری ارائه می‌گردد. مدل به دو روش صحت‌سنجی گردید [۵۸].

Sharp and McAnally در سال (۲۰۱۱) از مدل تطبیق‌پذیر هیدرولیکی (AdH)^۱ برای محاسبه‌ی سرعت و عمق در حین واقعه‌ی روگذری استفاده کردند. با استفاده از این مقادیر، استفاده از AdH برای تخمین تنش‌های برشی مربوطه بررسی می‌گردد تا مقادیر درست برای حفاظت استفاده گردند و نهایتاً احتمال خرابی خاکریزها در حین یک پدیده‌ی روگذری کاهش یابد [۳۶].

Rao و همکاران در سال (۲۰۱۲) مطالعه عددی موج ترکیبی و افزایش نیروی روگذری در تقویت سیستم خاکریز RCC^۲ را با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار بررسی کردند. یک مدل عددی SPH در این بررسی جهت آنالیز هیدرولیک‌های یک خاکریز مقاوم شده توسط RCC و در معرض موج ترکیبی افزایش نیروی روگذری ایجاد شده است. ترکیبی از ۲۷ مورد هیدرولیکی شامل سطوح افزایشی ۰.۲ تا ۰.۶ متر، ارتفاعات موج قابل‌توجه حدود ۰.۲۸۵ تا ۰.۹۱۲ متر و پیک موج با پریود ۳ تا ۵ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. سری‌های زمانی از ارتفاعات آب در بالای تاج در نظر گرفته شدند و ضخامت‌های جریان شیب- قائم در ۵ موقعیت بر روی سمت ساحلی سمت شیب به دست آمدند. تخلیه‌ی روگذری، ضخامت جریان، ارتفاع موج RMS^۳ و سرعت موج پیش‌تاز محاسبه شدند. به عنوان نتیجه، پیشنهاد‌های زیر ارائه گردید:

- یک معادله عددی به دست آمد که میانگین تخلیه‌ی روگذری را در هر واحد عرض تاج خاکریز به عنوان تابعی از یک سطح آزاد منفی و ارتفاع موج قابل‌توجه نشان می‌دهد. این

^۱ Adaptive Hydraulics Modelling

^۲ Roller Compacted Concrete

^۳ Root Mean Square

معادله داده‌ها را کاملاً خوب ارائه می‌دهد و نرخ‌های روگذری پایین تری را نسبت به معادلات عددی قبلی بیان می‌کند.

- سرعت میانگین در پایین‌دست شیب ساحلی که به صورت میانگین تخلیه روگذری تقسیم بر میانگین ضخامت جریان بیان می‌شود، با استفاده از معادلات به دست آمده در این بررسی تخمین زده شد.

- ارتفاع موج RMS پایین‌دست شیب ساحلی به صورت تابعی از ضخامت متوسط جریان و سطح آزاد نسبی بیان شد [۳۷].

Hieu and Vinh در سال (۲۰۱۲) مطالعه عددی روگذری موج از یک دیوار دریایی را با تقویت ساختارهای متخلخل مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه یک مدل عددی VOF مبتنی بر دو فاز جریان برای شبیه‌سازی ساختار موج برای روگذری موج از یک دیوار عمودی توسعه داده شد و با مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی مورد تأیید قرار گرفت. نتایج عددی نشان داد که این مدل در حال حاضر قادر به دوباره تولید کردن حرکت موج در کانال موج و شبیه‌سازی روگذری موج از یک دیوار عمودی با دقت قابل قبول می‌باشد. این نتایج تأیید کرد که VOF مبتنی بر دو فاز جریان برای شبیه‌سازی ساختار فعل و انفعالات موج شامل فرآیندهای روگذری بسیار مناسب است. این مدل به منظور مطالعه اثر متقابل موج با یک دیوار دریایی حفاظت‌شده توسط صخره‌های متخلخل و نفوذپذیر نشان داد که نرخ روگذری به شدت به اتلاف انرژی از طریق نیروی پسا مرتبط است. صخره‌های متخلخل در ایجاد انواع دیوارهای دریایی با تاج کوتاه بسیار موثر هستند. این تحقیق به این نتیجه رسید که دو مقدار بهینه از تخلخل صخره غوطه‌ور ۰.۲۵ و ۰.۷ وجود دارد که به حداقل نرخ روگذری می‌رسد. برای این مطالعه، کشش سطحی در مدل گنجانده نشده است. گنجاندن اثرات کشش سطحی در این مدل به بهبود دقت می‌تواند کمک کند [۳۸].

Sun و همکاران در سال (۲۰۱۲) روش حل مدل خطر روگذری را برای سدهای خاکی بررسی کردند. ارزیابی خطر روگذری سد و تحلیل نامعین توسط روش‌های ریاضی و آماری اطلاعات زیادی را برای مدیران فراهم می‌کند. این مقاله روش ارزیابی احتمال روگذری را با در نظر گرفتن حالات باد و سیل در معرض نامعینی‌ها برای مخزن Dongwushi ارائه داد. نامعینی‌های ارتفاع سد، سطح اولیه‌ی آب، بارش و سرعت باد در تحلیل خطر روگذری در نظر گرفته شدند. روش MCS^۱ بهبودیافته و روش MFOSM^۲ جهت حل مدل خطر روگذری سد ایجاد شده‌اند. در روش MCS بهبودیافته، روش NKDE^۳ جهت تخمین احتمال تابع غلظت سطح موج اولیه معرفی شده است. این روش مزیت‌هایی را در شبیه‌سازی توزیع چندگانه دارد و از تفاوت بین احتمال شبیه‌سازی شده‌ی تابع و توزیع واقعی پرهیز می‌کند. در ضمن، روش LHS^۴ جهت تولید اعداد تصادفی به کار می‌رود و بازده نمونه و پایداری را بهبود می‌بخشد [۳۹].

در سال‌های اخیر مدل‌های تلفیقی جهت مدل‌سازی موج از دوردست تا ناحیه شکست و نهایتاً روگذری از سازه‌های ساحلی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این تکنیک که بر مبنای درگیر ساختن دو روش مختلف مدل‌سازی شکل می‌گیرد، از روش‌های اجزاء مرزی و حجم سیال به طور درگیر استفاده می‌شود.

۲-۳- جمع‌بندی

در این فصل روش‌های تحلیلی و تجربی و عددی روگذری موج بیان گردید و روابط هر یک به طور مفصل بیان شد. در فصل آینده به معادلات حاکم بر روش هیدرودینامیک ذرات هموار پرداخته می‌شود.

^۱ Monte Carlo Simulation

^۲ Mean-value First-Order Second-Moment

^۳ Nonparametric Kernel Density Estimation

^۴ Latin Hypercube Sampling

فصل سوم:

معادلات حاکم و مدل سازی روش
سیدرودینامیک ذرات، هموارشده می
تراکم پذیر

۳-۱- مقدمه

روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای اولین بار در سال ۱۹۷۷ توسط Lucy [۴۰] در زمینه‌ی مسائل اختر فیزیکی به کار گرفته شد. از دیگر پیشگامان این روش می‌توان به Gingold و Monaghan [۴۱] اشاره کرد که علاوه بر مسائل اخترشناسی برای اولین بار این روش را برای تحلیل جریان‌های با سطح آزاد به کار گرفتند و نتایج قابل قبولی نیز کسب کردند. وجود قابلیت‌های منحصربه‌فرد این روش موجب شد علیرغم بروز اشکالاتی نظیر ناپایداری، تاکنون در حل بسیاری از مسائل فیزیکی که ماهیت دینامیکی دارند مورد استفاده قرار گیرد. رویکرد به این روش در دهه نود میلادی در زمینه‌های پاسخ دینامیکی مسائل مختلف، مدل‌سازی ترک‌خوردگی، برخورد، مصالح ترد و شکننده [۵۹، ۴۳، ۴۲]، شکل‌دهی فلزات [۴۴]، دینامیک سیالات [۴۵، ۴۶]، پدیده انفجار بر سازه‌ها [۴۷] و انفجار زیر آب بوده است. کاربردهای جالب‌تری از روش ذرات هموار در زمینه اندر کنش فاز مایع و جامد مانند بررسی اندر کنش خون و رگ [۴۸] و اندر کنش آب و شیر کنترل لاستیکی [۴۹]، در مقالات اخیر مشاهده می‌شود. پیشرفت کاربردهای روش ذرات هموار SPH پشوانه‌ای برای تلاش محققین در رفع نقیضه‌های آن گردید تا جایی که علاوه بر پیشنهاد روش‌هایی برای اصلاح روش ذرات هموار استاندارد، روش‌های جدیدتری که عاری از مشکلات روش استاندارد بودند به وجود آمدند. در این فصل مروری بر مبنای این روش از جنبه نظری و ریاضی انجام شده، فرمول‌بندی اساسی و معادلات پایه ذکر می‌گردد.

۳-۲- مبنای روش هیدرودینامیک ذرات هموار استاندارد SPH

روش SPH از این جهت مشابه روش تفاضل محدود است که برای حل معادلات دیفرانسیل در فرم قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. وجه تشابه روش ذرات هموار استاندارد SPH با روش تفاضل محدود در ارائه روابطی جهت برآورد عددی مشتقات یکسری داده در نقاط مورد نظر می‌باشد. در مقابل، برتری آن در قابلیت مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده با توزیع نسبتاً نامنظم ذرات است. بعلاوه

ذرات امکان حرکت آزادانه در فضا را دارند که مدل سازی مسائل دینامیک سیالات و مسائل مکانیک جامدات درگیر با تغییر شکل های بزرگ را در دیدگاه لاگرانژی ممکن می نماید. این در حالی است که روش تفاضل محدود، تنها قابلیت حل مسائل را در دیدگاه اویلری دارد. روش SPH مبتنی بر تخمین مقدار تابع و یا مقدار مشتقات آن در یک ذره بر حسب مقادیر موجود در ذرات هم جوار می باشد که با استفاده از آن می توان فرم عددی مشتقات را در معادلات دیفرانسیل جایگزین فرم دقیق نموده و معادله را به صورت عددی حل نمود. ایده اساسی SPH بر پایه خاصیتی از تابع دلتای دیراک می باشد:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_i - \xi) d\xi = 1 \quad (1-3)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u(\xi) \delta(x_i - \xi) d\xi = u(x_i) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_i - \xi) d\xi = u(x_i) \quad (2-3)$$

$u(x_i)$ مقدار تابع u در نقطه x_i می باشد. برای کاربردی نمودن خاصیت تابع دلتای دیراک، در روش SPH این تابع با تابع وزن w جایگزین می گردد. تابع وزن مورد استفاده باید مثبت باشد و مقادیر غیر صفر تابع در همسایگی نقطه مرکزی قرار داشته باشند. این همسایگی، دامنه هموارسازی نام دارد و در خارج از این همسایگی تابع وزن دارای مقدار صفر می باشد. شکل این تابع به صورت زنگوله ای می باشد و سطح زیر نمودار آن مشابه خاصیت دلتای دیراک باید برابر یک باشد. خصوصیات و شروط اساسی تابع وزن w به طور خلاصه در روابط (3-3) ذکر شده اند.

$$1) w > 0 \quad \text{مثبت بودن در کل دامنه ی } \Omega_1$$

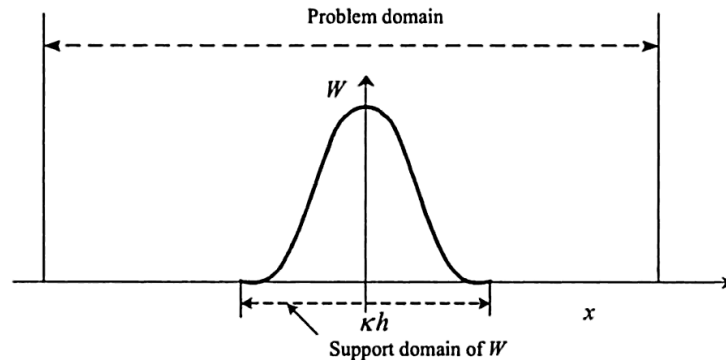
$$2) w = 0 \quad \text{صفر بودن در خارج از دامنه ی } \Omega_1$$

$$3) \int_{\Omega_i} w(|x - x_i|, h) d\Omega_i = 1 \quad \text{برابر واحد بودن انتگرال آن در دامنه } \Omega_1 \quad (3-3)$$

$$4) \quad \text{حالت تک آهنگی داشته باشد (در حال کاهش)}$$

$$5) w \rightarrow \delta \quad \text{وزن به سمت } \delta \text{ برود}$$

که Ω_1 دامنه هموارسازی یا دامنه تأثیر و $w(|x - x_i|, h)$ مقدار تابع وزن می‌باشد که تابع فاصله بین ذره i و z و طول هموارسازی h است. شعاع این محدوده ضریبی از طول هموارسازی h (یعنی kh) در نظر گرفته می‌شود. مسائل حل شده در این پژوهش بر فرض مقدار $k = 2$ استوارند. شکل ۱-۳ چگونگی تعریف این پارامترها را بر هندسه‌ی مسئله‌ای یک بعدی نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: نمایش دامنه تأثیر تابع هموارسازی W و دامنه مسئله [۴۷].

مجدداً متذکر می‌شویم که مقدار تابع هموارسازی بیرون از دامنه تأثیرش مقداری برابر با صفر دارد. $d\Omega_i$ جزء حجم اشغال شده در اطراف نقطه x می‌باشد و عبارت $|x - x_i|$ مبین فاصله نقطه x واقع در دامنه هموارسازی تا ذره مرکزی i می‌باشد. با به کارگیری تابع وزن مناسب که جزئیات آن در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد، مقدار دقیق $u(x_i)$ با مقدار تقریبی $u^h(x_i)$ با استفاده از رابطه (۴-۳) جایگزین می‌شود.

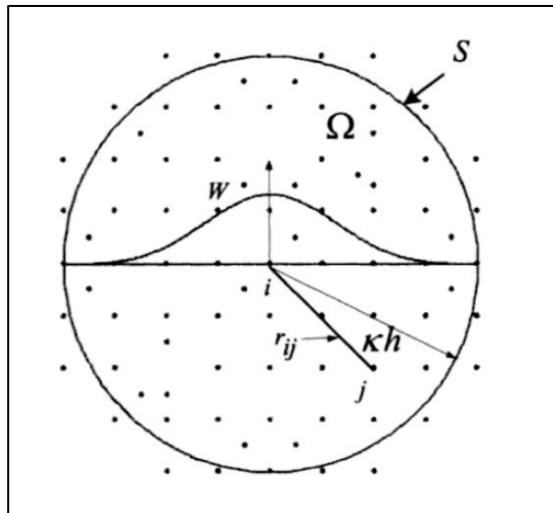
$$u(x_i) \approx u^h(x_i) = \int_{\Omega_i} u(x)w(|x - x_i|, h)d\Omega_i \quad (۴-۳)$$

فرم ناپیوسته رابطه (۴-۳) مشابه یک میانگین‌گیری وزنی از مقادیر تابع، در ذرات موجود در دامنه تأثیر ذره i می‌باشد.

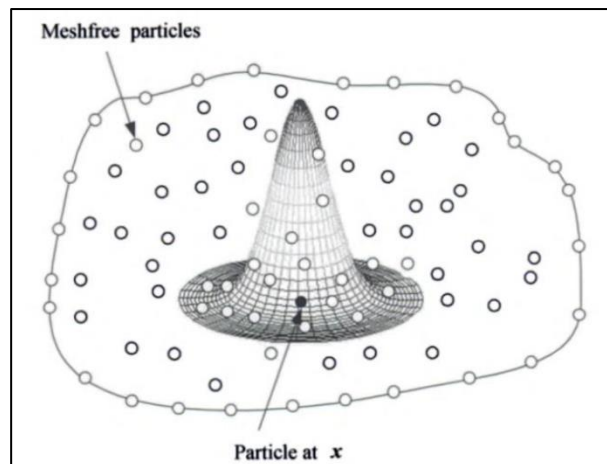
$$u^h(x_i) \approx \sum_{j=1}^N u_j w(|x_j - x_i|, h) \Delta v_j \quad (۵-۳)$$

که N تعداد ذرات هم‌جوار موجود در دامنه هموارسازی Ω_1 و Δv_j فضای اشغال شده توسط ذره j می‌باشد. در مسائل یک بعدی Δv_j به Δx_j تبدیل می‌شود که متوسطی از فاصله ذره j تا نقاط هم‌جوار

است. همان طور که در شکل ۳-۲ و ۳-۳ مشخص شده است با دور شدن از ذره مرکزی مقدار تابع وزن کاهش می‌یابد، به بیان دیگر مقدار وزن در ذره j که در دامنه هموارسازی ذره مرکزی i واقع شده است تابع فاصله $r_{ij} = |x_j - x_i|$ از آن می‌باشد. با استفاده از رابطه (۳-۵) می‌توان مقادیر میانی از یک رشته داده گسترده را درونیابی نمود.



شکل ۳-۲: ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نمایش کیفی تخصیص مقدار وزن به آن‌ها در حالت دو بعدی [۴۷].



شکل ۳-۳: ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نمایش کیفی تخصیص مقدار وزن به آن‌ها در حالت دو بعدی [۴۷].

۳-۳- توابع وزن SPH

یکی از موضوعات اساسی در روش‌های بدون المان، چگونگی انجام مؤثر تقریب تابع بر اساس مجموعه‌ای از ذرات پراکنده (به صورت تصادفی توزیع شده) می‌باشد که این ذرات از شبکه‌ای که از قبل اتصال بین آن‌ها را فراهم کند، استفاده نمی‌کند. روش‌های تقریب تابع در کتاب Liu [۴۷] به سه نوع زیر تقسیم می‌شوند:

- فرم انتگرالی
- فرم سری
- فرم دیفرانسیلی

روش SPH فرم انتگرالی تبدیل یافته توسط تابع هموارساز را به کار می‌گیرد. تابع هموارساز (که تابع کرنل هموار، کرنل هموار یا به صورت ساده‌ای کرنل نیز خوانده می‌شود) حائز اهمیت بالایی می‌باشد چون هم جزو خصوصیات تقریب تابع و تعیین کننده بعد دامنه هموارسازی ذرات می‌باشد و هم سازگاری و دقت تقریب کرنل و ذرات را تعیین می‌کند. در مورد انتخاب و ساختن توابع وزن، تحقیقات زیادی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات Liu و همکاران [۴۷] اشاره کرد. بخشی از این تحقیقات به صورت زیر می‌باشد:

در اولین مقاله SPH، Lucy از تابع زنگوله‌ای شکل^۱ زیر استفاده کرده بود [۴۰]:

$$W(x - x', h) = W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} (1 + \frac{1}{2}R)(1 - R)^3 & R \leq 1 \\ \text{Otherwise} & \end{cases} \quad (3-6)$$

در تمام روابط ارائه شده برای توابع هموارساز گوناگون، پارامتری جهت ارضا شرط سوم از رابطه یعنی شرط واحد^۲ (واحد بودن سطح زیر نمودار تابع وزن) و نرمالیزه کردن لحاظ می‌گردد. این پارامتر

^۱ Bell-shaped

^۲ Unity condition

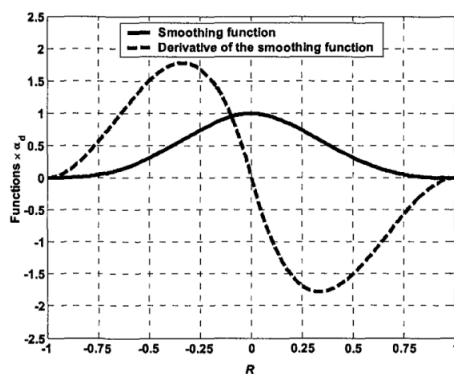
را α_d می‌نامیم. α_d تابع هموارساز (۶-۳) در حالت یک، دو و سه بعدی به ترتیب دارای مقادیر $\frac{5}{4}h$ ،

$$\frac{5}{\pi h^2} \text{ و } \frac{105}{16\pi h^3} \text{ خواهد بود و } R = r_{ij}/h \text{ [۴۷].}$$

فاصله نسبی بین دو ذره به این صورت می‌باشد:

$$r_{ij} = |x_j - x_i| = |x_{ij}| \quad , \quad R = r_{ij}/h \quad (۷-۳)$$

شکل ۴-۳ نمایانگر تابع هموارساز (۶-۳) است.



شکل ۴-۳ : تابع هموارساز Lucy و مشتق اول آن [۴۷].

چندی بعد، Monaghan در مقالات خود به این نتیجه رسید که هسته‌ی تابع هموارساز SPH

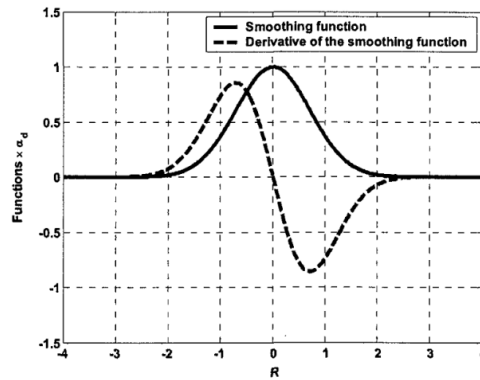
می‌بایست دارای تعبیر فیزیکی باشد و بدین منظور استفاده از تابع گاوسی^۱ را پیشنهاد نمود [۵۰]:

$$W(R, h) = \alpha_d e^{-R^2} \quad (۸-۳)$$

α_d تابع هموارساز (۸-۳)، در حالت یک، دو و سه بعدی به ترتیب دارای مقادیر $\frac{1}{h\sqrt{\pi}}$ ، $\frac{1}{\pi h^2}$ و

$\frac{1}{h^3\sqrt{\pi^3}}$ خواهد بود.

^۱ Gaussian function



شکل ۳-۵: تابع هموارساز گاوسی و مشتق اول [۴۷].

