



دانشکده مهندسی  
گروه مهندسی عمران

رساله دکتری

شبیه سازی دو بعدی اندر کنش سیال و جسم جامد در  
پدیده های اسلاشینگ و برخورد موج و سازه

حسن ساقی

شهریور ۱۳۹۱

شبیه سازی دو بعدی اندر کنش سیال و جسم جامد در  
پدیده های اسلاشینگ و برخورد موج و سازه

حسن ساقی

۱۳۹۱



دانشکده مهندسی - گروه مهندسی عمران

رساله دکتری در رشته مهندسی عمران - آب

# شبیه سازی دو بعدی اندر کنش سیال و جسم جامد در پدیده های اسلاشینگ و برخورد موج و سازه

حسن ساقی

استاد راهنما

دکتر محمد جواد کتابداری

اساتید مشاور

دکتر منصور قلعه نوی

دکتر روزبه پناهی

این پایان نامه با عنوان « شبیه سازی دو بعدی اندر کنش سیال و جسم جامد در پدیده های همزمان اسلاشینگ و برخورد موج و سازه» توسط «حسن ساقی» در تاریخ ۹۱/۰۵/۱۵ با نمره و درجه ارزشیابی در حضور هیات داوران با موفقیت دفاع شد.

#### هیات داوران:

ردیف	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	سمت در هیات	امضاء
۱	آقای دکتر محمد جواد کتابداری	دانشیار	استاد راهنما	
۲	آقای دکتر روزبه پناهی	استادیار	استاد مشاور	
۳	آقای دکتر منصور قلعه نوی	استادیار	استاد مشاور	
۴	آقای دکتر محمود فغفور مغربی	استاد	استاد مدعو (داور) داخلی	
۵	آقای دکتر محمد پسندیده فرد	دانشیار	استاد مدعو (داور) داخلی	
۶	آقای دکتر حبیب حکیم زاده	دانشیار	استاد مدعو (داور) خارجی	
۷	آقای دکتر هاشم شریعتمدار	دانشیار	نماینده تحصیلات تکمیلی	

## صفحه تعهد نامه

صفحه تعهد نامه به صورت زیر تهیه شده، به امضاء دانشجو می رسد:

### تعهد نامه

- عنوان پایان نامه: شبیه سازی دو بعدی اندر کنش سیال و جسم جامد در پدیده های همزمان اسلاشینگ و برخورد موج و سازه
- اینجانب حسن ساقی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی عمران - گرایش آب و هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد تحت راهنمایی دکتر محمد جواد کتابداری متعهد می شوم:
- نتایج ارائه شده در این پایان نامه حاصل مطالعات علمی و عملی اینجانب بوده، مسئولیت صحت و اصالت مطالب مندرج را به طور کامل بر عهده می گیرم.
  - در خصوص استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مراجع مورد نظر استناد شده است.
  - مطالب مندرج در این پایان نامه را اینجانب یا فرد دیگری به منظور اخذ هیچ نوع مدرک یا امتیازی تاکنون به هیچ مرجعی تسلیم نکرده است.
  - کلیه حقوق معنوی این اثر به دانشگاه فردوسی مشهد تعلق دارد. مقالات مستخرج از پایان نامه، ذیل نام دانشگاه فردوسی مشهد (Ferdowsi University of Mashhad) به چاپ خواهد رسید.
  - حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت خواهد شد.
  - در خصوص استفاده از موجودات زنده یا بافتهای آنها برای انجام پایان نامه، کلیه ضوابط و اصول اخلاقی مربوطه رعایت شده است.

تاریخ

نام و امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) به دانشگاه فردوسی مشهد تعلق دارد و بدون اخذ اجازه کتبی از دانشگاه قابل واگذاری به شخص ثالث نیست.

استفاده از اطلاعات و نتایج این پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

## چکیده

هدف از انجام رساله حاضر، شبیه سازی دوبعدی اندرکنش سیال و جسم شناور در پدیده های اسلاشینگ و برخورد موج و سازه در دو حالت سیال ایده آل و لزج است. در حالت سیال ایده آل، پدیده اسلاشینگ<sup>۱</sup> در یک مخزن مستطیلی مدل سازی و مدل برای مقاطع دوزنقه ای با دیواره خطی و غیرخطی توسعه داده شده و مزایای مقاطع پیشنهادی در مقایسه با مقطع مستطیلی مورد بررسی قرار گرفت. در جهت مدل سازی های فوق، از دو روش المان مرزی و اجزاء محدود جهت حل معادلات لاپلاس و شرط مرزی دینامیکی سطح آزاد استفاده شد. سپس، مدل عددی جهت مدل سازی اندرکنش موج و جسم شناور با استفاده از تئوری تفرق تهیه و با استفاده از نتایج ارائه شده توسط سایر محققین معتبر سازی شد. در حالت سیال لزج، معادلات پیوستگی و ناویر- استوکس<sup>۲</sup> به عنوان معادلات حاکم مورد استفاده قرار گرفت. جهت حل این معادلات از روش  $SMAC$ <sup>۳</sup> استفاده شد. به منظور مدل سازی سطح آزاد، از روش کسر حجمی که یکی از روش های تسخیر حجمی در مدل سازی سطح آزاد است، استفاده شد. بدین منظور از الگوریتم یانگز<sup>۴</sup> و  $FCT$ <sup>۵</sup> که به ترتیب از روش های موسوم به  $PLIC$ <sup>۶</sup> و  $SLIC$ <sup>۷</sup> هستند، استفاده شد. سپس، با استفاده از روابط تئوری امواج، موج منظم منظم خطی<sup>۸</sup>، غیرخطی تنها<sup>۹</sup> و موج نامنظم در یک مخزن موج ساز عددی تولید شد. بدین منظور، ابتدا زیربرنامه مربوط به حل معادلات ناویر- استوکس تهیه و با استفاده از تست های مبنایی همچون حفره<sup>۱۰</sup>، داکت و پله معتبر سازی شد. در ادامه، زیربرنامه مدل سازی سطح آزاد بر اساس روش کسر حجمی<sup>۱۱</sup> ( $VOF$ ) تهیه و به کمک تست های مبنایی همچون انتقال، برش و دوران معتبر سازی شد. در نهایت، با ترکیب زیربرنامه های فوق، مدل مربوط به شبیه سازی جریان سطح آزاد تهیه و با استفاده از تست شکست سد<sup>۱۲</sup> معتبر سازی شد. در این مرحله، با تغییر شرایط اولیه و مرزی در محدوده مورد مطالعه و اضافه نمودن زیربرنامه مربوط به تولید موج در مرز ورودی و نیز شرط مرزی باز در انتهای محدوده جهت خروج امواج تولیدی،

