٧-٦٤٣

١١٤٧٦٦

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی مهندسی

رساله دوره دکتری مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی

مدلسازی دوفازی پخش و انتقال آلودگی‌های نفتی در دریا

علیرضا ولی‌زاده

استاد راهنما:

دکتر مهدی شفیعی‌فر

استاد مشاور:

دکتر علی‌اکبر صالحی نیشابوری

دکتر پاول تکالیچ

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تاریخ ثبت مدارک
۱۳۸۸/۲/۱

۱۳۸۷

۱۱۴۷۶۶

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای علیرضا ولی زاده رساله ۲٤ واحدی خود را **با عنوان مدلسازی عددی انتشار آلودگی های نفتی در دریا** در تاریخ ۱۳۸۷/۱۲/۱۲ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی عمران - سازه های هیدرولیکی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر مهدی شفیعی فر	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر علی اکبر صالحی نیشابوری	استاد	
استاد مشاور	دکتر پاول تیکا لیچ	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد تقی احمدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر قاسم حیدری نژاد	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر سعیدرضا صباغ یزدی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مرتضی کلاهدوزان	استادیار	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد تقی احمدی	استاد	

۱۳۸۸/۲/۱

این نسخه به عنوان نسخه نهایی رساله مورد تأیید است.

امضای استاد راهنما:

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی عمران است که در سال ۱۳۸۷ در دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر محمدی شفیعی فر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر علی اکبر صالحی نیشابوری و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر عادل شکاییک از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب علیرضا ولی زاده دانشجوی رشته مهندسی عمران - سازه‌های دریایی مقطع دکتری

تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: علیرضا ولی زاده

تاریخ و امضا:

تقدیم به:

قلب مهربان مادر و وجود نازنین و گرامی پدرم، شمعهای فروزان و فداکار زندگی ام.

و

همسر عزیز و گرانقدرم، همنشین مهربان و همراه خستگی ناپذیرم.

تقدیر و تشکر

اکنون که با عنایات خداوند متعال انجام این رساله به پایان رسیده است، پس از حمد و سپاس ایزد یکتا بر خود لازم میدانم از همه عزیزانی که در این راه مرا یاریگر بوده اند سپاسگزاری نمایم:

از استاد عزیز و گرانقدرم جناب آقای دکتر مهدی شفیعی فرکه زحمت راهنمایی این رساله را عهده دار بودند تشکر فراوان دارم. در حضور این استاد گرانقدر درسهای زیاد گرفته و بهره ها برده ام، بدون حمایتها و ارشادات ایشان قطعا راه پرافت و خیز انجام تحقیق و تحصیل برایجانب هموار نمی گشت. برای ایشان تندرستی، موفقیت و بهروزی و برای سایر محققین و دانشجویان توفیق بهره گیری از محضر پربار این استاد گرانقدر را آرزومندم.

از استاد عزیز و گرانمایه جناب آقای دکتر علی اکبر صالحی نیشابوری که زحمت مشاوره این رساله را عهده دار بودند بسیار تشکر می کنم. در طول مدت تحصیل ایجانب در دانشگاه تربیت مدرس این استاد گرامی همواره به عنوان یک الگوی علمی و اخلاقی راهگشا و راهنمای مسایل و مشکلات ایجانب و سایر دانشجویان بوده اند. امیدوارم خداوند متعال به ایشان سلامتی و به سایر محققین و دانشجویان توفیق بهره گیری از محضر پربار این استاد گرانقدر را عطا فرماید.

اساتید عزیز و زحمتکش جناب آقای دکتر محمد تقی احمدی و جناب آقای دکتر مسعود قدسیان از جمله ذخایر ارزشمند علمی و اخلاقی کشورمان در دانشگاه تربیت مدرس می باشند. خدای متعال را شاکرم که توفیق کسب دانش و معرفت در حضور این عزیزان را به من عطا فرمود. سلامتی و سعادت روزافزون ایشان را از ایزد یکتا خواستارم.

اساتید گرامی و بزرگوار جناب آقایان دکتر مرتضی کلاهدوزان، دکتر سعید صباغ یزدی و دکتر قاسم حیدری نژاد با دقت نظر و حوصله فراوان زحمت باز خوانی، داوری، ارزیابی و ارایه پیشنهادات سازنده برای بهبود کیفیت رساله را تقبل فرمودند. نظرات گهربار این اساتید عزیز افقهای روشن و نکات ارزشمندی را فرا روی رساله قرار داد. از زحمات ایشان سپاسگزاری میکنم و برای ایشان سلامتی، طول عمر و سعادت آرزومندم.

استاد گرامی جناب آقای دکتر پاول تیکالیچ در دانشگاه ملی سنگاپور زحمت در اختیار گذاشتن قسمتی از برنامه کامپیوتری و فراهم نمودن امکان حضور کوتاه مدت در دانشگاه ملی سنگاپور را برای ایجانب فراهم نمودند، از ایشان و کلیه همکارانشان در آن دانشگاه و مخصوصا در دانشکده ریاضی تشکر فراوان دارم و برای همه ایشان آرزوی توفیق و سلامتی روزافزون دارم.

