2.1- خصائص المركبات الهيدروكربونية السائلة [*Properties Of Petroleum Liquids*]:

تعتبر عملية تعيين خصائص النفط الخام من أولويات مهام مهندسي البترول، إذ من الضروري جداً إعطاء وصف دقيق وشامل للخصائص الفيزيائية للنفط الخام بغية استخدامها في الدراسات النظرية وتطبيقاتها في هندسة البترول المختلفة.

عملياً تتغير طبيعة النفط الخام بشكل كبير وهي تعتمد بشكل أساسي على التركيب الكيميائي للنفط [أي نوع ونسبة المركبات الهيدروكربونية وغير الهيدروكربونية المكونة له]. وعلاوة على ذلك خصائص النفط الخام في المكمن تختلف عن خصائصه عند السطح وذلك بسبب الاختلافات الكبيرة في الضغط ودرجة الحرارة. حيث يحتوي النفط في المكمن على كمية كبيرة من الغاز المذاب، أما عند إنتاجه إلى السطح سوف ينكمش النفط ويصبح أكثر لزوجة بسبب تحرر قسم من الغاز المنحل فيه. وعليه يمكن الاستنتاج بأن هناك العديد من الاختلافات بين النفط في ظروف المكمن والنفط في الظروف السطحية.

تعتمد قيمة النفط الخام على خصائصه. إذ يفهم من الخصائص العامة للنفط الخام بالخصائص الفيزيائية للنفط في الظروف السطحية.

يجب أن تكون الخصائص التالية للمركبات الهيدروكربونية السائلة معلومة ومعروفة قبل البدء بتصميم أنظمة خطوط أنابيب نقلها وتحديد قيودها التشغيلية:

- الكتلة أو الحجم، [*Mass, or Volume*].
- الكثافة، الانضغاطية أو المعامل الحجمي ومعامل التمدد الحراري، [*Density, Compressibility or Bulk Modulus, and Thermal Expansion*].
- الوزن النوعي ودرجة [*API*]، [*Specific Gravity and API Gravity*].
- اللزوجة، [*Viscosity*].
- نسبة مزج السوائل الهيدروكربونية إن وجدت، [*Blending/Diluting Ratio of Hydrocarbon Liquid*].

- الضغط البخاري، [*Vapor Pressure*].
- السعة الحرارية والناقلية الحرارية، [*Heat Capacity and Thermal Conductivity*].
- نقطة الانصباب/نقطة الغيم، [*Pour Point/Cloud Point*].
- نقطة الوميض [من أجل قضايا السلامة فقط]، [*Flash Point* (*Safety Issues Only*)]

📖 : **الكتلة، الحجم والكثافة**:

الكتلة (m): هي بالتعريف كتلة المادة الموجودة في الجسم، وهي مقياس عن خاصية القصور الذاتي [*inertial property*] لذلك الجسم، أو بمعنى آخر هي المقاومة التي يبديها الجسم لتغيير حركته.

أحياناً تستخدم الكتلة بشكل متبادل مع الوزن [*Weight*]، مع أن هناك اختلاف واضح بين مفهومي الكتلة والوزن. فالوزن هو كمية شعاعية [*Vector Quantity*] وهو مقياس لجاذبية الأرض الناتج عن الجاذبية التي تتغير اعتماداً إلى المسافة عن مركز الأرض. حيث يكون للكتل المتساوية الواقعة في نفس المكان أوزاناً متساوية.في حين أن للكتلة الواقعة في الفضاء الخارجي أوزاناً تساوي الصفر تقريباً.

عموماً، يمكن التعبير عن الكتلة والوزن بواحدات [Kg] أو [lb]، ولكن من الناحية التقنية يشار إليها على التوالي بواحدات [Kgm] أو [lbm] و[Kgf] أو [lbf]. ومن المهم الإشارة إلى أن الكتلة مستقلة عن الضغط ودرجة الحرارة.

الحجم: وهو الحيز الذي تشغله كتلة معينة، على عكس الكتلة ، فإن الحجم يعتمد بشكل كبير على الضغط ودرجة الحرارة. يزداد حجم السائل قليلاً مع زيادة درجة الحرارة في حين أن للضغط تأثير ضئيل جداً على حجم السوائل مقارنة بتأثيره على الغازات. تعتمد قيمة المعامل الحجمي على الضغط ودرجة الحرارة وذلك من أجل حجم معين من السائل.

