بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی شیمی

مدلسازی ریاضی جریان دوفازی لایه‌ای گاز-مایع غیرنیوتنی در لوله

دانشجو:

مهشید فیروزی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی شیمی گرایش شبیه سازی، کنترل و طراحی فرایندها

استاد راهنما:

دکترسید حسن هاشم آبادی

اسفند ماه ۱۳۸۶

حمد و سپاس به درگاه خداوندی که وجود انسان را به زیور علم و معرفت بیاراست و با شکرگزاری به درگاه ایزد منان که مرا در تهیه این رساله یاری نمود.

شایسته است که از استاد ارجمند جناب آقای دکتر هاشم آبادی که همواره با راهنماییهای سودمند خود، روشنگر مسیر اینجانب در تهیه و تدوین این رساله بوده‌اند، تشکر و سپاسگزاری نمایم .

تقدیم به:

پدرو مادر عزیز و مهربانم به پاس زحمات بی‌دریغشان

چکیده

معادلات حرکت جریان دوفازی آرام، غیرقابل امتزاج، پایا و کاملاً توسعه یافته با الگوی جریان لایه ای که یک فاز، سیال نیوتنی و فاز دیگر سیال غیر نیوتنی می‌باشد، در لوله افقی بصورت تحلیلی و عددی حل شده است. جهت داشتن عمومیت بیشتر در تجزیه تحلیلهای انجام شده، مدل رئولوژیکی سه پارامتری هرشل- باکلی[۱] بعنوان مدل رئولوژیکی سیال غیر نیوتنی در نظر گرفته شده است؛ در حالت خاص ، زمانیکه شاخص قانون توانی[۲] در مدل برابر یک باشد، مدل مذکور به مدل بینگهام پلاستیک تبدیل می‌گردد که در هر دو حالت رفتار جریان دو فازی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت حل تحلیلی از مختصات دو قطبی[۳] که مناسبترین مختصات برای الگوی جریان لایه‌ای می باشد، استفاده شده است. نتیجه مدلسازی به معادلات دیفرانسیل جزئی(PDE) ناهمگن با ضرائب متغیر برای فاز مربوط به سیال نیوتنی و غیر نیوتنی منجر می گردد ولی از آنجائیکه حل معادله مربوط به سیال غیر نیوتنی با توجه به شکل ویسکوزیته ظاهری آن بصورت تحلیلی امکان پذیر نمی باشد، با فرض یک فیلم نازک از سیال غیر نیوتنی، می توان از تغییرات سرعت در یک جهت صرفنظر کرد و در نتیجه معادله مربوطه به یک معادله دیفرانسیل معمولی(ODE) ناهمگن با ضرائب متغیر، تبدیل می گردد. با حل معادلات حاکم با توجه به شرایط مرزی مناسب مسئله، توزیع سرعت دوفاز بدست می آید، و با استفاده از آن خواص جریان همچون ماندگی و افت فشار دو فاز محاسبه می گردد؛ بررسی خواص رئولوژیکی سیال غیر نیوتنی روی جریان نشان می‌دهد که در نسبت ویسکوزیته‌های پایین دو فاز، تغییرات زیادی در خصوصیات جریان دو فازی بوجود نمی‌آید ولی با افزایش این نسبت، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در افت فشار جریان و ماندگی سیال بوجود می‌آید. درصورتیکه عدد بی‌بعد بینگهام (Bi) در مدل هرشل-باکلی خیلی زیاد باشد، در این حالت جریان تک فازی خواهد بود که با توجه به کاربرد آن در مقاطع مختلف محدب و مقعر در مسائل مهندسی، مورد بررسی قرار گرفته است.