اساتید، دانشجویان و کارکنان دانشکده ریاضیات و فیزیک کاربردی در دانشگاه موناش استرالیا و دوستان عزیز مقیم در شهر ملبورن در طول اقامت اینجانب کمال همکاری را داشتند و با در اختیار گذاشتن امکانات و ارایه راهنمایی های ارزنده نقش ارزشمندی را در انجام پاره ای از تحقیقات انجام شده، ایفا نمودند. از همه آن عزیزان مخصوصا جناب آقای پروفسور جو موناهان کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم و برای همه آنها آرزوی سلامتی و توفیق دارم.

از حمایتهای مالی و علمی سازمان مدیریت منابع آب و پژوهشکده آب دانشگاه تربیت مدرس و کلیه کارکنان زحمتکش و مهربان دانشگاه تربیت مدرس نیز کمال تشکر و قدردانی به عمل می آید.

قطعا انجام این تحقیق بدون حمایتها و صبر و حوصله اعضای خانواده امکانپذیر نمی شد. در این راستا همسر عزیز و فداکارم و خانواده محترمشان، پدر و مادر و خواهران برادرانم همراه با همسران گرامیشان همواره یار و پشتیبان و مایه دلگرمی و تلاش من در راه تحصیل علم بوده اند، از همه این عزیزان تشکر صمیمانه میکنم، امیدوارم خداوند توفیق جبران محبتهای صمیمانه شان را به من عطا فرماید.

همچنین از تمام دوستان، همکلاسی ها، دبیران و اساتید گرانقدری که تحقیق حاضر برآیندی از دوستی و همنشینی با ایشان در طول سالیان متمادی تحصیل اینجانب می باشد، تشکر و قدردانی میکنم، امیدوارم همواره پیروز و سربلند باشند.

چکیده

در این رساله مدلسازی مستقیم تاثیر انتشار امواج مخصوصا بررسی شکست امواج بر انتشار نفت در ستون آب صورت گرفته است. این کار با استفاده از مدلسازی همزمان جریان نفت و آب به صورت یک جریان دوفازی انجام می‌گیرد. این کار در هیچ یک از تحقیقات گذشته انجام نشده است و مدلسازی مستقیم تاثیر شکست امواج بر انتشار نفت برای اولین بار در این تحقیق انجام گرفته است. معادلات حاکم، معادلات ناویر استوکس می‌باشند که با استفاده از یک روش لاگرانژی بدون شبکه موسوم به روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده[1] (SPH) حل می‌شوند. مدل تهیه‌شده قابلیت شبیه‌سازی جریانهای چندفازی (گاز، جامد و مایع) با سطح آزاد و تحت فشار را دارا می‌باشد و این مهم نیز یکی دیگر از نوآوریهای مدل SPH می باشد این کار با استفاده از ضرایب جرمی که در معادلات اندازه حرکت اعمال می شوند صورت میگیرد و با تغییر ضرایب مذکور امکان مدلسازی جریانهای با اختلاف چگالی خیلی زیاد را فراهم می کند. با توجه به اینکه هدف اصلی مطالعه انتشار نفت در مجاورت شکست موج می‌باشد و شکست موج هم در زمانهای کوتاه (در مقیاس ثانیه) اتفاق می‌افتد، تاثیر پدیده‌های دیگر مانند تبخیر، امولسیون و انحلال (که در مقیاس ساعت و روز رخ می‌دهند) را می‌توان نادیده گرفت. بنابراین مدل SPH فقط پخش و انتقال نفت را مدلسازی می‌نماید. در حقیقت می‌توان این مدل را مدل میدان نزدیک[2] انتشار نفت نامید. به دلیل زمان زیاد محاسبات و لزوم استفاده از گامهای زمانی کوچک مدلسازی انتشار نفت برای شبیه سازی جریانهای طولانی مدت با استفاده از روش SPH پرهزینه و زمانبر است و این یکی از محدودیتهای این مدل می باشد.

از آنجایی که در مدلهای انتشار نفت، هدف اصلی بررسی مسیر حرکت لکه نفتی تحت اثر امواج، باد، جریانات دریایی و استهلاک آن تحت اثر عوامل محیطی می‌باشد. به منظور کاربردهای عملی نیاز به استفاده از مدلهای میدان دور که انتشار نفت را در مقیاس کیلومتر شبیه‌سازی می‌نمایند، در کنار مدل میدان نزدیک (مدل SPH) می‌باشد. بنابراین در بخش دوم از تحقیق حاضر، با فرض معلوم بودن میدان جریان، اجرا و به کارگیری یک مدل میدان دور انتشار نفت که براساس روش اویلری مبتنی بر شبکه مستطیلی بنا نهاده شده است، صورت گرفت. مدل مذکور قابلیت شبیه‌سازی همزمان پخش و انتقال مولفه‌های مختلف دخیل در انتشار نفت (انحلال، امولسیون، تبخیر و پراکندگی) را دارد. در مدل اویلری