---

<sup>1</sup> Sloshing

<sup>2</sup> Navier- Stokes Equations (NSE)

<sup>3</sup> Simplified Marker And Cell

<sup>4</sup> Youngs

<sup>5</sup> Flux Corrected Transport

<sup>6</sup> Piecewise Linear Interface Construction

<sup>7</sup> Simple Line Interface Construction

<sup>8</sup> Airy

<sup>9</sup> Solitary

<sup>10</sup> Cavity

<sup>11</sup> Volume Of Fluid (VOF)

<sup>12</sup> Breaking Dam

موج مورد نظر تولید و به کمک روابط تئوری امواج معتبرسازی شدند. در ادامه، اندرکنش جسم شناور و موج با استفاده از تکنیک حوزه حل مجازی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، علاوه بر ارائه مدل‌های اصلاح شده سطح آزاد شامل مدل  $MYVM$ <sup>13</sup> و  $MFCT$ <sup>14</sup>، روشهای جدیدی نیز جهت محاسبه انحنا سطح آزاد ارائه و دقت آنها در مقایسه با روش متداولی که با استفاده از روش VOF محاسبه می شود مورد بحث قرار گرفته است. همچنین مقطع دوزنقه ای جهت طراحی مخازن پیشنهاد و عملکرد آن در مقایسه با مخازن مستطیلی و در مواجهه با پدیده اسلاشینگ بررسی و مزایای آن مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه، مدل عددی به منظور تولید امواج منظم، تنها و نامنظم<sup>15</sup> تهیه و نتایج مدل با روابط تئوری امواج معتبرسازی شد. در نهایت، تکنیک حوزه حل مجازی جهت شبیه سازی برخورد موج و سازه مورد استفاده قرار گرفت.

**کلمات کلیدی:** پدیده اسلاشینگ، کوپل روش المان مرزی- اجزاء محدود، کوپل اثر موج- اسلاشینگ، مخازن دوزنقه ای، مخزن موجساز عددی، روش حوزه حل مجازی.

---

<sup>13</sup> Modified Youngs VOF Method

<sup>14</sup> Modified Flux Corrected Transport

<sup>15</sup> Numerical Wave Tank (NWT)

حال که با الطاف حضرت حق، انجام این رساله به پایان رسیده است، خدای را شاکرم که این فرصت را در اختیار من قرار داد تا افتخار این را داشته باشم که در محضر استاد کرامت‌دور جناب آقای دکتر کتبداری، علاوه بر آشنایی با اصول تحقیق، درس زندگی، صبر، تلاش و پایداری را یاد بگیرم. عشق به تحقیق را یاد بگیرم. یاد بگیرم تلاش و پشتکار نخستین گام در رسیدن به هر هدف مقدسی است. از خداوند متعال می‌خواهم این افتخار را به من بدهد تا در محیط مقدس دانشگاه و در عرصه تحقیق بتوانم ساگرد خلفی برای این استاد بزرگوار باشم.

بعینین از جناب آقای دکتر روزبه پناهی بابت راهنمایی‌های ارزنده‌شان شاکرم می‌نمایم. از تمامی اساتید عزیز می‌نمزم که در دوران تحصیل مرا علم آموختند قدر دانی می‌نمایم.

در پایان از همسر عزیز و دختر گلم غزل جان که در دوران تحصیل مرا همراهی نموده و با وجود تمامی مشکلات و کمبودها مرا پشتیبانی نمودند شاکرم و قدر دانی می‌کنم. بی‌شک بدون حمایت‌های آنها انجام این کار ممکن نبود.



**فصل اول: مقدمه**

۱	مقدمه
۲	۱-۱- پدیده اسلاشینگ
۲	۲-۱- برخورد موج و سازه
۵	۳-۱- تحقیقات انجام گرفته تاکنون
۵	۱-۳-۱- تحقیقات انجام گرفته در مورد پدیده اسلاشینگ
۶	۲-۳-۱- تحقیقات انجام گرفته در مورد برخورد موج و سازه
۹	۴-۱- شرح مسئله و فرضیات به کار رفته

