



رئولوژی پیشرفته

استاد درس
دکتر علی زادهوش

فصل چهارم

جریانات کششی



جریان ویسکومتری همیشه در رابطه با جریان برشی تعریف شده است، از این رو جریان کششی و ویسکوزیته کششی کمتر مورد بررسی قرار می گیرد.

در جریان کششی محض، جریان برشی وجود ندارد و اغلب به او جریان های بدون برشی گفته می شود. در نوشته های علمی تحت عنوان Elongational viscosity یا Elongational flow (جریان ازدیاد طول) آورده شده است.

حال می خواهیم بدانیم تفاوت جریان برشی و کششی در چیست؟

تفاوت اصلی در جریان کششی و برشی در آرایش مولکولی می باشد. برای مولکول هایی با وزن مولکولی بالا و در جریان برشی، آرایش ترجیحی در جهت جریان می باشد.

به طور کلی عوامل زیادی روی جریان کششی تاثیر گذار است. مهم ترین آن ها وزن مولکولی و ساختار مولکولی (شاخه بلند و شاخه کوتاه، چه زمانی بتواند چرخش داشته باشد) می باشد. سرعت نیز تاثیر گذار است.

مثلا پلی اتیلن سنگین با پلی اتیلن سبک با هم متفاوت است. اطلاعاتی که در جریان کششی است ۰/۱ اطلاعات جریان برشی است. همچنین جریان کششی را به نحوی به جریان برشی ربط می دهند. در اینجا نیز مباحث رقیقی Thining و غلیظی Thickening مطرح است، تحت عنوان: کشش رقیقی و کشش غلیظی.

جریان کششی در بسیاری از فرآیندهای پلیمری مخصوصا ذوب، ژل و محلول رایج اند.

□ انواع جریان کششی :

- 1) کشش تک محوری: فقط در یک محور تغییر شکل داریم.
 - 2) کشش صفحه ای: در هر سه محور تغییر شکل داریم.
 - 3) کشش دو محوری: در دو جهت کشش داریم.
- حال بایستی برای تمام حالت های بالا ویسکوزیته تعریف کنیم.



❖ کشش تک محوری:

برای مواد با دانسیته ثابت (تراکم ناپذیر) هستند. در کشش تک جهته توزیع سرعت در محور مختصات کارتیزین توسط نرخ کرنش هنکی (Hencky) تعریف می شود. (به پیوست ۳ مراجعه شود).

$$u_1 = \dot{\epsilon}_h x_1 \quad (۱)$$

$$u_2 = -\frac{\ddot{\epsilon}_h x_2}{2} \quad (۲)$$

$$u_3 = -\frac{\dot{\epsilon}_h x_3}{2} \quad (۳)$$

$$u_z = \dot{\epsilon}_h z \quad (۴)$$

$$u_r = -\frac{\dot{\epsilon}_h r}{2} \quad (۵)$$

$$u_\theta = 0 \quad (۶)$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = \sigma_{r\theta} = \sigma_{z\theta} = 0 \quad (۷)$$

از آنجایی که این جریان نامتقارن است، می توان آن را نیز در دستگاه محور مختصات استوانه تعریف کرد، و درک بهتری داشته باشیم:

در جریان کششی محض، برش وجود ندارد.
تغییر شکل برشی وجود ندارد.

بنابراین تمام تنش های برشی که داشتیم صفر می شود.

تنش متقارن محوری برابر هم اند. یعنی تنش های عمود که نتیجه آن اختلاف تنش نرمال به دست می آید که آن را می توان برای ویسکوزیته کششی تعریف کنیم.



