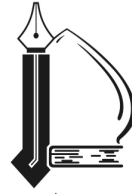


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه فردوسی مشهد

دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

عنوان پایان نامه:

مدل سازی عددی پدیده اسلاشینگ در مخازن محتوی سیال با استفاده از روش

نسبت حجمی سیال

نگارش:

رسول الهی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی هوا فضا گرایش آیرودینامیک

استاد راهنما:

دکتر محمد پسندیده فرد

شهریور ماه ۱۳۹۰



بسمه تعالی
دانشگاه فردوسی مشهد

صور تجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

جلسه دفاع از پایان نامه آقای/خانم رسول الهی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته هوافضا گرایش آیرودینامیک در ساعت ۱۲ روز دوشنبه ۱۳۹۰/۶/۲۸ در محل کلاس ۲۱۲ دانشکده مهندسی با حضور امضا کنندگان ذیل تشکیل گردید. پس از بررسی های لازم، هیأت داوران پایان نامه نامبرده را با نمره به عدد ۱۹/۲۵، به حروف نوزده و بیست و پنج صدم و با درجه عالی مورد تأیید قرار داد.

عنوان رساله

مدل سازی عددی پدیده اسلاشینگ در مخازن محتوی سیال با استفاده از روش

نسبت حجمی سیال

امضا

هیئت داوران

- داور: دکتر محمود پسندیده فرد
دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
- داور و نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر محمد حسن جوارشکیان
دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
- استاد راهنما: دکتر محمد پسندیده فرد
دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
- مدیر گروه: دکتر حمید نیازمند

تأییدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

امضاء

دانشجو: رسول الهی

تاریخ:

امضاء

استاد راهنما: دکتر محمد پسندیده‌فرد

تاریخ:



تقدیم :

به مهر بی‌پایان مادرم

به ژرفای وجود پدرم

به تنها برادر مهربانم

به استاد گرانقدر و دل‌سوزم

و به دوستانی بهتر از آب روان

که همه زندگیم را مدیون زحمات و محبت‌های بی‌دریغ‌شان هستم.

تشکر و قدردانی

به انجام رسانیدن این پایان نامه محصول لطف و راهنمایی‌های استاد ارجمند و گرانمایه جناب آقای دکتر محمد پسندیده فرد بوده که عشق به کردار او مرا شیفته تحقیق و پژوهش نمود و راهنمایی‌هایش راه‌گشای کارهای من بوده است و از خداوند متعال توفیق و سعادت روز افزون برای ایشان آرزومندم.

از آقایان دکتر محمد حسن جوارشکیان و دکتر محمود پسندیده فرد اعضاء محترم ممتحن پایان‌نامه که با ارائه پیشنهادات و نقطه نظرات ارزشمند خویش سبب ارتقای کیفیت پایان‌نامه شدند بسیار سپاسگذارم.

همچنین از تمامی دوستان که لحظات زندگی‌ام سرشار از شادی‌ها و دوستی‌های بی‌پایان آن‌ها بوده است و سهم بسزایی در پیشرفت اینجانب داشته‌اند کمال تشکر را دارم. در انتها نیز از زحمات دانشجویان گرامی آقای سجاد پویان، آقای ایمان میرزائی، آقای جواد اسماعیل پناه، سرکار خانم مهدیه کنعانی و آقای محمد جعفری راد که هر یک به نوعی در انجام این پایان‌نامه به این جانب یاری رساندن کمال سپاسگذاری را دارم.

رسول الهی (شهریور ۱۳۹۰)

فهرست مندرجات

فصل اول : مقدمه

۱-۱	مقدمه.....	۲
۲-۱	مشکلات مرتبط با اسلاشینگ.....	۲
۳-۱	برخی کاربردهای مهم اسلاشینگ.....	۳
۱-۳-۱	اسلاشینگ در سفینه‌های فضائی.....	۴
۲-۳-۱	اسلاشینگ در کشتی‌های حامل سوخت.....	۵
۳-۳-۱	کاربرد اسلاشینگ در جاذب‌های ارتعاشی مایع.....	۸
۴-۱	تاریخچه مطالعات اسلاشینگ.....	۱۰
۱-۴-۱	تاریخچه کوپلینگ سیستم سیالاتی-مکانیکی.....	۱۴
۲-۴-۱	مشکلات پیش رو در مدل‌سازی پدیده اسلاشینگ.....	۱۵
۳-۴-۱	مقدمه ای درباره روش نسبت حجمی سیال.....	۱۶
۵-۱	پژوهش حاضر.....	۱۷
۱-۵-۱	توسعه‌های انجام شده در این پروژه.....	۱۹
۲-۵-۱	دور نمای پایان نامه.....	۲۲
۳-۵-۱	طبقه بندی پایان نامه.....	۲۳