**فصل دوم: مدل‌های ریاضی**

۱۰	مقدمه
۱۰	۱-۲- مدل ریاضی با فرض سیال ایده آل
۱۰	۱-۱-۲- مدل عددی جهت بررسی برخورد موج و سازه شناور- تئوری تفرق
۱۸	۲-۱-۲- مدل عددی جهت بررسی پدیده اسلاشینگ در حالت سیال ایده آل
۲۴	۳-۱-۲- مدل عددی جهت بررسی اثر همزمان موج و اسلاشینگ بر روی مخزن شناور مهار شده در حالت سیال ایده آل
۲۵	۲-۲- مدل عددی سیال لزج
۲۶	۱-۲-۲- زیربرنامه حل معادلات ناویر- استوکس
۳۰	۲-۲-۲- زیربرنامه مدل‌سازی سطح آزاد
۳۱	۱-۲-۲-۲- روش FCT
۳۲	۲-۲-۲-۲- روش Youngs
۳۵	۳-۲-۲- مدل‌سازی جریانهای سطح آزاد
۳۷	۱-۳-۲-۲- ارائه روشی نوین جهت محاسبه انحناء در جریانات سطح آزاد
۳۷	۱-۱-۳-۲-۲- روش کسر حجمی جهت محاسبه انحناء سطح آزاد
۳۹	۲-۱-۳-۲-۲- روش پارامتریک جهت محاسبه انحناء سطح آزاد (روش پیشنهادی)
۴۸	۴-۲-۲- تولید امواج خطی و غیرخطی
۴۹	۱-۴-۲-۲- تولید امواج خطی
۴۹	۲-۴-۲-۲- تولید موج تنها
۵۱	۵-۲-۲- شبیه سازی جسم شناور در داخل محدوده سیال

**فصل سوم: نتایج شبیه سازی برای پدیده اسلاشینگ**

۵۴	مقدمه
۵۸	۱-۳- مخازن دوزنقه ای با دیواره خطی و عرض ثابت
۶۲	۲-۳- مخازن دوزنقه ای با دیواره غیرخطی

۶۴	۳-۳- مقطع دوزنقه ای با دیواره خطی و عرض متغیر
۶۴	۳-۴- مخازن مستطیلی با نسبت ابعاد بهینه
۷۵	۳-۵- بررسی تأثیر مشخصات حرکت مخزن در پدیده اسلاشینگ
۷۵	۳-۵-۱- دامنه حرکت مخزن
۷۷	۳-۵-۲- فرکانس حرکت مخزن

### فصل چهارم: نتایج شبیه سازی برای برخورد موج و سازه

۸۲	مقدمه
۸۲	۴-۱- نتایج مدل سیال ایده آل
۸۲	۴-۱-۱- شبیه سازی برخورد موج و سازه
۸۶	۴-۱-۲- اثر همزمان موج و اسلاشینگ بر روی مخزن شناور مهار شده
۹۰	۴-۲- نتایج مدل سیال لزج
۹۰	۴-۲-۱- تولید موج با استفاده از مخزن موجساز عددی
۹۲	۴-۲-۱-۱- تولید موج منظم
۹۴	۴-۲-۱-۲- تولید موج منفرد
۹۶	۴-۲-۱-۳- تولید موج نامنظم
۹۸	۴-۲-۲- شبیه سازی برخورد موج و سازه شناور

### فصل پنجم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

۱۰۳	مقدمه
۱۰۳	۵-۱- نتایج به دست آمده از مدل سیال ایده آل
۱۰۴	۵-۲- نتایج به دست آمده از مدل سیال لزج
۱۰۶	۵-۳- ارائه پیشنهادات جهت ادامه تحقیقات

### مراجع

پیوست: معتبر سازی مدل های عددی

## فهرست شکلها

## شماره صفحه

- شکل ۱-۱: استفاده از شبکه نامنظم جهت مدلسازی حرکت یک جسم در داخل سیال ۴
- شکل ۱-۲: حرکت یک جسم سه بعدی در درجات آزادی مختلف ۱۰
- شکل ۲-۲: شکل شماتیک جسم شناور مهار شده ۱۱
- شکل ۳-۲: المانهای به کار رفته جهت مدلسازی مرز ناحیه حل ۱۴
- شکل ۴-۲: تعریف پارامترهای بکار رفته در المانهای خطی در تحلیل معادله لاپلاس ۱۵
- شکل ۵-۲: موقعیت گره های مختلف جهت محاسبه تابع پتانسیل و جابجایی سطح آزاد در مدلسازی پدیده اسلاشینگ ۲۳
- شکل ۶-۲: نمونه ای از شبکه های مورد استفاده جهت گسسته سازی معادلات ناویر-استوکس الف) شبکه منظم ب) شبکه نامنظم ۲۷
- شکل ۷-۲: نمونه ای از شبکه های مورد استفاده جهت گسسته سازی معادلات ناویر-استوکس الف: شبکه جابجا شده ب: شبکه متمرکز ۲۷
- شکل ۸-۲: شبکه مورد استفاده جهت گسسته سازی و حل معادلات ناویر-استوکس ۲۸
- شکل ۹-۲: حالت های مختلف سطح آزاد در روش FCT ۳۱
- شکل ۱۰-۲: حالت های مختلف سطح آزاد در روش Youngs ۳۲
- شکل ۱۱-۲: مقدار فلاکس عبوری از وجه سمت راست سلول برای حالت نشان داده شده (محدوده دوهاشوره) ۳۳
- شکل ۱۲-۲: محاسبه سرعت در مرکز ثقل سیال جهت محاسبه فلاکس در روش MYVM ۳۴
- شکل ۱۳-۲: مدلسازی سطح آزاد در روش چهار نقطه ای ۳۹
- شکل ۱۴-۲: مدلسازی سطح آزاد در روش سه خطی ۴۲
- شکل ۱۵-۲: دایره و شبکه بندی انجام شده جهت محاسبه انحناء در سلولهای سطحی ۴۴
- شکل ۱۶-۲: مقایسه انحناء به دست آمده برای دایره با استفاده از روشهای مختلف و ابعاد مختلف شبکه: الف) ۰/۰۵ متر، ب) ۰/۱ متر، ج) ۰/۱۵ متر و د) ۰/۲ متر ۴۴
- شکل ۱۷-۲: مقایسه معیارهای خطا برای روشهای مختلف جهت محاسبه انحناء در دایره ۴۵
- شکل ۱۸-۲: بیضی و شبکه بندی انجام شده جهت محاسبه انحناء در سلولهای سطحی ۴۵
- شکل ۱۹-۲: مقایسه انحناء به دست آمده برای سطح بیضی با استفاده از روشهای مختلف و ابعاد مختلف شبکه: الف) ۰/۰۵ متر، ب) ۰/۱ متر، ج) ۰/۱۵ متر و د) ۰/۲ متر ۴۶
- شکل ۲۰-۲: مقایسه معیارهای خطا برای روشهای مختلف جهت محاسبه انحناء در بیضی ۴۷
- شکل ۲۱-۲: مقایسه انحناء به دست آمده برای منحنی سینوسی با استفاده از روشهای مختلف ۴۷
- شکل ۱-۳: جابجایی سطح آزاد در محل تماس با دیواره سمت راست به ازاء طولهای مختلف شبکه ۵۴
- شکل ۲-۳: جابجایی سطح آزاد در محل تماس با دیواره سمت راست به ازاء گامهای زمانی مختلف ۵۵
- شکل ۳-۳: مقایسه نتایج مدل عددی تهیه شده برای بررسی پدیده اسلاشینگ با نتایج ارائه شده توسط ناکایاما و واشیزو ۵۵
- شکل ۴-۳: وضعیت سطح سیال در پدیده اسلاشینگ در زمانهای مختلف ۵۶
- شکل ۵-۳: مخازن دوزنقه ای با دیواره: الف) خطی، ب) غیر خطی ۵۷
- شکل ۶-۳: چیدمان مخازن دوزنقه ای با دیواره خطی و غیر خطی ۵۷