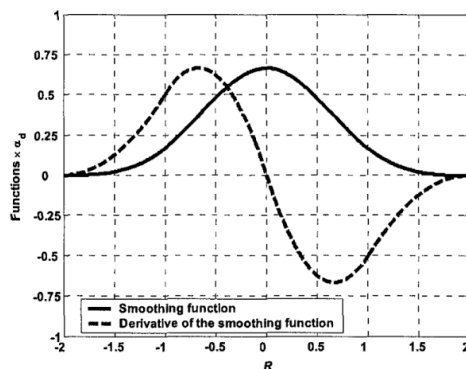
تابع هموارساز گاوسی به اندازه کافی حتی برای مشتقات درجات بالاتر نیز هموار می‌باشد، و دارای دقت و پایداری بالایی به خصوص برای ذرات با توزیع نامنظم می‌باشد. پس از تحقیقات متعدد، Monaghan تابع هموارسازی بر پایه‌ی کثیرالجمله‌ای‌های درجه سه^۱ ارائه کرد [۵۱].

$$W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{6}R^3 & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6}(2 - R)^3 & 1 \leq R \leq 2 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3-9)$$

α_d تابع هموارساز (۳-۹)، در حالت یک، دو و سه بعدی به ترتیب دارای مقادیر $1/h$ ، $1/h^2$ و $1/h^3$ خواهد بود.

به دلایل متعددی از جمله شباهت به هسته‌ی گاوسی، اثرات کمتر فشردگی در مرزها و هموار باقی ماندن تابع هموارساز در برخی مشتقات مراتب بالاتر (برخلاف تابع گاوسی)، تابع اخیر عنوان متداول-ترین هسته‌ی SPH است که اغلب در مقالات و پژوهش‌های اخیر از آن استفاده شده است.

^۱ Cubic Spline (known as B-Spline)

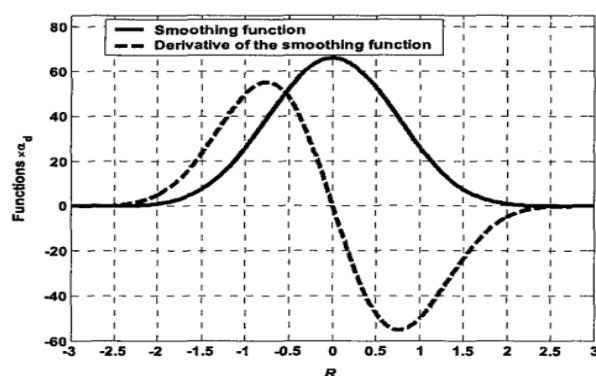


شکل ۳-۶: تابع هموارساز Cubic Spline و مشتق اول آن [۴۷].

Morris تابع کثیرال جمله‌ای درجه ۵^۱ بالاتر را که تقریب نزدیک‌تری به گاوسی دارد و پایدارتر می‌باشد، پیشنهاد داد [۵۴، ۵۳، ۵۲]:

$$W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} (3-R)^\delta - 6(2-R)^\delta + 15(1-R)^\delta & 0 \leq R < 1 \\ (3-R)^\delta - 6(2-R)^\delta & 1 \leq R < 2 \\ (3-R)^\delta & 2 \leq R < 3 \\ 0 & R \geq 3 \end{cases} \quad (3-10)$$

α_d تابع هموارساز (۳-۱۰)، در حالت یک، دو و سه بعدی به ترتیب دارای مقادیر $120/h$ ^۲، $720\pi h^2$ ^۳ و $359\pi h^3$ ^۳ خواهد بود.



شکل ۳-۷: تابع هموارساز درجه پنج و مشتق اول آن [۴۷].

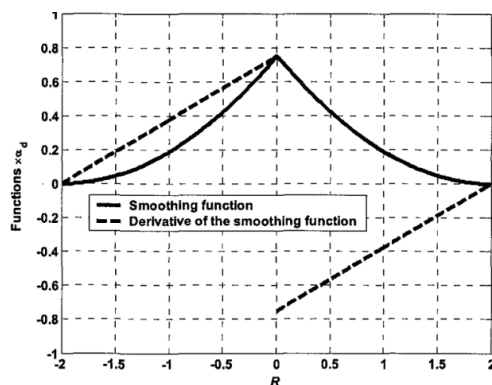
Johnson و همکارانش از تابع هموارساز درجه دو^۲ زیر جهت شبیه‌سازی مسائل برخورد با سرعت بالا استفاده کردند [۵۲]:

^۱ Quintic Spline

^۲ Quadratic smoothing function

$$W(R, h) = \alpha_d \left(\frac{3}{16} R^2 - \frac{3}{4} R + \frac{3}{4} \right) \quad 0 \leq R \leq 2 \quad (11-3)$$

α_d تابع هموارساز (۱۱-۳)، در حالت یک، دو و سه بعدی به ترتیب دارای مقادیر $1/h$ ، $1/(\pi h^2)$ و $1/(\pi h^3)$ خواهد بود.



شکل ۳-۸: تابع هموارساز درجه دو و مشتق اول آن [۴۷].

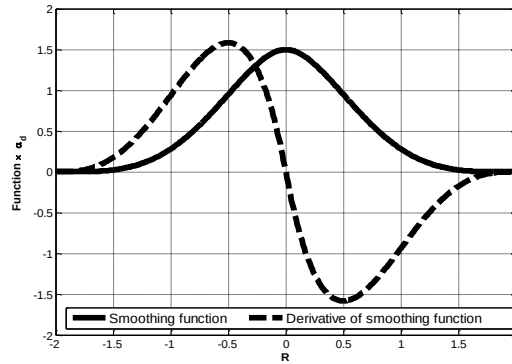
برخلاف بقیه توابع هموارساز، مشتق تابع هموارساز درجه دو، با نزدیک‌تر شدن ذرات به هم افزایش و با دور شدن ذرات از هم کاهش می‌یابد. این خاصیت توسط Johnson به عنوان اصلاح مهمی در تابع هموارساز چندجمله‌ای درجه سه مورد توجه واقع شد و به عنوان رهایی از مشکل ناپایداری تراکمی^۱ معرفی شده است.

Wendland در سال ۱۹۹۵ از تابع درجه ۵^۲ زیر جهت شبیه‌سازی استفاده کرد [۵۴]:

$$W(R, h) = \alpha_d \left(1 - \frac{R}{2} \right)^4 (2R + 1) \quad 0 \leq R \leq 2 \quad (12-3)$$

α_d تابع هموارساز (۱۲-۳)، در حالت یک، دو و سه بعدی به ترتیب دارای مقادیر $1/h$ ، $1/(\pi h^2)$ و $1/(\pi h^3)$ خواهد بود.

^۱ Compressive instability
^۲ Quintic



شکل ۳-۹: تابع هموارساز درجه پنج و مشتق اول آن [۴۷]

۳-۴- محاسبه مقدار مشتق اول تابع با استفاده از روش SPH

در روش اجزای محدود مشتق میدان متغیر به صورت مقادیر گرهی ضرب در مشتق توابع شکل تقریب زده می‌شود. به طور مشابه در روش ذرات متحرک نیز محاسبه مشتق یک تابع عددی معلوم در نقاط دامنه با دانستن مقادیر مشتق تابع وزن در نقاط واقع در دامنه هموارسازی ممکن می‌گردد. یکی از شرایط حصول مشتقات بالاتر، مشتقات مراتب بالاتر تابع وزن است. در صورتی که مختصات گره مرکزی x_i باشد، برآورد مقدار مشتق نسبت به متغیر x_a ، در نقطه i با در نظر داشتن رابطه (۳-۴) با استفاده از روش انتگرال‌گیری جزء به جزء امکان‌پذیر است. تقریب برای مشتق فضایی $\nabla \cdot u(x)$ به سادگی با جایگزین کردن $u(x)$ به جای $\nabla \cdot u(x)$ در معادله به دست می‌آید.

$$\nabla \cdot u(x) = \int_{\Omega} \nabla \cdot u(x') \cdot w(x - x', h) dx' \quad (۳-۱۴)$$

در داخل انتگرال دیورژانس در ارتباط با x' صورت می‌گیرد. با استفاده از رابطه جزء به جزء در معادله

(۳-۱۴) و با به کارگیری برای معادله (۳-۱۳) داریم:

$$(\nabla \cdot u(x))w(x - x') = \nabla(u(x')w(x - x', h)) - u(x') \cdot \nabla w(x - x', h) \quad (۳-۱۵)$$

$$\nabla \cdot u(x) = \int_{\Omega} \nabla(u(x') \cdot w(x - x', h)) dx' - \int_{\Omega} u(x') \cdot (\nabla w(x - x', h)) dx' \quad (۳-۱۶)$$

$$\nabla \cdot u(x) = \int_{\Omega} u(x') \cdot w(x - x', h) \vec{n} ds - \int_{\Omega} u(x') \cdot (\nabla w(x - x', h)) dx' \quad (13-3)$$

ترم اول در طرف راست معادله (۱۵-۳) را می‌توان با استفاده از قضیه دیورژانس به انتگرال روی سطح S در دامنه انتگرال‌گیری Ω تبدیل کرد.

$\vec{n}$ بردار نرمال واحد بر روی S می‌باشد.

دامنه w پیوسته است و در صورتی که دامنه آن به طور کامل داخل دامنه مسئله قرار گیرد انتگرال روی سطح در طرف راست معادله (۱۶-۳) برابر با صفر خواهد بود. فرم گسسته این رابطه را می‌توان به صورت رابطه (۱۷-۳) نوشت:

$$\frac{\partial u}{\partial x_a} \approx \left(\frac{\partial u}{\partial x_a} \right)_i^h = - \sum_{j=1}^N u(x_j) \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_a} \Delta v_j \quad (17-3)$$

در رابطه فوق منظور از $\frac{\partial w_{ij}}{\partial x_a}$ مقدار عددی مشتق تابع وزن نسبت به متغیر x_a در نقطه واقع در مختصات $x_j = (x_\alpha, x_\beta, x_\gamma)_j$ که در دامنه هموارسازی نقطه مرکزی به مختصات $x_i = (x_\alpha, x_\beta, x_\gamma)_i$ می‌باشد. در عمل برای محاسبه مشتق تابع وزن نسبت به متغیر مستقل x_a با توجه به قاعده زنجیری مشتق، از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w(|x - x_i|, h)}{\partial x_a} &= \frac{\partial R}{\partial x_a} \cdot \frac{dw(R, h)}{dR} \\ R &= \frac{|x - x_i|}{h} = r/h \\ r &= \sqrt{(x_\alpha - (x_\alpha)_i)^2 + (x_\beta - (x_\beta)_i)^2 + (x_\gamma - (x_\gamma)_i)^2} \\ \frac{\partial R}{\partial x_a} &= \frac{1}{h} \cdot \frac{x_\alpha - (x_\alpha)_i}{r} \end{aligned} \quad (18-3)$$

بدین ترتیب مشتق توابع وزنی معرفی شده در بخش قبلی به راحتی قابل محاسبه می‌باشد.

۳-۵- محاسبه مقدار مشتق مراتب بالاتر با استفاده از روش SPH

برای محاسبه مشتق دوم نیز مجدداً از روش انتگرال‌گیری جزء به جزء استفاده می‌گردد.

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_\alpha^2}\right) &\approx \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_\alpha^2}\right)_i^h = \int_{\Omega_i} \frac{\partial^2 u(\mathbf{x})}{\partial x_\alpha^2} w(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|, h) d\Omega_i \\
&= \frac{\partial u(\mathbf{x})}{\partial x_\alpha} \cdot w(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|, h) \Big|_0^{kh} - \int_{\Omega_i} \frac{\partial u(\mathbf{x})}{\partial x_\alpha} \cdot \frac{\partial w(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|, h)}{\partial x_\alpha} d\Omega_i \\
&= \frac{\partial u(\mathbf{x})}{\partial x_\alpha} \cdot w(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|, h) \Big|_0^{kh} - u(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial w(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|, h)}{\partial x_\alpha} \Big|_0^{kh} + \int_{\Omega_i} u(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial^2 w(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|, h)}{\partial x_\alpha^2} d\Omega_i
\end{aligned} \tag{۱۹-۳}$$

توابع وزن به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که دو جمله اول رابطه (۱۹-۳) حتی‌المقدور حذف گردد. این نکته قابل توجه است که بر خلاف روند محاسبه مشتق اول، حذف تمامی جملات مرزی با استفاده از انتخاب تابع وزن مناسب برای محاسبه مشتق دوم دشوار می‌باشد. بنابراین در نظر گرفتن رابطه مشتق دوم تابع u به صورت زیر با تقریب همراه می‌باشد.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x_\alpha^2} \approx \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_\alpha^2}\right)_i^h = \sum_{j=1}^N u_j \frac{\partial w_{ij}^2}{\partial x_\alpha^2} \Delta v_j \tag{۲۰-۳}$$

در رابطه فوق منظور از $\frac{\partial w_{ij}^2}{\partial x_\alpha^2}$ مقدار عددی مشتق دوم تابع وزن نسبت به متغیر x_α در نقطه j واقع در دامنه هموارسازی نقطه مرکزی i می‌باشد که از رابطه (۲۰-۳) محاسبه می‌گردد. با همین شیوه می‌توان رابطه کلی‌تری برای محاسبه مقدار مشتق دوم توابع چند متغیره در فرم گسسته نوشت.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} \approx \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_\alpha \partial x_\beta}\right)_i^h = \sum_{j=1}^N u_j \frac{\partial^2 w_{ij}}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} \Delta v_j \tag{۲۱-۳}$$

مشتق تابع وزن نسبت به متغیرهای مستقل از رابطه (۲۲-۳) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial w(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|, h)}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} = \frac{\partial s}{\partial x_\alpha} \left(\frac{d^2 w(s, h)}{ds^2} + \frac{1}{s} \frac{dw(s, h)}{ds} \right) \frac{\partial s}{\partial x_\beta} + \frac{\delta_{\alpha\beta}}{sh^2} \frac{dw(s, h)}{ds}$$

$$s = |\mathbf{x} - \mathbf{x}_i| / h = r / h \quad (22-3)$$

$$r = \sqrt{(x_\alpha - (x_\alpha)_i)^2 + (x_\beta - (x_\beta)_i)^2 + (x_\gamma - (x_\gamma)_i)^2}$$

$$\frac{\partial s}{\partial x_\alpha} = \frac{1}{h} \cdot \frac{x_\alpha - (x_\alpha)_i}{r}$$

۳-۶- فرمول بندی SPH برای معادلات ناویر- استوکس

همان طور که می دانیم معادله ی ناویر-استوکس در سیالات، شامل ۳ معادله ی اساسی می باشد به

صورت زیر:

معادله پیوستگی یا بقای جرم که به فرم زیر ارائه می شود:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (23-3)$$

که در آن ρ چگالی و $\mathbf{v}$ سرعت کلی سیال می باشد.

بقاء مومنتوم (بقای اندازه حرکت):

معادله مومنتوم بر پایه ی قانون بقای اندازه حرکت استوار است که در مکانیک محیط های پیوسته با

قانون دوم نیوتن بیان می شود. با انجام یک سری عملیات ریاضی و ساده سازی ها به معادلات بقاء

مومنتوم در راستای X به صورت زیر می رسمیم:

$$\rho \frac{Dv_x}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho F_x \quad (24-3)$$

و به طور مشابه، رابطه (۲۴-۳) را در جهات y و z می توان این گونه بیان کرد:

$$\rho \frac{Dv_y}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho F_y \quad (25-3)$$

$$\rho \frac{Dv_z}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho F_z \quad (26-3)$$

که در آن، p فشار، τ_{xy} تنش برشی و F نیروی خارجی می‌باشد. این نیرو شامل نیروی گرانش، نیروی کشش سطحی و یا هر نیرویی که حاکم بر هندسه‌ی مورد نظر است می‌باشد. در سیالات نیوتنی، تنش برشی و کرنش نظیرش توسط ضریبی بنام ویسکوزیته دینامیکی (لزجت) در ارتباط خطی می‌باشند، یعنی:

$$\tau_{ij} = \mu \varepsilon_{ij} \quad (27-3)$$

که در آن، ε_{ij} کرنش و μ ضریب ویسکوزیته می‌باشد. بر اساس قانون عمومی هوک و تعریف δ_{ij} به عنوان تابع دلتای دیراک:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \delta_{ij} \quad (28-3)$$

معادلات ناویر-استوکس در فرم مختصر شده:

۱- معادله پیوستگی:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j (u_i - u_j) \nabla W_{ij} \quad (29-3)$$

در معادله فوق ρ_i چگالی ذره i با سرعت u_i بوده و m_j جرم ذره j می‌باشد. بردار موقعیت از ذره j تا ذره i به صورت $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$ نشان داده می‌شود و $W_{ij} = W(r_{ij}, h)$ تابع کرنل می‌باشد.

وقتی که دو ذره به یکدیگر نزدیک می‌شوند سرعت نسبی آن‌ها منفی بوده و به علت منفی بودن گرادیان تابع کرنل، $\frac{d\rho_i}{dt}$ که حاصل ضرب این دو مقدار است مثبت خواهد شد. به عبارت دیگر ρ_i افزایش خواهد یافت. این عامل باعث ایجاد یک فشار مثبت شده که در نهایت ذرات را از یکدیگر دور خواهد کرد. به طریق مشابه اگر دو ذره از یکدیگر فاصله بگیرند، چگالی آن‌ها کاهش خواهد یافت و

فشار منفی ایجاد شده دو ذره را به سمت یکدیگر می کشاند.

۲- معادله مومنتوم :

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla\rho + \vec{g} + \frac{1}{\rho}\nabla \cdot \vec{\tau} \quad (30-3)$$

ترم های معادله بالا در فرم SPH به شکل زیر می باشند:

$$\left(\frac{\nabla P}{\rho}\right)_i = \sum_j m_j \left[\frac{P_i}{\rho_i^{\gamma}} + \frac{P_j}{\rho_j^{\gamma}}\right] \cdot \vec{\nabla}_i W_{ij} \quad (31-3)$$

$$\left(\frac{1}{\rho}\nabla \cdot \vec{\tau}\right)_i = \left(\frac{\mu}{\rho}\nabla^2 \vec{V}\right)_i = \sum_j \frac{4m_j(\mu_i + \mu_j)\vec{r}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}}{(\rho_i + \rho_j)^{\gamma}(|\vec{r}_{ij}|^{\gamma} + \eta^{\gamma})} (\vec{V}_i - \vec{V}_j) \quad (32-3)$$

با استفاده از روابط بالا، معادله مومنتم عبارت است از:

$$\frac{D\vec{V}_i}{Dt} = -\sum_j m_j \left[\frac{P_i}{\rho_i^{\gamma}} + \frac{P_j}{\rho_j^{\gamma}}\right] \cdot \vec{\nabla}_i W_{ij} + \vec{g} + \sum_j \frac{4m_j(\mu_i + \mu_j)\vec{r}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}}{(\rho_i + \rho_j)^{\gamma}(|\vec{r}_{ij}|^{\gamma} + \eta^{\gamma})} (\vec{V}_i - \vec{V}_j) \quad (33-3)$$

۳-۷- سطح آزاد

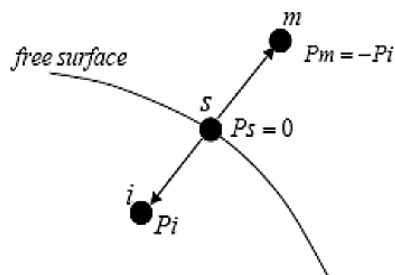
در الگوریتم های مختلف SPH تراکم پذیر روش های مختلفی برای تعیین سطح آزاد معرفی می شود. به عنوان نمونه، در اینجا یکی از روش هایی که در اکثر شبیه سازی های SPH تراکم ناپذیر استفاده می شود، بیان می گردد. هنگامی که یک ذره سیال در روی سطح آزاد قرار می گیرد با توجه به معادله (31-3) چگالی آن نسبت به چگالی ذرات داخلی سیال کاهش قابل توجهی پیدا می کند و از این طریق می توان پی برد که آیا یک ذره مشخص بر روی سطح آزاد قرار دارد یا خیر. به عبارت دیگر ذراتی که شرایط زیر را ارضاء کنند به عنوان یک ذره سطح آزاد شناخته می شوند و فشار صفر برای آنها منظور می شود.

$$\rho_* < \beta\rho. \quad (34-3)$$

که ρ_* چگالی ذرات در گام پیش‌بینی، ρ چگالی ثابت سیال و β پارامتر مربوط به سطح آزاد است. معمولاً $0.8 < \beta < 0.99$ می‌باشد. لازم به ذکر است که برای محاسبه گرادیان فشار برای ذرات سطح آزاد با توجه به اینکه در آن سوی مرز آزاد، دیگر ذره‌ای وجود ندارد نمی‌توان دیگر از معادله (۳-۳۱) مستقیماً استفاده کرد و باید تعدادی ذرات مجازی نیز در نظر گرفت. فرض می‌کنیم ذره i یک ذره درونی سیال، ذره s یک ذره سطح آزاد و m یک ذره مجازی باشد. در این صورت ذره مجازی m باید از لحاظ موقعیت در نقطه قرینه ذره i نسبت به ذره s باشد. موقعیت این ذرات در شکل (۳-۱۰) به تصویر کشیده شده است.