[1] Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)
[2] Near field model

انتشار نفت، مدل جریان و هیدرودینامیک حل نمی‌شود، بلکه میدان جریان از خروجی مدلهای هیدرودینامیک و میدان باد از خروجی مدلهای هواشناسی به عنوان ورودی به مدل انتشار نفت داده می‌شوند. لازم به ذکر است که مدل SPH و مدل اویلری کاملا مستقل از یکدیگر اجرا میشوند، اما این قابلیت وجود دارد که هم نتایج مدل SPH و هم نتایج مدل اویلری به عنوان داده های ورودی برای یکدیگر به برده شوند.

کاربرد مدل میدان نزدیک SPH در تخمین نرخ ورود ذرات نفت به ستون آب در اثر فعالیت امواج می‌باشد که به مورد استفاده در مدل میدان دور می‌باشد. مهمترین این ضرایب نرخ اختلاط نفت و طول اختلاط می‌باشند. مدل اویلری نمیتواند به صورت مستقیم تاثیر شکست موج را مدلسازی کند، بلکه بااستفاده از فرمولهای نیمه تجربی این اثر را در نظر میگیرد. زمان اجرای مدل بر روی کامپیوترهای معمولی کوتاه است و میتوان انتشار طولانی مدت نفت (در مقیاسهای هفته و ماه) در یک منطقه وسیع را به آسانی و در زمان کوتاهی (کمتر از یک ساعت) شبیه سازی نمود. هر کدام از مدلهای تهیه‌شده میدان دور و نزدیک از مقایسه با حلهای تحلیلی و نتایج عددی و آزمایشگاهی صحت‌سنجی می‌شوند.

کلمات کلیدی: انتشار نفت، مدل لاگرانژی، روش SPH، جریانهای چندفازی، جریانهای دوفازی.

فهرست مطالب

چکیده ..... أ

فهرست اشکال و نمودارها ..... ج

فهرست جداول ..... ز

فهرست جداول ..... ز

فصل ۱: کلیات ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ تعاریف ۵

۱-۳-۱ خلاصه سرنوشت یک لکه نفتی ۵

۱-۳-۲-۶ پراکندگی قایم نفت در ستون آب ۹

۱-۴ مدلسازی انتشار نفت ۱۰

۱-۵ اهداف و روش انجام تحقیق ۱۲

۱-۶ فصل‌بندی رساله ۱٤

فصل ۲: مروری بر کارهای انجام‌شده در زمینه انتشار نفت ۱۵

۲-۱ مقدمه ۱۵

۲-۲ انتقال و پخش آشفتگی ۱۵

۲-۲-۱ باد ۱۵

۲-۲-۲ جریانهای دریایی ۱۵

۲-۲-۳ پخش آشفتگی ۱٦

۲-۳ پخش افقی ۱٦

۲-۴ تبخیر، انحلال و امولسیون نفت در آب ۲۰

۲-۵ پراکندگی قایم نفت ۲۱

۲-۷-۲ انرژی ناشی از شکست موج ۲٤

۲-۷-۳ لایه اختلاطی ناشی از موج ۲۵

۲-۸ جمع‌بندی ۲۷

۲-۹ جایگاه تحقیق حاضر در میان کارهای پیشین ۳۳

فصل ۳: مدلسازی میدان نزدیک ۳٤
۳-۱ مقدمه ۳٤
۳-۲ معادلات حاکم ۳۷
۳-۲-۱ معادله بقای جرم ۳۷
۳-۲-۲ معادله بقای مومنتم ۳۸
۳-۳ اصول روش SPH ۳۸
۳-۳-۱ توابع در روش SPH ۳۹
۳-۳-۲ مشتقات توابع در روش SPH ٤۰
۳-۳-۳ تابع هموارساز ٤۱
۳-۳-۴ طول هموارساز ٤۲
۳-۴ معادلات سیال در روش SPH ٤٤
۳-۴-۱ معادله بقای جرم ٤٤
۳-۴-۲ معادله اندازه حرکت ٤٥
۳-۴-۳ حرکت ذرات ٤٦
۳-۴-۴ فرمول انفصال زمانی معادلات ٤۷
۳-۴-۵ شرایط مرزی ٤۹
۳-۴-۵-۱ مرزهای بسته ٤۹
۳-۴-۵-۲ مرزهای باز ٥۱
۳-۵ برنامه‌نویسی ٥۲
۳-۵-۱ خواص برنامه ٥۲
۳-۵-۲ تولید ذرات ٥۳
۳-۵-۳ یافتن ذرات مجاور ٥۳
۳-۶ نتایج شبیه‌سازیهای مدل تک‌فازی ٥٥
۳-۶-۱ شکست سد ٥٦
۳-۶-۱-۲ مقایسه با حلهای عددی و آزمایشگاهی ٥۹
۳-۶-۱-۳ برخورد آب ناشی از شکست سد به دیواره ٦۱
۳-۶-۲ جریان بین دو صفحه موازی ٦۱
۳-۶-۳ مدلسازی موج ٦۲
۳-۶-۳-۱ اصول شبیه‌سازی عددی موج ٦۲
۳-۶-۳-۲ موج منفرد ٦۳