- شکل ۳-۷: جابجایی گره قرار گرفته بر روی سطح آزاد الف)  $X = 0.002 \sin(5.5t), \theta = 90^\circ$  (ب) ۵۸
- شکل ۳-۸: حداکثر جابجایی سطح آزاد در پدیده اسلاشینگ برای حالت‌های مختلف
- شکل ۳-۹: توزیع فشار بر روی مخزن الف)  $X = 0.002 \sin(5.5t), \theta = 90^\circ$  (ب) ۵۹
- شکل ۳-۱۰: حداکثر مقدار فشار وارد بر مخزن در پدیده اسلاشینگ به ازای مقادیر مختلف  $\theta$
- شکل ۳-۱۱: نیروی وارد بر مخزن الف)  $X = 0.002 \sin(5.5t), \theta = 90^\circ$  (ب) ۶۰
- شکل ۳-۱۲: حداکثر نیروی وارد بر بدنه مخزن در پدیده اسلاشینگ به ازای مقادیر مختلف  $\theta$
- شکل ۳-۱۳: توزیع فشار بر روی مخزن با دیواره غیرخطی با پارامتر  $a = -12$  ۶۳
- شکل ۳-۱۴: حداکثر فشار وارد بر مخزن با دیواره غیرخطی به ازای مقادیر مختلف پارامتر  $a$  ۶۳
- شکل ۳-۱۵: توزیع فشار بر روی محیط مخزن در حالت‌های مختلف: الف)  $B = 1.1m, \theta = 115^\circ$  (ب) ۶۵
- شکل ۳-۱۶: حداکثر فشار بر روی مخزن به ازای مقادیر مختلف عرض مخزن
- شکل ۳-۱۷: توزیع فشار بر روی بدنه مخزن با حجم  $0.72$  متر مکعب به ازاء نسبت‌های مختلف ابعاد
- شکل ۳-۱۸: توزیع فشار بر روی بدنه مخزن با حجم  $1/50$  متر مکعب به ازاء نسبت‌های مختلف
- شکل ۳-۱۹: مقایسه معیار  $P_{max} * P$  مخزن با حجم  $0.72$  متر مکعب بر اساس نسبت ابعاد مختلف مخزن
- شکل ۳-۲۰: مقایسه معیار  $P_{max} * P$  مخزن با حجم  $1/50$  متر مکعب بر اساس نسبت ابعاد مختلف مخزن
- شکل ۳-۲۱: توزیع فشار بر روی بدنه مخزن مستطیلی با عرض  $0.7$  متر و ارتفاع  $2/00$  متر تحت حرکت اجباری افقی به صورت  $X = A \sin(5.5t)$  به ازاء مقادیر مختلف دامنه: a)  $0.001m$ ; b)  $0.0015m$ ; c)  $0.004m$ ; d)  $0.005m$  ۷۰
- شکل ۳-۲۲: نیروی وارد بر بدنه مخزن مستطیلی با عرض  $0.7$  متر و ارتفاع  $2/00$  متر تحت حرکت اجباری افقی به صورت  $X = A \sin(5.5t)$  به ازاء مقادیر مختلف دامنه: a)  $0.001m$ ; b)  $0.0015m$ ; c)  $0.004m$ ; d)  $0.005m$  ۷۱
- شکل ۳-۲۳: حداکثر فشار بر روی بدنه مخزن مستطیلی با عرض  $0.7$  متر و ارتفاع  $2/00$  متر تحت حرکت اجباری افقی به صورت  $X = A \sin(5.5t)$  به ازاء مقادیر مختلف دامنه ۷۲
- شکل ۳-۲۴: حداکثر نیروی وارد بر بدنه مخزن مستطیلی با عرض  $0.7$  متر و ارتفاع  $2/00$  متر تحت حرکت اجباری افقی به صورت  $X = A \sin(5.5t)$  به ازاء مقادیر مختلف دامنه ۷۲
- شکل ۳-۲۵: توزیع فشار بر روی بدنه مخزن مستطیلی با عرض  $0.7$  متر و ارتفاع  $2/00$  متر تحت حرکت اجباری افقی به صورت  $X = 0.002 \sin(\omega t)$  به ازاء مقادیر مختلف فرکانس زاویه ای: a)  $\omega = 1 rad/sec$ ; b)  $\omega = 3 rad/sec$ ; c)  $\omega = 5 rad/sec$ ; d)  $\omega = 6 rad/sec$  ۷۳
- شکل ۳-۲۶: نیروی وارد بر بدنه مخزن مستطیلی با عرض  $0.7$  متر و ارتفاع  $2/00$  متر تحت حرکت اجباری ۷۴

