تعتمد لزوجة المائع بشكل أساسي على كل من درجة الحرارة ومعدل القص والزمن. حيث يطلق على الموائع التي يكون لها معدل قص ثابت بالعلاقة مع إجهاد القص عند أي درجة حرارة معطاة مصطلح الموائع النيوتونية [مثل الماء، النفط الخام] وفي مثل هذه الحالة فغن اللزوجة هي تابع لدرجة الحرارة فقط، حيث تزداد قيمة اللزوجة بانخفاض درجة الحرارة.

لذلك فإن العلاقة الخطية بين إجهاد القص ومعدل القص على المخطط البياني والتي تمر من مبدأ الإحداثيات تشير إلى أن المائع يبدي خصائص المائع النيوتوني.

وبالمقابل فإن لزوجة الموائع غير النيوتونية مثل البيتومين لاتعتمد فقط على درجة الحرارة وإنما أيضاً على معدل القص وفي بعض الحالات على الزمن [أي الانكماش].

هناك العديد من الموائع التي يمكن أن تبدي سلوكاً غير نيوتونياً. وهذه يمكن أن تشمل الموائع الموسعة [*Dilatants*] مثل النشاء [*Starch*] والرمال المتحركة [*Quicksand*]، والموائع البسيدوبلاستيكية [*Pseudoplastic fluids*] مثل المحلول الجيري [*Lime Solution*] والموائع البلاستيكية البنغامية [*Bingham Plastics*]. وبشكل عام يمكن تقسيم الموائع غير النيوتونية إلى الفئات الرئيسية التالية:

1. الموائع غير النيوتونية التي تعتمد على الزمن [*Time-Dependent Non-Newtonian fluids*].
2. الموائع غير النيوتونية المستقلة عن الزمن [*Time-Independent Non-Newtonian fluids*].
3. الموائع غير النيوتونية المرنة اللزجة [*Viscoelastic Non-Newtonian fluids*].

الموائع غير النيوتونية التي تعتمد على الزمن:

واعتماداً على كيفية تغير اللزوجة مع الزمن، يمكن وصف سلوك الجريان كمايلي:

- تيكسوتروبي [*Thixotropic*]: تترقق مع الزمن، أي تنخفض الزوجة مع مرور الزمن، على سبيل المثال اللبن ومواد الطلاء التي تصبح أقل لزوجة مع مرور الزمن وذلك عند تحريكها أو اضطرابها.
- الريوبيتي [*Rheopetic*]: تثخن مع الزمن، أي تزداد الزوجة مع مرور الزمن، على سبيل المثال الصمغ الجبسي والعسل والتي تصبح أكثر لزوجة مع مرور الزمن وذلك عند تحريكها أو اضطرابها.

يصف مصطلح التيكسوتروبية المواد التي تشبه الهلام عند استقرارها ولكن تشبه الموائع عند اضطرابها وهيجانها. تعتبر الموائع التيكسوتروبية من الموائع الشائعة في الصناعة الكيميائية وصناعة المواد الغذائية في حين أن الموائع الريوبيتية فهي نادرة جداً.

وقد يلاحظ أن بعض الموائع [مثل البيتومين] تظهر سلوك الترقق مع الزمن بسبب تحطم بنيتها، وتدعى هذه الظاهرة بـــ [*Rheomaiaxis*]

الموائع غير النيوتونية المستقلة عن الزمن:

لاتعتمد لزوجة الموائع المستقلة عن الزمن على درجة الحرارة فقط وإنما على معدل القص أيضاً. واعتماداً على كيفية تغير اللزوجة مع تغير معدل القص يمكن وصف سلوك الجريان وفق مايلي:

- رقيقة القص [*Shear Thinning*]: وعندها تنخفض اللزوجة مع زيادة معدل القص، وتعتبر السوائل رقيقة القص [*Shear Thinning Liquids*] من السوائل الشائعة جداً، ولكن بشكل مضلّل، ويمكن وصفها كتيكسوتروبية.
- سميكة القص [*Shear Thickening*]: وفيها تزداد اللزوجة مع زيادة معدل القص.
- البلاستيكية [*Plastic*]: وتبدي قيمة إجهاد أولي، أي يجب تطبيق إجهاد قص معين قبل أن يبدأ السائل بالجريان.