فصل دوم : معادلات حاکم و مدل‌سازی عددی

۱-۲	مقدمه.....	۲۵
-----	------------	----

۲۶.....	۲-۲ فرضیات و معادلات حاکم.....
۲۶.....	۱-۲-۲ فرضیات.....
۲۶.....	۲-۲-۲ معادلات ناویر استوکس.....
۲۷.....	۳-۲-۲ روش نسبت حجمی سیال.....
۳۰.....	۴-۲-۲ کشش سطحی.....
۳۲.....	۵-۲-۲ شرایط مرزی جریان سیال.....
۳۴.....	۳-۲ گسسته‌سازی معادلات حاکم.....
۳۴.....	۱-۳-۲ روش تجزیه دو مرحله‌ای.....
۳۶.....	۲-۳-۲ گسسته‌سازی ترم جابه‌جایی.....
۳۹.....	۳-۳-۲ گسسته‌سازی ترم ویسکوزیته.....
۴۲.....	۴-۳-۲ نیروی کشش سطحی.....
۴۴.....	۵-۳-۲ معادله تفاضلی فشار.....
۴۶.....	۶-۳-۲ ردیابی حجمی.....
۴۸.....	۴-۲ معادلات حاکم بر سیستم مکانیکی.....
۴۸.....	۱-۴-۲ دینامیک جسم جامد.....
۴۹.....	۲-۴-۲ معادله مومنتوم خطی.....
۵۰.....	۳-۴-۲ معادله مومنتوم زاویه‌ای.....
۵۱.....	۵-۲ اتصال دینامیک مایع و جامد.....
۵۱.....	۱-۵-۲ تاثیر حرکت جسم جامد بر مایع.....
۵۲.....	۲-۵-۲ بررسی صحت اصل نیروی حجمی مجازی.....

۳-۵-۲	تأثیر مایع بر حرکت جسم جامد.....	۵۳.....
۴-۵-۲	معادلات کوپلینگ پایدار سیستم جامد- مایع.....	۵۵.....
۶-۲	بررسی پایداری روش عددی از دیدگاه نظری.....	۵۸.....
۱-۶-۲	مشابه سازی سیستم سیال-جامد با سیستم جرم و فنر.....	۵۸.....
۲-۶-۲	کوپلینگ عددی پایدار.....	۶۰.....
۳-۶-۲	تحلیل پایداری.....	۶۲.....
۷-۲	گسسته سازی معادلات سیستم دینامیکی.....	۶۳.....
۸-۲	حل معادلات سیستم دینامیکی.....	۶۴.....
۹-۲	نمودار مراحل انجام محاسبات.....	۶۶.....

فصل سوم: اعتبارسنجی و ارائه نتایج

۱-۳	مقدمه.....	۶۹.....
۲-۳	جریان آرام میان صفحات موازی.....	۷۰.....
۳-۳	بررسی صحت عملکرد برنامه عددی در محاسبه فشارهای هیدرواستاتیکی.....	۷۷.....
۱-۳-۳	بررسی فشار هیدرواستاتیکی مایع در مخزن مستطیلی.....	۷۷.....
۲-۳-۳	بررسی فشار هیدرواستاتیکی مایع در مخزن دوزنقه ای.....	۷۹.....
۳-۳-۳	بررسی فشار هیدرواستاتیکی مایع در مخزن دایره ای.....	۸۱.....
۴-۳	بررسی اسلاشینگ در حرکت با شتابهای خطی ثابت.....	۸۴.....
۵-۳	بررسی اسلاشینگ در حرکت با شتابهای خطی متغیر با زمان.....	۸۵.....
۱-۵-۳	بررسی اسلاشینگ در حرکت تک فرکانس مخزن.....	۸۷.....

