

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٠٨٢١٤

دانشگاه تبریز  
مجتمع فنی و مهندسی  
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه  
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

# شبیه سازی عددی جریان سیال غیرنیوتنی با سطح آزاد

استاد راهنما: دکتر محمد سفید

استاد مشاور: دکتر شهرام طالبی

پژوهش و نگارش: محمد توکلی کوپائی

۱۳۸۷ / ۹ / ۲۲

اسفند ۱۳۸۶

۱۰۸۲۱۴

تقدیم به :

آخرین ذخیره الهی حضرت مهدی (عج)

و به پدر و مادر عزیزم

شما که سایه های لطفتان لحظه لحظه های زندگی را پوشانده و دستان  
مهربانتان پشت و پناه روزهای سخت و آسانم بوده است.

سپاس یزدان را که شایسته سپاس و روشنی بخش اندیشه هاست .  
دانایی که سرچشمه بی پایان خرد بر آینه نیکبها و کمال مطلق است.  
توانایی که شناخت او درمان همه دردها و یاد او پایان بخش رنجهاست پس  
او را می‌پرستیم، می‌ستاییم و به راهش گام می‌نهیم.

### با سپاس از:

استاد گرامی جناب آقای دکتر محمد سفید که با دانش بی‌کران و زحمات بی‌شائبه خود در امر آموزش و تحقق و اجرای این پروژه دلسوزانه مرا یاری نمودند. همچنین از استاد ارجمند جناب آقای دکتر شهرام طالبی که با راهنماییها و کمکهای خود باعث دلگرمی و تشویق اینجانب در انجام این پروژه شدند و از هیچ مشاوره ای در این زمینه دریغ نکردند کمال تشکر و قدردانی را دارم.  
همچنین از همه عزیزان و دوستانی که در مراحل مختلف انجام پایان نامه و تدوین آن از راهنماییهای آنها استفاده کرده ام تشکر فراوان می‌نمایم.

## چکیده

در این پایان نامه جریان سیال غیر نیوتنی با سطح آزاد به طور عددی بررسی می‌گردد. کد عددی تهیه شده در حالت دو بعدی قادر است مسائل غیر نیوتنی با سطح آزاد و به طور غیر دائم را حل کند. به دلیل گستردگی سیالات غیر نیوتنی، حل مسائل در این تحقیق محدود به سیالات لزج خالص مستقل از زمان بدون تنش اولیه تسلیم، خواهد بود و سیال غیر نیوتنی با مدل پاورلا شبیه سازی شده است. برای حل معادلات جریان که شامل معادلات مومنتوم همراه با جمله های غیر خطی تنش برشی می باشد از روش گام جزئی، استفاده شده است. نتایج بدست آمده از سیال پاورلا که شامل سیال شبه پلاستیک و دایلاتانت می‌باشد، با سیال نیوتنی مقایسه شده است. سیال نیوتنی مرجع جهت مقایسه در حالت دو فازی آب و هوا در نظر گرفته شده است. برای تعیین موقعیت سطح از الگوریتم VOF که نوعی روش لاگرانژی ردیابی سطح است استفاده شده است. جهت تعیین نیروی کشش سطح از سه مدل تنش سطحی پیوسته (CSS)، نیروی سطحی پیوسته (CSF) و مایر استفاده شده است. با استفاده از کد عددی مسائل مختلفی در این تحقیق شبیه سازی شد. جریان داخل حفره جهت ارزیابی عملکرد کد و صحت نتایج سیال غیر نیوتنی ارائه شده است. مسأله شکست سد نشان داد حل مایر بسیار بهتر از CSS و CSF می‌باشد. مسائل دیگری از قبیل قطره دایروی، قطره بیضوی و قطره بر روی سطح نیز ارائه شد و مقایسه هایی بین نتایج سیال نیوتنی و غیر نیوتنی انجام گرفت. در تمامی موارد کد تهیه شده به خوبی عمل کرده است. البته اندازه سلولهای محاسباتی و گام زمانی در همگرایی حل عددی تأثیر زیادی دارد. نکته مهمی که باید بدان اشاره کرد این است که هنگام طرح مسائل با نرخ برش بالا تفاوت قابل ملاحظه ای بین نتایج سیال نیوتنی و غیر نیوتنی مشاهده می‌شود ولی در نرخهای برش پایین نتایج این دو نوع سیال به هم نزدیک است.