شکل ۳-۲۷: حداکثر فشار بر روی بدنه مخزن مستطیلی با عرض ۰/۷ متر و ارتفاع ۲/۰۰ متر تحت حرکت اجباری افقی به صورت  $X = A \sin(5.5t)$  به ازاء مقادیر مختلف فرکانس زاویه ای

a)  $\omega = 1 \text{ rad/sec}$ ; b)  $\omega = 3 \text{ rad/sec}$ ; c)  $\omega = 5 \text{ rad/sec}$ ; d)  $\omega = 6 \text{ rad/sec}$

۷۴ شکل ۳-۲۸: حداکثر نیروی وارد بر بدنه مخزن مستطیلی با عرض ۰/۷ متر و ارتفاع ۲/۰۰ متر تحت حرکت

اجباری افقی به صورت  $X = A \sin(5.5t)$  به ازاء مقادیر مختلف فرکانس زاویه ای

۷۵ شکل ۳-۲۹: توزیع فشار بر روی محیط مخزن در حالت‌های مختلف: الف)

ب)  $X = 0.002 \sin(5.5t)\theta = 70^\circ$  (ج)  $X = 0.002 \sin(5.5t)\theta = 110^\circ$

۷۶ شکل ۳-۲۹: توزیع فشار بر روی محیط مخزن در حالت‌های مختلف: الف)

ب)  $X = 0.002 \sin(5.5t)\theta = 70^\circ$  (ج)  $X = 0.002 \sin(5.5t)\theta = 110^\circ$

د)  $X = 0.003 \sin(5.5t)\theta = 70^\circ$  (ه)  $X = 0.003 \sin(5.5t)\theta = 110^\circ$

و)  $X = 0.004 \sin(5.5t)\theta = 70^\circ$  (و)  $X = 0.004 \sin(5.5t)\theta = 110^\circ$

۷۷ شکل ۳-۳۰: حداکثر فشار بر روی بدنه مخزن به ازاء مقادیر مختلف دامنه حرکت

۷۷ شکل ۳-۳۱: درصد کاهش فشار حداکثر وارد بر مخزن برای مقادیر مختلف دامنه حرکت و به ازاء مقادیر

مختلف زاویه جانبی مخزن دوزنقه ای

۷۸ شکل ۳-۳۲: توزیع فشار بر روی محیط مخزن در حالت‌های مختلف: الف)

ب)  $X = 0.002 \sin(3.0t)\theta = 70^\circ$  (ج)  $X = 0.002 \sin(3.0t)\theta = 110^\circ$

د)  $X = 0.002 \sin(5.5t)\theta = 70^\circ$  (ه)  $X = 0.002 \sin(5.5t)\theta = 110^\circ$

و)  $X = 0.002 \sin(7.0t)\theta = 70^\circ$  (و)  $X = 0.002 \sin(7.0t)\theta = 110^\circ$

۷۹ شکل ۳-۳۳: حداکثر فشار بر روی بدنه مخزن به ازاء مقادیر مختلف فرکانس حرکت

۷۹ شکل ۳-۳۴: درصد کاهش فشار حداکثر وارد بر مخزن برای مقادیر مختلف فرکانس حرکت و به ازاء

مقادیر مختلف زاویه جانبی مخزن دوزنقه ای

۸۰ شکل ۳-۳۵: تاریخچه نیروی وارد بر بدنه مخزن دوزنقه ای با زاویه جانبی ۶۵ درجه، عرض ۰/۲ متر و ارتفاع

۰/۶ متر تحت حرکت نوسانی  $X = 0.002 \sin(5.5t)$

۸۳ شکل ۴-۱: مقایسه نتایج مدل و مقادیر ارائه شده توسط Sannasiraj و همکاران در محاسبه Sway RAO

۸۴ شکل ۴-۲: مقایسه نتایج مدل و مقادیر ارائه شده توسط Sannasiraj و همکاران در محاسبه Heave RAO

۸۴ شکل ۴-۳: مقایسه نتایج مدل و مقادیر ارائه شده توسط Sannasiraj و همکاران در محاسبه Roll RAO

۸۵ شکل ۴-۴: حرکت قائم مخزن (Heave RAO) به ازاء مقادیر مختلف نسبت ابعاد مخزن

۸۵ شکل ۴-۵: حرکت قائم مخزن (Sway RAO) به ازاء مقادیر مختلف نسبت ابعاد مخزن

۸۶ شکل ۴-۶: حرکت قائم مخزن (Roll RAO) به ازاء مقادیر مختلف نسبت ابعاد مخزن

۸۷ شکل ۴-۷: بررسی اثر همزمان موج و اسلاشینگ بر روی حرکت افقی (Sway) یک مخزن مستطیلی

شناور

۸۷ شکل ۴-۸: بررسی اثر همزمان موج و اسلاشینگ بر روی حرکت قائم (Heave) یک مخزن مستطیلی

شناور

۸۸ شکل ۴-۹: طیف انرژی حرکت قائم مخزن مستطیلی شناور با ابعاد مختلف ناشی از اثر همزمان موج و

اسلاشینگ

۸۹ شکل ۴-۱۰: مقایسه میزان جابجایی افقی (Sway) مخازن مستطیلی و دوزنقه ای شناور ناشی از اثر همزمان