تدعى أيضاً الموائع رقيقة القص بالبسيدوبلاستيكية [*Pseudoplastic*]، أما الموائع سميكة القص بالموسعة [*Dilatant*].

يمكن وصف الموائع غير النيوتونية المستقلة عن الزمن من خلال المنحنيات البيانية [إجهاد القص–معدل القص] الموضّحة في الشكل [3.2] وهي كمايلي:

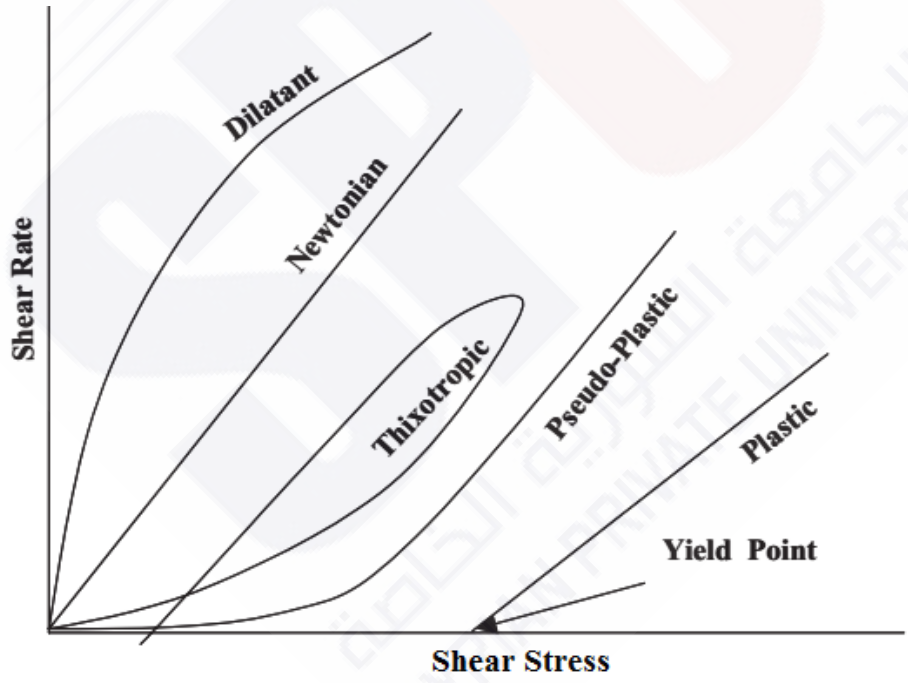
a) الموائع البلاستيكية البنغامية [*Bingham Plastic fluid*]: وهي الموائع التي تسلك سلوك المادة الصلبة عند الإجهادات المنخفضة ولكنها تتدفق كموائع لزجة عند الإجهادات العالية.

b) الموائع البلاستيكية [*Plastics*]: وهي موائع غير نيوتونية معقدة والتي فيها لايتناسب إجهاد القص مع معدل القص، تعتبر معظم سوائل الحفر [*Drilling Muds*] من الموائع البلاستيكية.

c) البسيدوبلاستيكية [*Pseudoplastic*]: ولهذا النوع من الموائع القدرة على تغيير اللزوجة الظاهرية مع تغير في معدل القص. تعتبر اللزوجة الظاهرية مؤشراً على لزوجة المائع عند معدل قص معطى عند درجة حرارة ثابتة.

d) الموائع البسيدوبلاستيكية [*Pseudoplastic fluids*]: تزداد لزوجتها عند تعريضها لانخفاض في معدل القص، ويطلق عليها أحياناً الموائع رقيقة القص وتبدي قيمة أولية للإجهاد أي يجب تطبيق إجهاد قص معين قبل أن يبدأ السائل بالجريان.

