

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

تحلیل عددی جریان و انتقال حرارت سیال غیر نیوتنی در لوله شیاردار

استاد راهنما: دکتر محمد سفید

استاد مشاور: دکتر شهرام طالبی

پژوهش و نگارش: مهدی شریفی شریف آباد

مهر ماه ۱۳۸۹

چکیده

با توجه به اهمیت استفاده از سیال غیرنیوتنی در صنعت، در این پژوهش به تحلیل عددی جریان و انتقال حرارت سیال غیرنیوتنی در یک لوله شیاردار و فنردار در حالت سه بعدی به کمک نرم افزار فلونت پرداخته شده است. محدوده جریان سیال آرام در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش موارد زیر مورد بررسی قرار گرفته شده است:

۱- تاثیر عدد رینولدز

۲- شرایط مرزی دما ثابت و شار ثابت

۳- اثرات شیار و فنر

۴- اثرات دما

نتایج نشان می دهد که با افزایش عدد رینولدز عدد ناسلت در طول لوله افزایش می یابد. با مقایسه عدد ناسلت لوله فنردار با لوله صاف مشاهده می شود که عدد ناسلت به علت ایجاد فنر افزایش یافته و بیشترین نسبت عدد ناسلت لوله فنردار به لوله صاف در شرط مرزی دماتابت برای گام ۲۰ و ارتفاع فنر ۱,۵ میلی متر برای رینولدز ۹۱۸ و برابر با ۲/۱۹ می باشد. همچنین با مقایسه عدد ناسلت لوله شیاردار با لوله صاف مشاهده می شود که عدد ناسلت به علت ایجاد شیار افزایش یافته و بیشترین نسبت عدد ناسلت لوله شیاردار به لوله صاف در شرط مرزی دماتابت برای گام ۲۰ و عمق شیار ۲ میلی متر برای رینولدز ۳۰۷ و برابر با ۲/۳۲ می باشد.

با مقایسه افت فشار لوله فنردار با لوله صاف مشاهده می شود کمترین افت فشار لوله فنردار به لوله صاف در شرط مرزی شار ثابت برای گام ۲۰ و ارتفاع فنر ۱,۵ میلی متر برای رینولدز ۹۱۸ و برابر با ۱/۳۱ می باشد. همچنین با مقایسه افت فشار لوله شیاردار با لوله صاف مشاهده می شود کمترین افت فشار لوله شیاردار به لوله صاف در شرط مرزی دماتابت برای گام ۶۰ و عمق شیار ۲ میلی متر برای رینولدز ۹۱۸ و برابر با ۱/۰۳ می باشد.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول : مقدمه
۱	۱-۱- سیال غیر نیوتنی.....
۲	۲-۱- افزایش انتقال حرارت.....
	فصل دوم : سیالات غیر نیوتنی
۴	۱-۲- مقدمه.....
۶	۲-۲- دسته بندی سیالات غیر نیوتنی.....
۷	۳-۲- سیالات لزج خالص.....
۸	۱-۳-۲- سیالات لزج مستقل از زمان با تنش تسلیم اولیه.....
۱۰	۲-۳-۲- سیالات لزج مستقل از زمان بدون تنش تسلیم اولیه.....
۱۰	۱-۲-۳-۲- سیالات شبه پلاستیک.....
۱۳	۲-۲-۳-۲- سیالات غلیظ شونده.....
۱۴	۳-۳-۲- سیالات تیکسوتروپیک.....
۱۵	۴-۳-۲- سیالات رئوپکتیک.....
۱۶	۴-۴- سیالات ویسکوالاستیک.....
۱۸	فصل سوم : مروری بر مقالات و کارهای انجام شده.....
	فصل چهارم : طرح مسئله فعلی
۳۱	۱-۴- کلیات.....
۳۲	۲-۴- مدل حل.....
۳۲	۱-۲-۴- مدل ریاضی.....
۳۲	۲-۲-۴- مدل عددی.....
۳۵	۳-۲-۴- مشخصات سیال.....
۳۵	۳-۴- روش محاسبه عدد رینولدز در سیال غیرنیوتنی.....
۳۶	۴-۴- سرعت ورودی.....
۳۶	۵-۴- طرح سه بعدی مسئله.....
۳۷	۶-۴- شبکه.....
	فصل پنجم : بررسی نتایج
۴۱	۱-۵- نمودارهای سرعت.....
۴۱	۱-۱-۵- حالت فنردار.....
۴۱	۱-۱-۱-۵- دما ثابت.....