- ۲-۵-۳ بررسی اسلاشینگ در مخازن با نوسانات ترکیبی ۸۹
- ۶-۳ بررسی پایداری حل عددی در حرکت سقوط آزاد ۹۰
- ۱-۶-۳ بررسی حرکت سقوط آزاد مخزن در برنامه عددی اصلاح نشده ۹۲
- ۲-۶-۳ بررسی حرکت سقوط آزاد مخزن در برنامه عددی اصلاح شده ۹۵
- ۷-۳ بررسی حرکت سقوط آزاد مخزن بر روی سطح شیب دار ۹۶
- ۳-۷-۱ بررسی تئوری حرکت سقوط آزاد یک مخزن حاوی مایع بر روی سطح شیب دار ۹۷
- ۳-۷-۲ شبیه‌سازی عددی حرکت سقوط آزاد بر روی سطح شیب دار ۹۸
- ۸-۳ بررسی حرکت دورانی با سرعت زاویه ثابت در محیط بدون جاذبه ۹۸
- ۳-۸-۱ اعتبارسنجی برنامه عددی در مدل‌سازی اثر شتاب‌های مرکزگرا ۱۰۰
- ۳-۸-۲ اعتبارسنجی برنامه عددی در مدل‌سازی اثر شتاب کربولیس ۱۰۱
- ۹-۳ بررسی حرکت دورانی با سرعت زاویه ثابت با وجود جاذبه ۱۰۳
- ۱۰-۳ بررسی پدیده اسلاشینگ در مکعب غلتان ۱۰۴
- ۱۱-۳ بررسی پدیده اسلاشینگ در حرکت چرخ و فلکی ۱۰۶
- ۱۲-۳ بررسی مدل‌سازی اسلاشینگ در کاربرد صنعتی ۱۰۹

فصل چهارم: جمع بندی و پیشنهادات

- ۱-۴ جمع بندی ۱۱۴
- ۲-۴ ارائه پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده ۱۱۶
- ۱۱۹ مراجع و منابع ۱۱۹

فهرست جداول

جدول ۱-۳ مقایسه نتایج برنامه عددی و روش تحلیلی برای فشارهای هیدرو استاتیکی. (مخزن مستطیلی) ۷۸

جدول ۲-۳ مقایسه نتایج برنامه عددی و روش تحلیلی برای فشارهای هیدرو استاتیکی. (مخزن دوزنقه ای) ۸۱

جدول ۳-۳ مقایسه نتایج برنامه عددی و روش تحلیلی برای فشارهای هیدرو استاتیکی. (مخزن دایره‌ای) ۸۳

نمادها

A	اندازه سطح آزاد سیال موجود در هر سلول
a_x	شتاب خطی مخزن در جهت X (m/s)
a_y	شتاب خطی مخزن در جهت Y (m/s)
$\frac{D}{Dt}$	مشتق مادی
f	نسبت حجمی مایع
\bar{f}	مقدار میانی نسبت حجمی مایع
\vec{F}_b	نیروی حجمی (N)
\vec{F}_{ST}	نیروی سطحی معادل در هر سلول سطح
f_1, f_2	فرکانس نوسانات مخزن (Hz)
F	شتاب ذره در دستگاه \hat{O}_{xyz} ($\frac{m}{s^2}$)
\vec{g}	شتاب جاذبه ($\frac{m}{s^2}$)
h	ارتفاع ستون مایع (m)
I_s	ممان اینرسی مخزن جامد ($kg \cdot m^2$)
I	ممان اینرسی کلی سیستم کوپله ($kg \cdot m^2$)
k	ضریب ثابت فنر
m_s	جرم مخزن جامد (kg)
m	جرم کلی سیستم کوپله
\hat{n}_\perp	بردار یکه عمود بر سطح
n_i, n_k	مؤلفه‌های بردار یکه عمود بر سطح
O_{xyz}	مرکز چهار چوب دستگاه مختصات متحرک
\hat{O}_{xyz}	مرکز چهار چوب دستگاه مختصات اینرسی
P, p	فشار (Pa)
q	سرعت خطی مرکز O_{xyz} (m/s)
\dot{q}	شتاب خطی مرکز O_{xyz}
\vec{r}_s	فاصله مرکز جرم مخزن نسبت به O_{xyz}