۳-۶-۳-۲ شکست موج ٦٨
۳-۷ ساخت دستگاه موجساز ۷۹
۳-۷-۱ ضرورت ساخت دستگاه ۷۹
۳-۷-۲ مخزن دستگاه ۷۹
۳-۷-۳ پاروی موجساز ۸۰
۳-۷-٤ موتور و سیستم کنترل ۸۰
۳-۷-۵ مدلسازی موج منظم ۸۱
۳-۸ جریانهای دوفازی ۸۳
۳-۸-۱ مشکلات مدل SPH در جریانهای دوفازی ۸۳
۳-۸-۲ اصلاح روش SPH ۸۵
۳-۸-۳ نوسان بیضی در جریان دوفازی ۸۷
۳-۸-۳-۱ حل تحلیلی نوسان بیضی ۸۷
۳-۸-٤ صعود یک حباب درون سیال ۹٤
۳-۸-۳ جریان غیرتبادلی ۹۹
۳-۸-٤ مدلسازی شکست سد با استفاده از الگوریتم جریان دوفازی ۱۰۵
۳-۸-۵ همگرایی مدل دوفازی ۱۱۰
۳-۹ جمع‌بندی ۱۱۲
فصل ۴: شبیه‌سازی انتشار نفت با استفاده از مدل SPH دوفازی ۱۱٤
۴-۱ مقدمه ۱۱٤
۴-۲ تاثیر نوسان سطح آب بر انتشار نفت ۱۱٤
۴-۲-۱ معادلات موج سینوسی دامنه کوچک ۱۱٤
۴-۲-۲ نحوه مدلسازی موج سینوسی در روش SPH ۱۱۵
۴-۲-۳ نتایج انتشار نفت تحت اثر امواج سینوسی ۱۱۵
۴-۳ عملکرد لکه نفتی در مجاورت بوم ۱۲۰
۴-۳-۱ بوم‌های شناور ۱۲۰
۴-۳-۲ شبیه‌سازی بوم در روش SPH ۱۲۱
۴-۳-۳ شبیه‌سازی لکه نفتی در مجاورت بوم ۱۲۳
۴-٤ بررسی اختلاط قایم نفت در ستون آب ۱۳۳
۴-۵ استفاده از نتایج مدل SPH در مدل چندفازی اویلری ۱۳۷

فصل ۵: مدلسازی انتشار نفت (مدل چندمولفه‌ای) ۱۴۰

۵-۱ مقدمه ۱۴۰
۵-۲ معادلات حاکم بر مدل MOSM ۱۴۰
۵-۳ روش حل و شبیه سازی عددی ۱۴۵
۵-۳-۱ گسسته‌سازی مکانی و زمانی معادلات ۱۴۵
۵-۳-۲ شرط پایداری ۱۵۱
۵-۳-۳ طرحهای مرتبه سوم ۱۵۲
۵-۳-۴ شرایط مرزی ۱۵۸
۵-۳-۵ الگوریتم سه‌بعدی ۱۶۰
۵-۴ نتایج مدل چندمولفه‌ای ۱۶۲
۵-۴-۱ پخش خالص ۱۶۲
۵-۴-۲ جابجایی خالص در اثر جریان ۱۶۳
۵-۴-۴ تاثیر همزمان باد، جریان و پخش ۱۶۶
۵-۴-۵ مقایسه با حل تحلیلی Fay (1971) ۱۶۶
۵-۴-۶ تاثیر مرزهای بسته ۱۶۸
۵-۴-۷ تاثیر فرمولاسیون گسسته‌سازی ترمهای پخش ۱۷۰
۵-۴-۸ شبیه‌سازی سه بعدی پخش نفت ۱۷۲
۵-۵ جمع‌بندی ۱۷۶

فصل ۶: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۷۷

۶-۱ مقدمه ۱۷۷
۶-۲ جمع‌بندی و نتایج ۱۷۷
۶-۳ پیشنهادات ۱۸۳

منابع و مراجع ۱۸۴

واژه نامه فارسی به انگلیسی ۱۹۴
واژه نامه انگلیسی به فارسی ۱۹۷
ABSTRACT ۱۹۹

فهرست اشکال و نمودارها

شکل ۱-۱: نمائی از ارتفاع آلوده شده با نفت در ساحل مربوط به حادثه *Exxon Valdez* در سال ۱۹۸۹. ٤