۴۸	..... ۵-۱-۱-۲- شار ثابت
۵۳	..... ۵-۱-۲- حالت شیاردار
۵۳	..... ۵-۱-۲-۱- دما ثابت
۵۷	..... ۵-۲-۱-۲- شار ثابت
۶۰	..... ۵-۲- نمودارهای دما
۶۰	..... ۵-۲-۱- حالت فنردار
۶۰	..... ۵-۲-۱-۱- دما ثابت
۶۱	..... ۵-۲-۱-۲- شار ثابت
۶۳	..... ۵-۲-۲- حالت شیاردار
۶۳	..... ۵-۲-۲-۱- دما ثابت
۶۴	..... ۵-۲-۲-۲- شار ثابت
۶۶	..... ۵-۳- نمودارهای عدد ناسلت
۶۶	..... ۵-۳-۱- حالت فنردار
۶۶	..... ۵-۳-۱-۱- دما ثابت
۶۷	..... ۵-۳-۱-۲- شار ثابت
۶۹	..... ۵-۳-۲- حالت شیاردار
۶۹	..... ۵-۳-۲-۱- دما ثابت
۷۰	..... ۵-۳-۲-۲- شار ثابت
۷۱	..... ۵-۳-۳- لوله صاف
۷۱	..... ۵-۳-۳-۱- دما ثابت
۷۱	..... ۵-۳-۳-۲- شار ثابت
۷۲	..... ۵-۴- افت فشار
۷۸	..... نتیجه گیری نهایی
۷۹	..... پیشنهادات
۸۰	..... Abstract
۸۱	..... منابع و ماخذ

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: حرکت دائم آرام سیال نیوتنی بین دو صفحه موازی ۴
- شکل ۲-۲: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیال نیوتنی ۵
- شکل ۳-۲: دسته بندی سیالات غیر نیوتنی ۶
- شکل ۴-۲: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش و زمان برای سیالات مختلف ۷
- شکل ۵-۲: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیالات با تنش تسلیم ۸
- شکل ۶-۲: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیالات تیکسو تروپیک ۱۴
- شکل ۷-۲: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیالات رئوپکتیک ۱۵
- شکل ۱-۳: هندسه شیار های داخل لوله [3] ۱۸
- شکل ۲-۳: نمودار توزیع انتقال حرارت برای شیار های دایره ای، مستطیلی و ذوزنقه ای [3] ۲۰
- شکل ۳-۳: لوله DDIR [3] ۲۰
- شکل ۴-۳: نمودار توزیع سرعت و خطوط جریان [4] ۲۱
- شکل ۵-۳: شیار لوله DDIR [4] ۲۱
- شکل ۶-۳: لوله همراه با نوار تابیده شده [5] ۲۲
- شکل ۷-۳: نوار مارپیچ حلزونی با نسبت نوار مارپیچ مختلف [24] ۲۸
- شکل ۸-۳: نوار مارپیچ حلزونی با افزایش نسبت نوار مارپیچ [24] ۲۸
- شکل ۹-۳: نوار مارپیچ حلزونی با کاهش نسبت نوار مارپیچ [24] ۲۸
- شکل ۱۰-۳: لوله دایره ای همراه با پیچش [27] ۲۹
- شکل ۱-۴: هندسه مسئله ۳۷
- شکل ۲-۴: شبکه بندی لوله ۳۸
- شکل ۳-۴: منحنی تغییرات فشار بر حسب تعداد سلول ها ۳۹
- شکل ۱-۵: نمودار سرعت در گام ۲۰، ارتفاع ۱ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۴۱
- شکل ۲-۵: نمودار سرعت در گام ۲۰، ارتفاع ۱،۵ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۴۱
- شکل ۳-۵: نمودار سرعت در گام ۲۰، ارتفاع ۲ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۴۲
- شکل ۴-۵: نمودار سرعت در گام ۴۰، ارتفاع ۱،۵ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۴۲
- شکل ۵-۵: نمودار سرعت در گام ۴۰، ارتفاع ۲ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۴۳
- شکل ۶-۵: نمودار سرعت در گام ۶۰ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۴۳
- شکل ۷-۵: نمودار سرعت برای مقاطع و رینولدزهای مختلف در $n = 1.2$ ۴۴
- شکل ۸-۵: نمودار سرعت در گام ۲۰، ارتفاع ۱،۵ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۴۵
- شکل ۹-۵: نمودار سرعت در گام ۲۰، ارتفاع ۲ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۴۵