\vec{r}_s	فاصله مرکز جرم مخزن نسبت به \hat{O}_{xyz}
\vec{r}	فاصله مرکز جرم کلی سیستم کوپله نسبت به O_{xyz}
Re	عدد رینولدز
\mathfrak{R}	مجموع نیروهای وارد بر مخزن (N)
T	مجموع گشتاورهای وارد بر مخزن ($N \cdot m$)
t	زمان (ثانیه s و میلی ثانیه ms)
\hat{t}_\perp	بردار یکه موازی سطح
u	مولفه افقی سرعت (m/s)
u^{fl}	شار سرعت افقی (m/s)
v	مولفه عمودی سرعت (m/s)
v^{fl}	شار سرعت عمودی (m/s)
\vec{V}	بردار سرعت (m/s)
$\vec{\tilde{V}}$	بردار سرعت میانی (m/s)
\vec{V}^*	بردار سرعت میانی (m/s)
v^*	سرعت ذره سیال نسبت به \hat{O}_{xyz}
x	محور مختصات افقی (m)
y	محور مختصات عمودی (m)
α	پارامتر متغیر بین صفر تا ۱ در روش ون لیر (معادلات ۲-۳۳ تا ۲-۳۴)
علائم یونانی	
$\vec{\nabla}$	عملگر دلتا
Δx	ضخامت سلول در امتداد محور افقی (m)
Δy	ضخامت سلول در امتداد محور عمودی (m)
Δt	گام زمانی (s)
Ω	حجم سلول (m^3)
Ω', Ω''	حجم سلول پس از انتقال تابع f (m^3)
σ	کشش سطحی (N/m)
∂	نشانگر مشتق جزئی
k	شعاع انحنا
μ	لزجت دینامیکی ($kg/m \cdot s$)
ν	لزجت سینماتیکی (m^2/s)
ρ	چگالی (kg/m^3)
$\vec{\tau}$	تانسور تنش (N/m^2)
τ_{ik}	مؤلفه‌های از تانسور تنش (N/m^2)
$\vec{\omega}_s$	بردار سرعت چرخشی جسم جامد (Rad/s)
\sum	علامت مجموع

زیر نویس ها	
<i>cell</i>	سلول در حوزه محاسباتی
<i>g</i>	مربوط به فاز بخار
<i>i</i>	بردار یکه محور افقی
<i>j</i>	بردار یکه محور عمودی
<i>l</i>	مربوط به فاز مایع
<i>nb</i>	مخفف سلول های همسایه
<i>S, s</i>	مربوط به جسم جامد
<i>xx, xy, yy</i>	نشانگر مولفه های تنش برشی
\perp	علامت امتداد عمود بر سطح
\parallel	علامت شرط مرزی تقارن
بالا نویس ها	
<i>fl</i>	شار سرعت روی سطوح حجم کنترل
<i>n</i>	نشانگر زمان در گام قبل
<i>R</i>	نشانگر مولفه لزجت در سمت راست سلول
<i>RBC, BRC</i>	نشانگر مولفه لزجت در سمت راست و پایین سلول
<i>RTC, TRC</i>	نشانگر مولفه لزجت در سمت راست و بالای سلول
<i>T</i>	ترانهاده ماتریس
δ	نشانگر نوع مختصات (دکارتی یا استوانه ای)
علائم اختصاری	
CSF	نیروی سطحی پیوسته (Continuum Surface Force)
cyl	پارامتر نشانگر مختصات (cyl=1: Cylindrical, cyl=0: Cartesian)
FLAIR	روش تقریب خطی روی سطوح حجم کنترل (Flux Line-segment model for Advection and Interface Reconstruction)
ICCG	روش گرادیان مزدوج ناقص چالسکی (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient Decomposition)
<i>max</i>	مقدار بیشینه
<i>min</i>	مقدار کمینه
PLIC	تقریب قطعه به قطعه خطی سطح تماس (Piecewise Linear Interface Construction)
PPE	معادله گسسته شده پواسون فشار (Pressure Poisson Equation)
SLIC	روش تقریب خط راست سطح تماس (Simple Line Interface Construction)
TDMA	روش حل ماتریس سه قطری (Tri-Diagonal Matrix Algorithm)
VOF	روش نسبت حجمی سیال (Volume Of Fluid)