**کلمات کلیدی:** سیال غیر نیوتنی، روش نسبت حجمی سیال (VOF)، جریان با سطح مشترک،

مدل پاورلا، روش عددی گام جزئی، سیال شبه پلاستیک، سیال دایلاتانت



مدیریت تحصیلات تکمیلی

صور تجلسه دفاعیه پایان نامه دانشجوی  
دوره کارشناسی ارشد

شناسه: ب/ک/۳

جلسه دفاعیه پایان نامه تحصیلی آقای / خانم: محمد توکلی کوپایی  
رشته / گرایش: مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی  
تحت عنوان: شبیه سازی عددی جریان سیال غیر نیوتنی با سطح آزاد  
و تعداد واحد: ۶ در تاریخ ۱۳/۱۲/۱۳۸۶ با حضور اعضای هیأت داوران (به شرح ذیل) تشکیل گردید.  
پس از ارزیابی توسط هیأت داوران، پایان نامه با نمره: به عدد ۱۹/۱ به حروف نوزده و یکم  
و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت.

عنوان	نام و نام خانوادگی	امضاء
استاد / استادان راهنما:	آقای دکتر محمد سفید	
استاد / استادان مشاور:	آقای دکتر شهرام طالبی	
متخصص و صاحب نظر داخلی:	آقای دکتر محمدرضا هادیان	
متخصص و صاحب نظر خارجی:	آقای دکتر احمد رضا عظیمیان	

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه (ناظر)  
نام و نام خانوادگی: آقای دکتر منصور نخکش

امضاء:

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول : مقدمه</b>
۱	۱-۱- سیال غیر نیوتنی.....
۳	۲-۱- جریان با سطح مشترک.....
۴	۳-۱- کشش سطح.....
	<b>فصل دوم : سیالات غیر نیوتنی</b>
۷	۱-۲- مقدمه.....
۹	۲-۲- دسته بندی سیالات غیر نیوتنی.....
۱۰	۳-۲- سیالات لزج خالص.....
۱۱	۱-۳-۲- سیالات لزج مستقل از زمان با تنش تسلیم اولیه.....
۱۳	۲-۳-۲- سیالات لزج مستقل از زمان بدون تنش تسلیم اولیه.....
۱۳	۲-۲-۳-۱- سیالات شبه پلاستیک.....
۱۶	۲-۲-۳-۲- سیالات غلیظ شونده.....
۱۷	۳-۳-۲- سیالات تیکسوتروپیک.....
۱۸	۲-۳-۴- سیالات رئوپکتیک.....
۱۸	۲-۴-۴- سیالات ویسکوالاستیک.....
۲۰	۲-۵- انتخاب نهائی.....
	<b>فصل سوم : روش های عددی در شبیه سازی جریان های با سطح مشترک</b>
۲۱	۱-۳- مقدمه.....
۲۱	۲-۳- معادلات حاکم و الگوریتم حل.....
۲۳	۳-۲-۱- روشهای دنبال کننده سطح.....
۲۴	۳-۲-۲- روشهای تسخیر کننده سطح.....
۲۶	۳-۲-۳- روش VOF یا حجم سیال.....

۲۹	..... تعیین محل سطح مشترک یا بازسازی سطح
۳۰	..... روش SLIC ۱-۳-۳
۳۰	..... روش SOLA ۲-۳-۳
۳۱	..... روش PLIC ۳-۳-۳
۳۳	..... انتقال سطح ۴-۳
۳۴	..... روشهای لاگرانژی انتقال سطح ۱-۴-۳
۳۷	..... نیروی کشش سطحی ۵-۳
۳۸	..... بیان ریاضی اثر کشش سطحی ۱-۵-۳
۴۰	..... روش نیروی سطحی پیوسته ۲-۵-۳
۴۴	..... روش تنش سطحی پیوسته ۳-۵-۳
۴۵	..... روش مایر ۴-۵-۳