- شکل ۵-۱۰: نمودار سرعت در گام ۴۰، ارتفاع ۱،۵ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۴۶
- شکل ۵-۱۱: نمودار سرعت در گام ۴۰، ارتفاع ۲ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۴۶
- شکل ۵-۱۲: نمودار سرعت در گام ۶۰، ارتفاع ۱ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۴۷
- شکل ۵-۱۳: نمودار سرعت در گام ۶۰، ارتفاع ۱،۵ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۴۷
- شکل ۵-۱۴: نمودار سرعت در گام ۶۰، ارتفاع ۲ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۴۷
- شکل ۵-۱۵: نمودار سرعت در گام ۲۰، ارتفاع ۱ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۴۸
- شکل ۵-۱۶: نمودار سرعت در گام ۲۰، ارتفاع ۱،۵ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۴۸
- شکل ۵-۱۷: نمودار سرعت در گام ۲۰، ارتفاع ۲ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۴۹
- شکل ۵-۱۸: نمودار سرعت در گام ۴۰، ارتفاع ۲ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۴۹
- شکل ۵-۱۹: نمودار سرعت در گام ۶۰، ارتفاع ۱،۵ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۵۰
- شکل ۵-۲۰: نمودار سرعت در مقاطع و رینولدزهای مختلف در $n = 1.2$ ۵۰
- شکل ۵-۲۱: نمودار سرعت در گام ۲۰ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۵۱
- شکل ۵-۲۲: نمودار سرعت در گام ۴۰ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۵۱
- شکل ۵-۲۳: نمودار سرعت در گام ۶۰ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۵۲
- شکل ۵-۲۴: نمودار سرعت در گام ۲۰ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۵۳
- شکل ۵-۲۵: نمودار سرعت در گام ۴۰ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۵۳
- شکل ۵-۲۶: نمودار سرعت در گام ۶۰ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۵۴
- شکل ۵-۲۷: نمودار سرعت در مقاطع و رینولدزهای مختلف در $n = 1.2$ ۵۵
- شکل ۵-۲۸: نمودار سرعت در گام ۲۰ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۵۵
- شکل ۵-۲۹: نمودار سرعت در گام ۴۰ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۵۶
- شکل ۵-۳۰: نمودار سرعت در گام ۶۰ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۵۶
- شکل ۵-۳۱: نمودار سرعت در گام ۲۰ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۵۷
- شکل ۵-۳۲: نمودار سرعت در گام ۴۰ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۵۷
- شکل ۵-۳۳: نمودار سرعت در گام ۶۰ میلی متر و رینولدز ۳۰۷ ۵۸
- شکل ۵-۳۴: نمودار سرعت در گام ۲۰ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۵۸
- شکل ۵-۳۵: نمودار سرعت در گام ۴۰ میلی متر و رینولدز ۹۱۸ ۵۹
- شکل ۵-۳۶: نمودار دما در رینولدز ۳۰۷ ۶۰
- شکل ۵-۳۷: نمودار دما در رینولدز ۹۱۸ ۶۱
- شکل ۵-۳۸: نمودار دما در رینولدز ۳۰۷ ۶۲
- شکل ۵-۳۹: نمودار دما در رینولدز ۹۱۸ ۶۲
- شکل ۵-۴۰: نمودار دما در رینولدز ۳۰۷ ۶۳
- شکل ۵-۴۱: نمودار دما در رینولدز ۹۱۸ ۶۴
- شکل ۵-۴۲: نمودار دما در رینولدز ۳۰۷ ۶۴