شکل ۱-۲: مناطقی که در آنها پسمانده‌های نفتی (الف) و قیر (ب) مشاهده شده است. ٤

شکل ۱-۲: مناطقی که در آنها پسمانده‌های نفتی (الف) و قیر (ب) مشاهده شده است. ٥

شکل ۱-۳: ساختار فازهای مختلف و انتقال جرم بین آنها ۷

شکل ۱-۵: نمائی از مقطع قائم آب و لایه اختلاط ۱۰

شکل ۱-۶: نمودار جریان مدل عددی شبیه‌سازی انتشار نفت در محیط دریا ۱۱

شکل ۲-۱: نمائی از نحوه گسترش نفت در دو حالت یک بعدی و شعاعی ۱۷

شکل ۳-۱: تاثیر طول هموارسازی (h) بر تغییرات تابع هموارساز (تابع *cubic spline*). ٤۳

شکل ۳-۲: قلمرو تاثیر ذره i زمانی که $h = 1.4\Delta p$ انتخاب شود (Monaghan، 1994). ٤۳

شکل ۳-۳ : نمودار جریان حل معادلات ناویر استوکس به روش صریح Leap-Frog (Wit، 2006). ٤۸

شکل۳-۴: نحوه مدلسازی مرزهای بسته ٥۱

شکل ۳-۵: گسسته سازی محیط پیوسته و جایگزینی آن با مجموعه ذرات مجزا ٥۳

شکل ۳-۶: چگونگی تقسیم‌بندی فضای اشغال شده توسط ذرات و یافتن ذرات همسایه ذره درون دایره. ٥٤

شکل۳-۷: الگوریتم حل با استفاده از روش SPH. ٥٥

شکل ۳-۸: مخزن مورد استفاده در شبیه‌سازی شکست سد. ٥۷

شکل ۳-۹: تغییر ارتفاع سطح آب در نقاط H1 (الف) و H2 (ب). نتایج با استفاده از ذرات با اندازه‌های مختلف به دست آمده‌اند. ٥۸

شکل ۳-۱۰: مقایسه نتایج شکست سد در مدل SPH (C-SPH) و کارهای دیگر ٥۹

شکل ۳-۱۱: مقایسه فشار و سرعت در دو مدل SPH تراکم‌پذیر(C-SPH) و SPH تراکم‌ناپذیر (I-SPH) ٦۰

شکل ۳-۱۲: جریان بین دو صفحه موازی ٦۲

شکل ۳-۱۳: شکل موج منفرد (solitary)، پارامترهای به کار رفته در معادلات و نحوه مدلسازی آزمایشگاهی. ٦۳

شکل ۳-۱۴: مقایسه نتایج مدل SPH (با استفاده از معادله خطی Rayleigh) با نتایج آزمایشگاهی براساس معادلات مختلف حرکت پارو ٦۷

شکل ۳-۱۵: نتایج شبیه‌سازی عددی با استفاده از SPH؛ پروفیل سطح آزاد و خطوط هم‌فشار در انتشار موج

منفرد..... ۷۰
شکل ۳-۱۶: نتایج شبیه‌سازی عددی با استفاده از SPH؛بردارهای سرعت در انتشار موج منفرد بر روی ساحل شیبدار. ۷۱
شکل ۳-۱۷: بردارهای سرعت در حین حرکت موج منفرد بر روی ساحل شیبدار. بزرگنمایی محدوده‌های نشان داده شده در شکل (۳-۱۶)..... ۷۲
شکل ۳-۱۸: تغییرات دامنه و سرعت حرکت موج منفرد در طول کانال ۷۳
شکل ۳-۱۹: تغییرات دامنه و سرعت حرکت موج منفرد در طول کانال به ازای d=0.5m ، شیب ساحل 1:7.22 و $\varepsilon = 0.8$ ۷۳
شکل ۳-۲۰: تغییرات پروفیل سطح آب در نقاط مختلف با زمان. شرایط مشابه شکل (۳-۲۱) است..... ۷۴
شکل ۳-۲۱: مقایسه سرعت افقی (ux) و قایم (uz) ذرات آب در شکست موج..... ۷۵
شکل ۳-۲۲: پروفیل سطح آب و خطوط هم‌فشار در مراحل مختلف شکست موج منفرد. d=0.5 m، $\varepsilon = 0.8$ و تعداد ذرات ۷۵۴۳..... ۷۶
شکل۳-۲۳: سرعت موج منفرد در مراحل مختلف شکست موج برای مثال مذکور در شکل (۳-۲۵)..... ۷۸
شکل ۳-۲۴: الف) طرح شماتیک عملکرد مخزن موجساز، ب) مخزن موجساز ساخته‌شده..... ۸۱
شکل ۳-۲۵: پروفیل سطح آب در انتشار موج سینوسی پس در نوسان ششم پاروی موجساز؛ الف) آزمایشگاهی، ب) عددی SPH و ج) مقایسه نتایج الف و ب..... ۸۲
شکل ۳-۲۶: حبابی از سیال سبک B درون سیال سنگین A قرار دارد. ناپایداری مدل استاندارد SPH در شرایط مختلف..... ۸۴
شکل ۳-۲۷: الف) مدلسازی صعود حباب هوا درون محیط آب ($\rho_B / \rho_A = 0.001$) با مدل SPH بعد از اعمال ضرایب (k_d و k_I) . ب) شبیه‌سازی صعود حباب سیال سبک درون سیال سنگین ($\rho_B / \rho_A = 0.1$)بدون اعمال ضرایب تصحیح (k_d و k_I)..... ۸۶
شکل ۳-۲۸: شکل جریان دوفازی که برای نوسان بیضی به کار برده شده است..... ۸۸
شکل ۳-۳۰: مقایسه تغییرات سرعت در جهت x با زمان در نقاط o، c و d و e نشان داده شده در شکل(۳-۳۰ الف)..... ۹۱
شکل ۳-۳۱: مقایسه فشار در نقاط c (سمت راست) و d (سمت چپ) برای شرایط شکل (۳-۳۰ الف).. ۹۲
شکل ۳-۳۲: نوسان بیضی در جریان دوفازی در زمانهای مختلف..... ۹۳
شکل ۳-۳۳: مقادیر kd به ازای Δp/R های مختلف ۹۴
شکل ۳-۳۴: تصویر عکسبرداری شده از حرکت حباب هوا در نیتروبنزن ۹۶
شکل ۳-۳۵: نحوه صعود حباب هوا درون مخزن آب در زمانهای مختلف مدلسازی شده با مدل SPH... ۹۷