#### فصل چهارم : مروری بر کارهای انجام شده

##### فصل پنجم : روش حل عددی

۶۶	..... مقدمه ۱-۵
۶۹	..... روش عددی گام جزئی ۲-۵
۷۲	..... حل معادله پواسان ۳-۵
۷۲	..... خطاها و همگرایی کند ۱-۳-۵
۷۴	..... انتقال اطلاعات بین شبکه ها ۲-۳-۵

##### فصل ششم : نتایج

۷۹	..... جریان در حفره ۱-۶
۹۲	..... شکست سد ۲-۶
۹۳	..... قطره دایره ای ۳-۶
۹۳	..... قطره بیضوی ۴-۶
۹۳	..... قطره آب ساکن روی دیوار ۵-۶
۹۳	..... نتیجه گیری و پیشنهادات ۶-۶

۱۱۶	..... مراجع
-----	-------------



## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: حرکت دائم آرام سیال نیوتنی بین دو صفحه موازی..... ۸
- شکل ۲-۲: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیال نیوتنی..... ۸
- شکل ۳-۲: دسته بندی سیالات غیر نیوتنی..... ۹
- شکل ۴-۲: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش و زمان برای سیالات مختلف..... ۱۰
- شکل ۵-۲: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیالات با تنش تسلیم..... ۱۱
- شکل ۶-۲: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیالات تیکسو تروپیک..... ۱۷
- شکل ۷-۲: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیالات رئوپکتیک..... ۱۸
- شکل ۱-۳: سلول محاسباتی شامل سیال ۱ و ۲..... ۲۷
- شکل ۲-۳: نمونه ای از توزیع تابع F در حوالی سطح مشترک..... ۲۹
- شکل ۳-۳: تولید یک سطح مشترک با روش SLIC..... ۳۰
- شکل ۴-۳: تولید یک سطح مشترک با روش SOLA..... ۳۱
- شکل ۵-۳: تولید یک سطح مشترک با روش PLIC..... ۳۱
- شکل ۶-۳: انتقال لاگرانژی سطح در جهت (x) بازسازی سطح در سلول مرکزی قبل از انتقال (شکل سمت چپ) و توسعه سلول مرکزی در جهت (x) بعد از انتقال..... ۳۴
- شکل ۷-۳: انتقال سطح لاگرانژی..... ۳۵
- شکل ۸-۳: ناحیه گذار در یک شبکه محاسباتی..... ۴۱
- شکل ۹-۳: میان یابی وزنی در روش مایر..... ۴۶
- شکل ۱-۴: بررسی جت ناپایدار در سیال نیوتنی و غیر نیوتنی در زمانهای مختلف..... ۵۳
- شکل ۲-۴: بررسی تزریق خون در پا در سیال نیوتنی و غیر نیوتنی در زمانهای مختلف..... ۵۳
- شکل ۳-۴: تحلیل جت ناپایدار سه بعدی با سیال پلیمر..... ۵۴
- شکل ۴-۴: برخورد قطره آب با صفحه فلزی..... ۵۴
- شکل ۵-۴: شبیه سازی سه بعدی یک قطره آویزان..... ۵۵
- شکل ۶-۴: شبیه سازی سه بعدی یک قطره آویزان و مقایسه با حالت تجربی..... ۵۵
- شکل ۷-۴: برخورد دو قطره..... ۵۶