- شکل ۴۳-۵: نمودار دما در رینولدز ۹۱۸ ۶۵
- شکل ۴۴-۵: نمودار عدد ناسلت در رینولدز ۳۰۷ و $n = 1.2$ ۶۶
- شکل ۴۵-۵: نمودار عدد ناسلت در رینولدز ۹۱۸ و $n = 0.75$ ۶۷
- شکل ۴۶-۵: نمودار عدد ناسلت در رینولدز ۳۰۷ و $n = 1.2$ ۶۷
- شکل ۴۷-۵: نمودار عدد ناسلت در رینولدز ۹۱۸ و $n = 0.75$ ۶۸
- شکل ۴۸-۵: نمودار عدد ناسلت در رینولدز ۳۰۷ و $n = 1.2$ ۶۹
- شکل ۴۹-۵: نمودار عدد ناسلت در رینولدز ۹۱۸ و $n = 0.75$ ۷۰
- شکل ۵۰-۵: نمودار عدد ناسلت در رینولدز ۹۱۸ و $n = 0.75$ ۷۰
- شکل ۵۱-۵: نمودار عدد ناسلت برای لوله صاف ۷۱
- شکل ۵۲-۵: نمودار عدد ناسلت برای لوله صاف ۷۲
- شکل ۵۳-۵: نمودار افت فشار برای حالت فنردار و شرط مرزی دما ثابت و $n = 1.2$ ۷۲
- شکل ۵۴-۵: نمودار افت فشار برای حالت فنردار و شرط مرزی دما ثابت و $n = 0.75$ ۷۳
- شکل ۵۵-۵: نمودار افت فشار برای حالت شیاردار و شرط مرزی دما ثابت و $n = 1.2$ ۷۳
- شکل ۵۶-۵: نمودار افت فشار برای حالت شیاردار و شرط مرزی دما ثابت و $n = 0.75$ ۷۳
- شکل ۵۷-۵: نمودار افت فشار برای حالت شرط مرزی شار ثابت ۷۴
- شکل ۵۸-۵: نمودار افت فشار برای لوله صاف ۷۴

فهرست جداول

- جدول ۴-۱: ضرایب معادله پیوستگی ۳۴
- جدول ۴-۲: ضرایب ثابت ۳۵
- جدول ۵-۱: نسبت افزایش عدد ناسلت و افت فشار در حالت فنردار و شرط مرزی دما ثابت..... ۷۵
- جدول ۵-۲: نسبت افزایش عدد ناسلت و افت فشار در حالت شیاردار و شرط مرزی دما ثابت..... ۷۶
- جدول ۵-۳: نسبت افزایش عدد ناسلت و افت فشار در حالت فنردار و شرط مرزی شار ثابت..... ۷۷
- جدول ۵-۴: نسبت افزایش عدد ناسلت و افت فشار در حالت شیاردار و شرط مرزی شار ثابت..... ۷۷

علائم لاتین

شاخص رفتار سیال مدل پاورلا	n
ضریب سازگاری سیال مدل پاورلا	k
ضریب انتقال حرارت لوله شیاردار	h_a
ضریب انتقال حرارت لوله ساده	h_s
پهنای شیار	w
طول شیار	L
گام شیار	p
ارتفاع شیار	e
عدد ناسلت	Nu
ضریب اصطکاک	f
ضریب حرارتی سیال	C_p
قابلیت هدایت حرارتی	K
عدد رینولدز	Re
سرعت ورودی	V
قطر هیدرولیکی	D_h
محیط مقطع ورودی سیال	P
مساحت مقطع ورودی سیال	A_c

علائم یونانی

تنش برشی	τ
ویسکوزیته سیال	μ
ویسکوزیته ظاهری سیال	η
دانسیته سیال	ρ

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- سیال غیر نیوتنی^۱

روابط ریاضی متعددی برای بیان رفتار سیال ایده آل در موقعیت های مختلف حاصل شده است که بعضی از این روابط تخمین مناسبی برای سیالهای واقعی در موقعیت خاص می باشند. پرانتل^۲ 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. 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.

از آنجایی که این سیالات به طور فزاینده در یک طیف گسترده در فرآیندهای صنعتی به کار گرفته می شوند درک شاخصهای انتقالی آنها اهمیت یافته است. 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.

۱- Non-Newtonian fluid

۲- Prandtl

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.

مدل پاورلا^۳ بیشترین کاربرد را در توصیف سیالات غیر نیوتنی لزج خالص دارد. این مدل به طور گسترده کاربرد داشته و طیف گسترده‌تری 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. در فصل دوم به بررسی کامل رفتار سیالات غیر نیوتنی خواهیم پرداخت.