فهرست شکل‌ها

فصل اول : مقدمه

- شکل ۱-۱- روند افزایش حجم مخازن سوخت کشتی‌های حامل گاز طبیعی مایع در نیم قرن گذشته..... ۶
- شکل ۲-۱- نمونه ای از کشتی حمل گاز مایع..... ۷
- شکل ۳-۱- نمونه ای از جاذب ارتعاشی مایع و نحوه عملکرد آن..... ۸
- شکل ۴-۱- نمونه کاربرد جاذب ارتعاشی مایع در صنعت ساختمان سازی..... ۹
- شکل ۵-۱- نمونه‌هایی از کاربرد روش نسبت حجمی سیال در مدل‌سازی جریانهای دو فازي..... ۱۷
- شکل ۶-۱- شماتیک اسلاشینگ سیال در مخزن سوخت تحت نیروهای دینامیکی..... ۲۰
- شکل ۷-۱- شماتیک سیستم دستگاه مختصات مکانیکی و سیالاتی..... ۲۱
- شکل ۱-۲- روش‌های ردیابی سطح مشترک (الف) ذرات نشانگر (ب) شبکه تطبیقی (ج) ردیابی حجمی..... ۲۸
- شکل ۲-۲- نمونه‌هایی از روش‌های ارائه شده به منظور بازسازی سطح در روش نسبت حجمی سیال..... ۲۹
- شکل ۳-۲- محل سرعت‌ها و مقادیر فشار و نسبت حجمی سیال در شبکه‌بندی جابه‌جا شده..... ۳۵
- شکل ۴-۲- تعاریف مربوط به سرعت‌ها در معادله گسسته شده مومنتوم در جهت x ۳۷
- شکل ۵-۲- تعاریف مربوط به محاسبه تنش برشی در معادله مومنتوم در راستای جهت x ۴۰
- شکل ۶-۲- نمونه‌ای از نحوه محاسبه مقادیر ویسکوزیته در گوشه‌های سلول..... ۴۲
- شکل ۷-۲- تعاریف مربوط به بردارهای یکه در گوشه‌ها و مرکز سلول..... ۴۴
- شکل ۸-۲- نقطه مورد نظر به منظور محاسبه ضرایب فشار..... ۴۵
- شکل ۹-۲- سطح مشترک دقیق (چپ) و خطوط تقریب زده شده (راست) بر اساس روش یانگز..... ۴۷
- شکل ۱۰-۲- مرکز جرم جسم جامد نسبت به $Oxyz$ و \hat{O}_{xyz} ۴۹
- شکل ۱۱-۲- مسیر مرکز جرم (مولفه افقی) سیال نسبت به مرجع مختصات متحرک و اینرسی..... ۵۴
- شکل ۱۲-۲- جداسازی سیستم جرم و فنر (کوپلینگ با احتمال ناپایداری عددی)..... ۵۹
- شکل ۱۳-۲- جداسازی سیستم جرم و فنر براساس کوپلینگ پایدار..... ۶۲
- شکل ۱۴-۲- نمودار مراحل انجام محاسبات در برنامه عددی توسعه یافته..... ۶۷