- شکل ۴-۸: شکست سد ..... ۵۶
- شکل ۴-۹: سقوط یک قطره در مایع ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۰: برخورد حباب ها ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۱: پرشدن کانال S شکل از مایع ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۲: پرشدن قالب ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۳: حرکت گلوله در آب ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۴: بالا رفتن یک قطره ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۵: برخورد دو قطره ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۶: سقوط یک توپ در یک سیال نیوتنی ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۷: برخورد یک قطره با صفحه فلزی ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۸: مقایسه بین روش لولست و روشهای دنبال کننده جرم در سقوط یک قطره ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۹: شکست سد ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۰: مقایسه شکست سد در حالت تجربی ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۱: نازل یک چاپگر جوهر افشان ..... ۶۴
- شکل ۴-۲۲: مقایسه روش حجم سیال و لولست با حالت تجربی در افتادن استوانه در آب ..... ۶۴
- شکل ۵-۱: شبکه جابه جا شده و متغیر های جریان ..... ۶۸
- شکل ۵-۲: شبکه ریز و شبکه درشت تر ساخته شده بر روی آن ..... ۷۴
- شکل ۵-۳: تشکیل شبکه درشت از نوع جابه جا شده ..... ۷۴
- شکل ۶-۱: مقایسه کیفی خطوط جریان سیال نیوتنی در حالت دائم در نمونه عددی حل شده (راست) و نتیجه مرجع [۶۰] ..... ۸۲
- شکل ۶-۲: مقایسه بین مؤلفه افقی سرعت، بر حسب محور عمودی گذرنده از مرکز حفره در نمونه عددی حل شده و نتیجه مرجع [۶۰] ..... ۸۳
- شکل ۶-۳: مقایسه بین مؤلفه عمودی سرعت، بر حسب محور افقی گذرنده از مرکز حفره در نمونه عددی حل شده و نتیجه مرجع [۶۰] ..... ۸۳
- شکل ۶-۴: توزیع خطوط جریان در سیال شبه پلاستیک، دایلاتانت و سیال نیوتنی ..... ۸۴
- شکل ۶-۵: مقایسه بین مؤلفه افقی سرعت، بر حسب محور عمودی گذرنده از مرکز حفره در سیال شبه پلاستیک با سیال نیوتنی ..... ۸۵
- شکل ۶-۶: مقایسه بین مؤلفه افقی سرعت، بر حسب محور عمودی گذرنده از مرکز حفره در سیال دایلاتانت با سیال نیوتنی ..... ۸۵
- شکل ۶-۷: مقایسه بین مؤلفه عمودی سرعت، بر حسب محور افقی گذرنده از مرکز حفره در سیال شبه پلاستیک با سیال نیوتنی ..... ۸۶

- شکل ۶-۸: مقایسه بین مؤلفه عمودی سرعت، بر حسب محور افقی گذرنده از مرکز حفره در سیال دایلاتانت با سیال نیوتنی..... ۸۶
- شکل ۶-۹: توزیع ویسکوزیته ظاهری ( $kg/m.s$ ) در سیال شبه پلاستیک و سیال دایلاتانت..... ۸۷
- شکل ۶-۱۰: زمان رسیدن خطوط جریان به حالت دائم بر حسب شاخص سیال پاورلا..... ۸۸
- شکل ۶-۱۱: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش سیالات غیر نیوتنی لزج خالص بدون تنش تسلیم اولیه [۶۱]..... ۸۸
- شکل ۶-۱۲: مقایسه تنش برشی بر حسب نرخ برش در سیال شبه پلاستیک و نیوتنی..... ۸۹
- شکل ۶-۱۳: مقایسه تنش برشی بر حسب نرخ برش در سیال دایلاتانت و نیوتنی..... ۸۹
- شکل ۶-۱۴: مقایسه ویسکوزیته ظاهری بر حسب نرخ برش کلی در سیال شبه پلاستیک..... ۹۰
- شکل ۶-۱۵: مقایسه نمودار لگاریتمی ویسکوزیته ظاهری بر حسب نرخ برش کلی در سیال شبه پلاستیک (راست) با مرجع (چپ) [۶۲]..... ۹۰
- شکل ۶-۱۶: مقایسه ویسکوزیته ظاهری بر حسب نرخ برش کلی در سیال دایلاتانت..... ۹۱
- شکل ۶-۱۷: مقایسه نمودار لگاریتمی ویسکوزیته ظاهری بر حسب نرخ برش کلی در سیال دایلاتانت..... ۹۱
- شکل ۶-۱۸: هندسه اولیه مسأله..... ۹۵
- شکل ۶-۱۹: مقایسه شکل سطح سیال شبه پلاستیک ( $n = 0.7$ ) در زمانهای مختلف..... ۹۶
- شکل ۶-۲۰: مقایسه شکل سطح سیال شبه پلاستیک ( $n = 0.8$ ) در زمانهای مختلف..... ۹۷
- شکل ۶-۲۱: مقایسه شکل سطح سیال دایلاتانت ( $n = 1/3$ ) در زمانهای مختلف..... ۹۸
- شکل ۶-۲۲: مقایسه شکل سطح سیال دایلاتانت ( $n = 1/4$ ) در زمانهای مختلف..... ۹۹
- شکل ۶-۲۳: مقایسه شکل سطح سیال نیوتنی و غیر نیوتنی در زمانهای مختلف با استفاده از روش کشش سطح مایر..... ۱۰۰
- شکل ۶-۲۴: مقایسه شکل سطح سیال شبه پلاستیک ( $n = 0.8$ ) وقتی که مرزهای سمت بالا و راست باز باشند..... ۱۰۲
- شکل ۶-۲۵: مقایسه شکل سطح سیال دایلاتانت ( $n = 1/4$ ) وقتی که مرزهای سمت بالا و راست باز باشند..... ۱۰۳
- شکل ۶-۲۶: مقایسه شکل سطح سیال نیوتنی وقتی که مرزهای سمت بالا و راست باز باشند..... ۱۰۴
- شکل ۶-۲۷: فرایند تخلیه محفظه با استفاده از روش کشش سطح مایر در سیال نیوتنی و غیر نیوتنی..... ۱۰۵
- شکل ۶-۲۸: مقایسه جرم سیال خروجی از مرز سمت راست در زمانهای مختلف برای سیال نیوتنی و غیر نیوتنی..... ۱۰۵
- شکل ۶-۲۹: مقایسه توزیع ویسکوزیته در سیال شبه پلاستیک ( $n < 1$ ) و سیال دایلاتانت ( $n > 1$ ) برای حالت شکست سد در یک محفظه بسته..... ۱۰۶