۱-۲- افزایش انتقال حرارت

با توجه به پیشرفت صنعت و ضرورت استفاده از سیستم‌های با حجم کمتر و نرخ انتقال حرارت بیشتر، بررسی انتقال حرارت و خصوصیات جریان سیال در داخل لوله‌ها در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های افزایش ضریب انتقال حرارت از جمله روش‌های دینامیکی مانند، ارتعاش و در روش‌های استاتیکی می‌توان از وسایلی مانند نوار پیچیده شده، سیم پیچ یا ایجاد شیار و دندانه‌ها در داخل لوله اشاره کرد. این وسایل و زبریها باعث اغتشاش و چرخشی شدن جریان در اطراف دیواره لوله و افزایش سرعت سیال می‌شوند. در نتیجه این عوامل باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شوند.

در فصل سوم به بررسی مقالات و کارهای انجام شده در گذشته در مورد افزایش انتقال حرارت سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی در داخل لوله خواهیم پرداخت.

در فصل چهارم به طرح مسئله و روابط حاکم بر آن خواهیم پرداخت. همچنین روش حل عددی

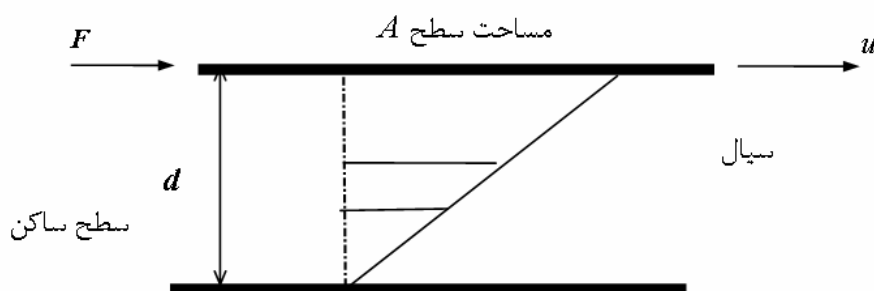
استفاده شده و مدل پاورلا برای سیالات غیرنیوتنی توضیح داده می شود.
در فصل پنجم به بررسی نتایج بدست آمده با استفاده از حل عددی در مورد افزایش انتقال حرارت در داخل لوله و تاثیرات وجود شیار و فنر در داخل لوله می پردازیم.

فصل ۲

سیالات غیر نیوتنی

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، امولیسون‌های 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 (۲-۱) 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

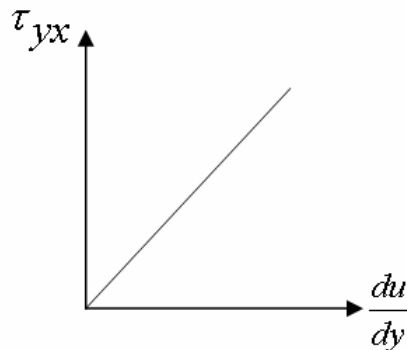


شکل ۲-۱: حرکت دائم آرام سیال نیوتنی بین دو صفحه موازی

خطی است و گرادیان سرعت $\frac{du}{dy}$ یا نرخ برش در عرض لایه سیال ثابت است. شیب منحنی تنش برشی بر حسب گرادیان سرعت همان μ ضریب لزجت سیال است که برای سیال نیوتنی فقط به دما و فشار وابسته است و مستقل از نرخ برش می‌باشد و رابطه تنش برشی و نرخ برش در همه جریانها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{yx} = \mu \times \frac{du}{dy} \quad (1-2)$$

در سیال نیوتنی، انرژی بوسیله برخورد نسبی مولکولها از بین می‌رود و در نتیجه رفتار نیوتنی را می‌توان برای گازها و سیالات با وزن مولکولی کم بکار برد.