موج و اسلاشینگ

- شکل ۴-۱۱: مقایسه میزان جابجائی قائم (Heave) مخازن مستطیلی و دوزنقه ای شناور ناشی از اثر همزمان موج و اسلاشینگ
- شکل ۴-۱۲: طیف انرژی حرکت قائم مخازن مستطیلی و دوزنقه ای شناور ناشی از اثر همزمان موج و اسلاشینگ
- شکل ۴-۱۳: شبکه متغیر با کلاستر موضعی جهت تولید موج در مخزن موجساز عددی
- شکل ۴-۱۴: شبکه متغیر با تغییرات تدریجی ابعاد شبکه جهت تولید موج در مخزن موجساز عددی
- شکل ۴-۱۵: بررسی استقلال از شبکه نتایج مدل جهت تولید موج خطی در مخزن موجساز عددی
- شکل ۴-۱۶: مقایسه الگوریتمهای مختلف VOF جهت تولید موج منظم
- شکل ۴-۱۷: مقایسه نتایج مدل جهت تولید موج خطی با استفاده از شبکه کلاستر شده موضعی و به ازاء مقادیر مختلف LCC
- شکل ۴-۱۸: مقایسه نتایج مدل جهت تولید موج خطی با استفاده از شبکه متغیر با تغییرات تدریجی و به ازاء مقادیر مختلف SRC
- شکل ۴-۱۹: بررسی استقلال از شبکه نتایج مدل جهت تولید موج تنها
- شکل ۴-۲۰: مقایسه نتایج مدل جهت تولید موج تنها با استفاده از شبکه کلاستر شده موضعی
- شکل ۴-۲۱: مقایسه نتایج مدل جهت تولید موج تنها با استفاده از شبکه متغیر با تغییرات تدریجی و به ازاء مقادیر مختلف ECC
- شکل ۴-۲۲: پروفیل موج نامنظم تولیدی به کمک مخزن موجساز عددی بر اساس طیف JONSWAP
- شکل ۴-۲۳: مقایسه طیف موج نامنظم تولیدی به کمک مخزن موجساز عددی به کمک طیف JONSWAP و مقایسه آن با طیف اصلی
- شکل ۴-۲۴: بررسی اعتبار مدل عددی تهیه شده در پیش بینی جابجایی افقی مخزن شناور
- شکل ۴-۲۵: بررسی اعتبار مدل عددی تهیه شده در پیش بینی قائم مخزن شناور
- شکل ۴-۲۶: حرکت قائم (Heave) جسم شناور با ابعاد مختلف ناشی از برخورد موجی به ارتفاع ۳ سانتیمتر و طول موج ۲/۸ متر
- شکل ۴-۲۷: حرکت قائم (Heave) جسم شناور با ابعاد مختلف ناشی از برخورد موجی به ارتفاع ۴ سانتیمتر و طول موج ۲/۸ متر
- شکل ۴-۲۸: حرکت قائم (Heave) جسم شناور با ابعاد ۲۰ سانتیمتر عرض، ۳۰ سانتیمتر ارتفاع کل و ۱۵ سانتیمتر ارتفاع آبخور ناشی از برخورد موجی به ارتفاعات مختلف
- شکل ۴-۲۹: حرکت قائم (Heave) جسم شناور با ابعاد ۲۰ سانتیمتر عرض، ۳۰ سانتیمتر ارتفاع کل و ۱۵ سانتیمتر ارتفاع آبخور ناشی از برخورد موجی با ارتفاع ۴ سانتیمتر، طول موج ۲/۸ متر و به ازاء مهارهای با سختی های مختلف

## فهرست جدولها

## شماره صفحه

۲۳	جدول ۱-۲: موقعیت گره ها جهت محاسبه پارامترهای مختلف
۳۲	جدول ۲-۲: محاسبه سرعت در مرکز ثقل سیال در داخل سلول جهت محاسبه فلاکس در روش MFCT
۳۵	جدول ۳-۲: محاسبه سرعت در مرکز ثقل سیال در داخل سلول جهت محاسبه فلاکس در روش MYVM
۴۸	جدول ۴-۲: مقایسه معیارهای خطا برای روشهای مختلف جهت محاسبه انحناء در منحنی سینوسی
۶۶	جدول ۱-۳: ابعاد مخزن مستطیلی بر اساس نسبت ابعاد و حجم مخزن جهت مدلسازی پدیده اسلاشینگ در مخازن مستطیلی با نسبت ابعاد مختلف
۸۳	جدول ۱-۴: مشخصات مخزن مورد استفاده جهت معتبرسازی مدل تهیه شده جهت مدلسازی اندرکنش موج و جسم شناور به روش تئوری تفرق بر اساس نتایج مدل آزمایشگاهی
۸۵	جدول ۲-۴: مشخصات مخازن شناور مهار شده جهت آنالیز حساسیت مدل تهیه شده در مقابل ابعاد مخزن
۹۳	جدول ۳-۴: مقایسه معیارهای خطا برای الگوریتمهای مختلف مدلسازی سطح آزاد در تولید موج منظم
۹۴	جدول ۴-۴: مقایسه معیارهای خطا برای شبکه های مختلف جهت تولید موج خطی
۹۵	جدول ۵-۴: مقایسه معیارهای خطا برای شبکه های مختلف جهت تولید موج تنها
۹۷	جدول ۶-۴: شبکه های مورد استفاده جهت تولید موج نامنظم