همان طور که در شکل (۳-۱۰) مشخص شده است به ذره مجازی m قرینه فشار ذره درونی i اعمال می‌شود که در این صورت با درونیابی بین این دو مقدار، میزان فشار ذره سطح آزاد صفر می‌شود. گرادیان فشار بین ذرات سطح آزاد s ، ذره مجازی m و ذره درونی i به شکل زیر خواهد شد:

$$\left(\frac{1}{\rho} \nabla P\right)_s = m \left[\frac{P_s}{\rho_s} + \frac{P_i}{\rho_i} \right] \cdot \nabla_s W_{si} + m \left[\frac{P_s}{\rho_s} + \frac{P_m}{\rho_m} \right] \cdot \nabla_s W_{sm} \quad (3-35)$$



شکل ۳-۱۰: محل قرارگیری یک ذره مجازی سیال در آن سوی مرز سطح آزاد

گرادیان بین ذره m و s برابر با گرادیان بین ذره s و i است:

$$\begin{aligned} P_m &= -P_i \\ P_s &= 0 \end{aligned} \quad (3-36)$$

$$\nabla_s W_{sm} = -\nabla_s W_{si}$$

با اعمال شرایط معادله (۳-۳۴) در معادله (۳-۳۵) خواهیم داشت:

$$\left(\frac{1}{\rho} \nabla P\right)_s = \gamma m \left(\frac{P_i}{\rho_i^{\gamma}}\right) \nabla_s W \quad (3-37)$$

در نتیجه، میزان واقعی گرادیان فشار یک ذره سطح آزاد دو برابر می‌شود و با اعمال این شرایط می‌توان ذرات سطح آزاد را به درستی حرکت داد. استفاده از معادله (۳-۳۶) برای این ذرات، باعث ایجاد ناپایداری در حل عددی خواهد شد. برای رفع این مشکل، از معادله لاپلاسین فشار بین ذره سطح آزاد s و ذره درونی i استفاده می‌شود:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla P\right) = \gamma m \left(m_s \frac{\frac{1}{(\rho_s + \rho_i)^{\gamma}} P_{si} r_{si} \cdot \nabla_s W_{si}}{|r_{si}|^{\gamma} + \eta^{\gamma}}\right) \quad (3-38)$$

۳-۸- مرزهای جامد

اعمال شرایط مرزی به شکل‌های مختلف در روش SPH قابل انجام است. Monaghan پیشنهاد نموده است که مرز ناحیه حل را با مجموعه‌ای از ذرات مرزی که فاصله‌شان نصف تا یک سوم فاصله اولیه ذرات است می‌پوشاند. برای این ذرات مرزی معادله‌ای حل نمی‌شود. این ذرات مرزی بر ذرات داخلی سیال نیروهای دافعه وارد می‌کنند تا از مرز عبور نکنند.

یک روش دیگر این است که دیوار جامد به صورت یک آینه برای ذرات داخلی عمل کنند. بنابراین نزدیک شدن هر ذره به دیوار همزمان با نزدیک شدن یک ذره مجازی در آن طرف دیوار به دیوار است. بدین ترتیب نیروی دافعه اعمال شده از طرف ذره مجازی اجازه عبور ذره داخلی از دیوار را نخواهد داد. در این روش که از مدل Gotoh and Sakai تبعیت می‌کند، مرزهای دیواره توسط ذرات ثابتی مدل می‌شوند. معادله پواسون برای این ذرات حل خواهد شد. علاوه بر آن، به تعدادی ذره مجازی احتیاج است که در سمت بیرونی دیواره قرار بگیرند تا چگالی سیال در ذرات دیواره را با چگالی سیال درونی سازگار نگه‌دارند. با این حال، برخلاف مدل Gotoh and Sakai، این ذرات، ثابت نیستند بلکه حرکت ذرات سیال درونی را نسبت به دیواره به صورت آینه‌ای انعکاس می‌دهند. در

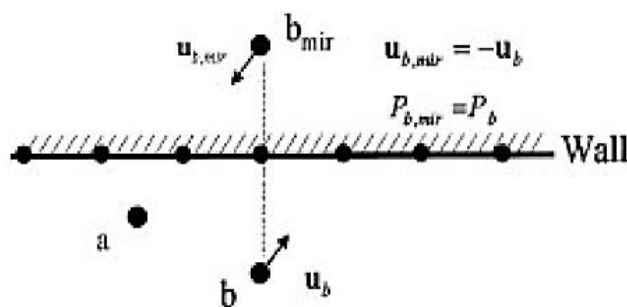
نتیجه شرط مرزی عدم لغزش^۱ را در مرزهای جامد به خوبی ارضا می‌کنند. موقعیت این در شکل (۳-۱۱) نمایش داده شده است. دیواره، ذراتی دارد که در محل خود ثابت هستند. بنابراین برای عکس‌العمل بین ذره سیال داخلی a و ذره b ، در صورتی که ذرات a و b نزدیک دیواره باشند، یک عکس‌العمل اضافی بین ذره a و یک ذره مجازی b_{mir} نیز احتیاج است. ذره مجازی b_{mir} دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد:

۱- موقعیت b_{mir} بر اساس موقعیت ذره b به صورت آینه‌ای نسبت به دیوار تعیین می‌شود.

۲- سرعت b_{mir} برای برقراری عدم لغزش، مساوی و مخالف جهت ذره b تعیین می‌شود، یعنی:

$$u_{b,mir} = -u_b$$

۳- فشار b_{mir} مساوی با ذره b است. بنابراین شرط مرزی همگن نیومن، $\partial P / \partial n$ اعمال می‌شود.



شکل ۳-۱۱: رفتار دیواره مرزی - رابطه بین ذرات درونی، مجازی و دیواره

۳-۹- جستجوی ذرات هم‌جوار

برای محاسبات مختلف در SPH لازم است ذرات هم‌جوار هر ذره معین باشد. هر دو ذره که هم‌جوار یکدیگر باشند برهم‌کنش^۲ بین آن‌ها وجود دارد. از آنجایی که پیدا کردن برهم‌کنش‌ها در هر گام زمانی باید انجام گیرد، از نظر محاسباتی هزینه‌ی زیادی ایجاد می‌کند. بنابراین استفاده از روش‌های

^۱ No-slip boundary condition

^۲ Interaction

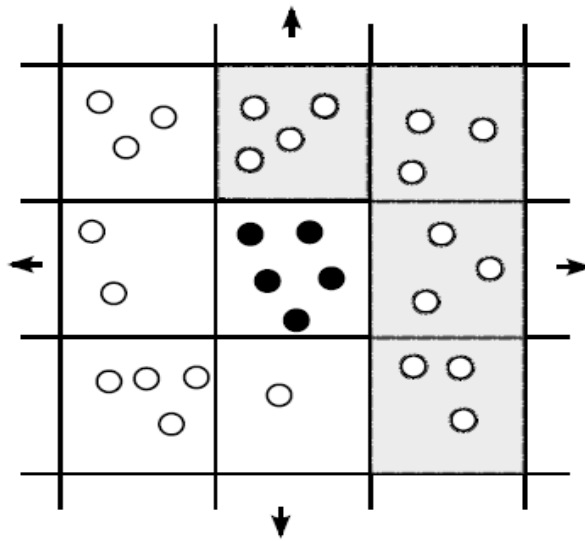
سریع و بهینه برای پیدا کردن ذرات هم‌جوار اهمیت زیادی دارد. سه روش متداول برای جستجو وجود دارد. [۴۷]

- جستجوی مستقیم^۱: ساده‌ترین روشی که می‌توان پیشنهاد داد. در واقع هر ذره با تمامی ذرات دیگر برای هم‌جوار بودن آزمایش می‌شود. اگر تعداد ذرات N باشد آن گاه زمان الگوریتم از مرتبه $O(N^2)$ است و با زیاد شدن تعداد ذرات کارایی خوبی ندارد. شاید مهم‌ترین کاربرد آن در ابتدای برنامه‌نویسی یک کد SPH باشد، به دلیل سادگی رفع اشکال آن ساده است و پس از آزمایش بخش‌های دیگر برنامه و اطمینان از درست بودن آن‌ها می‌توان روش جستجو را سریع‌تر کرد.
- جستجوی مبتنی بر شبکه‌ی سلول‌ها^۲: در این روش ذرات ابتدا دسته‌بندی می‌شوند. حال برای هر ذره تنها کافی است که ذراتی که در سلول همسایه‌ها هستند جستجو شود. به دلیل اینکه برهم‌کنش بین هر دو ذره تنها یک بار لازم است، تنها نیمی از سلول‌های همسایه جستجو می‌شوند مانند آنچه در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است. چنانچه فاصله‌ی متوسط بین ذرات در طول زمان تقریباً ثابت باشد (این اتفاق در جریان‌های تراکم‌ناپذیر رخ می‌دهد) تعداد ذرات موجود در هر سلول تقریباً ثابت است و الگوریتم از مرتبه‌ی $O(N)$ خواهد بود. به همین دلیل این روش بسیار سریع‌تر است.
- جستجوی درختی^۳: اگر h ، متغیر باشد می‌توان همچنان از روش شبکه استفاده کرد ولی لازم است تا اندازه‌ی سلول‌های شبکه برابر h_{max} در نظر گرفته شود. اگر تغییرات h زیاد باشد مزیت روش شبکه از بین می‌رود. مسائل اختر فیزیک و جریان‌های تراکم‌پذیر از این نمونه هستند. در این موارد از روش جستجوی درختی استفاده می‌شود که در آن به طور پیوسته ذرات به دو قسمت تقسیم می‌شوند. مرتبه‌ی این روش جستجو از $O(N \log N)$ است.

^۱ Direct search

^۲ Linked list search

^۳ Tree search



شکل ۳-۱۲: برای جستجوی ذرات داخل یک سلول تنها نیمی از سلول‌های مجاور جستجو می‌شود

۳-۱۰- محدودیت گام زمانی

با توجه به نیمه ضمنی بودن مدل روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده‌ی تراکم ناپذیر (صریح در محاسبه‌ی جمله‌ی انتقال و ضمنی در محاسبه‌ی جمله‌ی گرادیان فشار در معادله‌ی مقدار حرکت)، اندازه‌ی گام زمانی باید به منظور دستیابی به پایداری کنترل گردد. در مدل حاضر، اندازه‌ی گام زمانی توسط پارامتر عدد کورانت^۱ کنترل می‌گردد [۴۷].

$$\Delta t = \min\left\{\frac{C.h_i}{h_i \nabla.v_i + c_i + 1.2(\alpha_\pi c_i + \beta_\pi h_i |\nabla.v_i|)}\right\} \quad (3-39)$$

که در آن C ، عدد کورانت، α_π و β_π دو ضریبی هستند که در ویسکوزیته‌ی مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

^۱ Courant number

۳-۱۱- جمع‌بندی

در این فصل فرمول‌بندی روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده شامل معادلات ناویر-استوکس و دیگر مسائل به طور کامل تشریح شد. در فصل بعد بالاروی و روگذری موج تنها مدل‌سازی می‌شوند و توسط مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

فصل چهارم:

صحت سنجی مدل عددی و شبیه سازی

مسائل بالاروی و روگذری موج

۴-۱- مقدمه

مطالعه پدیده انتشار امواج و بالاروی و روگذری آن در جریان های سطح آزاد، مزایای بسیاری داشته و اخیرا بسیار مورد توجه قرار گرفته است. امواج سطح آزاد پتانسیل عظیمی برای آسیب رساندن و نابود کردن زندگی نواحی ساحلی دارند. پیش بینی آسیب های این امواج به منظور آمادگی برای مقابله با آنها به خصوص در هنگام جاری شدن سیل در نواحی ساحلی، از اهمیت زیادی برخوردار است. متاسفانه به دلیل پیچیدگی این پدیده تعداد آزمایشگاه های معتبری که بتوانند اطلاعات مناسبی را در این زمینه ارائه دهند، بسیار محدود می باشد. بنابراین در سالهای اخیر با پیشرفت کامپیوترها، علاقه مندی برای استفاده از کامپیوتر در شبیه سازی پدیده های دینامیک سیالات (از جمله پدیده انتشار امواج سطح آزاد) بسیار زیاد شده و روشهای عددی مختلفی در این زمینه به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد.

در این فصل ابتدا توضیح مختصری راجع به کدهای برنامه SPHYSICS و نرم افزار شبیه سازی ParaView داده می شود و سپس به منظور بررسی دقت مدل عددی تهیه شده ی روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده ی تراکم ناپذیر، مسئله ی بالاروی موج منفرد^۱ در اعماق مختلف و با ارتفاع های امواج مختلف که یک مثال متداول و پیچیده برای صحت سنجی مدل های عددی می باشد، مورد بررسی قرار می گیرد. پس از مشاهده ی محاسبات با دقت بالای مدل عددی و اطمینان از صحت آن، روگذری موج منفرد مدل سازی و نتایج آن با داده های آزمایشگاهی موجود مقایسه شده اند.

۴-۲- کدهای SPHYSICS و نرم افزار شبیه ساز ParaView

کدهای موجود در برنامه SPHYSICS بر پایه هیدرودینامیک ذرات هموار استوار شده و از معادلات آن استفاده می کند. این برنامه روی تمام سیستم عامل ها قابل نصب می باشد. کدهایی برای مسائلی از قبیل تولید موج توسط موج ساز در ساحل و تولید سونامی به وسیله ی یک گوه ی لغزنده و

^۱ Solitary Wave

شکست سد و... ارائه کرده است و مثال هایی از حالت های دو بعدی و سه بعدی آنها آورده است و در بقیه موارد از کدهای موجود استفاده می شود و با ویرایش قسمت هایی از آن می توان به مدل های مختلف دست یافت. کدهای FORTRAN برای برنامه های دو بعدی و سه بعدی این مدل استفاده شده است. برای استفاده از کدهای برنامه SPHYSICS نیاز به یک کامپایلر زبان برنامه نویسی FORTRAN می باشد که کامپایلرهای زیر توسط خود برنامه پیشنهاد شده اند.

۱. Win_ifort

۲. Silverfrost FTN۹۵

۳. ifort

۴. gfortran

لازم به ذکر است که برنامه SPHYSICS از کامپایلر Silverfrost FTN۹۵ استفاده کرده است، اما به دلیل قدیمی بودن و خطاهای زیاد این کامپایلر، در این پایان نامه از کامپایلر win_ifort استفاده شده است که برای نصب آن ابتدا باید برنامه Visual Studio را نصب کرد. این کامپایلر با ویندوز ۷ و ۸ سازگار می باشد و بسیاری از خطاهای مشاهده شده در Silverfrost FTN۹۵ با استفاده از این کامپایلر رفع گردید. در نهایت پس پردازش در نرم افزار MATLAB یا ParaView صورت می گیرد که در مدل حاضر از نرم افزار ParaView استفاده گردیده است. در این نرم افزار خروجی های SPHYSICS به صورت انیمیشن نمایش داده می شود و در آن چگالی و گرادیان فشار و سرعت و... به صورت Contour و Vector نشان داده می شوند که در مدل حاضر به دلیل تعداد بالای ذرات که در بعضی حالت ها از مرز ۳۲۰۰۰ ذره هم عبور می کنند و درهم شدن آنها، خروجی ها فقط به صورت Contour نشان داده شدند.

۴-۳- مسئله‌ی بالاروی موج

۴-۳-۱- توصیف مسئله

ابتدا بالاروی موج منفرد مدل‌سازی شده است. نمونه‌ای واقعی از این مسئله، انتشار و بالاروی امواج سونامی از ساحل می باشد. عدم پیش‌بینی چگونگی حرکت این امواج می‌تواند باعث وارد آوردن خسارت‌های بالا به سازه‌های ساحلی شود. یکی از مراحل مهم در شناخت حرکت امواج سونامی، تخمین سطحی از سازه‌های ساحلی است که تحت تأثیر سیلاب امواج قرار می‌گیرد که در پیش‌بینی خسارت‌های سونامی بسیار مهم می‌باشد. به منظور مطالعه‌ی بالاروی امواج از سازه‌های ساحلی، مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی مختلفی صورت پذیرفته است.

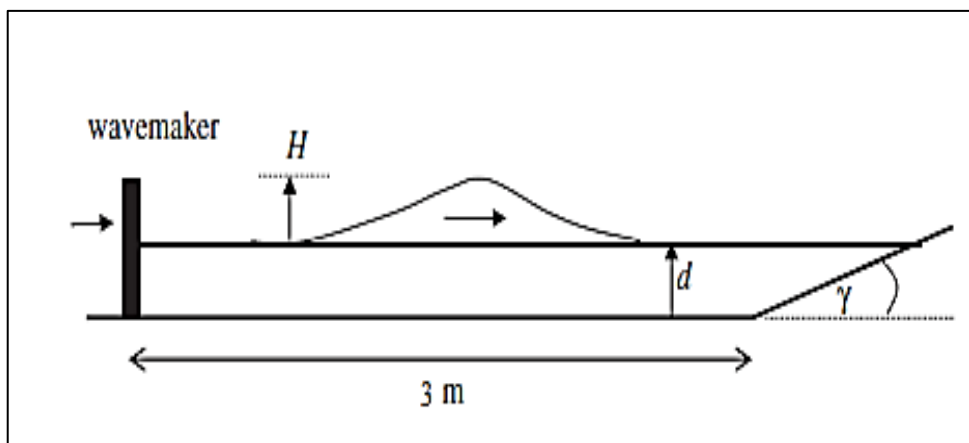
در مدل حاضر بالاروی برای ۲۱ حالت با H/d های مختلف انجام گرفت و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. اجرای هر مدل با کامپیوتر شخصی ۵ هسته ای حدوداً ۳ تا ۶ ساعت و با کامپیوتر شخصی ۳ هسته ای حدوداً ۵ تا ۱۰ ساعت به طول انجامید.

در این بخش، بالاروی موج از شیب ۱۰.۷۴ درصد با عمق آب ۲۶ سانتیمتر و ارتفاع موج ۱۵.۵ سانتیمتر مدل‌سازی شده است. پس از صحت سنجی نتایج به دست آمده از مدل، بالاروی موج در حالت‌های دیگر بررسی شد و در نهایت رابطه‌ای برای میزان بالاروی موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و عمق و ارتفاع موج های مختلف ارائه شده است.

۴-۳-۲- پارامترهای مدل‌سازی مسئله

در مدل‌سازی مسئله‌ی مطرح شده، فاصله‌ی اولیه‌ی بین ذرات در کلیه‌ی حالت‌های ذکر شده ۰.۰۰۶ متر در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی ذرات به این شکل انتخاب گردید که ابتدا فاصله‌ی بین ذرات برابر ۰.۰۲ متر در نظر گرفته شد و مشاهده شد که نتیجه مدل حاضر با مدل آزمایشگاهی فاصله‌ی زیادی دارد. سپس این فاصله به ۰.۰۱ متر کاهش داده شد و نتایج کمی بهبود یافت. بعد از آن

فاصله ذرات به 0.008 متر کاهش یافت و سپس در 0.006 متر نتایج قابل قبول مشاهده گردید. در مرحله بعد فاصله ذرات به 0.004 متر کاهش داده شد، اما نتایج تغییر محسوسی نکرد و فقط زمان انجام محاسبات به بیش از ۴ برابر افزایش یافت و به این ترتیب فاصله ذرات 0.006 متر برای مدل حاضر انتخاب گردید. همچنین در محاسبات این مسئله، چگالی آب 1000 کیلوگرم بر متر مکعب، و لزجت سینماتیکی آب (۷)، 0.000001 متر مربع بر ثانیه و سرعت صوت 30 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که کاهش سرعت صوت باعث افت شدید ارتفاع موج شد و باعث گردید که ارتفاع موج در پای شیب کمتر از مقدار متناظر در داده های آزمایشگاهی شود. مدل سازی حالت های مختلف این مسئله با گام زمانی اولیه 0.00005 ثانیه صورت گرفته است. لازم به ذکر است که تعداد ذرات به کار رفته در این مدل در عمق آب 10.5 سانتیمتر برابر 12229 ذره و در 15.5 سانتیمتر برابر 17884 ذره و در 21 سانتیمتر برابر 24954 ذره و در 26 سانتیمتر برابر 31989 ذره می باشد. مدل سازی برای 21 حالت شامل 4 عمق 10.5 و 15.5 و 21 و 26 سانتیمتری و موج های با ارتفاع 2.2 تا 15.5 سانتیمتر، انجام شده است. شکل ۴-۱ نمایانگر مدل حاضر می باشد. در مدل آزمایشگاهی طول سطح صاف 10.5 متر بود که به دلیل اینکه تعداد ذرات خیلی بالا رفته و محاسبات غیر اقتصادی می شد، در این مدل طول سطح صاف 3 متر در نظر گرفته شد و محاسبات به گونه ای انجام شد که ارتفاع موج در ابتدای شیب در مدل با ارتفاع موج در آزمایشگاه برابر شود و از آن قسمت به بعد دقیقاً مشابه آزمایشگاه در نظر گرفته شد.



شکل ۴-۱: شرایط هندسی اولیه‌ی مسئله‌ی بالاروی موج منفرد در ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد.

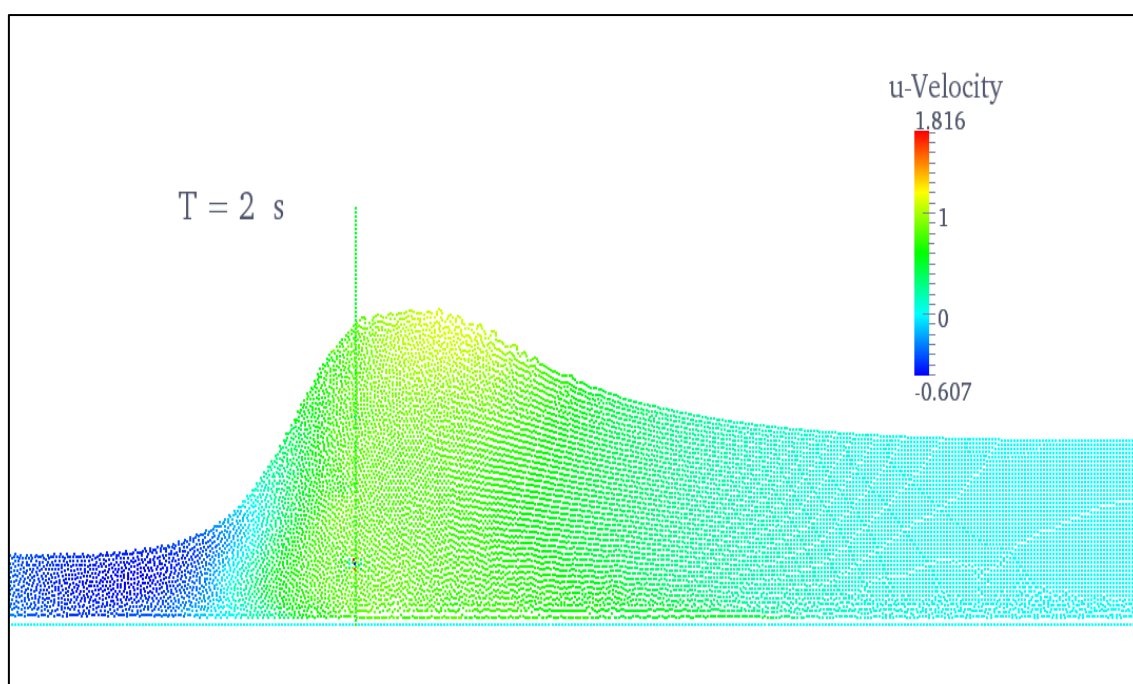
در این شکل، d عمق آب و H ارتفاع موج می باشد. باید خاطر نشان کرد که شرایط آزمایشگاه به گونه ای بود که موج ساز موج منفرد تولید می کرد. موج منفرد در SPHYSICS تعریف نشده است و باید به آن اضافه گردد. برای تولید موج منفرد باید معادلات آن را برای حرکت و سرعت به موج ساز داد تا به همان شکل تولید موج کند. اینکار در برنامه FORTRAN انجام شده است. وقتی معادلات به برنامه FORTRAN داده می شود، برنامه دو فایل خروجی می دهد که یکی حرکت موج ساز در هر گام زمانی و دیگری سرعت آن در هر گام زمانی می باشد. به این ترتیب موج تولید شده مشابه موج تولید شده در آزمایشگاه می گردد.