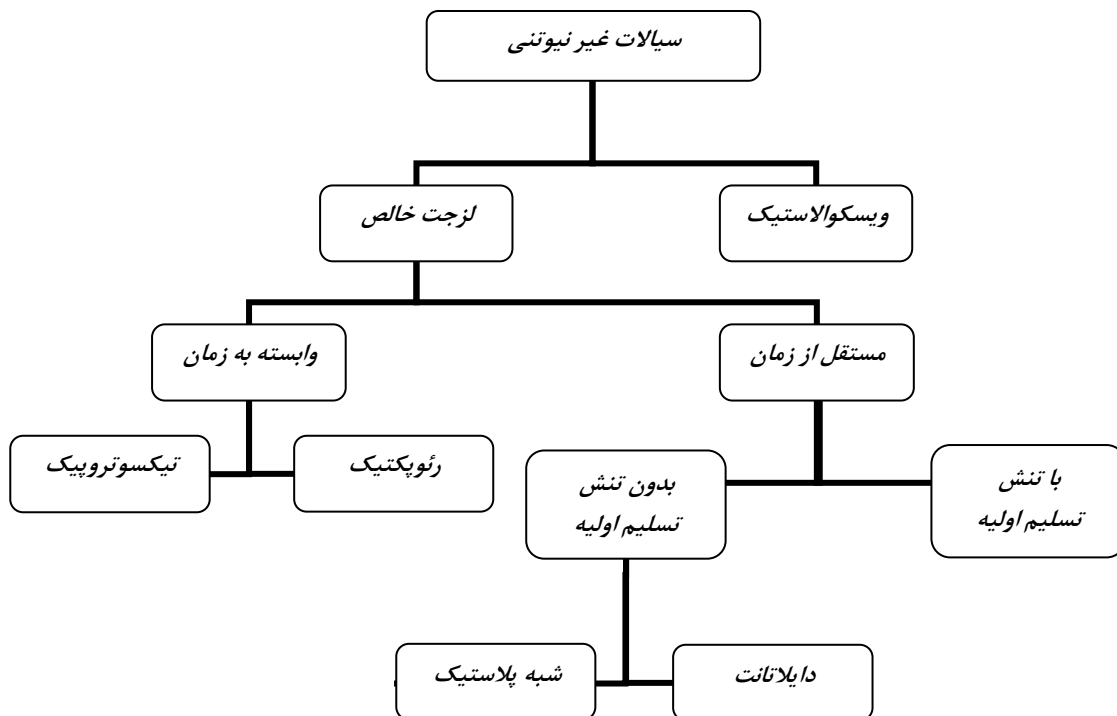


شکل ۲-۲: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیال نیوتنی

برای سیال غیر نیوتنی نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش یک خط مستقیم گذرنده از مبدأ نیست و لزجت ظاهری که نسبت تنش برشی به برآیند نرخ برش تعریف می‌شود ممکن است با نرخ برش افزایش یا کاهش یابد. در بعضی از سیالات ممکن است به مدت برش نیز وابسته باشد. این بی‌قاعدگی در لزجت تحت عنوان رفتار سیال غیر نیوتنی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲-۲- دسته بندی سیالات غیر نیوتنی

سیالات غیر نیوتنی تحت ترکیبات شیمیائی آنها که خواص آنها را باعث می‌شود دسته بندی شده‌اند. متزner^۱ در سال ۱۹۶۱ یک دسته بندی رئولوژیکی جامع ارائه داده است [۱]. یک دسته بندی دیگر نیز به وسیله شنی^۲ و ماشلکار^۳ در سال ۱۹۸۲ ارائه شده است [۲]. که این دسته بندی در شکل (۲-۳) ارائه شده است.



شکل ۲-۳: دسته بندی سیالات غیر نیوتنی

Metzner -۱

Shenoy -۲

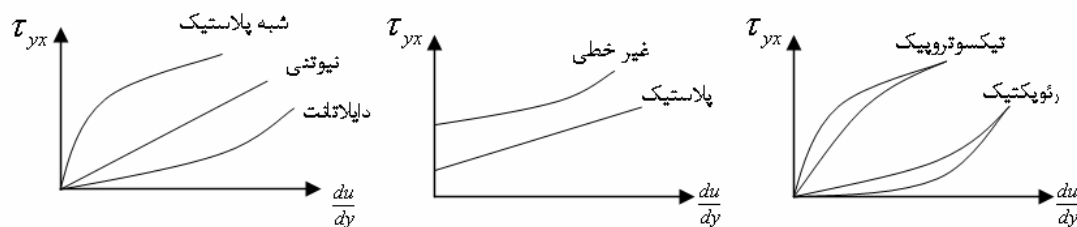
Mashelkar -۳

در ارتباط با پاسخ الاستیک سیال به تنش اعمالی دو گروه کلی سیال وجود دارند: لزج خالص و ویسکوالاستیک. چنانچه با برداشتن تنش اعمالی تغییر شکلی که سیال را به حالت اولیه طبیعی برگرداند وجود نداشته باشد یعنی پاسخ الاستیک نباشد، آنرا سیال لزج خالص می‌نامیم. یادآوری می‌شود اکثر جامدات پاسخ الاستیک از خود بروز می‌دهند به طوری که با برداشت تنش اعمالی به حالت اولیه خویش بازمی‌گردند. ساده‌ترین این اجسام جامدات الاستیک هوکی می‌باشند که در آنها تغییر شکل مستقیماً متناسب با تنش اعمالی است.