معادلات حاصل از مدلسازی با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده‌ای به روش تحلیلی حل شدند و در پایان جهت بررسی حل ارائه شده، با صرفنظر از برخی فرضیات ساده کننده، حل عددی معادلات حاکم به روش المان محدود با استفاده از جعبه ابزار حل معادلات دیفرانسیل جزئی[۴] در نرم افزار MATLAB نیز ارائه شده است و مقایسه نتایج بدست آمده از حل عددی با حل تحلیلی انجام شده نشان می‌دهد که برای نسبتهای ارتفاع مایع غیر نیوتنی به قطر لوله (h/D) نزدیک به ۰,۳۵ از تطابق خوبی برخوردار می‌باشد.

---

۱ Herschel- Bulkley

۲ Power law

۳ Bipolar

۴ PDE Toolbox

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل۱ مقدمه ۱

مقدمه۱-۱- ۲

فصل۲ مروری بر مفاهیم و کارهای انجام شده ۴

۲-۱- مقدمه ۵

۲-۲- رئولوژی سیالات ۶

۲-۳- تقسیم بندی سیالات ۶

۲-۳-۱- سیالات غیر نیوتنی ۷

۲-۴- جریانهای دو فازی گاز- مایع ۹

۲-۴-۱- الگوهای جریان در لوله های عمودی ۱۱

۲-۴-۲- الگوهای جریان در لوله‌های افقی وشیبدار ۱۲

۲-۵- مدلسازی رژیم جریان لایه‌ای ۱۴

۲-۵-۱- مدلهای یک بعدی ۱۵

۲-۵-۱-۱- پارامتر لاکارت و مارتینلی ۱۵

۲-۵-۱-۲- دیدگاه مکانیکی ۱۵

۲-۵-۲- مدلهای دو بعدی ۱۷

۲-۵-۲-۱- جریان آرام ۱۷

۲-۵-۲-۲- جریان آشفته ۲۵

۲-۶- هدف از انجام این مطالعه ۲۵

فصل۳ مدلسازی جریانهای لایه‌ای آرام - آرام ۲۷

۳-۱- مقدمه ۲۸

۳-۲- حل تحلیلی ۲۹

۳-۲-۱- مدلسازی جریان ۲۹

۳-۲-۱-۱- شکل فصل مشترک دو فاز ۳۲

۳-۲-۱-۲- تعیین ناحیه پلاگ ۳۳

۳-۲-۲- حل معادله حرکت مربوط به فاز نیوتنی ۳۶
۳-۲-۳- حل معادله حرکت مربوط به فاز غیر نیوتنی ۳۸
۳-۲-۴-محاسبه افت فشار جریان دو فازی ۴۰
۳-۲-۵-محاسبه ماندگی ۴۲
۳-۲-۶- بحث و آنالیز نتایج ۴۳
۳-۲-۶-۱- مقایسه نتایج جریان دو فازی نیوتنی در حالت یک بعدی و دو بعدی ۴۳
۳-۲-۶-۲- تأثیر عدد بینگهام و نسبت ویسکوزیته دو فاز ۴۴
۳-۲-۶-۳- تأثیر شاخص قانون توانی بر جریان دو فازی ۵۰
۳-۲-۶-۴- تأثیر انحنای فصل مشترک دو سیال بر جریان دو فازی ۵۲
۳-۲-۶-۵- تأثیر خواص رئولوژیکی سیال بر افت فشار جریان دو فازی ۵۴
۳-۲-۶-۶- تأثیر خواص رئولوژیکی سیال بر ماندگی سیال ۵۷
۳-۲-۶-۷- اثر سطح مقطع غیر دایره‌ای روی جریان تک فازی ۶۰
۳-۲-۶-۷-۱- ضریب اصطکاک سیال نیوتنی در کانالهای با سطح مقطع غیر دایره‌ای ۶۲
۳-۳-حل دو بعدی جریان دو فازی نیوتنی- غیر نیوتنی ۶۹

فصل۴ نتایج و پیشنهادات ۷۵
۴-۱- جمع بندی نتایج ۷۶
۴-۲- پیشنهادات ۷۸
۴-۳- لیست مقالات مستخرج از این رساله ۷۸
پیوست الف ۸۰
مراجع ۸۳