تنش متقارن محوری برابر هم اند. یعنی تنش های عمود که نتیجه آن اختلاف تنش نرمال به دست می آید که آن را می توان برای ویسکوزیته کششی تعریف کنیم.

$$\sigma_{rr} = \sigma_{22} = \sigma_{33} \quad (۸)$$

$$\mu = f(\dot{\gamma})$$

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

$$\eta_E = f(\dot{\epsilon}_h) = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\dot{\epsilon}_h} = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{\dot{\epsilon}_h} = \frac{\sigma_{22} - \sigma_{rr}}{\dot{\epsilon}_h}$$

ویسکوزیته
تک محوری ✓
(۹)

اصطلاحات رایج برای جریان های برشی نیز اینجا استفاده می کنند.

اگر یک تنش نشان داده شده را اعمال کنیم با افزایش نرخ برش، ویسکوزیته کم شود ← کشش رقیقی
اگر یک تنش نشان داده شده را اعمال کنیم با افزایش نرخ برش، ویسکوزیته زیاد شود ← کشش غلیظی

❖ کشش صفحه ای :

توزیع سرعت در کشش صفحه ای توسط معادلات زیر تعریف می شود (Hencky):

$$u_1 = \dot{\epsilon}_h x_1 \quad (۱۰)$$

$$u_2 = -\dot{\epsilon}_h x_2 \quad (۱۱)$$

$$u_3 = 0 \quad (۱۲)$$

این نوع جریان دواختلاف تنش نرمال متمایز از خود نشان می دهد، که عبارتند از:

$$\sigma_{11} - \sigma_{22}$$

$$\sigma_{11} - \sigma_{33}$$



ویسکوزیته صفحه ای بر حسب اختلاف تنش نرمال که به راحتی اندازه گیری می شود را می توان به صورت زیر تعریف کرد.

$$\eta_P = f(\dot{\epsilon}_h) = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\dot{\epsilon}_h} \quad (13)$$

ویسکوزیته ✓
صفحه ای

در عمل به وجود آوردن کشش صفحه ای ساده نمی باشد و روش های اندازه گیری صفحه ای و تک محوری رایج نمی باشد.

❖ کشش دو محوری:

توزیع سرعت که توسط فشار تک جهته انجام می شود در جریان کششی دو محوری در مختصات کارتیزین توسط روابط زیر تعریف می شود:

$$u_1 = \dot{\epsilon}_B x_1 \quad (14)$$

$$u_2 = -2\dot{\epsilon}_B x_2 \quad (15)$$

$$u_3 = \dot{\epsilon}_B x_3 \quad (16)$$

$$u_z = -2\dot{\epsilon}_B z \quad (17)$$

$$u_r = \dot{\epsilon}_B r \quad (18)$$

$$u_\theta = 0 \quad (19)$$

از آنجایی که $2\dot{\epsilon}_B = \dot{\epsilon}_h$ پرس کردن با کشش در این جا تفاوت دارد به دلیل اینکه محور های الیاف و غیره با هم متفاوت اند.

در مختصات استوانه:



✓ ویسکوزیته
دو محوری

$$\eta_B = f(\dot{\epsilon}_B) = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\dot{\epsilon}_B} = \frac{\sigma_{33} - \sigma_{22}}{\dot{\epsilon}_B} = \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{zz}}{\dot{\epsilon}_B} = \frac{2(\sigma_{rr} - \sigma_{zz})}{\dot{\epsilon}_h} \quad (20)$$

□ رابطه میان ویسکوزیته کششی و برشی:

حال می خواهیم رابطه بین جریان کششی و جریان برشی را بیان کنیم:
نسبت ویسکوزیته کششی به ویسکوزیته برشی را عدد تروتون می گویند.
روابط محدودی میان ویسکوزیته کششی و ویسکوزیته برشی برای سیالات غیرنیوتنی در کرنش های کوچک تعریف گردیده است.
برای مثال Wathers (۱۹۷۴)، Petrie (۱۹۷۹) و Dealy (۱۹۹۴) تعریف شده است.