سیالات ویسکوالاستیک دارای هر دو خاصیت سیالات لزج و جامدات الاستیک هستند. به عبارتی این دسته از سیالات پاسخ الاستیک جزئی در هنگام برداشت تنش اعمالی از خود نشان می‌دهند. خواص سیالات ویسکوالاستیک و لزج خالص در زیر به طور کامل مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲-۳- سیالات لزج خالص

این سیالات را می‌توان به سیالات وابسته به زمان و مستقل از زمان تقسیم بندی کرد. سیالات مستقل از زمان آنهایی هستند که مدت زمان برش تأثیری روی لزجت آنها ندارد. نرخ برش در یک نقطه وابسته به تنش برشی در همان نقطه است. نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای یک گروه از چنین سیالاتی در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.



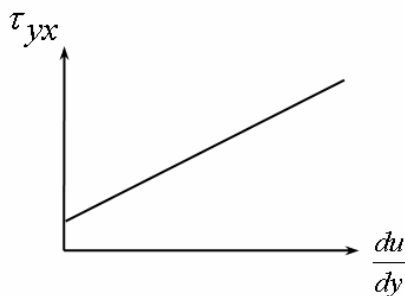
وابسته به زمان مستقل از زمان با تنش تسلیم اولیه مستقل از زمان بدون تنش تسلیم اولیه

شکل ۲-۴: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش و زمان برای سیالات مختلف

۲-۳-۱- سیالات لزج مستقل از زمان با تنش تسلیم اولیه

تنش تسلیم اولیه در این سیالات باعث جلوگیری از حرکت برای مقادیر تنش برشی کمتر از مقدار تسلیم خواهد شد. به عبارتی این سیالات مقدار محدودی تنش را با نرخ کرنش صفر تحمل می‌کنند. این مقدار تسلیم که τ_y نامیده می‌شود به علت ساختارهای داخلی این سیالات است. چنانچه τ_{yx} بزرگتر از τ_y باشد، این ساختارهای داخلی کاملاً فروریخته و اجازه حرکت برشی داده می‌شود. این ساختار داخلی اجازه بازسازی مجدد لحظه‌ای هنگامی که τ_{xy} کوچکتر از τ_y است را دارند. این سیالات غیر نیوتنی عموماً تحت عنوان سیالات ویسکو پلاستیک شناخته می‌شوند.

نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیالات با تنش تسلیم در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. همانطور که بیان شد این سیالات هنگامی که تنش برشی کوچک به آنها اعمال می‌شود جریان پیدا نخواهند کرد و در یک مقدار بحرانی τ_y شروع به جریان خواهند کرد. نمونه‌ای از این سیالات خمیر دندان است که هنگامی که لوله خمیر دندان را باز می‌کنیم احتیاج به یک نیروی مناسب داریم تا جریان خمیر داخل لوله برقرار شود. از این نمونه سیالات می‌توان به این موارد نیز اشاره کرد: روغن حفاری^۴، خمیر دندان، گریس^۵، مایع‌های شوینده^۶، آدامس صمغی، قیر، سس گوجه فرنگی، لجن‌های فاضلاب، مذاب پلاستیک^۷ و خمیر کاغذ.



شکل ۲-۵: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیالات با تنش تسلیم

Drilling Mud - ۴

Grease - ۵

Detergent Slurries - ۶

Plastic Melts - ۷

برخی از مدل ها که برای سیالات با تنش تسلیم پیشنهاد شده به همراه فرمول تنش برشی

بر حسب نرخ برش به صورت زیر است [۲]:

۱. مدل بینگهام - پلاستیک^۸:

$$\tau_{xy} - \tau_y = \eta \times \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (۲-۲)$$

۲. مدل هرشل بالکی^۹ (I):

$$\tau_{xy} - \tau_y = \left(\eta \times \left(\frac{du}{dy} \right) \right)^{\frac{1}{m}} \quad (۳-۲)$$