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل(۲-۱)نمای شماتیکی از حرکت سیال بین دوصفحه موازی ۶

شکل(۲ -۲) رفتار رئولوژیکی سیالات غیرنیوتنی..... ۹

شکل(۲-۳) الگوهای جریان دوفازی در جریان عمودی..... ۱۲

شکل(۲-۴) الگوهای جریان دوفازی در جریانهای افقی دو فازی..... ۱۴

شکل(۲-۵) خطای مطلق در حل به روش سری فوریه ۲۱

شکل(۲-۶) اثر ماندگی برکانتور سرعت ۲۳

شکل(۲-۷) اثر نسبت ویسکوزیته دو فاز برکانتورهای سرعت ۲۴

شکل(۳-۱) نمای شماتیکی از سیستم جریان دو فازی لایه‌ای در سیستم مختصات دو قطبی..... ۲۹

شکل(۳-۲) نمای شماتیکی از جریان لایهای دوفازی در مختصات دوقطبی ۳۰

شکل(۳-۳) نمای شماتیکی از شکل فصل مشترک دو سیال و ناحیه پلاگ..... ۳۳

شکل(۳-۴) مقایسه سرعت متوسط حاصل از حل تحلیلی معادلات ممنتوم حاکم بر جریان دوفازی نیوتنی در حالتهای یک و دو بعدی..... ۴۳

شکل(۳-۵) بررسی اثر عدد بی‌بعد بینگهام برتوزیع بی‌بعد سرعت دو فاز $\left(\varphi_1=\frac{\pi}{6},\mathrm{Bi}=0.015,\mathrm{n}=1,\xi=0,\mu^*=0.1\right)$ ۴۶

شکل(۳-۶) بررسی اثر عدد بی‌بعد بینگهام برتوزیع بی‌بعد سرعت دو فاز $\left(\varphi_1=\frac{\pi}{6},\mathrm{Bi}=0.015,\mathrm{n}=1,\xi=0,\mu^*=10\right)$ ۴۷

شکل(۳-۷) توزیع بی‌بعد سرعت در $\varphi_1=\frac{\pi}{6},\xi=0,\mathrm{Bi}=0.05,\varphi_i=\pi$ و بررسی اثر μ^*بر آن..... ۴۹

شکل(۳-۸) تغییرات توزیع سرعت در طول خط $\xi=0$ در $(\mathrm{Bi}=0.05,\tilde{\mu}=0.01,\xi=0)$ ۴۸

شکل(۳-۹) تغییرات توزیع سرعت فاز یک با ξ در فصل مشترک دو سیال $\left(\varphi_i=\pi,\ \mu^*=100,\ \mathrm{Bi}=0.015\right)$ ۵۰

شکل(۳-۱۰) اثر شاخص سیال قانون توانی بر نرخ برش سیال غیرنیوتنی $\left(\varphi_1=\frac{\pi}{6},\xi=0,\mathrm{Bi}=0.015\right)$..... ۵۱

شکل(۳-۱۱) توزیع بی‌بعد سرعت و بررسی اثرات n بر آن $\left(\varphi_1=\frac{\pi}{10},\mathrm{Bi}=0.005\right)$ ۵۲