## فصل اول: مقدمه

### مقدمه

بشر از دیرباز، دریاها و اقیانوس‌ها را به عنوان منابع عظیم انرژی شناخته و برای استفاده از آنها به ساخت سازه‌های دریائی اقدام نموده است؛ به‌طوری‌که می‌توان گفت، عمر سازه‌های دریائی معادل قدمت تمدن بشر است. کشتی، اولین سازه دریائی است که انسان برای حمل و نقل، تجارت و جنگ‌های دریائی از آن استفاده می‌نمود. برای پهلوگیری کشتی‌ها در ناحیه ساحلی و در محیطی امن، انواع موج‌شکن‌ها ابداع و ساخته شد. با افزایش جمعیت و نیاز بشر به انرژی بیشتر، استخراج نفت و گاز از دل دریاها و اقیانوس‌ها ضرورت پیدا کرد. به همین دلیل، تکنولوژی طرح و ساخت سازه‌های فراساحلی در چند دهه گذشته با سرعت زیادی پیشرفت نمود؛ به‌طوری‌که در حال حاضر می‌توان به کمک سکوهاى شناور خاص، عملیات اکتشاف و استخراج نفت و گاز را تا اعماق چندهزار متر از سطح دریا انجام داد.

دریاها و اقیانوس‌ها دارای شرایط محیطی خاصی بوده و شناخت بهتر این شرایط، تأثیر بسزائی در طراحی و اجرای بهینه سازه‌های فراساحلی دارد. سازه‌های دریائی، دور از ساحل ساخته می‌شوند. بنابراین عملکرد آنها می‌بایست مستقل و با حداقل اتکا به زیرساخت‌های ساحلی باشد. لذا در طراحی اینگونه سازه‌ها می‌بایست شرایط محیطی به صورت دقیق بررسی شود تا بتوان رفتار سازه دریائی را در چنین شرایطی به خوبی پیش‌بینی نمود. یکی از معیارهای بسیار مهم در طراحی سازه‌های دریائی، ارضاء



دریامانی<sup>۱۶</sup> در شرایط مختلف محیطی دریا است تا سازه با حداقل جابجایی نسبت به موقعیت اولیه خود، بتواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد. بررسی پدیده اسلاشینگ ناشی از حرکت سیال در داخل مخازن شناور و کشتی‌های حمل سوخت و نیز اثر برخورد موج به سازه، دو عامل مهم در طراحی این سازه‌ها است. لذا در ادامه این دو پدیده اسلاشینگ و برخورد موج و سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

---

<sup>16</sup> Sea keeping

### ۱-۱- پدیده اسلاشینگ

اسلاشینگ، پدیده ای است که در آن مخزن حاوی سیال با شتاب خطی و یا زاویه ای شروع به حرکت کرده و نوساناتی در سطح آزاد بوجود می آورد. در این شرایط، نیرویی از طرف مخزن به سیال و متقابلاً از طرف سیال به مخزن وارد و باعث افزایش فشار در بدنه آن می شود. این پدیده در بسیاری از وسایل نقلیه شامل تانکرهای حامل سوخت، قطارهای حامل مواد شیمیایی، نفت کش ها، موشک های سوخت مایع و فضاپیماها، مخازن نگهداری مایعات که تحت اثر زلزله قرار می گیرند و در سدها و رآکتورها و مخازن نیروگاههای هسته ای اتفاق می افتد و در صورت عدم بررسی دقیق این پدیده می تواند اثرات مخربی داشته باشد. بررسی پدیده اسلاشینگ، کاربرد زیادی در مطالعه پایداری پایداری سازه های متحرک و یا مخازن تحت تأثیر محرک های خارجی در رشته های مختلف مهندسی شامل مهندسی عمران، مکانیک، هوا فضا و مهندسی دریا دارد [1]. از آنجمله می توان به بررسی تأثیرات زلزله بر پایداری و ایمنی مخازن ذخیره سوخت در پالایشگاهها [2] و یا دینامیک تلاطم در مخازن سوخت و یا خنک کننده فضاپیماها به عنوان عاملی بسیار مهم بر دقت عملکرد و مسیریابی سیستم های کنترلی آنها اشاره نمود [3].

### ۱-۲- برخورد موج و سازه

برخورد جسم جامد و سیال از جمله مسائلی است که سالها مورد مطالعه و بررسی محققین بوده است. بررسی این پدیده در مسائل مختلفی همانند رسوب اجسام جامد معلق در سیالات، معلق سازی اجسام جامد رسوب کرده، جابجایی اجسام جامد توسط سیال، طراحی هواپیما و شناور دارای کاربردهای فراوانی است [4]. در مدلسازی اندرکنش جسم جامد و سیال سه حالت مختلف قابل بررسی است [4]. تأثیرگذاری یک طرفه جسم جامد به سیال، تأثیرگذاری یک طرفه سیال به جسم جامد و تأثیرگذاری متقابل جسم جامد و سیال. در تأثیرگذاری یک طرفه جسم جامد به سیال، مکان و حرکت جسم جامد از پیش تعیین شده است. حرکت کشتی در دریا و یا عبور جریان رودخانه از اطراف پایه های یک پل نمونه هایی از این پدیده هستند. در شرایطی مشخصات جسم جامد که در برخورد با سیال است، تأثیری بر روی مشخصات جریان شامل سرعت نداشته باشد، تأثیرگذاری یک طرفه سیال به جامد را خواهیم داشت. به عنوان مثال در صورتیکه ابعاد جسم شناور در برخورد با موج در مقایسه با طول موج از مقدار مشخصی کمتر باشد، می توان از تأثیر جسم بر روی مشخصات موج صرف نظر نمود [5]. اما در شرایطی که جسم جامد و جریان سیال هر دو در مشخصه های یکدیگر تغییر ایجاد نمایند، تأثیرگذاری متقابل سیال و جامد را خواهیم داشت. برخورد موج با اجسام شناور با ابعاد بزرگ نمونه ای از اینگونه مسائل هستند. به منظور مدلسازی برخورد موج و سازه، در برخی موارد می