- شکل ۳۰-۶: مقایسه توزیع ویسکوزیته در سیال شبه پلاستیک ( $n = 0.8$ ) و سیال دایلاتانت
- شکل ۳۱-۶: هندسه اولیه قطره دایره ای .....  
 ۱۰۶..... برای حالت شکست سد با مرزهای باز.....  
 شکل ۳۲-۶: تست قطره ساکن در محیطی بدون گرانش.....  
 ۱۰۷.....  
 شکل ۳۳-۶: قطره سیال غیر نیوتنی بیضوی در محیطی بدون گرانش.....  
 ۱۰۸.....  
 شکل ۳۴-۶: مقایسه قطره بیضوی برای سیال شبه پلاستیک و دایلاتانت.....  
 ۱۱۰.....  
 شکل ۳۵-۶: مقایسه قطره آب ساکن روی دیوار در سیال نیوتنی و غیر نیوتنی.....  
 ۱۱۱.....  
 ۱۱۴.....

## فهرست علائم اختصاری

شاخص سیال پاورلا	n
ثابت سازگاری، (pa.s <sup>n</sup> )	k
جمله اینرسی، m/s <sup>۲</sup>	L <sub>i</sub>
جمله لزجت، m/s <sup>۲</sup>	L <sub>v</sub>
جمله مربوط به کشش سطح m/s <sup>۲</sup>	L <sub>s</sub>
تابع کسر حجمی	F
شتاب گرانش، m/s <sup>۲</sup>	g
مولفه عمودی سرعت، m/s	V
مولفه افقی سرعت، m/s	U
گام زمانی، s	τ
ضریب لزجت، kg/m.s	μ
چگالی، kg/m <sup>۳</sup>	ρ
ضخامت ناحیه گذار، m	h
بردار یکه عمود بر سطح	$\hat{n}$
بردار یکه مماس بر سطح	$\hat{t}$
نیروی حجمی	F <sub>sv</sub>
تابع دلتای دیراک	δ <sub>s</sub>
اختلاف چگالی، kg/m <sup>۳</sup>	[ρ]
ماتریس همانی	I
بردار شتاب	e
تابع انحراف	O
تنش برشی، pa	τ <sub>yx</sub>
تنش عمودی، pa	σ <sub>xx</sub>
ویسکوزیته ظاهری، kg/m.s	η
لزجت در نرخ برش صفر، kg/m.s	μ <sub>0</sub>
زمان خلاصی	λ
نرخ برش، s <sup>-۱</sup>	γ
ویسکوزیته نیوتنی، kg/m.s	μ*