۴-۳-۳- نتایج مدل سازی مسئله

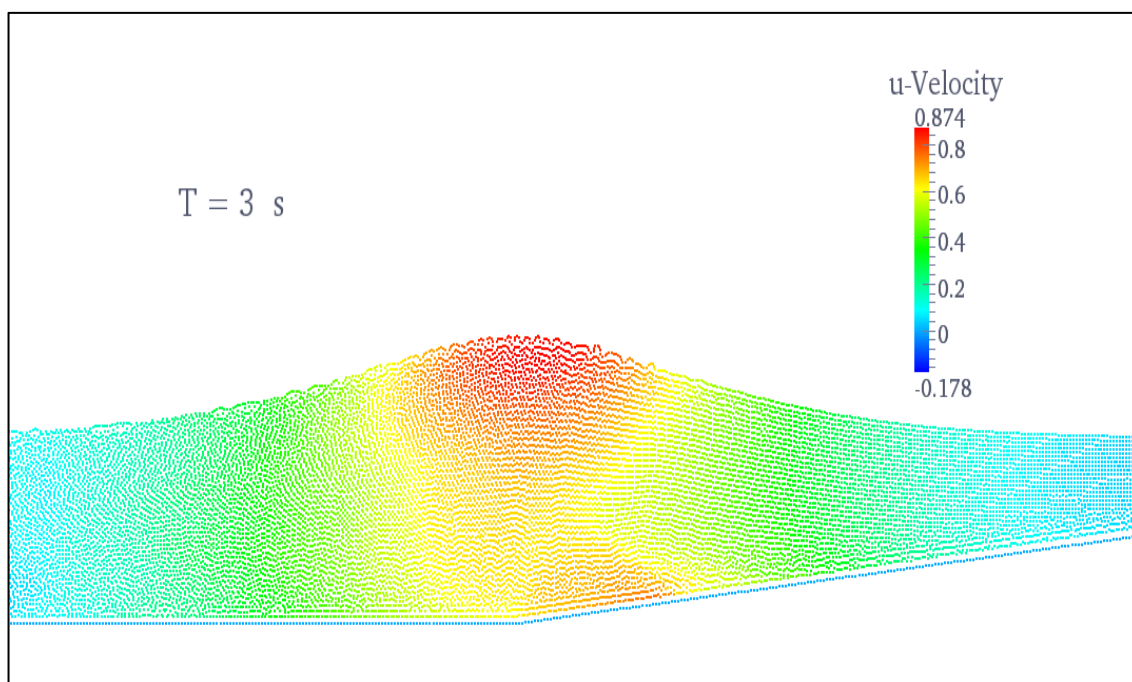
در شکل ۴-۲ نتایج مدل سازی مسئله برای حالتی که عمق آب ۲۶ سانتیمتر و ارتفاع موج ۱۵.۵ سانتیمتر است، به وسیله‌ی مدل حاضر شامل موقعیت و میدان سرعت ذرات در جهت افقی در زمان های مختلف نمایش داده شده است.



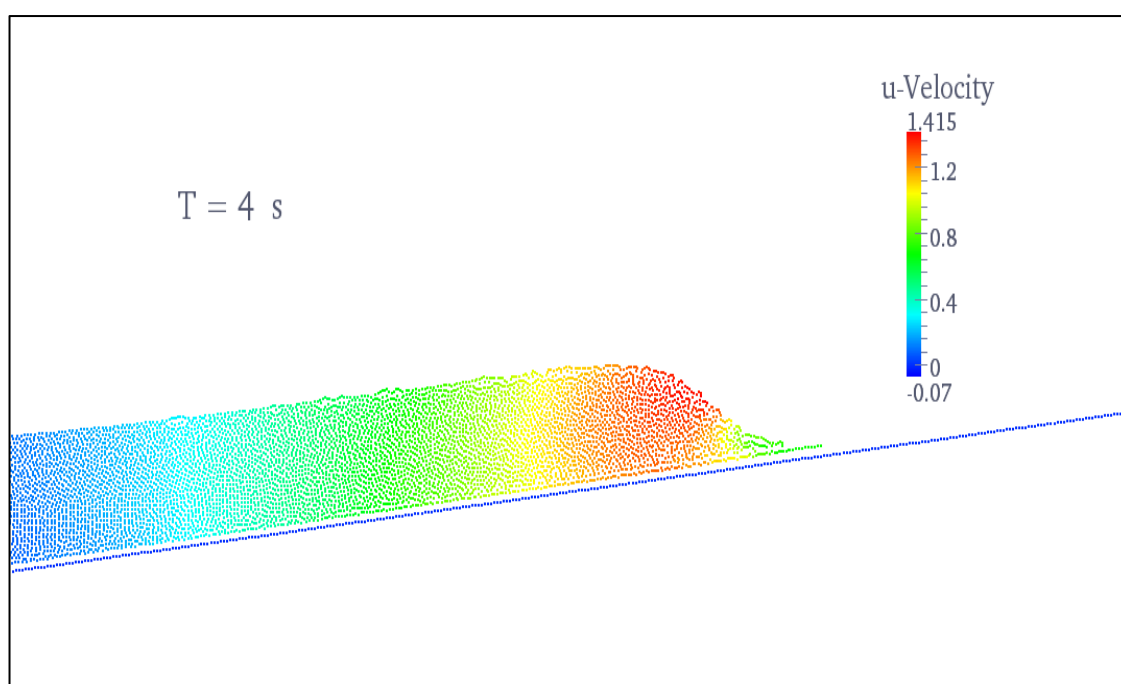
شکل ۴-۲ آ: موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی بالاروی موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=0$ ثانیه.



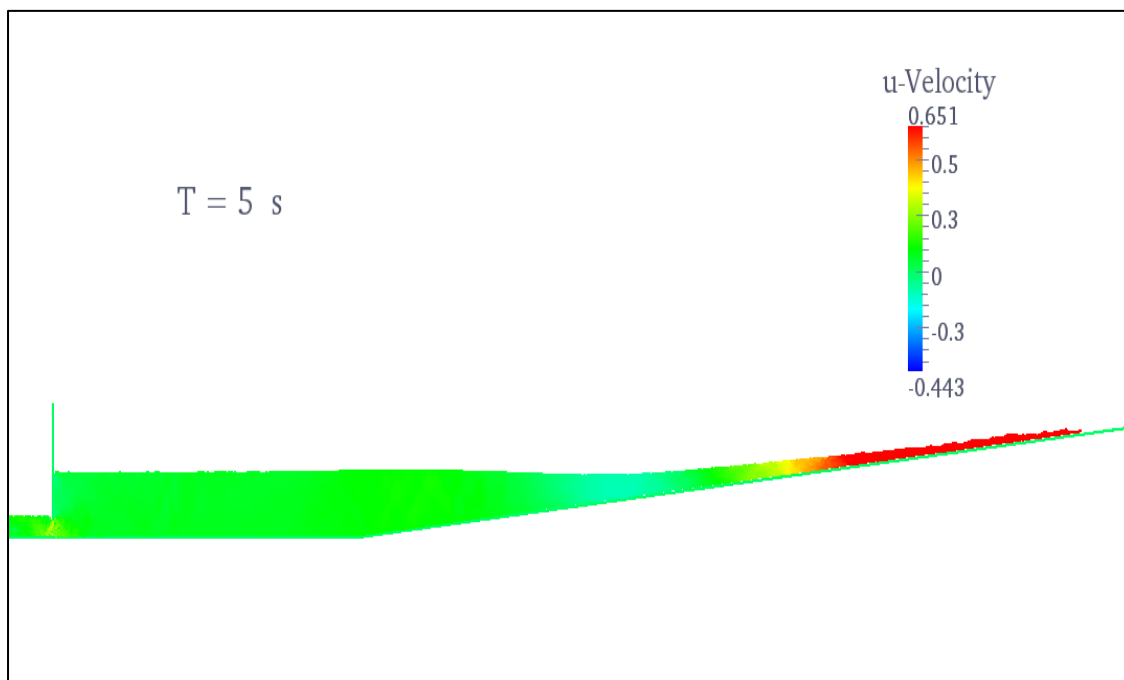
شکل ۴-۲ ب: موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی بالاروی موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=2$ ثانیه.



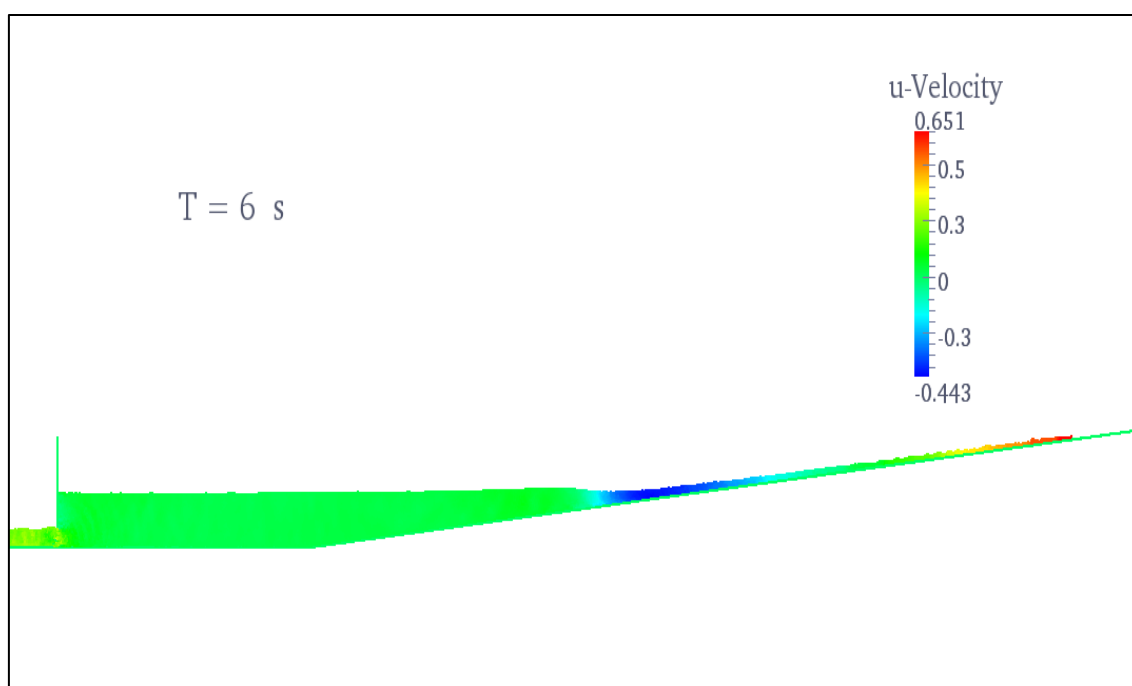
شکل ۴-۲ پ : موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی بالاروی موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=3$ ثانیه.



شکل ۴-۲ ت : موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی بالاروی موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=4$ ثانیه.



شکل ۲-۴ ث : موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی بالاروی موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=5$ ثانیه.



شکل ۲-۴ ج : موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی بالاروی موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=6$ ثانیه.

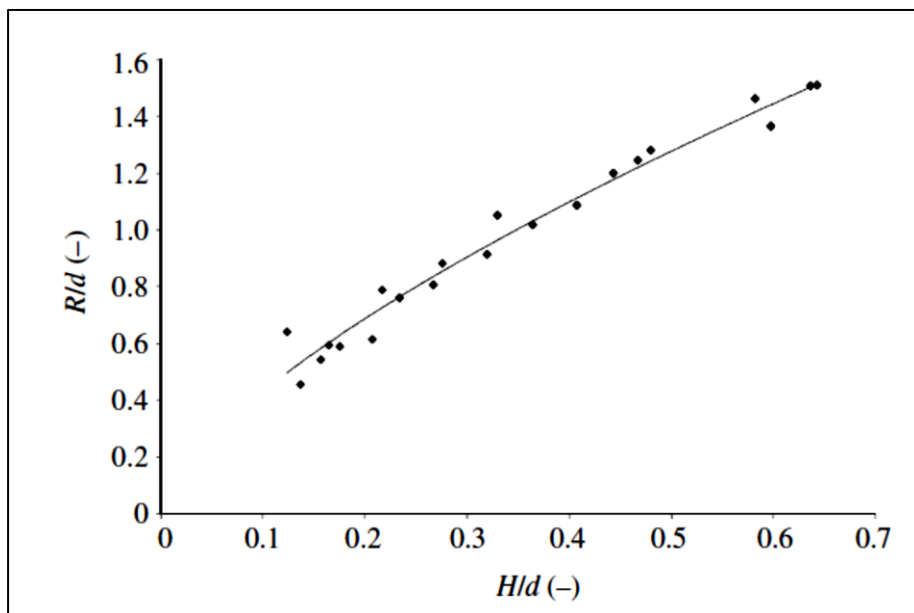
همان طور که از شکل ۴-۲ مشخص است در منطقه ای که موج قرار دارد بیشترین سرعت موجود است که کاملاً منطقی می باشد.

در جدول ۴-۱ مقادیر آزمایشگاهی R/d برای ارتفاع موج (H) و عمق آب (d) و ارتفاع موج به عمق آب (H/d) های مختلف نشان داده شده است. این مقادیر در مقاله آزمایشگاهی به صورت نمودار آورده شده بود و توسط نرم افزار Digitizer مقادیر آن به دست آمد.

جدول ۴-۱ : مقادیر آزمایشگاهی

ردیف	d (cm)	H (cm)	H/d	R/d
۱	۲۶	۳.۲	۰.۱۲۳	۰.۵۴۱
۲	۲۶	۴.۱	۰.۱۵۷	۰.۶۴۹
۳	۲۶	۶.۱	۰.۲۳۴	۰.۷۶۱
۴	۲۶	۸.۳	۰.۳۱۹	۰.۹۱۱
۵	۲۶	۱۰.۶	۰.۴۰۷	۱.۰۸۹
۶	۲۶	۱۵.۵	۰.۵۹۶	۱.۳۶۴
۷	۲۱	۲.۹	۰.۱۳۸	۰.۴۵۴
۸	۲۱	۳.۷	۰.۱۷۶	۰.۵۹۰
۹	۲۱	۵.۶	۰.۲۶۶	۰.۸۰۳
۱۰	۲۱	۷.۶	۰.۳۶۲	۱.۰۲۰
۱۱	۲۱	۹.۸	۰.۴۶۶	۱.۲۴۴
۱۲	۱۵.۵	۲.۵	۰.۱۶۱	۰.۵۹۴
۱۳	۱۵.۵	۳.۴	۰.۲۱۹	۰.۸۷۸
۱۴	۱۵.۵	۵.۱	۰.۳۲۹	۱.۰۵۱
۱۵	۱۵.۵	۷.۴	۰.۴۷۷	۱.۲۷۸
۱۶	۱۵.۵	۱۰	۰.۶۴۵	۱.۵۱۰
۱۷	۱۰.۵	۲.۲	۰.۲۰۹	۰.۶۱۵
۱۸	۱۰.۵	۲.۹	۰.۲۷۶	۰.۸۹۷
۱۹	۱۰.۵	۴.۶	۰.۴۳۸	۱.۱۹۷
۲۰	۱۰.۵	۶.۱	۰.۵۸۱	۱.۴۶۳
۲۱	۱۰.۵	۶.۷	۰.۶۳۸	۱.۵۰۴

در شکل ۳-۴ نتایج محاسبه شده نسبت میزان بالاروی برای عمق‌ها و امواج با ارتفاع‌های مختلف در ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد که در جدول ۱-۴ نمایش داده شد، به وسیله‌ی نتایج آزمایشگاهی [۵۵] نشان داده شده است. در این شکل R میزان بالاروی موج نسبت به سطح اولیه آب می باشد.



شکل ۳-۴ : نتایج آزمایشگاهی بالاروی موج منفرد برای ۲۱ حالت با عمق و ارتفاع‌های مختلف. $R^2 = 0.96$

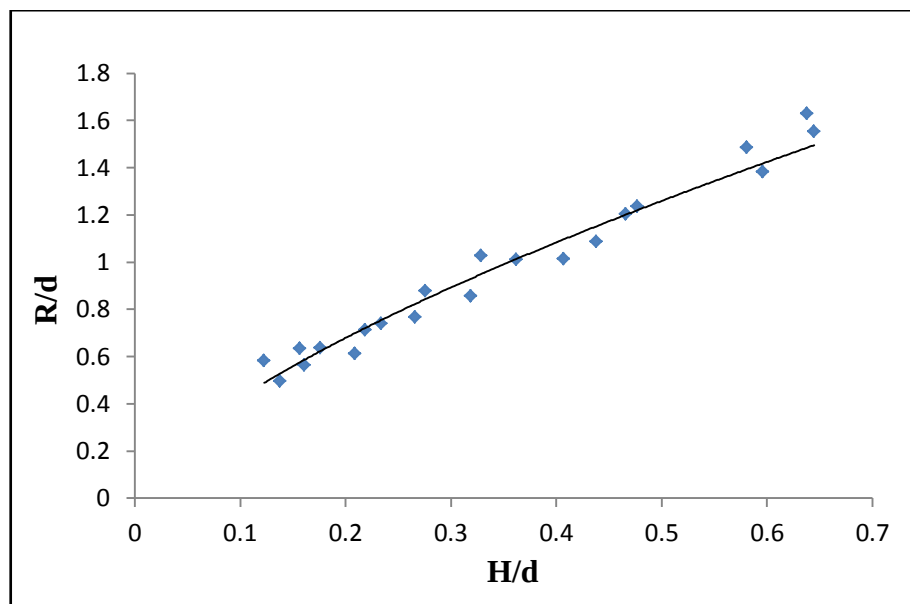
در جدول ۲-۴ مقادیر R/d مدل حاضر برای ارتفاع موج (H) و عمق آب (d) و ارتفاع موج به عمق آب (H/d) های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۲-۴ : مقادیر مدل حاضر

ردیف	d (cm)	H (cm)	H/d	R/d
۱	۲۶	۳.۲	۰.۱۲۳	۰.۵۸
۲	۲۶	۴.۱	۰.۱۵۷	۰.۶۳۳
۳	۲۶	۶.۱	۰.۲۳۴	۰.۷۴
۴	۲۶	۸.۳	۰.۳۱۹	۰.۸۵۴
۵	۲۶	۱۰.۶	۰.۴۰۷	۱.۰۱۴
۶	۲۶	۱۵.۵	۰.۵۹۶	۱.۳۸۱
۷	۲۱	۲.۹	۰.۱۳۸	۰.۴۹۵
۸	۲۱	۳.۷	۰.۱۷۶	۰.۶۳۶
۹	۲۱	۵.۶	۰.۲۶۶	۰.۷۶۵

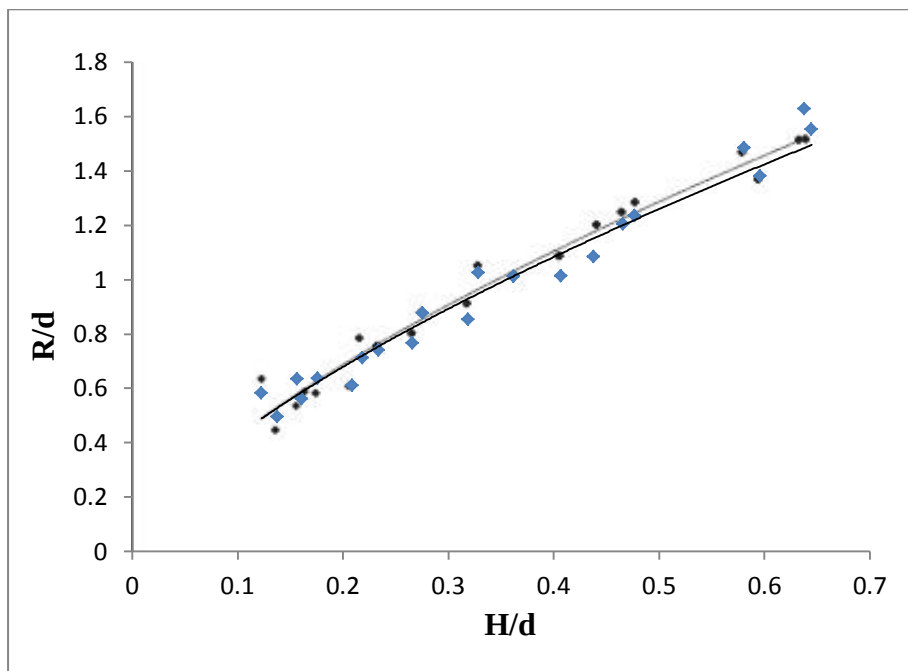
۱۰	۲۱	۷.۶	۰.۳۶۲	۱.۰۱
۱۱	۲۱	۹.۸	۰.۴۶۶	۱.۲۰۳
۱۲	۱۵.۵	۲.۵	۰.۱۶۱	۰.۵۶۱
۱۳	۱۵.۵	۳.۴	۰.۲۱۹	۰.۷۱۲
۱۴	۱۵.۵	۵.۱	۰.۳۲۹	۱.۰۲۵
۱۵	۱۵.۵	۷.۴	۰.۴۷۷	۱.۲۳۵
۱۶	۱۵.۵	۱۰	۰.۶۴۵	۱.۵۵۲
۱۷	۱۰.۵	۲.۲	۰.۲۰۹	۰.۶۱
۱۸	۱۰.۵	۲.۹	۰.۲۷۶	۰.۸۷۶
۱۹	۱۰.۵	۴.۶	۰.۴۳۸	۱.۰۸۵
۲۰	۱۰.۵	۶.۱	۰.۵۸۱	۱.۴۸۵
۲۱	۱۰.۵	۶.۷	۰.۶۳۸	۱.۶۲۸

در شکل ۴-۴ نتایج محاسبه شده نسبت میزان بالاروی برای عمق‌ها و امواج با ارتفاع‌های مختلف در ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد که در جدول ۲-۴ نمایش داده شد، به وسیله‌ی نتایج مدل حاضر نشان داده شده است.