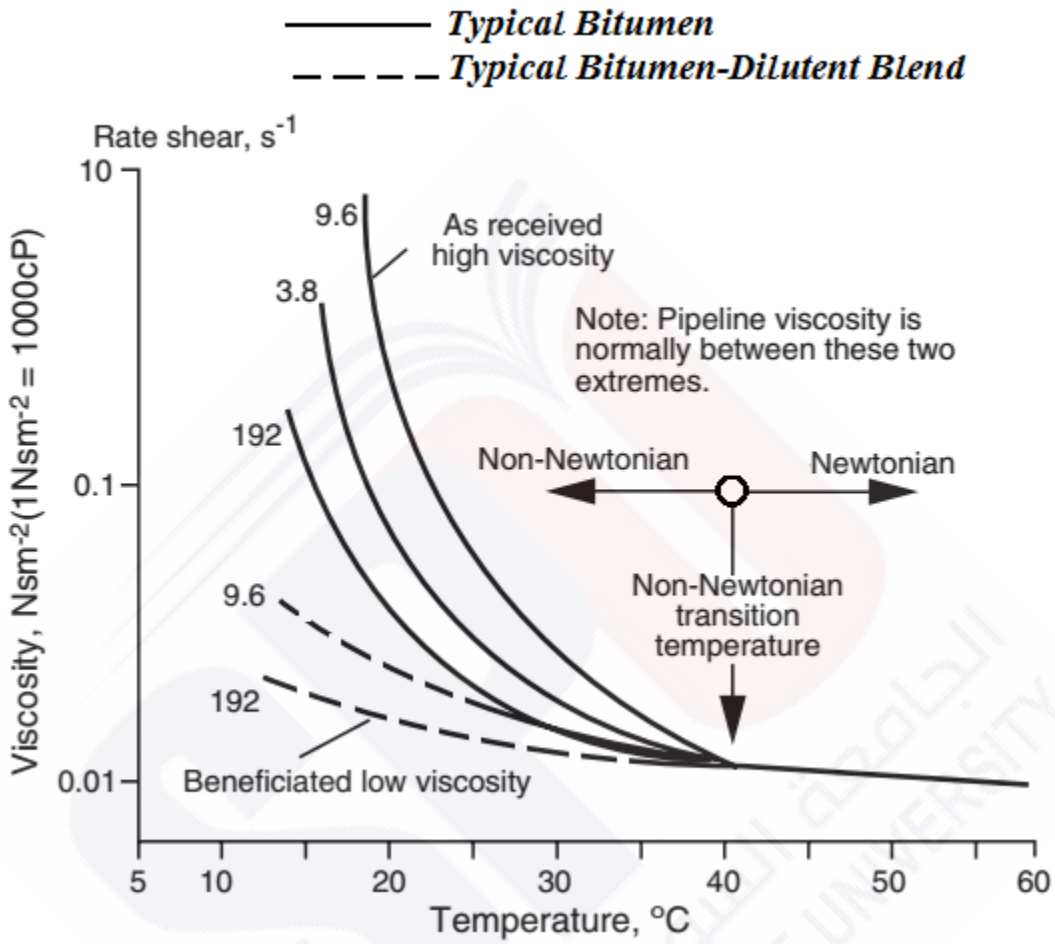
e) الموائع الموسعة [*Dilatant fluids*]: سميكة القص.



الشكل (3.2)، الموائع غير النيوتونية المستقلة عن الزمن

عند نقل الموائع غير النيوتونية مثل البيتومين والنفوط الخام الثقيلة يجب الأخذ بعين الاعتبار خاصية اللزوجة بعناية خاصة. وبما أن معدل القص يتغير مع السرعات المختلفة للمائع، فإنه من الضروري جداً تحديد منحني اللزوجة للمائع المدروس عند سرعة معروفة للمائع على طول بروفيل توزع درجة حرارة المائع في خط الأنابيب.

يوضّح الشكل [4.2] اللزوجة المميزة للبيتومين النموذجي/مزيج [موسع-بيتومين].



العلاقة بين الكثافة واللزوجة [*Viscosity and Density Relationship*]:

لاترتبط اللزوجة بالكثافة ارتباطاً مباشراً، على الرغمم من وجود ارتباط معين بينهما في حالة سوائل المركبات الهيدروكربونية السائلة. يمكن لكل من الكثافة واللزوجة أن تفسر معظم تغييرات ضغط خط الأنابيب. فاللزوجة هي السبب الرئيسي لضياعات الاحتكاك في خط الأنابيب. في حين تحدد الكثافة متطلبات الطاقة ومخرجات الضغط لوحدات الضخ.