شکل ۳-۳۶: تغییر موقعیت پیشانی حباب با زمان براساس رابطه تحلیلی و مدل SPH ۹۷
شکل ۳-۳۷: مقادیر مختلف k_1 به ازای نسبتهای چگالی و اندازه ذرات مختلف که از مقایسه نتایج مدل SPH اصلاح‌شده با حل تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است. ۹۸
شکل ۳-۳۸: جریان غیرتبادلی، مدل آزمایشگاهی به کار برده شده توسط Gröbelbauer (۱۹۹۳)..... ۹۹
شکل ۳-۳۹: تغییر موقعیت پیشانی جریان سیال سنگین: مقایسه نتایج مدل SPH با نتایج آزمایشگاهی.... ۱۰۲
شکل ۳-۴۰: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی اعداد فرود جریان سیال سنگین و سیال سبک: الف) فرود در جبهه سیال سبک ب) فرود در جبهه سیال سنگین..... ۱۰۳
شکل ۳-۴۱: مقایسه چرخش(vorticity) جریان در مرز دو سیال ۱۰۴
شکل ۳-۴۲: مقایسه شکست سد درون مخزن بسته ۱۰۶
شکل ۳-۴۴: مقایسه ارتفاع آب در محلهای H1 و H2 برای مساله شکست سد..... ۱۰۷
شکل ۳-۴۵: تغییرات فشار در نقطه P2 برای مساله شکست سد..... ۱۰۸
شکل ۳-۴۶: مقایسه نیمرخ سطح آزاد جریان آب در شکست سد. الف) $t\sqrt{g/h}=4.6$ ب) $t\sqrt{g/h}=5.64$ ج) $t\sqrt{g/h}=6.48$ د) $t\sqrt{g/h}=7.14$ ۱۱۰
شکل ۳-۴۷: خطای نسبی کل (E) در مدل SPH دوفازی برای شبیه‌سازی نوسان بیضی . h/R نسبت طول هموارساز به شعاع اولیه دایره و dp/R نسبت فاصله اولیه بین ذرات به شعاع اولیه دایره می‌باشد. ۱۱۱
شکل ۳-۴۴: نمودار تاثیر تعداد ذرات بر تغییرات زمان اجرای برنامه (CPU time) و زمان شبیه‌سازی مدل. ۱۱۲
شکل ۴-۱: پخش لکه نفتی تحت اثر موج با پریود ۳ ثانیه و ارتفاع ۰/۶ متر در طول یک نوسان موج.... ۱۱۶
شکل ۴-۲: پخش لکه نفتی تحت اثر موج با پریود ۳ ثانیه و ارتفاع ۰/۶ متر در طول یک نوسان موج.... ۱۱۷
شکل ۴-۳: پخش لکه نفتی در اثر موج منظم با پریود ۳ ثانیه و ارتفاع ۰/۶ متر..... ۱۱۸
شکل ۴-۴: مقایسه سرعت انتقال جرم در مدل SPH با حل تحلیلی بر اساس تئوری مرتبه سوم استوکس ۱۱۹
شکل ۴-۵: پروفیل حرکت لکه نفتی در طول فلوم تحت اثر موج منظم سینوسی در زمانهای ۰، ۳، ۹، ۱۵، ۲۱ و ۳۳ ثانیه. ۱۲۰
شکل ۴-۶: نمای یک بوم جمع‌آوری نفت..... ۱۲۰
شکل ۴-۷: شبیه‌سازی بوم در مدل SPH. ۱۲۲
شکل ۴-۸: نمای مخزن شبیه‌سازی عددی انتشار نفت تحت اثر موج منظم و در مجاورت بوم شناور. ۱۲۳
شکل ۴-۹: حرکت لکه نفتی در مجاورت بوم در اولین پریود از نوسان موج با پریود ۳ ثانیه و ارتفاع ۰/۸