شکل ۴-۴: نتایج مدل حاضر برای بالاروی موج منفرد برای ۲۱ حالت با عمق و ارتفاع‌های مختلف. $R^2 = 0.9591$

در شکل ۵-۴ نتایج آزمایشگاهی و مدل حاضر برای ۲۱ مورد مختلف روی یک نمودار آورده شده که تطابق بسیار خوبی بین این دو مشاهده می‌شود. دایره‌ها مربوط به نتایج آزمایشگاهی و لوزی‌ها نتایج مدل حاضر می‌باشند.



شکل ۵-۴: مقایسه‌ی نتایج بالاروی موج از ساحل با مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی.

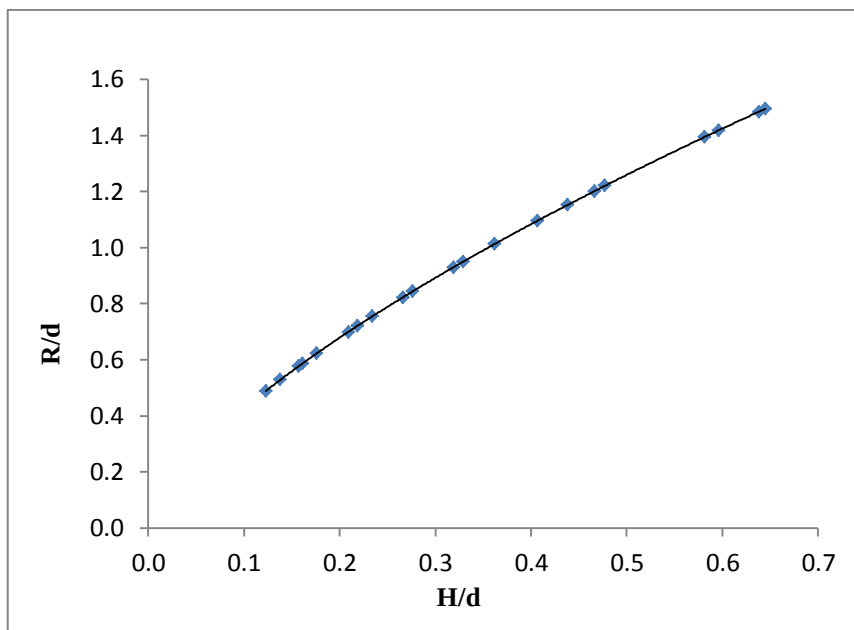
در نهایت با قرار دادن داده‌های نسبت بالاروی موج منفرد از ساحل به عمق آب در ساحل‌های با شیب ۱۰.۷۴ درصد و عمق و ارتفاع موج‌های مختلف، بر حسب نسبت ارتفاع موج به عمق آب در یک نمودار، روابط ذیل برای میزان بالاروی موج از ساحل ارائه می‌گردد:

$$R/d = 2.0111(H/d)^{0.6749} \quad (1-4)$$

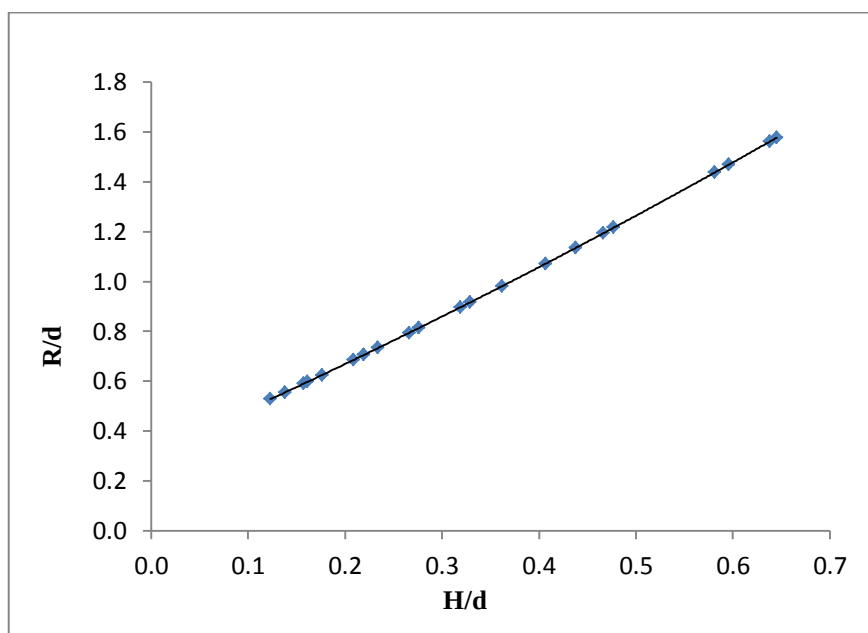
$$R/d = 0.3942(H/d)^2 + 1.7071(H/d) + 0.312 \quad (2-4)$$

رابطه ۱-۴ دارای ضریب همبستگی $R^2 = 1$ ، و رابطه ۲-۴ دارای ضریب همبستگی $R^2 = 1$ می‌باشد. لازم به ذکر است که رابطه ۱-۴ جواب‌های دقیقتری را ارائه می‌دهد.

شکل های ۶-۴ و ۷-۴ نتایج روابط ۱-۴ و ۲-۴ را به صورت نمودار نشان می دهد.



شکل ۶-۴: نمودار رابطه $R/d = ۲.۰۱۱۱(H/d)^{۰.۶۷۴۹}$



شکل ۷-۴: نمودار رابطه $R/d = ۰.۳۹۴۲(H/d)^۲ + ۱.۷۰۷۱(H/d) + ۰.۳۱۲$

در جدول ۳-۴ مقدار خطای محاسبه شده برای نتایج مدل حاضر و روابط ارائه شده نسبت به نتایج آزمایشگاهی آورده شده است. نتایج نشان می دهد که مقدار خطا قابل قبول می باشد.

جدول ۳-۴ : مقادیر خطای نتایج مدل حاضر و روابط ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی.

ردیف	H/d	R/d آزمایشگاهی	R/d مدل حاضر	رابطه ۱-۴	رابطه ۲-۴	خطای مدل حاضر	خطای رابطه ۱-۴	خطای رابطه ۲-۴
۱	۰.۱۲۳	۰.۵۴۱	۰.۵۸	۰.۴۸۹	۰.۵۲۸	۷.۲۰۹	۹.۶۳۲	۲.۴۱۵
۲	۰.۱۵۷	۰.۶۳۹	۰.۶۳۳	۰.۵۷۶	۰.۵۹۰	۰.۹۳۹	۹.۷۹۲	۷.۷۱۰
۳	۰.۲۳۴	۰.۷۶۱	۰.۷۴	۰.۷۵۵	۰.۷۳۳	۲.۷۶۰	۰.۸۴۱	۳.۶۷۳
۴	۰.۳۱۹	۰.۹۱۱	۰.۸۵۴	۰.۹۳۰	۰.۸۹۷	۶.۲۵۷	۲.۱۰۰	۱.۵۷۲
۵	۰.۴۰۷	۱.۰۸۹	۱.۰۱۴	۱.۰۹۶	۱.۰۷۲	۶.۸۸۷	۰.۶۷۵	۱.۵۵۳
۶	۰.۵۹۶	۱.۳۶۴	۱.۳۸۱	۱.۴۱۸	۱.۴۶۹	۱.۲۴۶	۳.۹۷۶	۷.۷۳۲
۷	۰.۱۳۸	۰.۴۵۴	۰.۴۹۵	۰.۵۲۸	۰.۵۵۵	۹.۰۳۱	۱۶.۳۸۱	۲۲.۲۶۶
۸	۰.۱۷۶	۰.۵۹۰	۰.۶۳۶	۰.۶۲۳	۰.۶۲۵	۷.۷۹۷	۵.۵۳۱	۵.۸۷۵
۹	۰.۲۶۶	۰.۸۰۳	۰.۷۶۵	۰.۸۲۳	۰.۷۹۴	۴.۷۳۲	۲.۴۶۴	۱.۱۲۳
۱۰	۰.۳۶۲	۱.۰۲۰	۱.۰۱	۱.۰۱۳	۰.۹۸۲	۰.۹۸۰	۰.۶۸۷	۳.۷۶۲
۱۱	۰.۴۶۶	۱.۲۴۴	۱.۲۰۳	۱.۲۰۱	۱.۱۹۳	۳.۲۹۶	۳.۴۳۸	۴.۰۹۱
۱۲	۰.۱۶۱	۰.۵۹۴	۰.۵۶۱	۰.۵۸۶	۰.۵۹۷	۵.۵۵۶	۱.۲۹۶	۰.۵۱۵
۱۳	۰.۲۱۹	۰.۷۸۷	۰.۷۱۲	۰.۷۲۲	۰.۷۰۵	۹.۵۳۰	۸.۳۰۹	۱۰.۴۵۰
۱۴	۰.۳۲۹	۱.۰۵۱	۱.۰۲۵	۰.۹۵۰	۰.۹۱۶	۲.۴۷۴	۹.۶۳۸	۱۲.۸۱۶
۱۵	۰.۴۷۷	۱.۲۷۸	۱.۲۳۵	۱.۲۲۰	۱.۲۱۶	۳.۳۶۵	۴.۵۱۵	۴.۸۵۳
۱۶	۰.۶۴۵	۱.۵۱۰	۱.۵۵۲	۱.۴۹۶	۱.۵۷۷	۲.۷۸۱	۰.۹۳۳	۴.۴۴۲
۱۷	۰.۲۰۹	۰.۶۱۵	۰.۶۱	۰.۶۹۹	۰.۶۸۶	۰.۸۱۳	۱۳.۶۹۱	۱۱.۵۴۵
۱۸	۰.۲۷۶	۰.۸۷۹	۰.۸۷۶	۰.۸۴۴	۰.۸۱۳	۰.۳۴۱	۴.۰۳۵	۷.۴۸۷
۱۹	۰.۴۳۸	۱.۱۹۷	۱.۰۸۵	۱.۱۵۲	۱.۱۳۵	۹.۳۵۷	۳.۷۵۷	۵.۱۵۲
۲۰	۰.۵۸۱	۱.۴۶۳	۱.۴۸۵	۱.۳۹۴	۱.۴۳۷	۱.۵۰۴	۴.۷۱۳	۱.۷۸۵
۲۱	۰.۶۳۸	۱.۵۰۴	۱.۶۲۸	۱.۴۸۵	۱.۵۶۲	۸.۲۴۵	۱.۲۶۸	۳.۸۲۹
میانگین خطا						۴.۵۲۸	۵.۱۲۶	۵.۹۳۵

۴-۴- مسئله‌ی روگذری موج

۴-۴-۱- توصیف مسئله

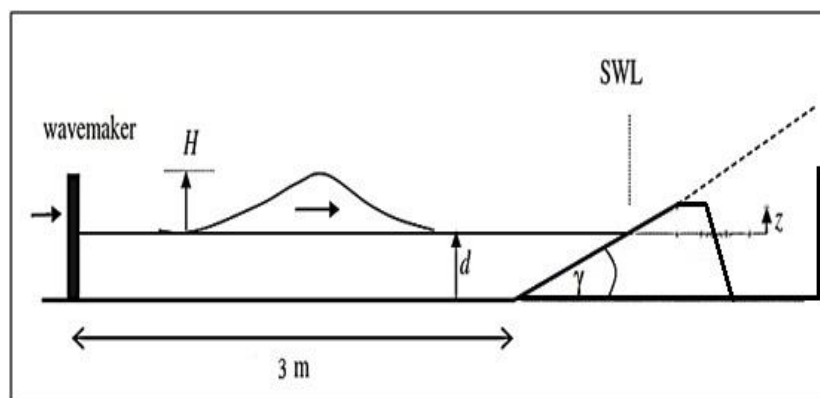
پدیده‌ی روگذری امواج به روش‌های تجربی و آزمایشگاهی و عددی مورد تخمین قرار گرفته است. لیکن استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH) برای مدلسازی و تخمین روگذری موج دستاوردی جدید می‌باشد که امکان تخمین دقیق تراز سطح آب و هیدرولیک آن را فراهم می‌کند.

فرایند روگذری موج شامل برخورد موج به سازه، بالاروی و نهایتاً سرریز جریان آب از سازه می‌باشد. پدیده‌ی روگذری امواج از سازه‌های ساحلی و موج‌شکن‌ها همواره به عنوان موردی که در طراحی تراز این سازه‌ها باید مدنظر قرار گیرد مطرح بوده است. به دلیل وابستگی میزان روگذری به پارامترهای مختلف و وجود عدم قطعیت در ماهیت این پدیده، تخمین دقیق این پارامترها در هنگام طراحی میسر نمی‌باشد. با این وجود تلاش‌های زیادی در جهت مدلسازی این پدیده و تخمین دقیق‌تر آن انجام شده است. این تحقیقات عمدتاً به دو دسته‌ی مدلسازی آزمایشگاهی و مدلسازی عددی قابل دسته‌بندی است. روگذری امواج از سازه‌های ساحلی یکی از مهم‌ترین رویدادهای هیدرولیکی است که در طراحی این نوع سازه‌ها در نظر گرفته می‌شود. پدیده روگذری امواج به ویژه در خصوص سازه‌های حفاظت از شهرها و تأسیسات، نظیر دیواره‌های ساحلی و دایک‌ها اهمیت زیادی دارد، به دلیل اینکه که روگذری از این سازه‌ها می‌تواند به تخریب سازه و وارد شدن تلفات و خسارات مالی بینجامد. وجود عدم قطعیت در پیش‌بینی تراز طراحی آب و همچنین در تعیین امواج طراحی و همچنین هزینه بر بودن احداث سازه‌های بلند، قبول وقوع درصدی روگذری را غیرقابل اجتناب می‌سازد. به همین دلیل سعی بر این است که پدیده‌ی روگذری موج از سازه‌های ساحلی به روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده مدلسازی گردد.

در این بخش، روگذری موج از شیب ۱۰.۷۴ درصد با عمق آب ۲۶ سانتیمتر و ارتفاع موج ۱۵.۵ سانتیمتر و فاصله عمق آب تا بالای شیب ۹.۱ سانتیمتر مدل سازی شده است. پس از صحت سنجی نتایج به دست آمده از مدل، روگذری موج در حالت های دیگر بررسی گردید.

۴-۴-۲- پارامترهای مدل سازی مسئله

در مدل سازی مسئله ی مطرح شده، فاصله ی اولیه ی بین ذرات مانند بخش ۴-۳-۲ در کلیه ی حالت های ذکر شده ۰.۰۰۶ متر در نظر گرفته شده است. همچنین در محاسبات این مسئله، چگالی آب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، و لزجت سینماتیکی آب (۱۷)، ۰.۰۰۰۰۰۱ مترمربع بر ثانیه و سرعت صوت ۳۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده اند. مدل سازی های حالت های مختلف این مسئله با گام زمانی اولیه ۰.۰۰۰۰۵ ثانیه صورت گرفته است. لازم به ذکر است که تعداد ذرات به کاررفته در این مدل در عمق آب ۲۱ سانتیمتر برابر ۲۵۵۰۹ ذره و در ۲۶ سانتیمتر برابر ۳۲۵۲۵ ذره می باشد. مدل سازی برای ۱۷ حالت مختلف شامل ۲ عمق ۲۱ و ۲۶ سانتیمتری و موج های با ارتفاع ۲.۹ تا ۱۵.۵ سانتیمتر و فاصله عمق آب تا بالای شیب ۶.۲ و ۹.۱ و ۱۴.۵ و ۱۷.۵ سانتیمتر، انجام شده است. در مدل آزمایشگاهی طول سطح صاف ۱۰.۵ متر بود که به دلیل اینکه تعداد ذرات خیلی بالا رفته و محاسبات غیراقتصادی می شد، در این مدل طول سطح صاف ۳ متر در نظر گرفته شد و محاسبات به گونه ای انجام شد که ارتفاع موج در ابتدای شیب در مدل با ارتفاع موج در آزمایشگاه برابر شود. برای ذخیره شدن حجم روگذری در مدل آزمایشگاهی یک تانک در نظر گرفته شده که در مدل حاضر تانک برداشته شده تا ذرات کاملاً روگذری کرده و ذراتی که رد شدند محاسبه شوند. بقیه قسمت ها مانند آزمایشگاه در نظر گرفته شد.



شکل ۴-۸: شرایط هندسی اولیه‌ی مسئله‌ی روگذری موج منفرد در ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد.

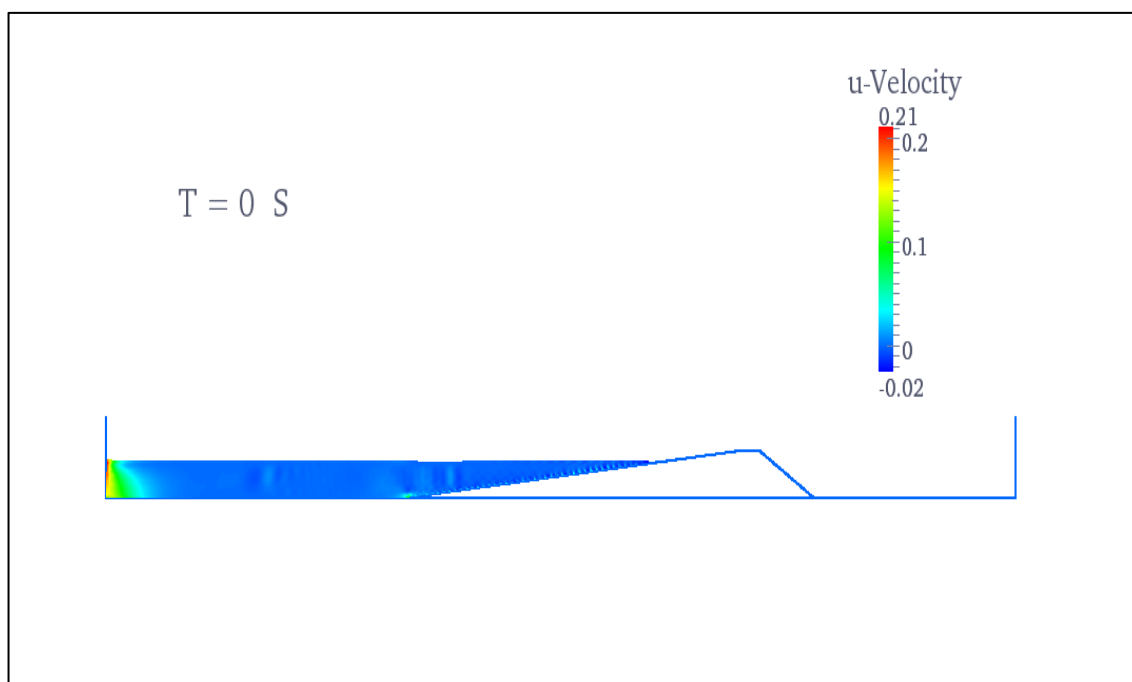
در این شکل، d عمق آب و H ارتفاع موج و Z فاصله‌ی بالای عمق آب تا بالای شیب می‌باشد.

۴-۴-۳- نتایج مدل‌سازی مسئله

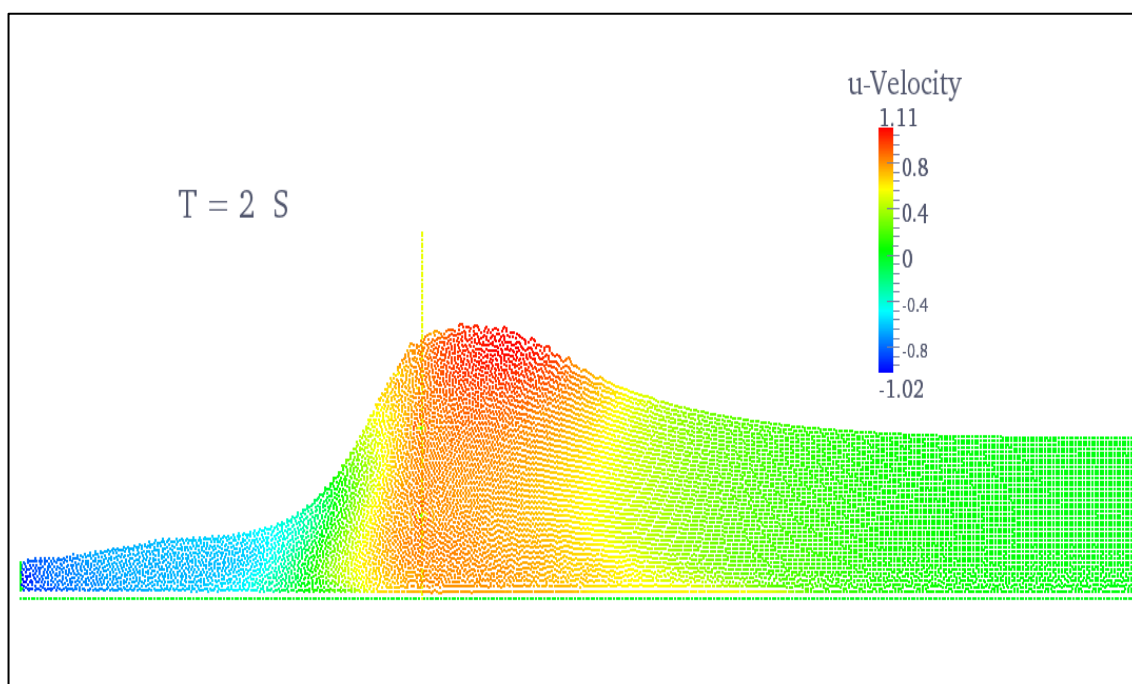
در شکل ۴-۹ نتایج مدل‌سازی مسئله برای حالتی که عمق آب ۲۶ سانتیمتر و ارتفاع موج ۱۵.۵ سانتیمتر و فاصله عمق آب تا بالای شیب ۹.۱ سانتیمتر است، به وسیله‌ی مدل حاضر شامل موقعیت و میدان سرعت ذرات در جهت افقی در زمان‌های مختلف نمایش داده شده است. همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، تعداد کل ذراتی که در شبیه‌سازی به کار برده شده‌اند حدود ۳۲۵۰۰ ذره و گام زمانی ثابت ۰.۰۰۰۰۵ ثانیه برای آن در نظر گرفته شده است. کل زمان محاسباتی در نظر گرفته شده برای این شبیه‌سازی در حدود ۱۰ ثانیه می‌باشد. در جدول ۴-۴ حالت‌های مختلف مدل‌سازی آورده شده است. در این جدول، عمق آب (d)، ارتفاع موج (H) و فاصله‌ی بالای عمق آب تا بالای شیب (Z) می‌باشد.