لزوجة السوائل المخلوطة [*Viscosity of Blended/Diluted Liquids*]:

في كثير من الأحيان تحدث عملية المزج في نظام خطوط الأنابيب وذلك عندما يتم حقن تيار من المائع مع آخر منقول أساساً بغرض جعل المنتجات النهائية المنقولة أخف أو في حالة النقل المتعاقب للمنتجات.

يمكن استخدام التقنية التالية لتحديد الكثافة النسبية ولزوجة السائل المخلوط:

الحجم الجديد من الحجم الحالي والكثافة النسبية الحالية والكثافة النسبية الهدف:

$$V_{new} = \left((SG_{cur} - 1.0)/\left(SG_{target} - 1.0\right)\right) * V_{cur} \qquad (19.2)$$

حيث إنّ:

V_{cur}: الحجم الحالي.

SG_{cur}: الكثافة النسبية الحالية.

SG_{target}: الكثافة النسبية الهدف.

وبالمقابل يمكن حساب الكثافة النسبية الجديدة من الكثافة النسبية الحالية والحجم الحالي والحجم الهدف، كمايلي:

$$SG_{new} = \left((SG_{cur} - 1.0) * (V_{cur}/V_{tar})\right) + 1.0 \qquad (20.2)$$

حيث إنّ:

SG_{cur}: الكثافة النسبية الحالية:

V_{cur}: الحجم الحالي.

V_{tar}: الحجم الهدف.

حساب لزوجة المزيج:

عندما يتم خلط أو مزج سائلين أو أكثر، ففي مثل هذه الحالة من المهم جداً تحديد لزوجة الخليط لتقييم خيارات عملية النقل في خط الأنابيب مثل موقع المزج أو الحقن وكذلك تحديد الإمكانية الملائمة لنظام النقل. ومن أجل هذا الهدف يتم بشكل عام استخدام مؤشر [*Refutas Viscosity Blending Index*] في الصناعة. تتطلب هذه المعادلة إدخال الكسور الكتلية [*Mass Fractions*]. في كثير من الأحيان يتم استخدام

الكسور الحجمية [*Volume Fractions*] التي سوف توفر نتائج غير صحيحة إلى حد كبير وذلك في الحالة التي تكون فيها كثافة الخامين النفطيين غير متباينة.

يتضمن حساب مؤشر اللزوجة للخليط المكون من سائلين أو أكثر والتي لها لزوجات مختلفة باستخدام معادلة [*Refutas*] إجراء الخطوتين التاليتين:

الخطوة الأولى: وتتضمن حساب مؤشر اللزوجة للخليط [*VBI*] الذي يأخذ بعين الاعتبار جميع مكونات الخليط باستخدام المعادلات التالية:

$$VBI = 14.534 \times ln[(\vartheta + 0.8)] + 10.975 \qquad (21.2)$$

حيث إنّ ϑ: اللزوجة الحركية مقدرة بـــ [cst].

الخطوة الثانية: وتتضمن حساب مؤشر اللزوجة للخليط باستخدام العلاقة التالية:

$$VBI_{Blend} = [W_A \times VBI_A] + [W_B \times VBI_B] + \cdots + [W_X \times VBI_X] \qquad (22.2)$$

حيث إنّ W: الكسر الوزني [الكتلي] لكل مكون في المزيج. من المهم الإشارة أنه في المعادلة المذكورة أعلاه من الضروري أن يتم تحديد جميع لزوجة جميع المكونات المراد خلطها عند نفس درجة الحرارة.

بعد أن يتم الحصول على رقم مزج اللزوجة [*Viscosity Blending Number*] للخليط باستخدام المعادلة [22.2] فإنه يمكن تحديد لزوجة الخليط باستخدام معكوس العلاقة [21.2] على الشكل التالي:

$$\vartheta = e^{[(VBN - 10.975)/14.534]} - 0.8 \qquad (23.2)$$

حيث إنّ VBN: رقم مزج اللزوجة للخليط

ومن المهم الإشارة إلى أنه يتم استخدام كل من اللزوجة المطلقة أو التحريكية [μ] واللزوجة الحركية [ϑ] في تطبيقات أنابيب نقل السوائل.

ويمكن أن نذكر من الطرق الأخرى المستخدمة في حساب لزوجة المنتجات المخلوطة معادلة $[ASTM]$ التي توفر تقديراً ملائماً للزوجة المنتجات المخلوطة:

$$LogLog(\vartheta + 0.7) = A - B * Log(T) \qquad (24.2)$$

حيث إنّ:

ϑ: اللزوجة الحركية للسائل، $[cst]$.