شکل(۳-۱۲) اثر انحنای فصل مشترک بر توزیع بی‌بعد سرعت $(\mathrm{Bi}=0.04, \varphi_1=\pi/6, \mathrm{n}=1)$ الف $\mu^*=0.1$، ب $\mu^*=10$ ۵۶
شکل(۳-۱۳) تغییرات افت فشار بی‌بعد جریان دوفازی با عدد بینگهام $(\mathrm{n}=1, \xi=0)$ ۵۵
شکل(۳-۱۴) تغییرات افت فشار بی‌بعد جریان دوفازی با نسبت ویسکوزیته دوفاز $(\mathrm{Bi}=0.015)$ ۵۶
شکل(۳-۱۵)مقایسه ضریب مارتینلی (افت فشار بی‌بعد جریان دوفازی) $(\mu^*=0.01, n=1, Bi\to 0)$ ۵۷
شکل(۳-۱۶) بررسی اثر μ^* بر ماندگی سیال غیرنیوتنی بصورت تابعی از نسبت دبی جریان دو فاز $(\mathrm{Bi}=0.005)$ ۵۸
شکل(۳-۱۷) بررسی اثر Bi بر ماندگی سیال غیرنیوتنی بصورت تابعی از نسبت دبی جریان دو فاز $(\mu^*=0.1)$ ۵۸
شکل(۳-۱۸) بررسی اثر μ^* در $\mathrm{Bi}=0.005$ و Bi در $\mu^*=0.1$ بر ماندگی سیال غیرنیوتنی بصورت تابعی ازپارامتر لاکارت- مارتینلی ۵۹
شکل(۳-۱۹) نمای شماتیکی از سطح مقطع کانالهای با سطح مقطع غیر دایره‌ای در مختصات دوقطبی ۶۰
شکل(۳-۲۰) تغییرات توزیع سرعت با تغییر سطح مقطع $\varphi_1=\frac{\pi}{3}, \xi=0$ ۶۱
شکل(۳-۲۱) تغییرات افت فشار بی‌بعد با شکل سطح مقطع کانال ۶۲
شکل(۳-۲۲) بررسی میزان دقت روابط ارائه شده (الف): (۳-۶۸)، (ب و ج): (۳-۶۹) نسبت به نتایج حاصل از حل تحلیلی ۶۶
شکل(۳-۲۳) مقایسه نتایج تحلیلی و عددی سرعت متوسط جریان دوفازی نیوتنی- بینگهام پلاستیک ۷۱
شکل(۳-۲۴) سرعت متوسط جریان دوفازی نیوتنی- بینگهام پلاستیک و بررسی اثر نسبت ویسکوزیته دو فاز $(\mathrm{Bi}=0.005)$ ۷۲
شکل(۳-۲۵) سرعت متوسط جریان دوفازی نیوتنی- بینگهام پلاستیک و بررسی اثر عدد بی‌بعد بینگهام $(\mu^*=0.1)$ ۷۳
شکل(۳-۲۶)سرعت متوسط فاز پایین در سیستم جریان دوفازی نیوتنی- هرشل - باکلی و بررسی اثر شاخص قانون توانی $(\mu^*=0.1, \mathrm{Bi}=0.005)$ ۷۴

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱) خلاصه ای از انواع سیالات غیر نیوتنی..... ۱۰
جدول (۳-۱) روابط هندسی برای فصل مشترک مسطح و منحنی در مختصات دو قطبی.....۳۶
جدول (۳-۲) ضرائب معادلات (۳-۷۵) و (۳-۷۶).....۶۵
جدول (۳-۳) C_fRe به ازای سطوح مقطع متفاوت..... ۶۷
جدول (۳-۴) ادامه جدول (۳-۳).....۶۸

فهرست علائم اختصاری

A	سطح مقطع [m^2]
B	کمیت کلی
b	مقدار مخصوص یک کمیت
Bi	عدد بی‌بعد بینگهام
D	قطر لوله [m]
f	ضریب اصطکاک
F	نیرو[N]
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی [$w/m^2.K$]
H	عمق سیال مربوط به فاز زیرین [m]
K	ضریب هدایت گرمایی [w/m.K]
M	جرم مولکولی[kg/kmol]
m	شاخص پایداری [$pa.s^n$]
n	شاخص قانون توانی
p	فشار[pa]
P	محیط تر شده [m]
Q	دبی حجمی [m^3/s]
q	شار حرارتی [J/m^2]
R	شعاع لوله [m]
S	محیط [m]
T	دما [°C]
X	مختصات کارتزین
Y	مختصات کارتزین
Z	ضریب تراکم پذیری