$$\lim_{\dot{\epsilon}_h \rightarrow 0} \eta_E(\dot{\epsilon}_h) = 3 \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta(\dot{\gamma}) \quad (21) \quad \text{تک محوری}$$

$$\lim_{\dot{\epsilon}_B \rightarrow 0} \eta_B(\dot{\epsilon}_h) = 6 \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta(\dot{\gamma}) \quad (22) \quad \text{دو محوری}$$

$$\lim_{\dot{\epsilon}_h \rightarrow 0} \eta_P(\dot{\epsilon}_P) = 4 \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta(\dot{\gamma}) \quad (23) \quad \text{صفحه ای}$$

روابط قابل اعتماد برای سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی در نرخ های کرنش یا سرعت کرنش ($\dot{\gamma}$) های بالا پیدا نشده است. بنابراین روابط فوق را می توان به صورت خلاصه اینطور نوشت:

$$\eta_E = 3\mu \quad (24) \quad , \eta_B = 6\mu \quad (25) \quad , \eta_P = 4\mu \quad (26)$$



معادلات ۲۴-۲۵-۲۶ را می توان برای عملکرد صحیح ویسکومترها مورد استفاده قرار داد.

حال اگر بخواهیم سیالات نیوتنی را کشش دهیم باید توان کشش داشته باشند. اگر خیلی رقیق باشد نمی توان کشش داد.

سیالات نیوتنی (ویسکوز) باید ظاهری جامد داشته باشند که نیاز جریان کششی است که بتوان در آزمایشات کشش مورد استفاده قرار گیرند.

Trouton یک رابطه ریاضی میان ویسکوزیته کششی و برشی ارائه کرده است. در حال حاضر با استفاده از این نسبت بی بعد که معروف شده به عدد Trouton داده های ویسکوزیته برشی و کششی را با هم مقایسه می کنند.

$$N_{Tr} = \frac{\text{ویسکوزیته کششی}}{\text{ویسکوزیته برشی}} \quad (۲۷)$$

از آنجایی که ویسکوزیته برشی و کششی نتیجه دو نرخ برشی و کششی هستند یک راه حل مناسب برای مقایسه این دو بر اساس کار Jones در سال ۱۹۸۷ برای رفتار ویسکوالاستیک عددهای Trouton را برای تک محوری و صفحه ای به این صورت به دست آورده است:

$$(N_{Tr})_{uniaxial} = \frac{\eta_E(\dot{\epsilon}_h)}{\eta(\sqrt{3}\dot{\epsilon}_h)} \quad (۲۸) \quad \text{تک محوری}$$

اگر ویسکوزیته کششی را در $\dot{\epsilon}_h$ انجام دادیم، باید ویسکوزیته برشی را در نرخ برشی $\sqrt{3}\dot{\epsilon}_h$ انجام دهید که بتوان مقایسه نمود.

$$(N_{Tr})_{planer} = \frac{\eta_P(\dot{\epsilon}_h)}{\eta(2\dot{\epsilon}_h)} \quad (۲۹) \quad \text{صفحه ای}$$

با این کار بدین معنی که ویسکوزیته های برشی محاسبه شده در نرخ برشی مساوی با هم مقایسه می شوند.



با روش مشابه در سال ۱۹۹۳ شخصی به نام Kokini و Huany روابطی برای عدد Trouton برای کشش دو محوری ارائه کردند:

$$(N_{Tr})_{biaxial} = \frac{\eta_B(\dot{\epsilon}_B)}{\eta(\sqrt{12\dot{\epsilon}_B})} \quad (۳۰) \quad \text{دو محوری}$$

نسبت تروتون برای سیال را می توان از روابط ۲۸-۲۹-۳۰ به دست آورد و اگر انحرافی در این مقادیر به وجود آید نتیجه رفتار ویس کو الاستیک است.

□ روش های اندازه گیری خواص جریانات کششی

مقدمه: دانش ویسکوزیته کششی برای درک بسیاری از فرآیندهای صنعتی لازم می باشد. ۳ نوع جریان کششی اصلی وجود دارد: (۱ تک محور ۲ دو محور ۳ صفحه ای

که شرح مختصری در بالا وارد شد و برای روش های عملی اندازه گیری ویسکوزیته کششی بسیار متنوع و بعضا متناقض (گسترده) گزارش شده است.