- شکل ۱-۳ شماتیک حوزه حل برای حل جریان سیال داخل کانال ۷۱
- شکل ۲-۳ توزیع سرعت در راستای y در کانال در سه گام زمانی ۷۳
- شکل ۳-۳ پروفیل‌های سرعت در مقطع میانی کانال در زمان‌های مختلف ۷۴
- شکل ۴-۳ پروفیل‌های سرعت در مقطع خروجی کانال در زمان‌های مختلف ۷۴
- شکل ۵-۳ تنش برشی دیواره سمت چپ در زمان‌های مختلف ۷۵
- شکل ۶-۳ بررسی استقلال از شبکه‌بندی برای پروفیل سرعت در راستای y در زمان $t = 5 \times 10^{-4} s$ ۷۶
- شکل ۷-۳ توزیع فشار داخل مخزن مربعی ۷۹
- شکل ۸-۳ شماتیک مخزن دوزنقه ای حاوی سیال و محل مرکز جرم سیال ۸۰
- شکل ۹-۳ توزیع فشار و نسبت جرمی سیال داخل مخزن دوزنقه ای ۸۱
- شکل ۱۰-۳ شماتیک مخزن دایره‌ای نیمه پر و محل مرکز جرم سیال ۸۲
- شکل ۱۱-۳ توزیع فشار و نسبت جرمی سیال داخل مخزن دایره‌ای ۸۴
- شکل ۱۲-۳ اسلاشینگ و شکل‌گیری تدریجی سطح مایع درون مخزن در حرکت با شتاب ثابت $4/5 ms^2$ ۸۶
- شکل ۱۳-۳ اسلاشینگ در مخزن در حال نوسان تک فرکانسی ۸۸
- شکل ۱۴-۳ مقایسه نتایج تجربی ناکایاما با نتایج شبیه‌سازی برای تغییرات ارتفاع سطح سیال ۸۹
- شکل ۱۵-۳ مقایسه نتایج تجربی کوریگنن با نتایج شبیه‌سازی اسلاشینگ درون مخزن در حال نوسانات ترکیبی .. ۹۱
- شکل ۱۶-۳ اسلاشینگ درون مخزن در حرکت سقوط آزاد ۹۳
- شکل ۱۷-۳ نمودار شتاب مخزن به ازای نسبت‌های جرمی متفاوت در برنامه عددی اولیه اصلاح نشده ۹۴
- شکل ۱۸-۳ نمودار شتاب مخزن به ازای نسبت‌های جرمی متفاوت در برنامه عددی پایدار ۹۶
- شکل ۱۹-۳ شماتیک حرکت سقوط آزاد مخزن بر سطح شیب دار ۹۷
- شکل ۲۰-۳ اسلاشینگ درون مخزن در حال سقوط آزاد بر روی سطح شیب دار ۹۹
- شکل ۲۱-۳ اسلاشینگ درون مخزن در اثر عکس العمل شتاب مرکزگرا ۱۰۱
- شکل ۲۲-۳ اسلاشینگ درون مخزن در اثر عکس العمل شتاب مرکزگرا و کریولیس ۱۰۳
- شکل ۲۳-۳ اسلاشینگ سیال درون مخزن در حال دوران در محیط جاذبه ۱۰۵

- شکل ۲۴-۳ اسلایسینگ درون مخزن مربعی غلتان .. ۱۰۷.....
- شکل ۲۵-۳ اسلایسینگ درون مخزن در حرکت چرخ و فلکی . ۱۰۸.....
- شکل ۲۶-۳ اسلایسینگ درون مخزن سوخت در حالت بدون تلاطم گیر و با تلاطم گیر..... ۱۱۱.....
- شکل ۲۷-۳ مقایسه انرژی جنبشی کل در زمان های مختلف برای دو حالت بدون تلاطم گیر و با تلاطم گیر .. ۱۱۲.....

فصل اول:

مقدمه

فصل اول : مقدمه

۱-۱ مقدمه

با حرکت یک مخزن که بصورت جزئی از سیال پر شده باشد و تحت نیروی گذرا و یا پایدار خارجی قرار گیرد، سیال داخل مخزن نیز حرکت کرده و دچار اغتشاش و بهم ریختگی میگردد. این پدیده اسلاشینگ نامیده می شود. بسته به نوع حرکت و شکل مخزن، سطح آزاد سیال را می توان تحت انواع مختلفی از حرکت شامل حرکت صفحه ای، غیر صفحه ای، دورانی، ضربانی بی قاعده، با تقارن محوری، شبه نوسانی و یا کاملاً بی نظم طبقه بندی نمود. اگر چه این پدیده بطور روزمره مورد مشاهده قرار می گیرد و پدیده ای ساده به نظر می رسد، اما به دلیل پیچیدگی ها و کاربردهای فراوان آن، امروزه مورد توجه بسیاری از محققین می باشد.

۲-۱ مشکلات مرتبط با اسلاشینگ

اسلاشینگ در مخازن حمل مایع، باعث بروز مشکلات فراوانی می گردد از این جمله می توان به موارد زیر اشاره نمود.

- مشکل در پایداری حرکت موشک‌ها و سفینه‌های فضائی با سوخت مایع.
- اختلال در عملکرد سیستم سوخت رسانی در موشک‌ها و فضاپیماهای با سوخت مایع.
- نیروهای نامطلوب در هنگام ترمز‌گیری در وسایل حمل‌کننده مایعات.
- ایجاد صدای نامطلوب در مخزن سوخت خودروها، در هنگام ترمز‌گیری.
- واژگونی وسایل نقلیه به خصوص بر اثر شتاب‌های جانب مرکز در هنگام دور زدن آن‌ها.
- ایجاد صداهای نامطلوب حاصل از اسلاشینگ سیال در مخازن سوخت.
- مشکلات ایمنی در راکتورهای هسته‌ای به خصوص در هنگام وقوع زلزله.