جدول ۴-۴ : حالت‌های مختلف روگذری موج

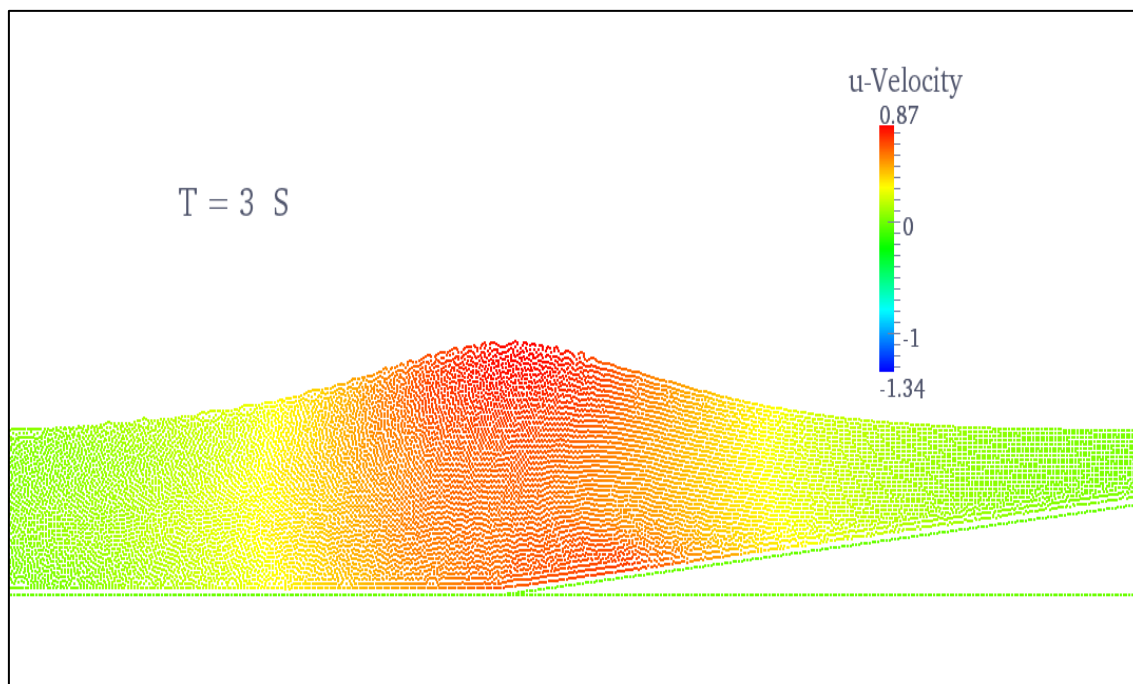
ردیف	d (cm)	H (cm)	Z (cm)
۱	۲۱	۲.۹	۶.۲
۲	۲۱	۳.۷	۶.۲
۳	۲۱	۵.۶	۶.۲
۴	۲۱	۷.۶	۶.۲
۵	۲۱	۹.۸	۶.۲
۶	۲۱	۵.۶	۱۴.۶
۷	۲۱	۷.۶	۱۴.۶
۸	۲۱	۹.۸	۱۴.۶
۹	۲۶	۴.۱	۹.۱
۱۰	۲۶	۶.۱	۹.۱
۱۱	۲۶	۸.۳	۹.۱
۱۲	۲۶	۱۰.۶	۹.۱
۱۳	۲۶	۱۵.۵	۹.۱
۱۴	۲۶	۶.۱	۱۷.۵
۱۵	۲۶	۸.۳	۱۷.۵
۱۶	۲۶	۱۰.۶	۱۷.۵
۱۷	۲۶	۱۵.۵	۱۷.۵



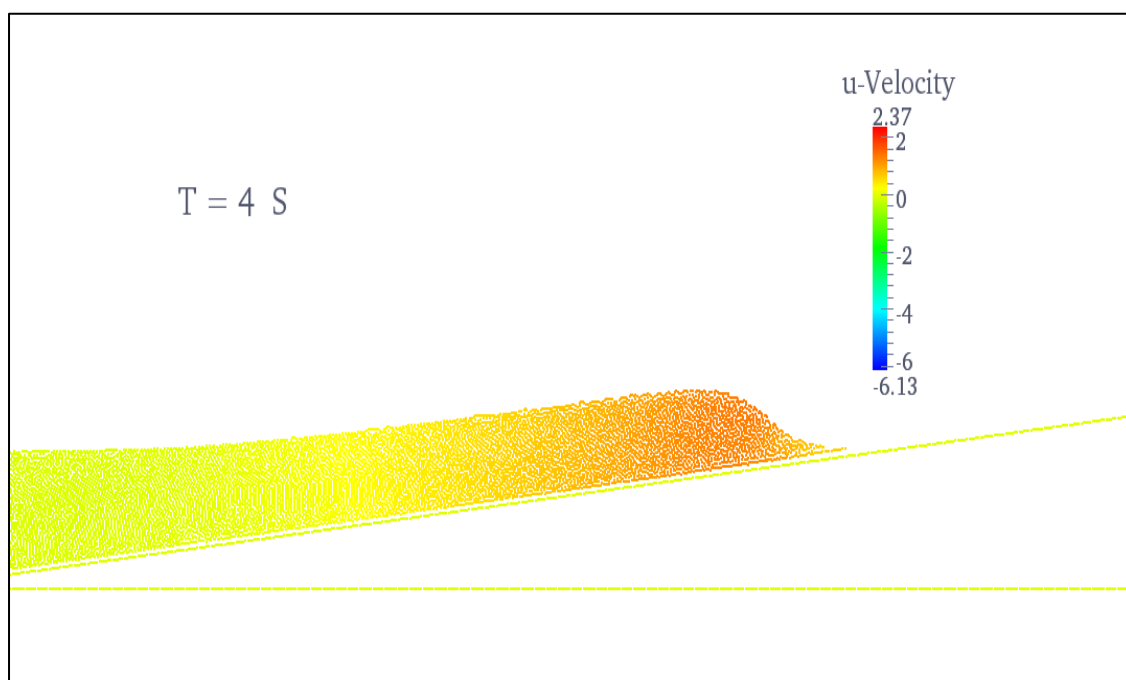
شکل ۹-۴ آ: موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی روگذری موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=0$ ثانیه.



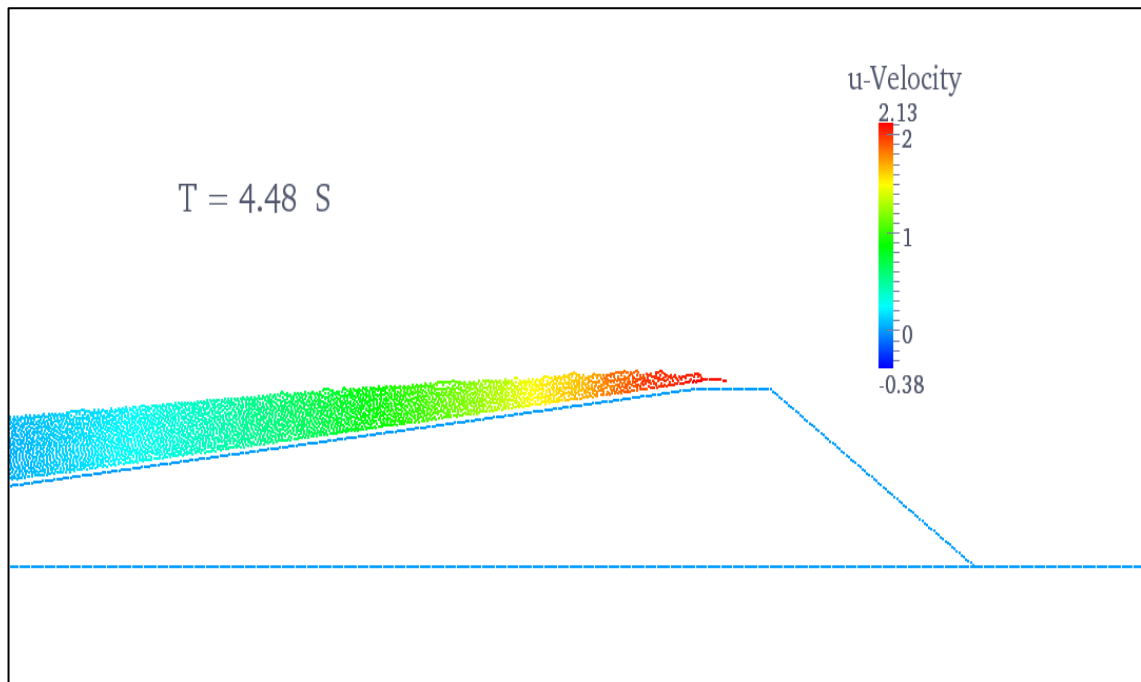
شکل ۹-۴ ب: موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی روگذری موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=2$ ثانیه.



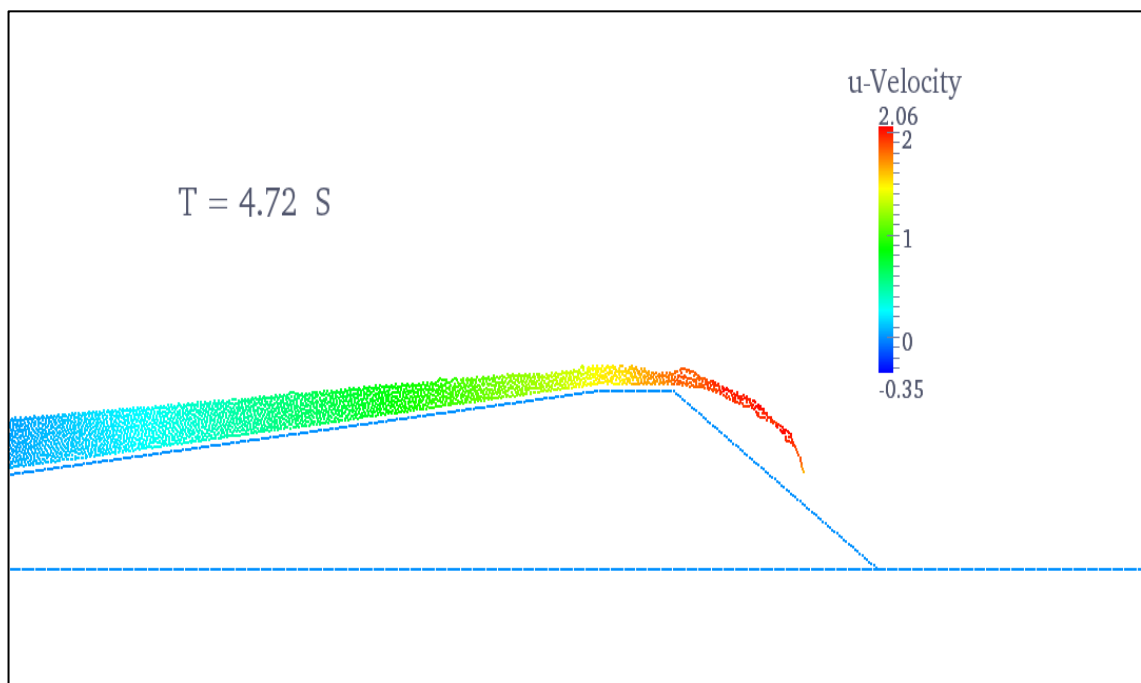
شکل ۹-۴ پ : موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی روگذری موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=3$ ثانیه.



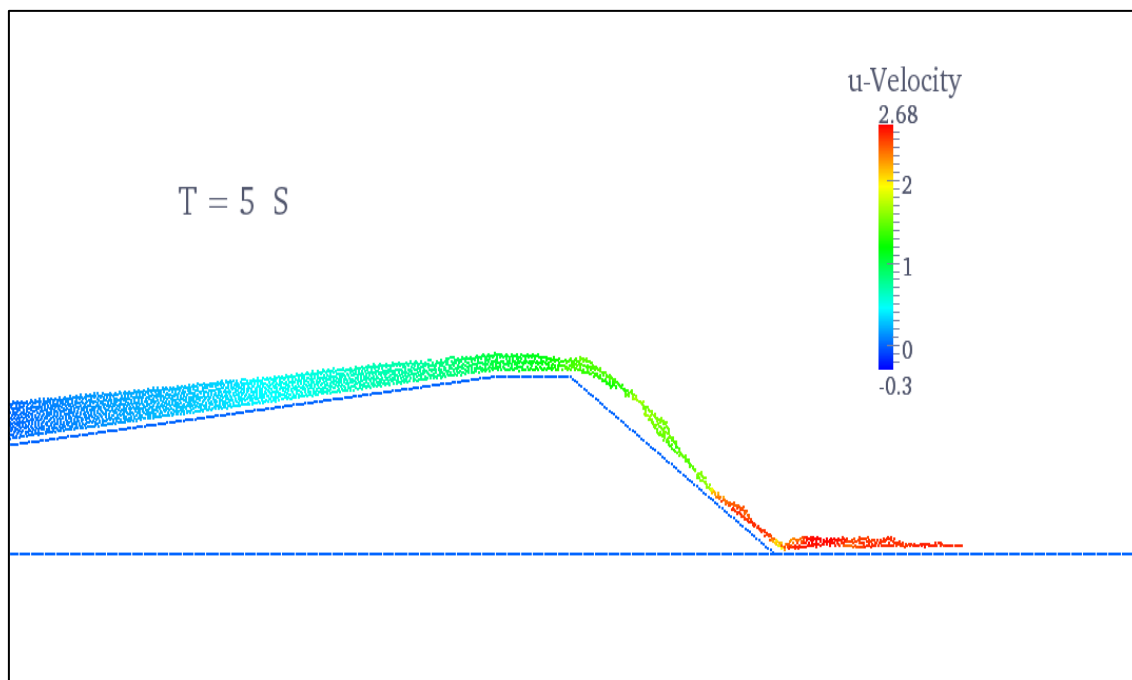
شکل ۹-۴ ت : موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی روگذری موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=4$ ثانیه.



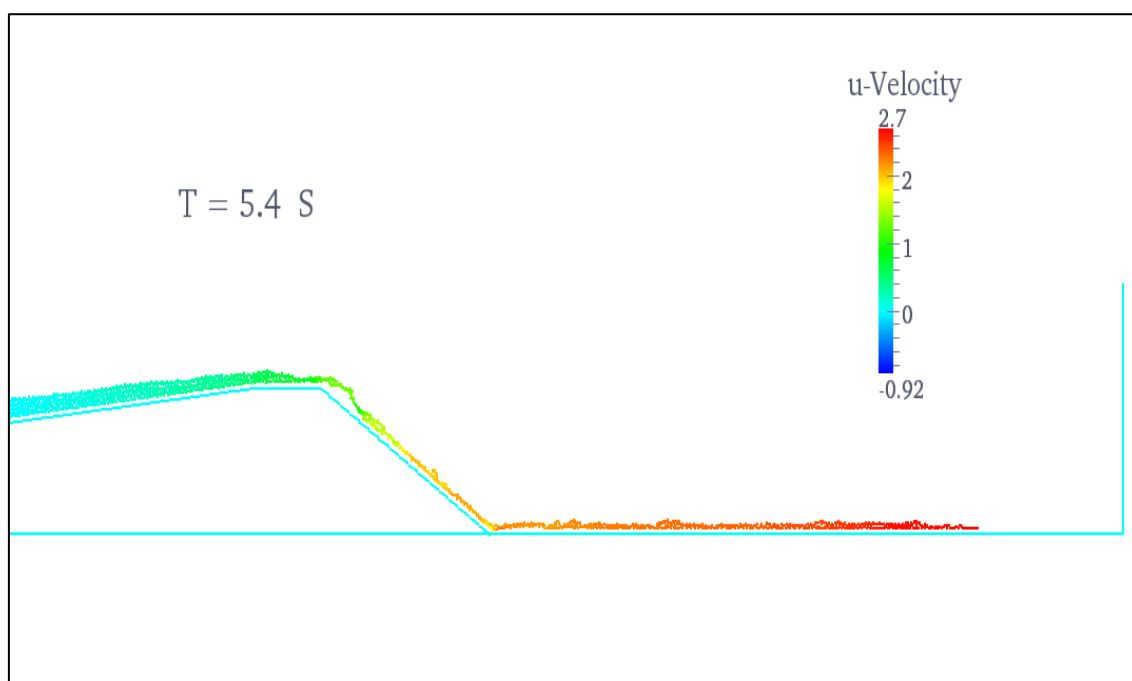
شکل ۴-۹ ث: موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی روگذری موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=4.48$ ثانیه.



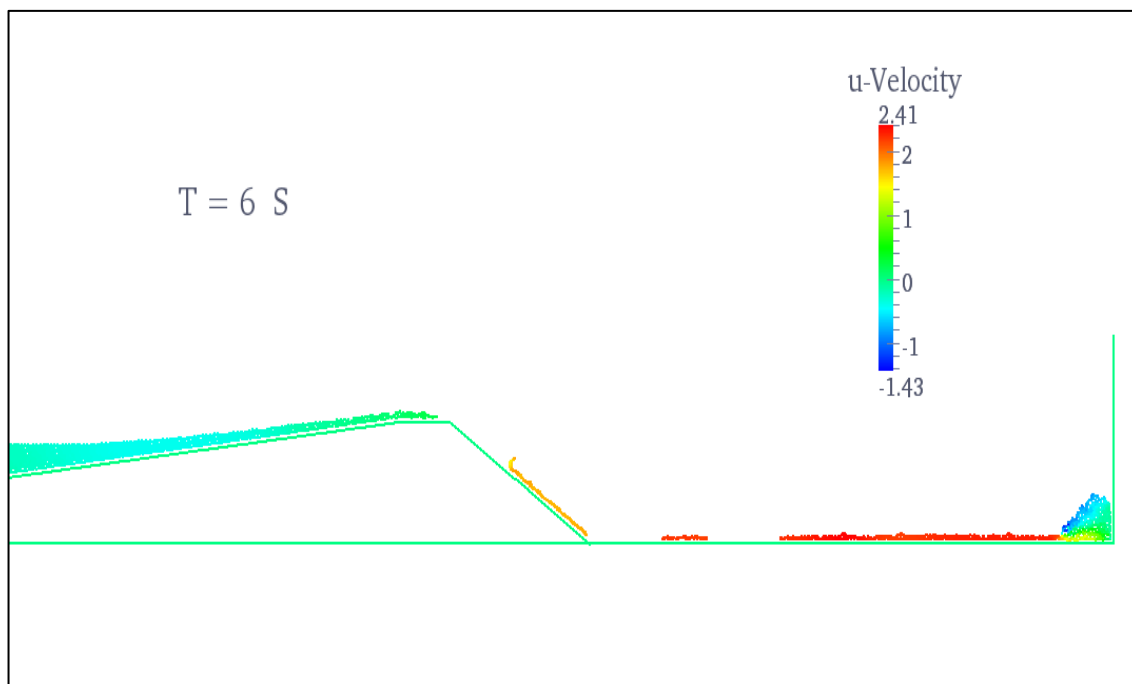
شکل ۴-۹ ج: موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی روگذری موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=4.72$ ثانیه.



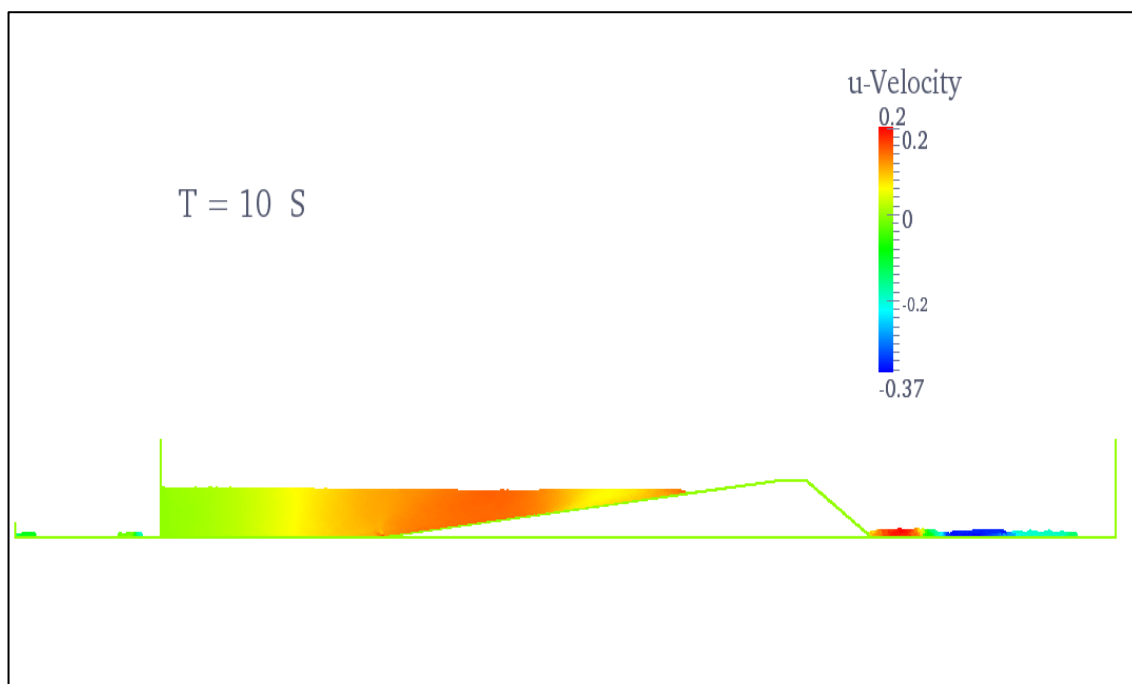
شکل ۹-۴ چ : موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی روگذری موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=5$ ثانیه.