## فصل اول : مقدمه

### ۱-۱- سیال غیر نیوتنی

روابط ریاضی متعددی برای بیان رفتار سیال ایده ال در موقعیت های مختلف حاصل شده است که بعضی از این روابط تخمین مناسبی برای سیالهای واقعی در موقعیت های خاص می باشد. پранتل<sup>۱</sup> با ارائه تئوری لایه مرزی نشان داد اثرات اصطکاک در لایه نازک سیال متصل به دیواره که لایه مرزی نامیده می شود حائز اهمیت است. با ارائه این تئوری نشان داده شد که بیرون از لایه مرزی، سیال تقریباً بدون اصطکاک بوده به طوری که روابط سیال ایده ال در این ناحیه معتبر است. اما مرحله مهمی که در تکامل تئوری دینامیک سیالات مورد توجه قرار دارد مربوط به فرایندهای صنعتی و پروسه هایی است که رفتار جریان همراه با برش، با روابط نیوتنی قابل بیان نیست. در سیال نیوتنی یک ارتباط خطی بین تنش برشی و نرخ برش وجود دارد لیکن بسیاری از سیالهای صنعتی رفتارهای غیر نیوتنی از خود بروز می دهند به عنوان مثال محلولها و پلیمرهای مذاب، رنگ، امولیسونهای خون، مایعات اتمی و موادی که دارای خواص توأم لزج و الاستیک هستند را می توان نام برد.

---

<sup>1</sup> - Prandtl

از آنجایی که این سیالات به طور فزاینده در یک طیف گسترده در فرآیندهای صنعتی به کار گرفته می‌شوند درک شاخصهای انتقالی آنها اهمیت یافته است و این مسأله لزوم شبیه سازی این نوع جریانها را نه تنها به عنوان یک کار علمی صرف بلکه به عنوان یک ضرورت در زندگی امروز بشر خاطر نشان می کند.

سیالات غیر نیوتنی تحت ترکیبات شیمیائی آنها که خواص آنها را باعث می‌شود دسته بندی شده‌اند. در ارتباط با پاسخ الاستیک سیال به تنش اعمالی دو گروه کلی سیال وجود دارند: سیال لزج خالص و سیال ویسکوالاستیک.

چنانچه با برداشتن تنش اعمالی تغییر شکلی که سیال را به حالت اولیه طبیعی برگرداند وجود نداشته باشد یعنی پاسخ الاستیک نباشد، سیال لزج خالص نامیده می‌شود.

سیالات لزج خالص به سیالات وابسته به زمان و مستقل از زمان تقسیم بندی شده است. سیالات مستقل از زمان سیالاتی هستند که مدت زمان برش تأثیری روی لزجت آنها ندارد. و نرخ برش در هر نقطه وابسته به تنش برشی در همان نقطه است.

مدل پاورلا<sup>1</sup> بیشترین کاربرد را در توصیف سیالات غیر نیوتنی لزج خالص دارد. این مدل به طور گسترده کاربرد داشته و طیف گسترده تری از سیالات را در بر می‌گیرد و شامل سیالات نیوتنی هم می‌شود و نیز صدق بیشتری بر رفتار سیال در نرخ برش بالا خواهد داشت.

بر این اساس در این تحقیق بررسی مسائل محدود به سیالات لزج خالص مستقل از زمان بدون تنش اولیه تسلیم، منطبق بر مدل پاورلا خواهد بود. در فصل دوم با یک دسته بندی جامع رئولوژیکی برای سیالات غیر نیوتنی آشنا خواهیم شد. همچنین به بررسی مدل‌های مختلف سیال غیر نیوتنی و روشهایی که برای شبیه سازی هر مدل پیشنهاد شده است خواهیم پرداخت.

---

<sup>1</sup> - PowerLow

## ۱-۲- جریان با سطح مشترک

بسیاری از پدیده های متداول طبیعی در حضور و مجاورت چندین سیال در کنار یکدیگر رخ می دهد. جریانهای با سطح مشترک مورد توجه بخش وسیعی از محققینی در حوزه مکانیک سیالات است و کاربرد های فراوانی در زمینه های مختلف فرایندهای طبیعی و صنعتی دارد. جریان های با سطح مشترک به آن دسته از جریان های گفته می شود که دوسیال با خواص متفاوت در یک سطح مشترک با هم در تماس هستند، مثل آب و هوا در سطح دریا. در دو سوی این سطح خواص مربوط به هر کدام از سیالات است و با گذر از این سطح یک جهش و یک ناپیوستگی در خواص رخ می دهد.