هر ساله هزینه‌های مرتبط با مشکلات بالا زیاد و غیر قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. این مشکلات معمولاً با استفاده از مطالعات تجربی و نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد که فرآیندی بسیار زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. بنابراین مدل‌سازی عددی این پدیده مورد توجه محققین قرار گرفت.

۳-۱ برخی کاربردهای مهم اسلاشینگ

در پدیده اسلاشینگ، حرکت دینامیکی سیال و تقابل سیال با مخزن باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ای در سیستم مکانیکی مخزن می‌گردد. از نمونه‌های مهم این پدیده، به تحلیل اسلاشینگ در کاربردهای صنعت هوا فضا می‌توان اشاره نمود که شامل طراحی مخازن سوخت سفینه‌های فضائی و موشک‌های سوخت مایع می‌باشد. همچنین از کاربردهای گسترده تحلیل اسلاشینگ، می‌توان به صنعت کشتی‌سازی به خصوص در طراحی مخازن نفت‌کش‌ها و همچنین مخازن حمل‌کننده گاز مایع اشاره نمود. علاوه بر کاربردهای بالا می‌توان به کاربرد این پدیده در طراحی استخرهای میراکننده اثر زلزله در برج‌های مرتفع، اشاره کرد که در ادامه، به اختصار به بررسی هر یک از این پدیده‌ها می‌پردازیم.

۱-۳-۱ اسلاشینگ در سفینه‌های فضائی

امروزه با افزایش مقدار مایعات در سفینه‌های فضائی، مدیریت مایعات و تاثیر آن بر روی دینامیک فضا پیمایا اهمیت بیشتری پیدا نموده است. همچنین اسلاشینگ مایع، ممکن است باعث اختلال در مانورهای فضائی حساس، از قبیل ارتباط مکانیکی حامل‌های سوخت مایع گردد. در سال‌های اخیر چندین مشکل به واسطه اسلاشینگ در فضا پیمایا گزارش شده است. برای مثال در طی اولین فرود بر روی ماه (سال ۱۹۶۹) اسلاشینگ سوخت باقی مانده، یک حرکت نوسانی به ماه نشین آپولو^۱ ۱۱ القا نمود که به وضوح در ویدئوهای ارسالی قابل مشاهده است [۱] و باعث اختلال در کنترل دقیق مانور فرود گردید. نمونه دیگر، ماموریت ایستگاه فضائی نیر^۲ در سال ۱۹۹۸ می‌باشد که در طی یک ماموریت تصحیح مداری، فضا پیما حرکتی غیر منتظره را تجربه کرد، که باعث خروج از حالت عادی گردید. اما اگرچه این ماموریت بازیابی شد، اما به قیمت ۱۳ ماه تاخیر تمام شد که علت این واقعه، اسلاشینگ در مخزن سوخت مایع شناخته شد [۲].

به طور کلی نیروی جاذبه یک تاثیر پایدار کننده در مایعات دارد و باعث می‌گردد که توده سیال در پائین مخزن قرار گیرد و هنگامی که این نیرو، تقلیل می‌یابد توده سیال در هر مکانی داخل مخزن بصورت غیر قابل پیش بینی قرار می‌گیرد. بطور کلی مشکلات اسلاشینگ در شرایط با جاذبه کم نسبت به محیط با جاذبه، متفاوت می‌باشد. این مشکلات شامل جهت دادن به مایع و همچنین مشکلات در حرکت دادن و جابجائی آن می‌باشد. همچنین در جاذبه کم، کشش سطحی، نیروی اصلی بوده و عدد بی بعد باند^۳ که نسبت نیروی جاذبه به نیروی موئینگی می‌باشد نقش عمده ای در مشخصات سطح آزاد مایع دارد. برای مقادیر کم عدد باند، نیروی موئینگی اهمیت می‌یابد. در این حالت سطح مایع دیگر تخت نخواهد بود و سیال از

^۱ Apollo11

^۲ NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous)

^۳ Bond