متر. ۱۲٤
شکل ۴-۱۰: استغراق بوم و از سرگذری نفت برای موجی با ارتفاع ۱ متر و پریود ۳ ثانیه در دومین پریود از نوسان موج. ۱۲٤
شکل ۴-۱۱: تغییرات لکه نفتی در مجاورت بوم شناور در پریودهای مختلف موج. پریود موج s ۳ و ارتفاع آن m ۰/۸ است. ۱۲۵
شکل ۴-۱۲: مراحل مختلف عبور نفت از بوم ۱۲٦
شکل ۴-۱۳: نحوه حرکت لکه نفتی در مجاورت بوم و تحت اثر موج سینوسی با پریود ۳ ثانیه و ارتفاع ۰/۸ متر. ۱۲۷
شکل ۴-۱۴: توزیع فشار (بر حسب پاسکال) در ذرات آب ونفت در پریود اول نوسان موج سینوسی با پریود ۳ ثانیه و ارتفاع ۰/۸ متر. ۱۲۸
شکل ۴-۱۵: تغییرات سرعت با زمان برای نقطه به مختصات (۰/۵و۴) ۱۲۹
شکل۴-۱۶: تغییرات فشار و سرعت با زمان در نقطه به مختصات (۱/۵ و ۴) درون فلوم ۱۳۰
شکل ۴-۱۷: تغییرات تراز سطح آب و فشار در نقطه (۰/۵ و ۴)، مقایسه با نتایج حل تحلیلی از تئوری امواج دامنه کوتاه. ۱۳۰
شکل ۴-۱۸: تغییرات سرعت و فشار در نقاط مختلف جریان ۱۳۱
شکل ۴-۱۹: بردارهای سرعت در مجاورت بوم و در انتهای شیب ساحل برای موج با پریود ۳ ثانیه و ارتفاع ۰/۸ متر در طول پریود پنجم نوسان موج. ۱۳۲
شکل ۴-۲۰: مسیر حرکت ذرات مختلف در طول نوسانات موج. الف) مخزن بدون بوم. ب) مخزن با وجود بوم ۱۳۳
شکل۴-۲۱: مخزن مورد استفاده در بررسی اختلاط قایم نفت و آب ۱۳۵
شکل ۴-۲۲: تغییرات کسر جرمی نفت در لایه نفت سطحی (Ms/Ma) و در لایه اختلاطی (Me/Ma) در مقابل ضریب اختلاط مقایسه نتایج مدل SPH با حل تحلیلی Tkalich (۲۰۰۶). ۱۳۵
شکل ۴-۲۳: مقایسه کسر جرمی ذرات نفت در لایه اختلاطی با نتایج عددی مدل Tkalich(۲۰۰۶)، ۱۳٦
شکل ۴-۲۴: تغییرات کسر جرمی نفت در لایه اختلاطی در مقابل نسبت لزجت سینماتیکی نفت به آب: مقایسه با نتایج مدل Tkalich(۲۰۰۶). ۱۳۷
شکل ۵-۱: طرح شماتیک دینامیک فازهای مختلف نفت در ستون آب. ۱٤۲
شکل ۵-۲: ساختار لایه اختلاط و شبکه محاسبات ۱٤۵
شکل ۵-۳: ساختار شبکه محاسباتی ۱٤٦
شکل ۵-۴: الگوی محاسباتی مربوط به طرح Davis و Moore (۱۹۸۲). نقاط سیاه برای محاسبهٔ جریان به