تلاشهای بسیاری در جهت شناسایی و شبیه سازی این نوع جریانها صورت گرفته است که این ناشی از کاربرد وسیع این جریانها می باشد. جریان های داخل رودخانه و اقیانوس ها نمونه های عینی این جریان ها در طبیعت هستند. در صنعت نیز نمونه های زیادی از جریان با سطح مشترک وجود دارد که از آن جمله می توان به فرایند تولید قطره، اسپری، و اتمیزه کردن مایعات اشاره کرد. از کاربردهای اسپری کردن، احتراق سوخت مایع در موتور های احتراق داخلی، توربین های گازی، کوره ها، دیگهای بخار، رم جت ها و راکت های با سوخت های مایع، رنگ آمیزی، نقاشی، پوشش سطوح فلزی، دستگاه های چاپ و چاپگر، تولید پودر در خشک کن ها، در دستگاه های پزشکی نظیر سیستم اینهلاسیون برای بیماری آسم و دستگاه های مرطوب کننده هوا، شستشو دهنده ها و تمیز کننده های صنعتی تزریق آب برای کاهش NOX و فیلتر کردن ذرات و غبار.

از جمله دیگر کاربردها خنک کردن صفحات پیل های سوختی و نیز دفع آب تولید شده روی صفحات بوسیله جریان هوا و نیز میعان بخار آب تولید شده در دیگهای بخار، پالایشگاه ها و



نیروگاه ها می باشد. نحوه تولید اسپری، توزیع سرعت و اندازه قطرات و مسیر حرکت آنها در بسیاری از موارد در عملکرد سیستم حائز اهمیت است.

به عنوان مثال میزان قطرات در سمپاشی گیاهان، برای کسب نتیجه زیست محیطی بسیار مهم است. به طور کلی این بخش از مسائل سیالات به علت چند فازی بودن میدان حل و پدیده های فیزیکی نظیر ناپایداری کلوین - هلمهولتز و ناپایداری ریلی - تیلور و حضور نیروی کشش سطح و همچنین به علت متحرک بودن سطح مشترک و پیچیدگی های هندسی که با زمان می تواند به شدت تغییر کند اساساً از لحاظ عددی دارای ظرافت و پیچیدگی های خاصی خواهد بود.

### ۱-۳- کشش سطح

پیچیدگی جریان های با سطح مشترک تنها به علت وجود یک سطح متحرک نمی باشد بلکه وجود برخی عوامل در سطح، دشواری شبیه سازی آن ها را دوچندان کرده است. یکی از این عوامل وجود کشش سطحی می باشد که در اینجا به اختصار به آن پرداخته می شود.

کشش سطحی در سطح مشترک دو سیال، که حداقل یکی از آنها مایع باشد و در یکدیگر قابل حل نباشند اتفاق می افتد. به این معنی که سطح مشترک در حالتی از کشش قرار دارد و شبیه به یک پوسته الاستیک عمل می کند.

وجود این پدیده به این علت است که مولکول هایی که در سطح و یا نزدیک آن قرار دارند، نیرویی متفاوت از مولکول هایی که دور از سطح قرار دارند تجربه می کنند. در داخل مایع نیروهای پیوستگی یکدیگر را خنثی می کنند ولی در سطح آزاد مایع نیروهای پیوستگی که از پایین اثر می کنند از نیروهای چسبندگی بیشتر شده و باعث ایجاد کشش سطحی می شوند.

در برخی از جریان های با سطح مشترک، کشش سطحی تاثیر عمده ای بر رفتار جریان دارد به طوری که در برخی از این جریان ها خود کشش سطحی عامل جریان است. در بسیاری از کاربردهایی که در ابتدای این فصل برای جریان هایی با سطح مشترک ذکر شد، کشش سطحی

نقش ویژه‌ای دارد. چون کشش سطحی در مرز مشترک دو سیال ظاهر می‌شود، بنابراین به عنوان یک شرط مرزی برای هر کدام از سیالات می‌باشد. اثر کشش سطحی در مرز مشترک دو سیال سبب ایجاد اختلاف فشار بین دو سیال است که البته این مقدار اختلاف فشار وابسته به انحناى سطح نیز می‌باشد.