شکل ۹-۴ ح : موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی روگذری موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=5.4$ ثانیه.



شکل ۹-۴ خ : موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی روگذری موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=6$ ثانیه.



شکل ۹-۴ د : موقعیت ذرات و میدان سرعت در جهت افقی مسئله‌ی روگذری موج منفرد از ساحل با شیب ۱۰.۷۴ درصد و در زمان $T=10$ ثانیه.

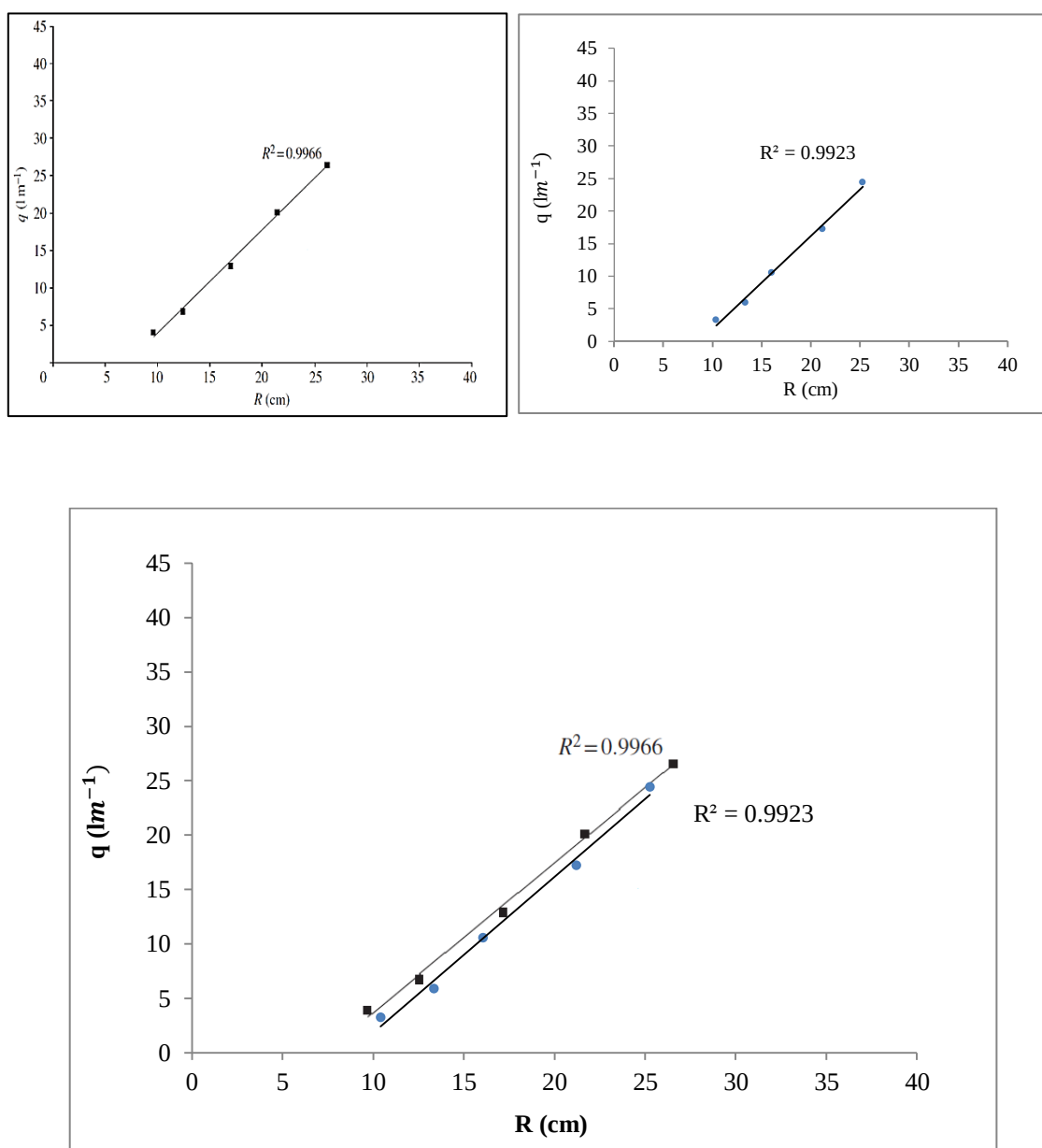
همان طور که در جدول ۴-۵ مشاهده می‌گردد، نتایج مدل حاضر به نتایج آزمایشگاهی تطابق نسبتاً خوبی دارد. لازم به ذکر است که این مقادیر در مقاله آزمایشگاهی به صورت نمودار آورده شده بود و توسط نرم‌افزار Digitizer مقادیر آن به دست آمد.

جدول ۴-۵: نتایج آزمایشگاهی و مدل حاضر

ردیف	d (cm)	H (cm)	Z (cm)	نتایج آزمایشگاهی q(L/m)	نتایج مدل حاضر q(L/m)
۱	۲۱	۲.۹	۶.۲	۳.۷۵۴	۳.۲۷۶
۲	۲۱	۳.۷	۶.۲	۶.۶۷۳	۵.۹۰۴
۳	۲۱	۵.۶	۶.۲	۱۲.۷۸۲	۱۰.۵۴۸
۴	۲۱	۷.۶	۶.۲	۱۹.۸۳۶	۱۷.۲۰۸
۵	۲۱	۹.۸	۶.۲	۲۶.۳۶۱	۲۴.۴۰۸
۶	۲۱	۵.۶	۱۴.۶	۳۰.۲۳	۲۰.۱۹۶
۷	۲۱	۷.۶	۱۴.۶	۸.۱۹۶	۶.۹۱۲
۸	۲۱	۹.۸	۱۴.۶	۱۳.۳۳۲	۱۰.۹۴۴
۹	۲۶	۴.۱	۹.۱	۴.۴۶۲	۳.۸۸۸
۱۰	۲۶	۶.۱	۹.۱	۱۱.۸۹۶	۱۲.۶۷۲
۱۱	۲۶	۸.۳	۹.۱	۱۹.۹۲۳	۱۸.۵۰۴
۱۲	۲۶	۱۰.۶	۹.۱	۲۷.۸۰۲	۲۵.۹۹۲
۱۳	۲۶	۱۵.۵	۹.۱	۴۱.۳۰۳	۳۹.۹۲۴
۱۴	۲۶	۶.۱	۱۷.۵	۱.۴۴۸	۱.۴۷۶
۱۵	۲۶	۸.۳	۱۷.۵	۸.۱۹۶	۶.۵۸۸
۱۶	۲۶	۱۰.۶	۱۷.۵	۱۴.۳۴۷	۱۲.۰۹۶
۱۷	۲۶	۱۵.۵	۱۷.۵	۲۶.۶۴۸	۲۴.۰۸۴

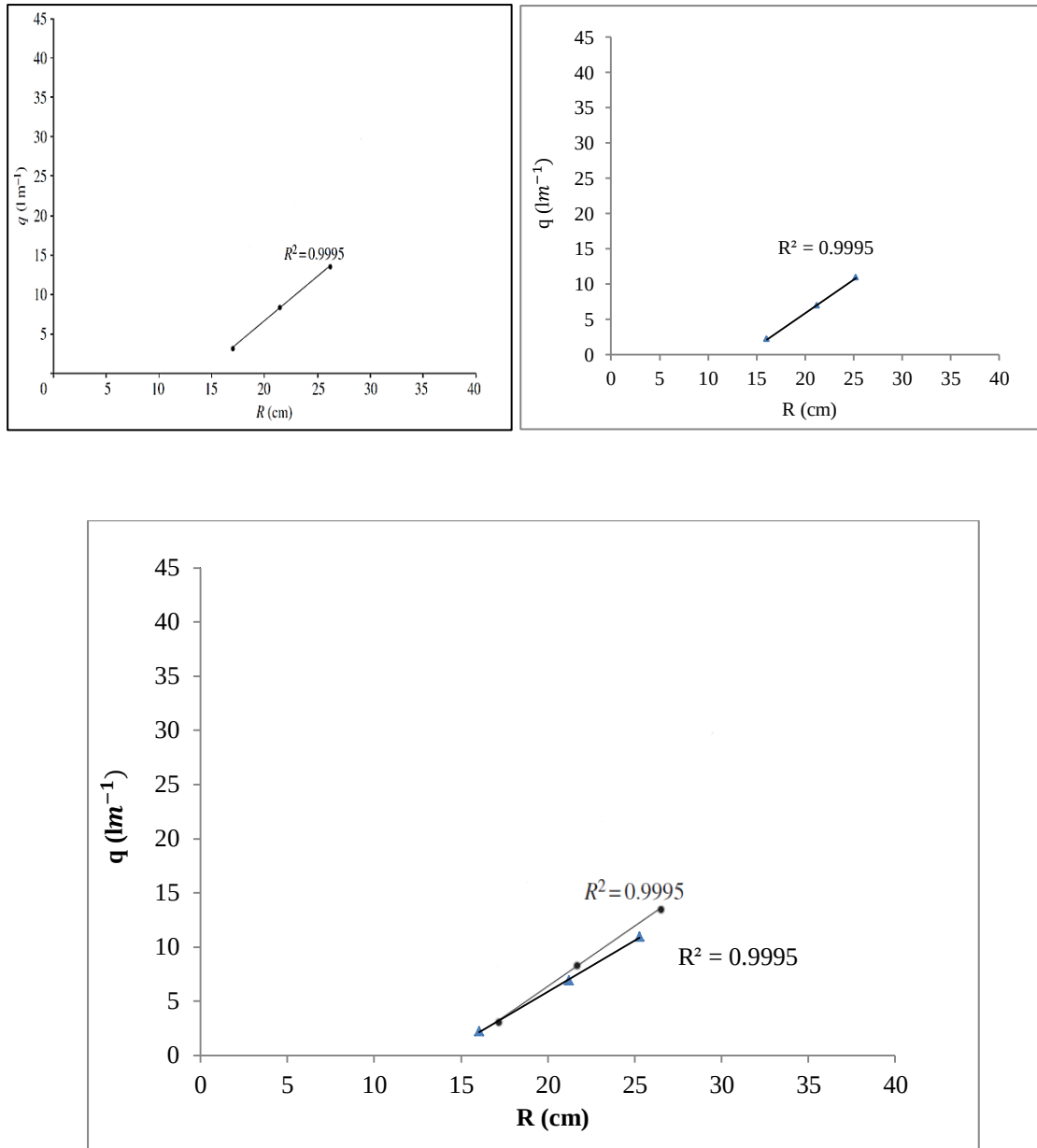
در شکل‌های زیر به مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل حاضر پرداخته‌شده که تطابق نسبتاً خوبی را بین این دو حالت می‌توان مشاهده کرد. شکل‌های سمت چپ صفحه مربوط به نتایج آزمایشگاهی و شکل‌های سمت راست مربوط به نتایج مدل حاضر می‌باشد.

شکل ۴-۱۰ مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل حاضر را برای 2.9 و 3.7 و 5.6 و 7.8 و 9.8 H سانتیمتر و $d = 21$ سانتیمتر و $Z = 6.2$ سانتیمتر نشان می‌دهد.



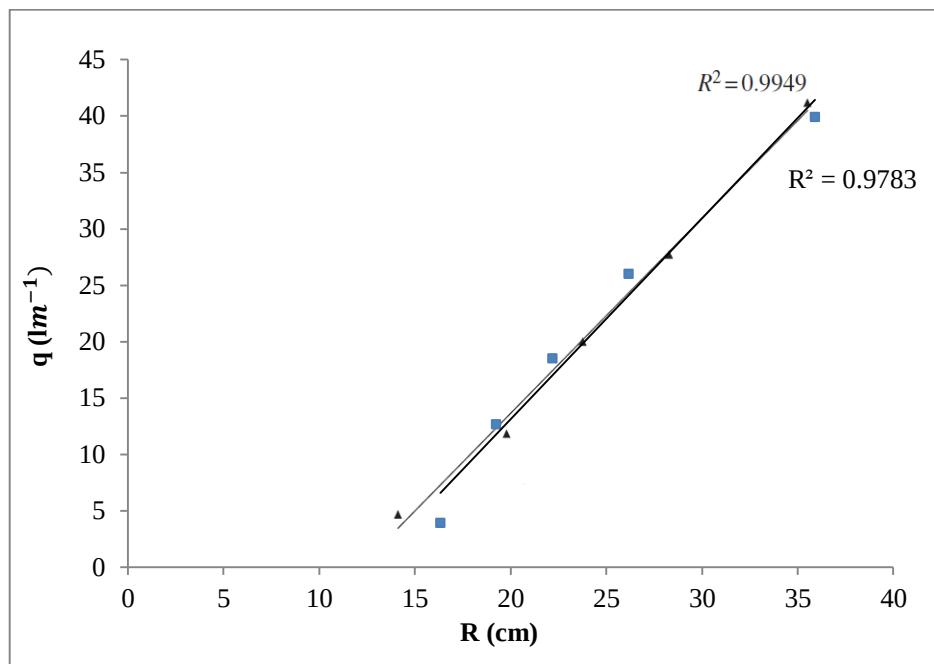
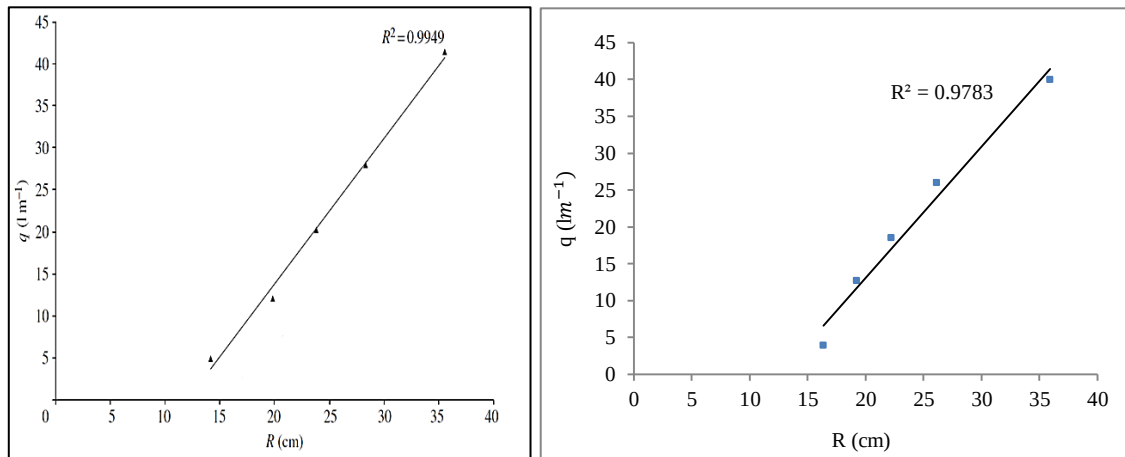
شکل ۴-۱۰ : مقایسه‌ی نتایج روگذری موج از ساحل برای مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی برای $d = 21$ و $Z = 6.2$ سانتیمتر. مربع‌ها نتایج آزمایشگاهی و دایره‌ها نتایج مدل حاضر می‌باشند.

شکل ۴-۱۱ مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل حاضر را برای $H = ۹.۸$ و ۷.۶ و ۵.۶ سانتیمتر و $d = ۲۱$ سانتیمتر و $Z = ۱۴.۶$ سانتیمتر نشان می‌دهد.



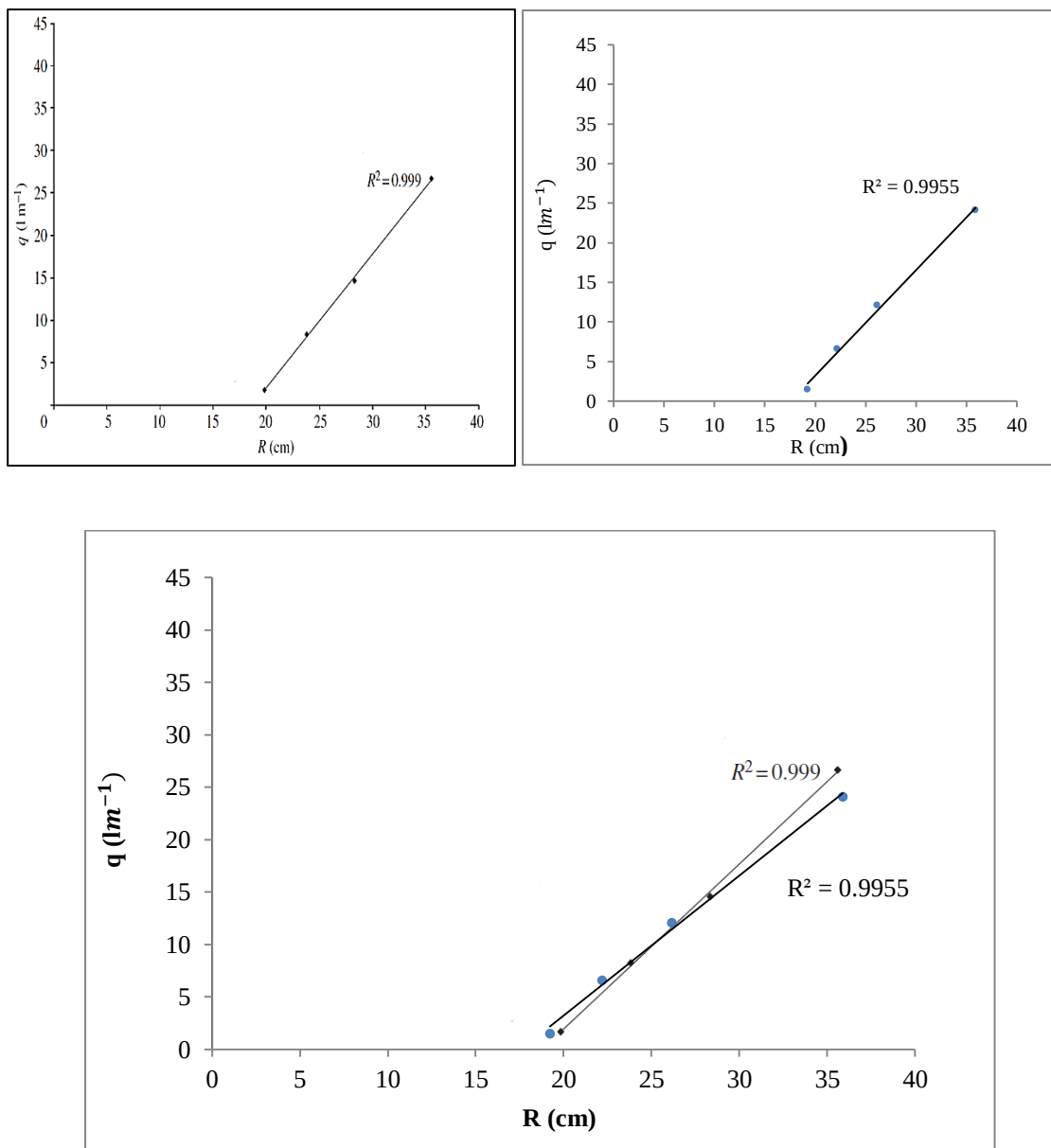
شکل ۴-۱۱: مقایسه‌ی نتایج روگذری موج از ساحل برای مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی برای $d = ۲۱$ و $Z = ۱۴.۶$ سانتیمتر. دایره‌ها نتایج آزمایشگاهی و مثلث‌ها نتایج مدل حاضر می‌باشند.

شکل ۴-۱۲ مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل حاضر را برای $H = 4.1$ و 6.1 و 8.3 و 10.6 و 15.5 سانتیمتر و $d = 26$ سانتیمتر و $Z = 9.1$ سانتیمتر نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۲ : مقایسه‌ی نتایج روگذری موج از ساحل برای مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی برای $d = 26$ و $z = 9.1$ سانتیمتر. مثلث‌ها نتایج آزمایشگاهی و مربع‌ها نتایج مدل حاضر می‌باشند.

شکل ۴-۱۳ مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل حاضر را برای $H = ۶.۱$ و ۸.۳ و ۱۰.۶ و ۱۵.۵ سانتیمتر و $d = ۲۶$ سانتیمتر و $Z = ۱۷.۵$ سانتیمتر نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۳ : مقایسه‌ی نتایج روگذری موج از ساحل با مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی برای $d = ۲۶$ و $z = ۱۷.۵$ سانتیمتر. لوزی‌ها نتایج آزمایشگاهی و دایره‌ها نتایج مدل حاضر می‌باشند.

۴-۵- برخی خطاها و مشکلات مدل سازی

یکی از مشکلاتی که در مسیر مدل سازی به وجود آمد، استفاده از کامپایلر FTN۹۵ بود. این کامپایلر که برنامه SPHYSICS برای خروجی گرفتن کدهایش از آن استفاده می کند، مشکلاتی دارد که در بعضی موارد Error هایی می دهد که کاملاً خاص بوده و در هیچ کتاب یا مقاله یا سایتی به آن ها اشاره نشده است. یکی از مهم ترین این خطاها زمانی اتفاق می افتد که بخواهیم کد را ویرایش کرده و از آن خروجی Note بگیریم. به طور مثال در مدل حاضر برای به دست آوردن خروجی بالاروی و روگذری، کد کمی ویرایش شد و فایل خروجی Note برای آن تعریف شد اما هنگامی که برنامه شروع به کار می کرد در همان ابتدا Error می داد. پس از آن با تغییر کامپایلر به Intel FORTRAN این مشکل به کلی رفع شد و خروجی ها به درستی نمایش داده شدند.