علائم یونانی

χ	پارامتر لاکارت- مارتینلی
τ	تنش برشی [Pa]
τ_0	تنش تسلیم [pa]
σ	ثابت استفان –بولتزمن
ρ	دانسیته [kg/m^3]
φ	زاویه دید از فصل مشترک دو سیال (مربوط به مختصات دو قطبی)
ε	ماندگی
$\dot{\gamma}$	نرخ برش [s^{-1}]
ξ	نسبت دو بردار فاصله از قطبها (مربوط به مختصات دو قطبی)
μ	ویسکوزیته دینامیک [pa.s]
υ	ویسکوزیته سینماتیک [m^2/s]
η	ویسکوزیته ظاهری [pa.s]

زیرنویس

LS	جریان مایع یک فازی
GS	جریان گاز یک فازی
SU	فاز بالا زمانیکه به تنهایی در لوله جریان داشته باشد
SL	فاز پایین زمانیکه به تنهایی در لوله جریان داشته باشد
TP	دو فازی
۱	فاز سبکتر
۲	فاز سنگینتر
g	فاز گاز
l	فاز مایع
i	فصل مشترک
P	جریان پلاگ

بالا نویس

*	پارامتر بی‌بعد
-	مقدار متوسط
h	جواب عمومی
p	جواب خصوصی

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

علاوه بر جریانهای دو فازی مانند برف و باران، فعالیتهای آتشفشانی و آلودگی آب و هوا و... موجود در طبیعت، فرایندهایی صنعتی مانند کارخانجات هسته ای، موتورهای درون سوز، سیستمهای نیروی محرکه، حمل و نقل نفت و گاز، فرایندهای شیمیایی، جریانهای موجود در بدن انسان ، صنایع غذایی و بطور کلی هر چیزی که با تغییر فاز همراه می باشد، با جریان های چند فازی سروکار دارند. استفاده صنعتی از جریانهای چند فازی مستلزم پیشگویی رفتار این جریانها می باشد. جریانهای چندفازی می‌توانند حین تولید یا انتقال هیدروکربنها بدلیل جداسازی گاز و مایع یا بدلیل تغییرات در دما یا فشار سیالات موجود در مخازن ایجاد شود.

هنگامیکه دو سیال با خواص فیزیکی متفاوت مانند گاز و مایع بطور همزمان داخل لوله در جریان هستند، الگوهای جریان متفاوتی ممکن است بوجود آید. محققین بسیاری سعی نموده اند تا الگوهای جریانی را که در شرایط متنوع وجود دارد پیش بینی کنند؛ زیرا بسیاری از روابط افت فشار و ماندگی مایع بستگی به الگوهای جریانی موجود در خط لوله دارد. جریانهای افقی از نظر صنعتی دارای اهمیت زیادی می باشند و از نمونه های کاربرد آنها در صنعت، می توان به لوله های کندانسورها، خطوط لوله نفت و گاز اشاره کرد؛ از بین الگوهای جریان افقی، الگوی جریان لایه‌ای ساده‌ترین و شناخته ترین الگوی جریان می‌باشد و با این وجود همواره از نقطه نظر علمی و کاربردی مرکز توجه محققین و دانشمندان بوده است. از طرفی پیشرفت تکنولوژی محدوده وسیعی از سیالات با خواص پیچیده رئولوژیکی را با خود به همراه آورده است که دارای انحراف زیادی از رفتار سیالات نیوتنی می باشند. با توجه به کاربرد وسیع سیالات غیر نیوتنی در صنعت، علاقه در مطالعه این دسته از سیالات افزایش یافته است. مواد بسیاری مانند محلولهای پلیمر یا پلیمرهای مذاب، گل حفاری، برخی از مواد نفتی، نفت خام در دماهای پایین و روانسازها جزء سیالات غیرنیوتنی می باشند که بدلیل پیچیدگی این دسته از سیالات، مدلهای رئولوژیکی بسیاری برای آنها ارائه شده است. با توجه به کاربرد بسیار زیاد جریانهای چندفازی حاوی سیالات دارای رفتار غیر نیوتنی ، شناسایی رفتار آنها دارای اهمیت زیادی می‌باشد. در این مطالعه به تجزیه و تحلیل تئوری جریانهای لایه‌ای در لوله‌های افقی پرداخته شده است و عوامل مؤثر بر پارامترهای جریان دو فازی مورد بحث قرار گرفته است.