به چند روش کلی اشاره می شود:

(۱) روش های مانند روش کشش دادن stretching یا pulling

(۲) روش های فشردن squeezing

جریان میان دو صفحه موازی که به هم فشرده می شوند.

(۳) جریان درون یک قالب همگرا: هم کشش و هم برش

در این حالت لازم است تا کشش و برش جداسازی شود که به کمک میزان افت فشار می توان محاسبه نمود چه مقدار کشش و برش است.

(۴) روش ریسندگی: ذوب ریزی یا محلول ریزی Spinning

در بعضی از این روش ها جریان کششی محض وجود ندارد، ممکن است که جریان برشی هم وجود داشته باشد.



روش اندازه گیری ویسکوزیته به روش ریسندگی:

ریسندگی روشی برای به دست آوردن ویسکوزیته کششی برای سیالات با ویسکوزیته میانه می باشد. در این روش یک نمونه سیال تحت ازدیاد طول تک محوری قرار می گیرد که نام های مختلفی به این روش داده شده است. (Extrudate drawing ، melt spinning یا fiber spinning)

در این آزمایش خروجی اکسترودر از یک لوله با قطر بسیار کوچک بر روی یک غلتک چرخان وارد می شود. همان طور که در شکل نشان داده شده:

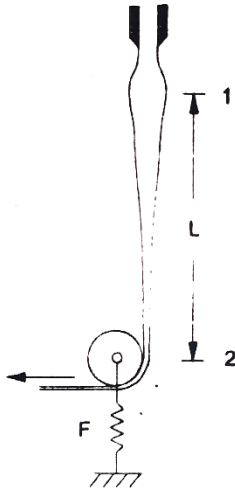


Figure 4.9. Spinning apparatus to evaluate extensional viscosity.

با تغییرات در سرعت غلتک می توان نرخ و سرعت و کشش را تغییر داد. تنش بر روی نمونه تحت آزمایش توسط نیروی اندازه گیری شده بر روی غلتک تعیین می شود (F) و نتایج به دست آمده را می توان با یک آنالیز ساده استفاده کرد. فرض کنید که سرعت ازدیاد طول بر روی طول ثابت نمونه را می توان بدین صورت نوشت:

$$\dot{\epsilon}_E = \frac{u_2 - u_1}{L}$$

جایی که u_1 و u_2 میانگین سرعت در نقطه ۱ و ۲ می باشد که توسط طول L از هم جدا شده است.



اگر Q شدت جریان حجمی مذاب باشد که از لوله خارج می شود:

$$\dot{\varepsilon}_E = \frac{1}{L} \left(\frac{Q}{\pi R_2^2} - \frac{Q}{\pi R_1^2} \right)$$

$$\dot{\varepsilon}_E = \frac{Q}{\pi L} \left(\frac{1}{R_2^2} - \frac{1}{R_1^2} \right)$$

جایی که R_1 و R_2 شعاع در نقطه ۱ و ۲ می باشد، کرنش اعمال شده بر روی نمونه در طول نمونه مساوی است با:

$$\varepsilon_E = \ln \left(\frac{u_2}{u_1} \right)$$

$$\sigma_E = \frac{F}{\pi R^2}$$

$$\varepsilon_E = \ln \left(\frac{R_1^2}{R_2^2} \right)$$

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

با استفاده از این معادلات می توان نوشت:

$$\eta_E = \frac{\sigma_E}{\dot{\varepsilon}_E} = \frac{FL}{R^2 Q} \left(\frac{R_2^2}{1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right)$$

این روش، روشی است که برای مذاب های پلیمری و محلول هایی که در محلول ریزی استفاده می شود می توان به کار برد.