۳. مدل هرشل - بالکی (II):

$$\tau_{xy} - \tau_y = \frac{\eta}{1 + c(\tau_{yx} - \tau_y)^n} \times \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (۴-۲)$$

$$\tau_{yx} = \mu_l \left(\frac{1.2 + 5(c\tau_{yx}^{-0.5} + 1)^2}{1.2 + 25(c\tau_{yx}^{-0.2} + 1)^2} \right) \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (۵-۲)$$

Bingham-Plastic -۸

Herschel-Bulkley -۹

مدل بینگهام پلاستیک شامل دو ثابت τ_y (تنش تسلیم) و η (ویسکوزیته پلاستیک) است و یک مدل خطی است که حل تحلیلی آن نیز مورد توجه قرار گرفته است. اگر چه رفتار خطی اغلب به ندرت اتفاق می افتد، اما انحراف به قدری کوچک است که در طراحی می توان از این مدل استفاده کرد. به سیال پلاستیک بینگهام در تحقیقات تحلیلی، مواد تسلیم شده تحت جریان گفته می شود. در این سیالات ویسکوزیته ظاهری با افزایش نرخ برش کاهش می یابد. مدل های هرشل بالکی منحنی جریان غیر خطی را تشریح می کند و ثابت های η و m در این مدل از شیب منحنی $\tau_{yx} - \tau_y$ بر حسب $\frac{du}{dy}$ بدست خواهد آمد.

۲-۳-۲- سیالات لزج مستقل از زمان بدون تنش تسلیم اولیه

سیالات مستقل از زمان که دارای تنش اولیه تسلیم نباشند اگر لزجت ظاهری که در حقیقت همان شیب منحنی تنش برشی بر حسب نرخ برش است با افزایش نرخ برش کاهش یابد شبه پلاستیک^{۱۰} نامیده می شود و اگر لزجت ظاهری با افزایش نرخ برش افزایش یابد دایلاتانت^{۱۱} (انبساطی) نامیده می شود. در ادامه با مثالهایی از این نمونه سیالات و مدلهایی که برای هر کدام ارائه شده آشنا خواهیم شد.

۲-۳-۲-۱- سیالات شبه پلاستیک

این سیالات عموماً تحت عنوان سیالات رقیق شونده^{۱۲} نامیده می شوند. در این سیالات ویسکوزیته ظاهری با افزایش نرخ برش کاهش می یابد. این سیالات در نرخ های برشی بی نهایت رفتاری مشابه سیالات نیوتنی دارند. نمونه هایی از این سیالات عبارتند از: پلی اسیتیرن مذاب^{۱۳}،

۱۰- Pseudoplastic Fluids

۱۱- Dilatant

۱۲- Shear thinning

۱۳- Molten polystyrene

اکسید پلی اتیلن^{۱۴}، محلولها و مذاب های پلیمری^{۱۵}، سیالات بیولوژیکی^{۱۶}، شیره قند، نشاسته، رنگ، محلول لاستیکها، ماده مخصوص تغلیظ بنزین (ناپلام)^{۱۷} و غیره. اکثر قریب به اتفاق سیالات غیر نیوتنی را می توان در این دسته قرار داد. برخی مدل های تجربی که برای ارتباط نرخ برش و تنش برشی این گونه سیالات بکار می رود به صورت زیر است [۲]:

۱. مدل پاورلا یا استوالد-دیوال (قاعده توانی)^{۱۸}:

$$\tau_{yx} = k \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \frac{du}{dy} \quad (۶-۲)$$

متغیرهای n, k ثابت های تجربی هستند که n شاخص رفتار سیال است و دامنه آن از صفر تا یک تغییر می کند، k نیز ضریب سازگاری سیال است. ثابت های n و k جزء خواص ماده بوده و در حالت کلی بسته به نوع ترکیب در مواد مخلوط، با فشار و دما تغییر می کند. در حالت کلی تغییر k با دما، نسبت به n محسوس تر است. حالت $n=1$ و $k = \mu$ بیانگر رفتار سیال نیوتنی است و $n < 1$ رفتار سیال شبه پلاستیک را بیان می کند و $n > 1$ سیال دایلاتانت (انبساطی) را توصیف می نماید. ویسکوزیته ظاهری در این مدل به صورت زیر تعریف می شود

$$\eta = k \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \quad (۷-۲)$$

Polyethylene Oxide - ۱۴
Polymere Solution or Melts - ۱۵
Biological Fluids - ۱۶
Naplam - ۱۷
Power-Law or Ostwald-Dewael - ۱۸