این رساله متشکل از ۴ فصل می‌باشد؛ در فصل ۱، مقدمه‌ای کوتاه در رابطه با عنوان رساله می-باشد، سپس در فصل ۲، مروری کوتاه بر کارهای انجام شده در زمینه جریان دو فازی لایه‌ای صورت

گرفته و به مفاهیم و تعاریف بنیادی در این راستا اشاره شده است. در فصل ۳، به مدلسازی جریان دوفازی لایه‌ای پایا، آرام و کاملاً توسعه یافته حاوی دو سیال غیر قابل امتزاج که یک فاز سیال نیوتنی و فاز دیگر سیال غیر نیوتنی پیروی کننده از مدل سیالات ویسکوپلاستیک مانند سیالات هرشل-باکلی و بینگهام پلاستیک است، در لوله پرداخته شده است. سپس معادلات حرکت حاکم بصورت تحلیلی و عددی حل شده است. در نهایت در فصل ۴ نتایج بصورت خلاصه ارائه شده و پیشنهاداتی جهت ادامه کار ذکر شده است.

فصل دوم

مروری بر مفاهیم و کارهای انجام شده

۲-۱- مقدمه

بسیاری از صنایع با محدوده وسیعی از سیالاتی سرو کار دارند که می توان بطور کلی تحت عنوان سیالات غیر نیوتنی آنها را دسته بندی کرد. ویسکوزیته سیالات غیر نیوتنی برخلاف سیالات نیوتنی که ثابت می باشد، تابعی از زمان، تنش برشی و دما می باشد. توصیف خواص رئولوژی این سیالات مستلزم شناخت روابط بین تنش برشی و نرخ برش[۱] می باشد.
بدیهی است که صنایع برای تولید محصولات مورد نیاز مجبور به کنترل خواص رئولوژیکی سیالات می باشند و به همین دلیل، علم رئولوژی در پنجاه سال اخیر بسرعت پیشرفت کرده است.