Flow Through a Converging Die

□ جریان درون یک قالب همگرا

در جریان همگرا یک اتلاف انرژی برشی و یک اتلاف انرژی کششی (ازدیاد طولی) در خطوط جریان به وجود می آید. جریان همگرا بعضا به نام جریان غیر قابل کنترل نامیده می شود. چون که خطوط جریان تابع خواص سیال هستند، همچنین جریان برشی محض نمی باشد و ترکیبی از تغییر شکل برشی و کششی می باشد. آنالیزی که اینجا انجام می گیرد بر اساس جداسازی افت فشار ورودی به دو مولفه، یکی مربوط به برش و دیگری مربوط به کشش می شود. یک روش دیگر که به آن sink flow (جریان sink دست شویی و ظرف شویی) گفته می شود. بر مبنای کار آقای متسنر metsner می باشد که فرض بر این است که جریان کششی محض است و برشی وجود ندارد. این روش نیاز به اطلاع از زاویه همگرایی دارد که آن را می توان اندازه گیری کرد. روش دیگری وجود دارد که بر اساس اصول انرژی به دست می آید که توسط Binding در سال ۱۹۸۸ توسعه یافته است.

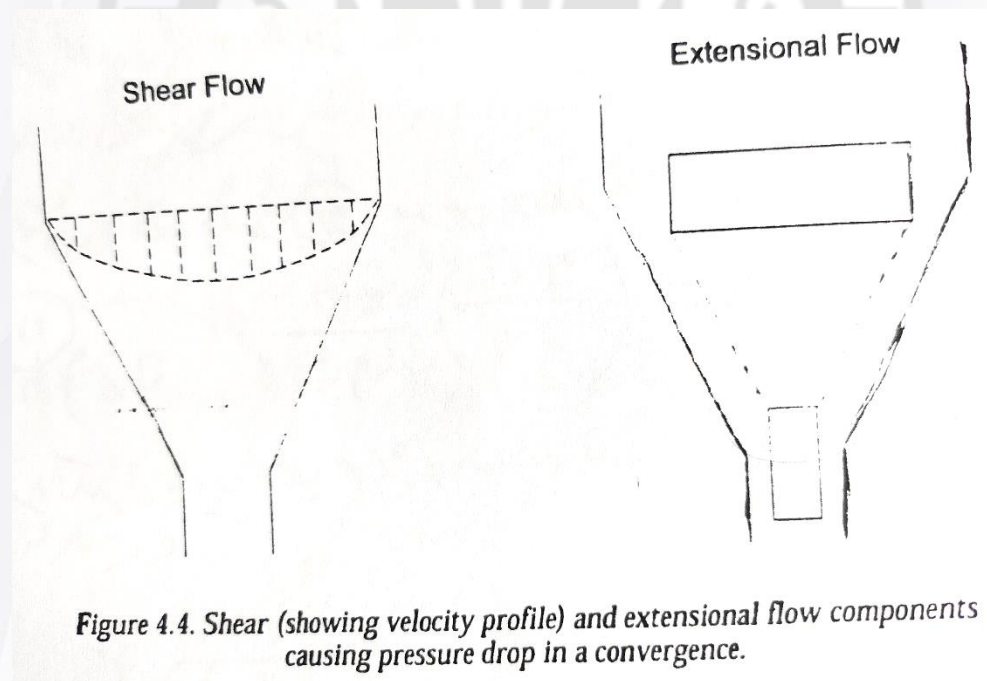


Figure 4.4. Shear (showing velocity profile) and extensional flow components causing pressure drop in a convergence.



□ طرز اندازه گیری ویسکوزیته به روش کاگسول:

این روشی است که در یک لوله همگرا جریان داشته باشیم، جریان ۲ جزء: بخش کششی و بخش برشی. بنابراین فشار انتهایی داریم: اگر فشار کششی و فشار برشی را مشخص کنیم می توانیم ویسکوزیته برشی و ویسکوزیته کششی را محاسبه نماییم.