کار می‌روند..... ۱۴۸
شکل ۵-۵: الگوی محاسباتی برای روش Leonard و Niknafs (۱۹۹۰) و Rasch (۱۹۹۴)،..... ۱۴۸
شکل ۵-۶: طرح مورد استفاده در تکنیک لاگرانژی..... ۱۴۹
شکل ۵-۷: الگوی محاسباتی برای روش TOP10-A..... ۱۵۲
شکل ۵-۸: الگوی محاسباتی برای روش TOP10-B..... ۱۵۳
شکل ۵-۹: الگوی محاسباتی برای روش UTOPIA (Leonard et al., 1995)..... ۱۵۴
شکل ۵-۱۰: الگوی محاسباتی برای روش TOP-12..... ۱۵۵
شکل ۵-۱۱: نمودار ضریب تقویت برای طرح TOP12 در مختصات قطبی رسم شده است. ۱۵۷
شکل ۵-۱۲: ضریب تقویت که برای طرح TOP12 رسم شده است. ۱۵۸
شکل ۵-۱۳: چگونگی مدلسازی شرایط مرزی..... ۱۵۹
شکل ۵-۱۴: نمودار جریان مدل سه‌بعدی چندمولفه‌ای پخش و جابجایی نفت..... ۱۶۱
شکل ۵-۱۵: پخش خالص (E=3.212 m2/s) با مدل دوبعدی توسعه داده شده، برای یک لکه با ضخامت اولیه ۰/۰۱۵..... ۱۶۲
شکل۵-۱۶: مقایسه نتایج حل تحلیلی (شکل الف) پخش یک بعدی با نتایج حل دوبعدی توسط مدل(شکل ب) ۱۶۳
شکل ۵-۱۷: مستطیل با ضخامت اولیه برابر واحد که برای انجام تستهای مختلف به کار رفته است..... ۱۶۴
شکل۵-۱۸: آزمایش جابجایی خالص در یک میدان چرخشی با سرعت زاویه ای ثابت با استفاده از روش TOP12. چرخش مکعب مستطیل پس از ۲۸ روز نشان داده شده است..... ۱۶۵
شکل۵-۱۹: مقایسه نتایج روشهای مختلف برای تست چرخش یک صفحه مستطیلی با ضخامت ثابت در جریان چرخشی با سرعت زاویه‌ای ثابت..... ۱۶۵
شکل۵-۲۰: حرکت لکه تحت اثر جابجایی و پخش توام در محیط جریانی با سرعت افقی $u=0.1m/s$ ، $Wy=3m/s$ و $E=3.212\ m^2/s$..... ۱۶۶
شکل ۵-۲۱: تاثیر طرحهای مختلف عددی در شبیه‌سازی پخش لکه نفت سطحی: مرتبه اول، دوم و سوم به ترتیب بیانگر درجه چمدجمله‌ای میانیابی ترمهای جابجایی می‌باشند..... ۱۶۷
شکل ۵-۲۲: مقایسه نتایج شکل (۵-۱۴) با مدل Fay (۱۹۷۱)..... ۱۶۷
شکل ۵-۲۳: تغییرات پروفیل ضخامت لکه نفتی در مجاورت مرز دیواره ۱۶۹
شکل ۵-۲۴: پخش افقی لکه نفت : سمت راست مدل تفاضل مرکزی (CSFT) سمت چپ مدل..... ۱۷۰
شکل ۵-۲۵: تاثیر نحوه مدلسازی ترمهای پخش بر الف) ضخامت لکه نفتی ب)امولسیون و ج) کل نفت موجود در محیط..... ۱۷۱

شکل ۵-۲۶: نحوه توزیع غلظت امولسیون (برحسب کیلوگرم نفت در مترمکعب آب) در لایه اختلاطی زیر سطح لکه نفتی در حالتی که برای امولسیون جابجایی و پخش منظور نشده است ۱۷۲
شکل ۵-۲۷: نحوه توزیع غلظت امولسیون (برحسب کیلوگرم نفت در مترمکعب آب) در لایه اختلاطی زیر سطح لکه نفتی در حالتی که برای امولسیون جابجایی و پخش منظور شده است. ۱۷۳
شکل ۵-۲۸: تغییرات فازهای مختلف در انتشار نفت..... ۱۷٤
شکل ۵-۲۹: پروفیل قایم فاز امولسیون ۵ ساعت پس از ریزش اولیه ۱۷۵
شکل ۵-۳۰: پروفیل قایم فاز تعلیق و انحلال ۱۰ ساعت پس از ریزش اولیه ۱۷۵

فهرست جداول

جدول ۱-۱: آلودگی‌های نفتی با حجم بیش از ۱۱ میلیون گالن که به ترتیب حجم آلودگی مرتب شده‌اند. ۲۰
جدول ۲-۱: فازهای گسترش نفت بوسیله نیروهای مکانیکی براساس تئوری Fay ۱۷
جدول ۲-۲: مروری بر مهمترین منابع در مورد انتشار نفت. ۳۰
جدول ۳-۱: توابع همواریاب دوبعدی (Monaghan، 1994، Liu & Liu، 2003)..... ۴۲
جدول ۳-۲: روشهای مختلف حل معادله حرکت پارو در تولید موج منفرد (Katell & Eric، 2002). .. ۶۵
جدول ۳-۳: ضرایب تابع $\alpha \tanh(\gamma t)$ که از انطباق بر حل عددی موج منفرد Rayleigh به دست آمده است. ۶۶
جدول۳-۴: مقادیر سرعت انتشار موج منفرد با شرایط مختلف به دست آمده از نتایج مدل SPH..... ۶۸
جدول ۳-۵: مقادیر پارامتر چگالی و اعداد رینولدز در آزمایشهای Gröbelbauer و همکاران (۱۹۹۳) و مدل عددی SPH..... ۱۰۰
جدول ۳-۶: ضریب همبستگی و درصد خطای حلهای عددی با نتایج آزمایشگاهی Zhou و همکاران (۱۹۹۹)..... ۱۰۹
جدول ۴-۱: مقادیر rmax، K، و Λ که با استفاده از روابط مختلف به دست آمده‌اند..... ۱۳۸