توان از اثرات بعضی از ترم ها صرفنظر نمود. به عنوان مثال در صورتیکه ابعاد جسم در مقایسه با طول موج از مقدار مشخصی بیشتر باشد [5]، می توان از اثرات ویسکوزیته صرفنظر نموده و معادله لاپلاس را به عنوان معادله حاکم مورد استفاده قرار داد. در مدلسازی های انجام شده با استفاده از جریان پتانسیل [6-8] ناحیه جدایش وجود ندارد و این امر تأثیر زیادی بر شرایط حاکم بر سیال در محدوده مورد مطالعه دارد. زیرا وجود ناحیه جدایش در پشت جسم جامد همواره با افت فشار همراه بوده و بر مسیر حرکتی اجسام جامد دیگر تأثیر می گذارد [4]. در برخی موارد، در صورتیکه ابعاد جسم در مقایسه مقیاس سیال کوچک باشد می توان جسم را ذره فرض نمود و تنها تأثیر سیال بر روی جسم را مد نظر قرار داد. در این شرایط موقعیت جسم بر اساس سرعت سیال محاسبه می شود [4,9].

برای مدلسازی دقیق برخورد موج و جسم شناور، معادلات ناویر-استوکس و قانون نیوتن، به عنوان معادلات حاکم بر حرکت سیال و جسم، به طور همزمان حل می شوند. این معادلات بر اساس شرایط مرزی سینماتیکی<sup>۱۷</sup> (شرط مرزی عدم لغزش روی جسم جامد)، شرط مرزی دینامیکی<sup>۱۸</sup> (یکسان بودن مقادیر نیروهای هیدرودینامیکی وارده از سیال به جسم جامد و عکس العمل این نیروها) به یکدیگر کوپل شده اند.

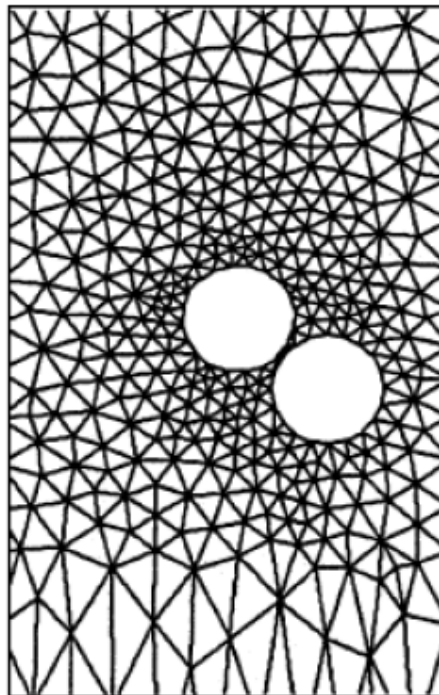
محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارده از سیال به جسم جامد و عکس العمل آنها در هنگام حل معادلات حاکم یکی از مشکلات اصلی در مدلسازی اندرکنش جسم جامد و سیال است [4]. لذا محققین به بررسی روشهایی جهت ساده نمودن مدلسازیها بدون نیاز به محاسبه مستقیم این نیرو پرداخته اند که در ادامه روشهای مختلف مدلسازی مورد بررسی قرار می گیرد. به طور کلی مدلسازی های عددی به دو دسته کلی روش شبکه بندی نامنظم<sup>۱۹</sup> و روش حوزه حل مجازی<sup>۲۰</sup> تقسیم بندی می شود. در روش شبکه بندی نامنظم حوزه حل فقط شامل ناحیه سیال بود و ناحیه داخل جسم جامد بخشی از حوزه محاسباتی در نظر گرفته نمی شود (شکل ۱-۱).

<sup>17</sup> Kinematic

<sup>18</sup> Dynamic

<sup>19</sup> Unstructured grid method

<sup>20</sup> Fictitious domain method



شکل ۱-۱: استفاده از شبکه نامنظم جهت مدل‌سازی حرکت یک جسم در داخل سیال [4]

در روش شبکه بندی نامنظم، با توجه به پیچیده شدن شکل حوزه حل، به خصوص در حضور تعداد زیاد اجسام جامد، استفاده از شبکه نامنظم غیر قابل اجتناب است. همچنین با حرکت جسم جامد در محیط سیال، شکل حوزه حل تغییر می نماید. در این شرایط یا باید در هر گام زمانی، حوزه حل مجدداً شبکه بندی و مقادیر سرعت، فشار و سایر پارامترهای مورد نیاز از شبکه قدیم به جدید منتقل شود. این امر بلافاصله باعث بروز خطاهای عددی و افزایش مدت زمان حل مسئله می شود. در روشهای جدید می توان از شبکه تغییر شکل پذیر<sup>۲۱</sup> استفاده نمود. در چنین شرایطی بازهم پس از گذشت چند گام زمانی به دلیل تغییر شکل شدید المانها می بایست شبکه بندی مجدداً<sup>۲۲</sup> انجام شود. روش های حوزه حل مجازی گسترده وسیعی از راه حل های مختلف برای معادلات با مشتقات جزئی را در بر می گیرند. ایده اصلی در این روش ها بسط دادن یک حوزه حل پیچیده به یک حوزه حل ساده تر است. این روش دارای دو مزیت مهم است. نخست اینکه حوزه حل گسترش یافته از لحاظ هندسی ساده تر است و می تواند شبکه بندی های منظم و معمول را اختیار کند. همچنین با استفاده از این روش، در بسیاری از موارد که حوزه حل اصلی وابسته به زمان است، حوزه حل مجازی می تواند مستقل از زمان در نظر گرفته شود [4].

<sup>21</sup> Deformable mesh

<sup>22</sup> Remeshing