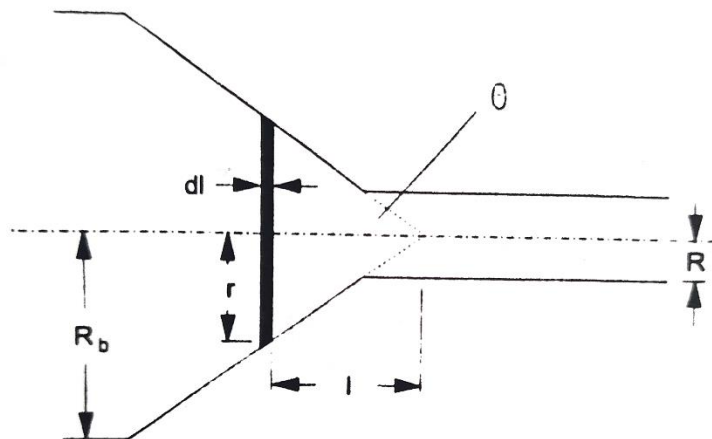


Figure 4.5. Geometry for converging flow from a barrel of radius R_b into a capillary die of radius R .

$$\delta P_{en} = \delta P_{ens} + \delta P_{enE} \quad (1)$$

آنالیز پاورلا:

$$Q = \frac{n\pi R^3}{3n+1} \left(\frac{R\Delta P}{2Lk} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

$$\Delta P = \frac{Q^n}{R^{3n+1}} \left(\frac{3n+1}{\pi n} \right)^n 2Lk \quad (3)$$

با استفاده از این دو رابطه برای المان می نویسیم:

برای بخش جریان برشی داریم:

$$d(\delta P_{ens}) = \frac{Q^n}{r^{3n+1}} \left(\frac{3n+1}{\pi n} \right)^n 2k dl \quad (4)$$



$$\tan \theta = \frac{r}{L}, \quad \tan \theta = \frac{dr}{dL}, \quad dL = \frac{dr}{\tan \theta} \quad (5)$$

$$d(\delta P_{ens}) = \frac{Q^n}{r^{3n+1}} \left(\frac{3n+1}{\pi n} \right)^n \frac{2k}{\tan \theta} dr \quad (6)$$

$$\int_0^{\delta P_{ens}} d(\delta P_{ens}) = \int_R^{R_b} \frac{Q^n}{r^{3n+1}} \left(\frac{3n+1}{\pi n} \right)^n \frac{2k}{\tan \theta} dr \quad (7)$$

$$\delta P_{ens} \Big|_0^{\delta P_{ens}} = Q^n \left(\frac{3n+1}{\pi n} \right)^n \frac{2k}{\tan \theta} \int_R^{R_b} \frac{1}{r^{3n+1}} dr$$

مرتب سازی و نتیجه گیری:

$$\delta P_{ens} = Q^n \left(\frac{3n+1}{\pi n} \right)^n \frac{2k}{\tan \theta} \left(\frac{R_b^{-3n} - R^{-3n}}{-3n} \right) \quad (8)$$

$$T = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

$$\delta P_{ens} = Q^n \left(\frac{3n+1}{\pi n} \right)^n \frac{2k}{\tan \theta (3n)} (R^{-3n} - R_b^{-3n})$$

رابطه بالا را در عبارت $\frac{4^n}{4^n} \times \frac{R^{3n}}{R^{3n}}$ ضرب می کنیم و داریم:

$$\delta P_{ens} = T^n \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \frac{2k}{3n \tan \theta} \left(1 - \left(\frac{R}{R_b} \right)^{3n} \right) \quad (9)$$