با توسعه روش‌های عددی شبیه‌سازی جریان‌های با سطح مشترک تلاش برای شبیه‌سازی این اثر نیز صورت گرفته است که بسته به روش عددی که برای ردیابی سطح به کار گرفته می‌شود، تکنیک‌های متفاوتی برای این منظور ارائه شده است. در روشهایی که سطح مشترک به عنوان شرط مرزی است و شبکه حل منطبق بر سطح مشترک می‌باشد (روش‌های لاگرانژی) اعمال این اثر با توجه به اینکه هندسه سطح مشخص است، به راحتی امکان پذیر می‌باشد. اما در روشهایی که شبکه حل بر سطح منطبق نبوده و سطح به طور غیر مستقیم ردیابی می‌شود (روش‌های اویلری) اعمال کشش سطحی به راحتی امکان پذیر نبوده و نیاز به ترفند‌های ویژه‌ای دارد. از آنجایی که روش‌های اویلری توانایی بیشتری در شبیه‌سازی جریان‌های با سطح مشترک دارد تلاش‌های زیادی در جهت اعمال کشش سطحی برپایه این روش‌ها صورت گرفته است که این پایان‌نامه نیز بر اساس همین روش‌ها انجام شده است.

در فصل سوم سعی خواهد شد روش‌های متداول عددی در زمینه ردیابی سطح و هم‌چنین نحوه محاسبه نیروی کشش سطحی به طور مفصل ارائه شود. در این فصل به انواع مختلف روش‌های تعیین سطح مشترک و چگونگی اعمال الگوریتم آنها به خصوص روش متداول حجم سیال پرداخته می‌شود.

در فصل چهارم برخی کارهای انجام شده با روش‌های مختلف تعیین سطح مشترک در زمینه جریان سیال نیوتنی و غیر نیوتنی ارائه خواهد شد. در این فصل کاربرد‌های روش‌های تعیین سطح مشترک و میزان دقت آنها نشان داده خواهد شد.

فصل پنجم در مورد کد و روش عددی استفاده شده در آن است. در این فصل معادلات حاکم و الگوریتم کامل حل بیان خواهد شد. الگوریتم اصلی حل، استفاده از روش پاورلا برای مدل کردن سیال غیر نیوتنی و استفاده از روش گام جزئی برای حل معادلات و حل معادله پواسون با روش های چند شبکه ای است.

فصل ششم به بحث و بررسی نتایج بدست آمده با کد تهیه شده در زمینه حفره، شکست سد با مرزهای باز و بسته، قطره دایره ای و بیضوی و قطره بر روی سطح خواهیم پرداخت و در نهایت نتیجه گیری خواهیم کرد.

## فصل دوم : سیالات غیر نیوتنی<sup>۱</sup>

### ۲-۱- مقدمه

در سیال نیوتنی یک ارتباط خطی بین تنش برشی و نرخ برش وجود دارد لیکن بسیاری از سیال‌های کاربردی رفتارهای غیر نیوتنی از خود بروز می‌دهند به عنوان مثال محلولها و پلیمرهای مذاب، رنگ، امولسیون‌های خون، مرکب چاپ، مایعات اتمی و موادی که دارای خواص توأم لزج و الاستیک هستند را می‌توان نام برد. از آنجایی که این سیالات به طور فزاینده در یک طیف گسترده در فرآیندهای صنعتی به کار گرفته می‌شوند درک شاخصهای انتقالی آنها اهمیت یافته است. به طوریکه در دو دهه گذشته تحقیقات فراوانی در مقالات گزارش شده است. برای تمیز بین دو سیال نیوتنی و غیر نیوتنی یک سیال را بین دو صفحه موازی در نظر بگیرید به طوریکه فاصله صفحه‌ها  $d$  باشد. همانگونه که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است هنگامی که نیروی  $F$  در جهت  $x$  به صفحه بالائی اعمال می‌شود، یک سرعت دائم  $u$  ایجاد خواهد شد و به واسطه پیوستگی بین سیال و صفحه بالائی، سیال کشیده می‌شود تنش برشی منتهی به وسیله رابطه  $\tau_{yx} = \frac{F}{A}$  بیان می‌شود

<sup>۱</sup> - Non-Newtonian Fluids