T: درجة الحرارة المطلقة، $[K]$.

لحساب لزوجة المنتج المخلوط، يمكن اتباع الإجراءات التالية:

1. حساب $[A]$ و$[B]$ لكل منتج على حدى من لزوجات المنتج وذلك عند درجتي حرارة مختلفتين باستخدام معادلة $[ASTM]$.
2. حساب $[A]$ و$[B]$ للمنتج المخلوط على النحو التالي:

$$B_b = \sum(Q_i)/\sum(Q_i/B_i)$$

$$A_b = \sum(A_i Q_i/B_i)/\sum(Q_i/B_i)$$

حيث إنّ Q_i: معدل تدفق كل منتج على حدى.

3. إدخال معاملات الخلط $[A_b]$ و$[B_b]$ في معادلة $[ASTM]$:

$$LogLog(\vartheta_b + 0.7) = A_b - B_b * Log(T)$$

- **خلط السوائل الهيدروكربونية وانكماش الحجم [*Hydrocarbon Liquids Blending and Volume Shrinkage*]:**

يحدث الانكماش عندما يتم اثنين أو أكثر من المنتجات البترولية. حيث سوف يعاني الخليط تقلصاً في الحجم يسم انكماشاً، ومع ذلك يتم تقييم الخسائر عادة في المكونات الخفيفة.

إن تقلص الحجم هو تابع لفرق الكثافة بين المكونات الخفيفة والثقيلة. يتناقص الانكماش كنسبة مئوية من زيادة حجم المكون الخفيف في المزيج.

وتجدر الإشارة إلى أن كمية الانكماش النهائية مستقلة عن تسلسل حقن المكونات الخفيفة في النفط الخام. يمكن استخدام الإجراء التالي لتقدير النسبة المئوية للانكماش الحجمي. يمكن التعبير عن الانكماش بواحدات الجملة الدولية كمايلي:

$$S_v = 2.69 * 10^4 * C(100 - C)^{0.819}(1/\Delta L - 1/\Delta H)^{2.28} \quad (25.2)$$

وبواحدات الجملة البريطانية:

$$S_v = 4.86 * 10^{-8} * C(100 - C)^{0.819}\Delta_{API}^{2.28} \quad (26.2)$$

حيث إنّ:

S_v: الانكماش الحجمي، كنسبة من الحجم المثالي للمزيج الكلي.

C: تركيز المكون الخفيف في نسبة حجم السائل.

Δ_{API}: فرق الكثافة، $°API$

$1/\Delta L - 1/\Delta H$: مقلوب فرق الكثافة بين المكونات الخفيفة والثقيلة، m^3/Kg.

يمكن تطبيق المعادلة المذكورة أعلاه فقط ضمن مجال الضغط $[7\ to\ 100\ psig]$ ودرجة الحرارة [15°C].

تحديد اللزوجة [*Viscosity Determination*]:

تعرّف اللزوجة الكينيماتيكية [الحركية] [ϑ] بأنها النسبة بين اللزوجة المطلقة [μ] والكثافة [ρ] عند نفس درجة الحرارة:

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho} \qquad (27.2)$$

حيث إنّ:

ϑ: اللزوجة الحركية، $[stoke]$ أو $[m^2/s]$.

μ: اللزوجة المطلقة، $[Pa \cdot s]$.

ρ: الكثافة.

بالنسبة للسوائل النيوتونية، إذا كانت اللزوجة عند درجتي حرارة مختلفتين معروفة، فإنه يمكن تقدير اللزوجة عند أية درجة حرارة أخرى. من أهم علاقات الارتباط المستخدمة في تحديد اللزوجة علاقة $[Andrade]$ وطريقة $[ASTM]$.

حيث تظهر علاقة $[Andrade]$ بأن الاختلاف في اللزوجة بالعلاقة مع درجة الحرارة هي علاقة لوغارتمية:

$$\ln(\vartheta) = A - B \times T \qquad (28.2)$$

حيث إنّ:

ϑ: اللزوجة الحركية للسائل، $[cSt]$.

T: درجة الحرارة المطلقة، $[K]$.

A, B: ثوابت.