حال باید رابطه ای برای فشار بخش جریان کششی به دست آوریم. ابتدا باید تعاریف اولیه را بیان کنیم:

$$\bar{u} = \frac{Q}{\pi r^2} \quad (10)$$

$$\tan \theta = \frac{r}{l} \rightarrow \tan^2 \theta = \frac{r^2}{l^2} \quad (11)$$

$$\bar{u} = \frac{Q}{\pi l^2 \tan^2 \theta} \quad (12)$$

$$\dot{\epsilon}_E = -\frac{d\bar{u}}{dl}$$

مشتق = نرخ کرنش کششی $\left(\frac{\text{میانگین سرعت}}{\text{طول}} \right)$

$$\frac{d\bar{u}}{dl} = -\frac{2Q}{\pi l^3 \tan^2 \theta}$$

$$\dot{\epsilon}_E = -\frac{d\bar{u}}{dl} = -\frac{(-2Q)}{\pi l^3 \tan^2 \theta} \times \frac{\tan \theta}{\tan \theta} = \frac{2Q \tan \theta}{\pi l^3 \tan^3 \theta} = \frac{2Q \tan \theta}{\pi r^3} \quad (13)$$

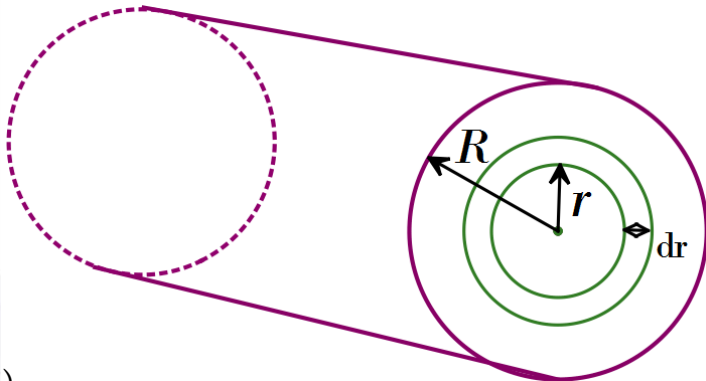
$$\dot{\gamma}_{wa} = T = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

این نرخ کرنش کششی که به دست آوردیم به توزیع سرعت بستگی ندارد.

می توان افت فشار تفاضلی ناشی از اتلاف انرژی کششی را بر حسب میانگین تنش وارد به حلقه نوشت.

برای این کار:

نیروی ناشی از تنش کششی بر سطح مقطع = نیروی ناشی از فشار بر سطح مقطع





$$(\pi r^2) d\delta P_{enE} = \sigma_E (\pi(r + dr)^2 - \pi r^2)$$

$$(\pi r^2) d\delta P_{enE} = \sigma_E (\pi r^2 + 2\pi r dr + \pi dr^2 - \pi r^2) \quad (14)$$

0 زیرا dr خیلی کوچک است.

$$(dP_{enE})\pi r^2 = \sigma_E 2\pi r dr$$

$$dP_{enE} = 2\sigma_E \frac{dr}{r} \quad (15)$$

$$\sigma_E = k_E (\dot{\epsilon}_E)^m \quad (16)$$

با جایگذاری رابطه ۱۵ در رابطه ۱۶:

$$d(\delta P_{enE}) = 2k_E (\dot{\epsilon}_E)^m \frac{dr}{r} \quad (17)$$

جایگذاری از ۱۳ در ۱۷:

$$\dot{\epsilon}_E = \frac{2Q \tan \theta}{\pi r^3}$$

$$d(\delta P_{enE}) = 2k_E \left(\frac{2Q \tan \theta}{\pi r^3} \right)^m \frac{dr}{r} \quad (18)$$



با انتگرال گیری از معادله ۱۸ بین R و R_b :

$$\int_0^{\delta P_{enE}} d\delta P_{enE} = \int_R^{R_b} 2k_E \left(\frac{2Q \tan \theta}{\pi r^3} \right)^m \frac{dr}{r} \quad (19)$$