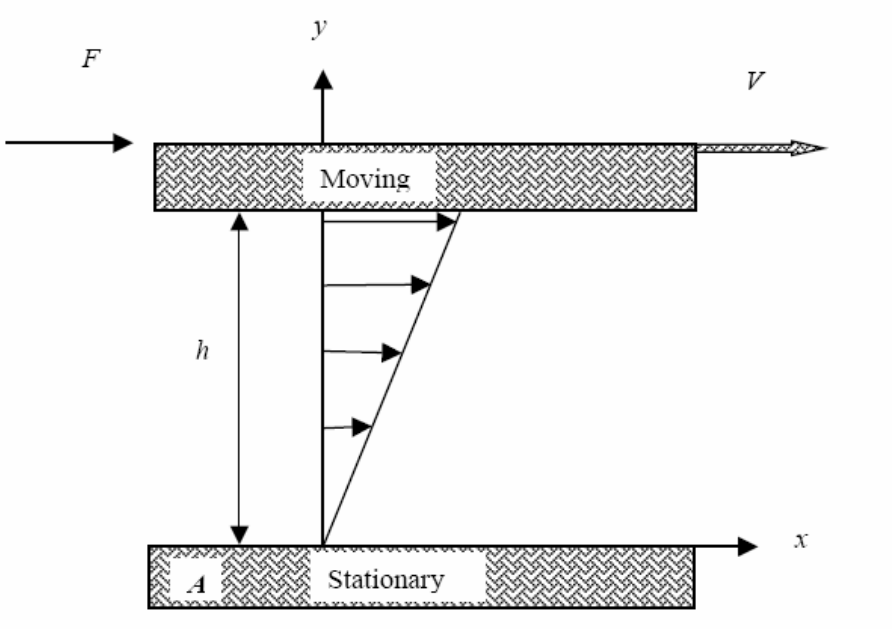
۲-۲- رئولوژی سیالات

رئولوژی مطالعه تغییر شکل و جریان سیالات در پاسخ به تنش می‌باشد. برای ایجاد جریانی از یک سیال غیرقابل تراکم، تنش برشی‌ای باید اعمال شود. سیالی را بین دو صفحه موازی به سطح مقطع A؛ همانطور که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است در نظر می‌گیریم. صفحه بالا تحت نیروی برشی F با سرعت ثابت V حرکت می‌کند در حالیکه صفحه پایین ثابت می‌باشد. در این زمینه تعاریف زیر بکار می‌رود:

تنش برشی: تنش برشی τ؛ بصورت نیروی وارده بر واحد سطح تعریف می‌شود.(F/A)

نرخ برش: در صورت ثابت بودن تغییرات سرعت بین دو صفحه موازی، نرخ برش، $\dot{\gamma}$، بصورت اختلاف سرعت بین دو صفحه تقسیم بر فاصله بین آنها،h ، تعریف می‌گردد.

[۱] .Shear Rate



شکل۲-۱. نمای شماتیکی از حرکت سیال بین دوصفحه موازی[۱]

ویسکوزیته: برای یک سیال نیوتنی، ویسکوزیته توسط قانون ویسکوزیته نیوتن بصورت زیر تعریف می-گردد

$$\tau = \mu\dot{\gamma} \qquad (۱-۲)$$

ویسکوزیته نمایشگر مقاومت سیالات در برابر حرکت می‌باشد ؛ ویسکوزیته سینماتیک بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho} \qquad (۲-۲)$$

۲-۳- تقسیم بندی سیالات

طی سالهای اخیر، علاقه به مطالعه سیالات غیرنیوتنی بدلیل کاربرد تکنولوژیکی آنها افزایش یافته است. بسیاری از مواد مانند مذاب یا محلولهای پلیمری، گل حفاری، نوع خاصی از گریس و بسیاری از امولوسیونها تحت عنوان سیال غیرنیوتنی طبقه بندی می‌شود. بدیل پیچیدگی رفتار این سیالات، مدلهای زیادی برای توصیف آنها وجود دارد.

بطور کلی سیالات بر اساس رابطه بین تنش برشی و نرخ برش معمولاً به چهاردسته زیر طبقه بندی می شوند:

۱. سیالات نیوتنی
۲. سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان
۳. سیالات غیر نیوتنی وابسته به زمان
۴. سیالات ویسکوالاستیک

۲-۳-۱- سیالات غیر نیوتنی [۲،۳،۴]

سیالاتی هستند که ویسکوزیته آنها می تواند با افزایش نرخ برش کم یا زیاد گردد. می توان سیالات غیر نیوتنی را بصورت زیر دسته بندی کرد:

۱. سیالات مستقل از زمان

ویسکوزیته آنها تابعیت زمانی ندارد و فقط تابع شدت برش می باشد و عبارتند از:

- **سیالات غلیظ شونده**[۱]

سیالاتی هستند که با افزایش شدت برش ، ویسکوزیته آنها افزایش می یابد. شیب مماس با افزایش شدت برش افزایش می یابد.

- **سیالات شبه پلاستیک**[۲]

سیالاتی هستند که با افزایش شدت برش ، ویسکوزیته سیال کاهش می یابد. مدل قانون توانی می-تواند بخوبی رفتار این دسته از سیالات را بیان کند.

[۱] .Dilatant
[۲] Pseudo-plastic