یکی دیگر از مشکلات به وجود آمده این بود که برای مدل سازی روگذری نقطه ای به عنوان مبنا در نظر گرفته شد که هر ذره ای در جهت طولی از آن نقطه عبور کرد برنامه آن ذره را به عنوان روگذری محاسبه کرده و به این ترتیب هر ذره ای که عبور کرد شمارشگر یک شماره به تعداد ذرات عبوری اضافه نماید. در ابتدای امر همه چیز درست به نظر می رسید اما مشاهده شد که تعداد ذرات رد شده از آن نقطه نسبت به نتایج آزمایشگاهی خیلی بیشتر بوده و نتایج کاملاً غیرمنطقی می باشد. پس از بررسی مشاهده گردید که برنامه، تعداد ذراتی که از پشت موج ساز عبور می کنند را در فاصله ای دور ذخیره می کند و به این ترتیب ذراتی که از موج ساز عبور می کنند را با ذراتی که روگذری می کنند جمع کرده و عدد به دست آمده خیلی بزرگ تر می باشد. پس از آن با تعیین حداقل و حداکثر مقدار بعد طولی برای مدل، دیگر آن ذرات در نظر گرفته نشدند و مشکل مرتفع گردید. مشکلات دیگری از قبیل عبور تعداد زیاد ذرات از پشت موج ساز و کاهش شدید ارتفاع موج و... هم پیش آمد که همگی مرتفع گردید.

۴-۶- جمع بندی

در این فصل ابتدا به منظور بررسی دقت مدل عددی تهیه شده‌ی هیدرودینامیک ذرات هموار شده‌ی تراکم ناپذیر، مسئله‌ی بالاروی موج روی ساحل شیب‌دار مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که از مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل حاضر مشخص است، این روش در مدل‌سازی جریان‌های با سطح آزاد، دقت بالایی دارد. در ادامه‌ی این فصل، با استفاده از مدل عددی تهیه شده، مسئله روگذری موج منفرد مورد مدل‌سازی قرار گرفت. در طی مدل‌سازی‌ها مشخص گردید که با افزایش تعداد ذرات و هم‌چنین کوچک کردن گام‌های زمانی و افزایش سرعت صوت، زمان مدل‌سازی به شدت افزایش می‌یابد. به عنوان مثال با انجام محاسبات مشاهده گردید اگر اندازه ذرات از 0.006 متر به 0.04 متر کاهش داده شود، زمان انجام محاسبات از 30000 ثانیه به 130000 ثانیه افزایش خواهد یافت. با این وجود، با توجه به این که در روش‌های لاگرانژی از جمله روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده جمله‌های انتقال در معادلات ناویر-استوکس به طور مستقیم محاسبه می‌شوند، خطای پخش عددی حذف می‌گردد. خطای پخش عددی در مسائلی مانند امواج منفرد به خصوص هنگامی که سطح آزاد جریان تغییرات زیادی داشته باشد، تأثیر منفی در نتایج خواهد داشت.

لازم به ذکر است به دو دلیل مقداری خطا در مدل مشاهده شد. یکی اینکه در مدل حاضر نقطه سوم دوزنقه به عنوان مبدا در نظر گرفته شد و ذراتی که از آن نقطه رد شدند به عنوان روگذری محاسبه گردید، درحالی که برخی از ذرات از نقطه دوم دوزنقه رد شدند اما قدرت رد شدن از نقطه سوم را نداشتند. دیگر اینکه برخی از ذرات از سمت چپ موج ساز عبور می‌کنند و این باعث شده که حجم آب کمتر شود.

فصل پنجم:

نتیجہ گیری و پیشہادہ

۵-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه مدل‌سازی بالاروی و روگذری موج با استفاده از روش SPH که یک روش لاگرانژی است انجام گرفت.

۱. مدل‌سازی بالاروی موج برای اعماق و ارتفاع موج‌های زیر انجام شد که نتایج قابل قبولی به دست آمد:

- عمق آب ۱۰.۵ و ارتفاع‌های ۲.۲ و ۲.۹ و ۴.۶ و ۶.۱ و ۶.۷ سانتیمتر
- عمق آب ۱۵.۵ و ارتفاع‌های ۲.۵ و ۳.۴ و ۵.۱ و ۷.۴ و ۱۰ سانتیمتر
- عمق آب ۲۱ و ارتفاع‌های موج ۲.۹ و ۳.۷ و ۵.۶ و ۷.۶ و ۹.۸ سانتیمتر
- عمق آب ۲۶ و ارتفاع‌های موج ۳.۲ و ۴.۱ و ۶.۱ و ۸.۳ و ۱۰.۶ و ۱۵.۵ سانتیمتر

۲. مدل‌سازی روگذری موج برای اعماق و ارتفاع موج و فاصله عمق آب تا بالای شیب‌های زیر انجام شد که نتایج قابل قبولی به دست آمد:

- عمق آب ۲۱ و فاصله عمق آب تا بالای شیب ۶.۲ و ارتفاع‌های موج ۲.۹ و ۳.۷ و ۵.۶ و ۷.۶ و ۹.۸ سانتیمتر
- عمق آب ۲۱ و فاصله عمق آب تا بالای شیب ۱۴.۶ و ارتفاع‌های موج ۵.۶ و ۷.۶ و ۹.۸ سانتیمتر
- عمق آب ۲۶ و فاصله عمق آب تا بالای شیب ۹.۱ و ارتفاع‌های موج ۴.۱ و ۶.۱ و ۸.۳ و ۱۰.۶ و ۱۵.۵ سانتیمتر

• عمق آب ۲۶ و فاصله عمق آب تا بالای شیب ۱۷.۵ و ارتفاع‌های موج ۶.۱ و ۸.۳ و

۱۰.۶ و ۱۵.۵ سانتیمتر

۳. سطح آزاد جریان در مسائل مدل‌سازی شده، با دقت بالا ردیابی شد که تطابق بسیار خوب

نتایج محاسباتی با داده‌های آزمایشگاهی در مسئله روگذری و بالاروی موج از ساحل موید

این مطلب می‌باشد؛ بنابراین می‌توان مدعی شد که روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده،

قادر به مدل‌سازی با دقت بالای جریان‌های امواج با سطوح آزاد دارای تغییرات زیاد می‌باشد.

۴. در مدل حاضر ارتفاع موج به شکلی مدل‌سازی شد که زمانی که موج به ابتدای شیب

می‌رسد، با ارتفاع موج مدل‌سازی شده در آزمایشگاه برابر گردد.

۵. مرزهای جامد نیز در مدل حاضر با قرار دادن ذرات ثابت بر روی دیواره‌ها و روی شیب و مانع

معرفی شدند. برای مسائلی که دارای مرزهای شیب‌دار یا انحنادار می‌باشند، چینش این

ذرات برای محاسبه‌ی صحیح چگالی ذرات درونی جریان و جلوگیری از عبور این ذرات از

مرزها، به دقت بالایی احتیاج دارد.

۶. در طی مدل‌سازی، همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد، با افزایش تعداد ذرات (همان کوچک

کردن فاصله‌ی بین ذرات) و کوچک کردن گام‌های زمانی، دقت مدل افزایش یافت، هرچند

که زمان محاسبات بالا رفت و بیش از ۴ برابر شد؛ و مشاهده گردید که اندازه ذرات ۰.۰۰۶

متر بهینه می‌باشد.

۷. در این مدل از موج منفرد برای تولید موج توسط موج ساز استفاده شد که در کدهای برنامه

SPHYSICS از گروه موج برای تولید موج استفاده شده بود. به همین دلیل به گونه‌ای طراحی

شد که موج ساز فقط یک بار به سمت جلو حرکت کرده و در حالت‌های مختلف ارتفاع موج

مورد نیاز که با مدل آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد را در اختیار بگذارد.

۸. برای بالاروی نتایج به گونه‌ای بود که ضریب همبستگی حالت‌های مختلف حدود ۰.۹۶ به دست آمد که نشان می‌دهد مدل برای حالت‌های مختلف عمق آب و ارتفاع موج پراکندگی نداشته و یکپارچه می‌باشد.

۹. از نتایج به دست آمده مدل‌سازی بالاروی دو منحنی برازش داده شد که $R^2 = 1$ برای هر کدام به دست آمد.

۱۰. حدوداً ۵۴ درصد حالت‌های مدل‌سازی شده برای بالاروی، خطای زیر ۴ درصد و تمام حالت‌ها خطای زیر ۱۰ درصد داشتند که نشان می‌دهد نتایج مطلوب می‌باشد.

۵-۲- پیشنهادها برای تحقیقات آتی

با توجه به مدل‌سازی‌های موفقیت‌آمیزی که در این پایان‌نامه با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده انجام شد، به نظر این مدل قابلیت مدل‌سازی بسیاری از جریان‌های هیدرولیکی را دارا می‌باشد. برای ادامه‌ی پژوهش بر روی این مدل، پیشنهادهایی که می‌توانند مطرح شوند، به شرح ذیل می‌باشند:

۱. تبدیل مدل عددی تهیه‌شده به مدل با قابلیت پردازش موازی برای کاهش زمان محاسبات.

۲. مطالعه در زمینه‌ی توابع هموار و بسط و گسترش توابع جدید و بررسی تأثیر آن‌ها در افزایش دقت و کاهش زمان محاسبات.

۳. مطالعه در زمینه‌ی روش‌های سریع پیدا کردن ذرات مجاور هر ذره و به‌کارگیری آن‌ها یا بسط مدل حاضر و یافتن روش‌های جدید، برای کاهش زمان محاسبات.

۴. مطالعه در زمینه‌ی روش‌های تکراری حل دستگاه معادلات خطی با دقت بالا و سریع و استفاده از آن‌ها در مرحله‌ی محاسبه‌ی فشار ذرات برای کاهش زمان محاسبات و افزایش دقت جواب‌ها.

۵. استفاده از مدل حاضر و بسط آن برای مدل‌سازی جریان‌های آشفته با سطح آزاد.

1. Pengzhi L.,(1993) "Numerical Modeling of Water Waves", **Taylor & Francis Routledge**,
2. Tu, J., Yeoh, G.H., Liu. C.,(2008). **Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach, Elsevier.**
- 3.Soliman, Akram S M (2003) Numerical study of irregular wave overtopping and overflow. **PhD thesis, University of Nottingham.**
4. Shiigai, H., Kono, T.(1970) - Analitical Approach On Wave Overtopping On Levees -Proc.The 12th. **Coastal Engineering Conference Vol. 1, pp. 563-573.**, 4-EA(UK), ENW(NL), and KFKI(DE), (2007), **"EurOtop Wave Overtopping of Sea Defence**
5. Yamamoto, Y. , Horikawa,K.(October 1992) - "New Methods to Evaluate Wave Run-up Height and Wave Overtopping Rate"- 23nd. **International Conference on Coastal Engineering 4-9 Venice Italy**
6. van der Meer, J., Janssen, J.P.F.M., (1995). Wave run-up and wave overtopping at dikes. In Kobayashi, N., Demirebilek, Z. (Eds.), **Wave forces on inclined and vertical structures. ASCE, pp. 1-27.**
7. Owen, M. W. (1982), "The hydraulic design of seawall profiles", **Proc. Conf. on Shoreline Protection, ICE, London, UK: pp. 185-192.**
8. Besley, P., T. Stewart and N. W. H. Allsop (1998), "Overtopping of vertical structures: new prediction methods to account for shallow water conditions", **Proc. of the Conference on Coastlines, structures and breakwaters, ICE**
9. Hedges T. S. and M. T. Reis (1998b), "Random wave overtopping of simple sea walls: a new regression modeled", **Oceanographic Literature Review 45(19),p-1711**
10. Hedges T.S. and M. T. Reis (1998a), "Random wave overtopping of simple seawalls: A new regression model", **Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Maritime and Energy 130(1),p- 1-10**
11. Kobayashi, N. and Wurjanto, A. (1989), "Wave Overtopping on Coastal Structures", **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 115(2),p- 235-251**
12. Hiraishi and Maruyama (1998), Presented a numerical model for calculation of overtopping discharges for a vertical breakwater in multi directional waves, **The basic assumption is that the overtopping discharge can be described by a weir expression as suggested by Kikkawa et al 1998**
13. Goda, Y. (2000), "Random seas and design of maritime structures", **University of Tokyo Press, Tokyo, Japan.**

14. Hu K. C. G. Mingham and D. M. Causon(2000), "Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the Non_Linear shallow water equations", **Coastal Engineering (41),p-433-435**
15. Harlow, F. H. and J. E. Welch (1965), "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow", **Phys. fluids Vol. 8: pp. 2182-2189.**
16. Austin, D. I. and R. S. Schluter (1982), "A numerical model of wave breaking /breakwater interactions. In proceedings 18th International Conference on Coastal Engineering", **Cape Town, Republic of South Africa Vol. 3: pp.2079-2096.**
17. Wu, N. (1994), "Numerischen simulation der druckschlagbelastung durch brechende wellen auf senkrechte bauwerke. Ph.D thesis Franzüs-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen ", **Universität Hannover. Hannover, Germany.**
18. Troch, P. (1997), "VOFbreak2, a numerical model for simulation of wave interaction with rubble mound breakwaters", **Proceedings 27th IAHR Congress, San Francisco, USA: pp. 1366-371.**
19. Liu, P. L.-F., P. Lin and K. A. Chang (1999), "Numerical modeling of wave interaction with porous structures", **Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering Vol. 125(6): pp. 322-330.**
20. M. Go´mez-Gesteira, D. Cerqueiro, C. Crespo, R.A. Dalrymple, (2004) ," Green water overtopping analyzed with a SPH model", **Ocean Engineering 32 (2005)p- 223–238**
21. Monaghan, J.J., Kos, A.,(1999)." Solitary waves on a Cretan beach". **J. Wtrwy. Port, Coastal Ocean Eng. 125, p-145–154.**
22. Monaghan, J.J., Kos, A.,(2000)." Scott Russell's wave generator". **Phys. Fluids 12,p- 622–630.**
23. Fontaine, E.,(2000). On the use of smoothed particle hydrodynamics to model extreme waves and their interaction with structures Proc. **Rogue Waves**
24. Dalrymple, R.A., Knio, O.,(2000)." SPH Modelling of water waves", **Proc. Coastal Dynm., Lund 2000.**
25. R.A. Dalrymple , B.D. Rogers, (2005)," Numerical modeling of water waves with the SPH method", **Coastal Engineering 53 (2006) p-141 – 147**
26. Songdong Shao, Changming Ji, David I. Graham, Dominic E. Reeve, Philip W. James, Andrew J. Chadwick, (2006)," Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model", **Coastal Engineering 53 (2006) p-723–735**
27. Monaghan, J.J., (1992). "Smoothed particle hydrodynamics". **Annu. Rev. Astron. Astrophys. 30,p- 543–574.**
28. D.E. Reeve, A.Soliman, P.Z. Lin, (2007)," Numerical study of combined overflow and wave overtopping over a smooth impermeable seawall", **Coastal Engineering 55 (2008) p-155–166**
29. Verhaeghe, H., J. De Rouck, and J. van der Meer, (2008), "Combined classifier-quantifier model: A 2- phases neural model for prediction of wave overtopping at coastal structures", **Coastal Engineering, 55(5): pp. 357-374.**

30. D.M. Ingram, F. Gao, D.M. Causon, C.G. Mingham, P. Troch. (2009)," Numerical investigations of wave overtopping at coastal structures", **Coastal Engineering** 56 (2009) p-190–202
31. Thieu Quang Tuan, Hocine Oumeraci, (2010), "A numerical model of wave overtopping on seadikes", **Coastal Engineering** 57 (2010)p- 757–772
32. Zhong Peng, Qing-Ping Zou, (2010), "Spatial distribution of wave overtopping water behind coastal structures", **Coastal Engineering** 58 (2011)p- 489–498
33. Pullen, T., Allsop, W., Bruce, T., Pearson, J.,(2008)." Field and laboratory measurements of mean overtopping"
34. Lykke Andersen, T., Burcharth, H.F.,(2006)." Landward distribution of wave overtopping for rubble mound breakwaters". **Proceedings of the First International Conferece on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection. IAHR, Porto, Portugal**, pp. 401–411.
35. D.M. Webber, M.J. Ivings, (2010)," Modelling bund overtopping using Shallow Water Theory", **Journal of Loss Prevention in the Process Industries** 23 (2010)p- 662e667
36. Jeremy A. Sharp, William H. McAnally, (2011), "Numerical modeling of surge overtopping of a levee", **Applied Mathematical Modelling** 36 (2012)p- 1359–1370.
37. Xin Rao, LinLi, FarshadAmini, HongwuTang. (2012)," Numerical study of combined wave and surge overtopping over RCC strengthened levee systems using the smoothed particle Hydrodynamics method", **Ocean Engineering**54(2012)p-101–109.
38. Phung Dang Hieu, Phan Ngoc Vinh, (2012)," Numerical study of wave overtopping of a seawall supported by porous structures", **Applied Mathematical Modelling** 36 (2012) 2803–2813.
39. Yuefeng Sun, Haotian Chang, Zhengjian Miao, Denghua Zhong, (2012), "Solution method of overtopping risk model for earth dams", **Safety Science** 50 (2012)p- 1906–1912.
40. L. B. Lucy,(1977) "A numerical approach to the testing of fission hypothesis," **Astrophysical Journal**, 82-p-1013–1020.
41. R. A. Gingold, J. J. Monaghan,(1977) "Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and application to nonspherical stars," **Astrophysical Journal**, 18(1977)1275–389.
42. J.K.Chen, J.E. Beraun,(2000) "A generalized smoothed particle hydrodynamics method for nonlinear dynamic problems," **Computer Methods Application Mechanics Engineering**, 190-p-225-239.
43. A. K. Das, P.K. Das,(2009) "Evolution through submerged orifice using smoothed particle hydrodynamics: Basic formulation and model validation," **Chemical Engineering Science**, 164-p-2281-2290.
44. R. Rajendran, K. Narasimhan,(2001) "Performance evaluation of HSLA steel subjected to underwater explosion," **Journal of Materials Engineering and Performance**, 10-p-66-74.

45. R.A. Dalrymple, B.D. Rogers,(2006) "Numerical modeling of water waves with the SPH method," **Coastal Engineering**, 53-p-141-147.
46. J.Fang, et al,(2006) "A numerical study of the SPH method for simulating transient viscoelastic free surface flows," **Non-Newtonian Fluid Mech**, 139-p-64-84.
47. G. R. Liu and M. B. Liu(2003). "**Smoothed Particle Hydrodynamics. A Meshfree Particle Method**". World Scientific, Singapore
48. M. Muller, et al, "Interaction of Fluids with Deformable Solids," **Swiss National Commission for Technology and Innovation (KTI), (project no 6310.1KTS-ET)**.
49. C. Antoci, M. Gallati, S. Sibilla,(2007) "Numerical simulation of fluid-structure interaction by sph," **Computers & Structures**, 85-p-879-890.
50. J.J. Monaghan,(1992) "Smoothed particle hydrodynamics," **Annual Review of Astronomical and Astrophysics**, 30-p-543-574.
51. J.J. Monaghan, J.C. Lattanzio, "A refined particle method for astrophysical problems," *Astronomy and Astrophysics*, 149(1985) 135-143.
52. G.R. Johnson, R.A. Stryk, S.R. Beissel,(1996) "SPH for high velocity impact computations," **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 139-p-347-373.
53. J.P. Morris,(1994) "A study of the stability properties of SPH," **Monash**.
54. H. Wendland,(1995) "Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree," **Advances in computational Mathematics**, 4-p-1389- 396.
55. T. E. Baldock, D. Peiris and A. J. Hogg(2012) "Overtopping of solitary waves and solitary bores on a plane beach". *Proc. R. Soc. A* 2012 468,p- 3494-3516 first published online

۵۶. عطایی آشتیانی ب.، بهشتی ع.، (۱۳۸۶) "مکانیک امواج آب"، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر،

۵۷. جعفری ا و شهیدی ا، (۱۳۸۹)، "ارائه مدلی برای تخمین روگذری موج در موجشکن های سنگریزه ای سکونی"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آبان ۱۳۸۹، دانشگاه تربیت مدرس.

۵۸. شفیعی فرم، مقصودی م،(۱۳۹۱)، عبد معبودی ا، (۱۳۹۱) " مدل سازی لاگرانژی روگذری و بالاروی امواج بر روی سطوح شیبدار ساحلی با استفاده از روش SPH"، نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ۹۱ .

۵۹. ح.ا.ح)،(۱۳۸۶) "بررسی اندرکنش فاز جامد و گاز با استفاده از روش بدون المان ذرات متحرک"، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تهران.

Abstract

In this study a numerical model has been created that can model overtopping of water waves with any desired initial conditions, using Smoothed-Particle Hydrodynamics (SPH). Smoothed-Particle Hydrodynamics is a lagrangian meshless particle based method that can numerically model high deforming waves with high precision. Different approaches have been used up until now to estimate and model the magnitude of wave overtopping over shore walls, dykes, and other shore protection structures. In this study SPH is used to improve the precision and eliminate the weaknesses of these models. To simulate free-surface flows in Lagrangian Navier-Stokes equations, fluid particles are followed in numerous time-steps. In this study first the problem of a solitary-wave run-up is verified by comparing results from the numerical model to a lab model, and a good match was observed between the lab and the present models. Then the problem of a solitary-wave overtopping was modeled and the results were compared with lab data. It should be noted that particles are minified to 0.006 meters, and in some models more than 30000 particles are present which have made the results more accurate. Obtained results show that the present SPH model, is a convenient model for simulating complex fluid mechanics problems with free-surface boundary conditions.



Shahrood University of Technology

Civil Engineering

Modelling Wave Overtopping Using Smoothed-particles Hydrodynamics (SPH) Method

Mohamad Reza Naeij

Supervisors:

Ramin Amini

Amir Abas Abedini

February 2014