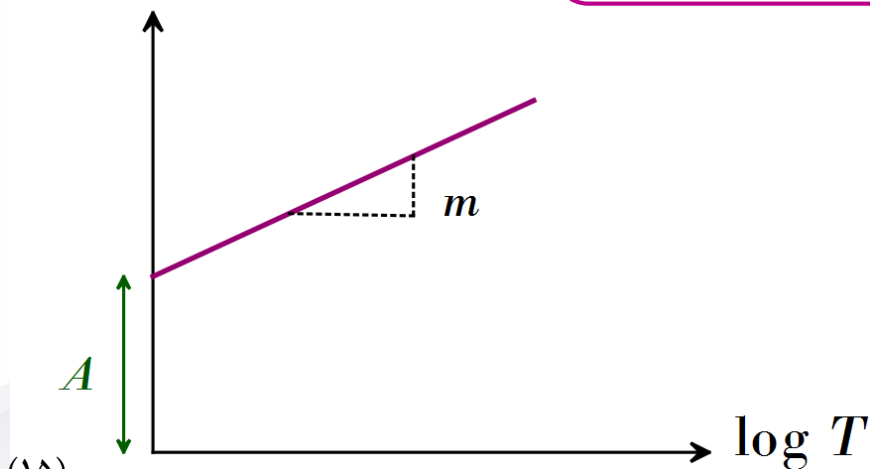
بعد از مرتب سازی های بسیار:

$$\delta P_{enE} = 2k_E \left(\frac{2Q \tan \theta}{\pi} \right)^m \left(\frac{R_b^{-3m} - R^{-3m}}{-3m} \right) \quad (20)$$

رابطه بالا را در عبارت $\frac{2^m}{2^m} \times \frac{R^{3m}}{R^{3m}}$ ضرب می کنیم و داریم:

$$\delta P_{enE} = T^m \left(\frac{2k_E}{3m} \right) \left(\frac{\tan \theta}{2} \right)^m \left(1 - \left(\frac{R^{3m}}{R_b^{3m}} \right) \right) \quad (21)$$

$\log \delta P_{enE}$



(۱۵)

$$\log(\delta P_{enE}) = m \log T + \log[A] \quad (22)$$

$$\eta_E = k_E (\dot{\xi}_{ER})^{m-1} \quad (23)$$

$$\dot{\xi}_{ER} = \frac{T \tan \theta}{2} \quad (24)$$



کاگسول در ۱۹۷۲ روابطی برای تنش کششی خالص و متوسط کششی خالص را برای سطح صاف 90° به صورت زیر به دست آورد.

$$\sigma_E = \frac{3}{8}(n+1)\delta P_{en}$$

$$\dot{\epsilon}_E = \frac{4\eta T^2}{3(n+1)\delta P_{en}}$$

$$\eta = k(T)^{n-1}$$

$$T = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

ویسکوزیته ظاهری دیواره

$$\eta_E = \frac{\sigma_E}{\dot{\epsilon}_E} = \frac{9(n+1)^2(\delta P_{en})^2}{32\eta T^2}$$



مسئله:

اطلاعات ذیل برای یک سیال پاورلا درون مجرای همگرا با زاویه $\theta = \frac{\pi}{4} \text{ rad} = 45^\circ$ به دست آمده است. آنالیز انجام شده بر روی این سیال برای جریان برشی نشان می دهد که سیال از نوع سودوپلاستیک است.

$$k = 23300 \text{ Pa (s)}^n$$

$$n = 0.29$$

مطلوب است ویسکوزیته کششی و برشی برای افت فشارهای ورودی اندازه گیری شده و محاسبه نسبت این دو که عدد تروتون نامیده می شود. جریان کششی تک محوری می باشد و نرخ برش اسمی $\sqrt{3\dot{\epsilon}_{ER}}$ می باشد.

$$R = 1.59 \times 10^{-3}$$

$$R_b = 7.5 \times 10^{-3}$$

$Q \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)}$	$\delta P_{en} \text{ (Pa)}$
1.155×10^{-7}	1.895×10^6
3.0×10^{-7}	2.94×10^6
7.0×10^{-7}	3.624×10^6
30.0×10^{-7}	6.17×10^6