الكثافة: يمكن تعريف كثافة السائل بأنها كتلة واحدة الحجوم، ويمكن التعبير عن ذلك رياضياً من خلال العلاقة التالية:

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (1.2)$$

حيث إنّ:

m: كتلة المركب الهيدروكربوني السائل.

V: حجم المركب الهيدروكربوني السائل.

عموماً يتم نسب كثافة النفط الخام إلى الضغط المرجعي ودرجة الحرارة المرجعية والتي غالباً ماتكون الشروط القياسية على السطح $[20^oC,\ \ 0.1\ MPa]$. وفي الصين $[15.6^oC,\ \ 0.1\ MPa]$.

وكما رأينا سابقاً، أن كتلة السائل لاتتغير مع الضغط ودرجة الحرارة ولكن بالمقابل فإن الحجم يتغير بتغيرات الضغط ودرجة الحرارة. وبناء عليه يمكن الاستنتاج بأن الكثافة تتغير مع الضغط ودرجة الحرارة. لذلك فإن الكثافة تعتمد على الضغط ودرجة الحرارة كما هو الحال بالنسبة للحجم. تتغير كثافة السائل مع درجة الحرارة حيث تتناقص الكثافة بزيادة درجة حرارة السائل والعكس بالعكس. في حين تزداد كثافة السائل مع زيادة الضغط المطبق على السائل وذلك نتيجة لانخفاض الحجم. تقدر الكثافة في الجملة الدولية [*SI Units*] بواحدة $[Kg/m^3]$ أما في الجملة البريطانية [*Imperial Units*] بواحدة $[lbm/ft^3]$.

📖: **<u>الكثافة والتمدد الحراري</u>** [*Density and thermal Expansion*]:

كما ذكرنا أعلاه، تنخفض كثافة السائل مع زيادة درجة الحرارة وذلك نتيجة لازدياد الحجم. حيث يشار إلى النسبة المتناقصة مع زيادة درجة الحرارة بمعامل التمدد الحراري [Thermal Expansion Coefficient]. في حين تزداد كثافة السائل مع زيادة الضغط وذلك نتيجة لانخفاض الحجم. حيث يشار إلى النسبة المتزايدة مع زيادة الضغط بمعامل المرونة الحجمي [*Bulk Modulus*].

📖: **<u>الانضغاطية، معامل المرونة الحجمي والتمدد الحراري</u>** [*Compressibility, Bulk modulus, and thermal Expansion*]:

🗎 **<u>الانضغاطية</u>**: وهي قابلية السوائل الحقيقة للانضغاط بالمقارنة مع الغازات. حيث أن أي تغيير في قيمة الضغط المطبق على المائع يمكن أن تؤدي إلى تغير في حجم هذا السائل، حيث يوضح الشكل (2.1)،

التغيير الحاصل في حجم السائل عند تعرضه لضغط منتظم. ويمكن التعبير رياضياً عن الانضغاطية من خلال العلاقة التالية:

$$C = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \qquad (2.2)$$

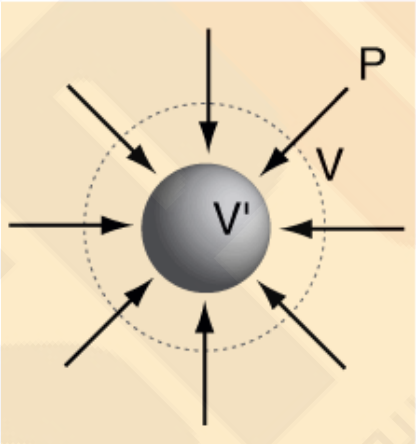
حيث إنّ:

C: معامل الانضغاطية.

∂V: التغير التفاضلي في الضغط.

∂P: التغير التفاضلي في الضغط.

V: الحجم الأولي.



الشكل (2.1)، التغير الحاصل في الحجم عند تغير الضغط.

وبدلاً من ذلك، يمكن التعبير عن الانضغاطية من خلال العلاقة التالية:

$$C = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T \qquad (3.2)$$

حيث إنّ:

$d\rho$: التغير التفاضلي في الكثافة.

ρ: الكثافة الأولية.

إن أي زيادة في الضغط سوف تؤدي إلى تقليل الحجم. في حين أن تقليل الحجم سوف يؤدي إلى زيادة الكثافة.

تشير الإشارة السالبة في العلاقة [2.2] إلى انكماش الحجم وذلك نتيجة لزيادة الضغط

معامل المرونة الحجمي:

كما هو مبين في أعلاه، إن معامل المرونة الحجمي هو مقلوب الانضغاطية وهو أكثر شيوعاً واستخداماً في تطبيقات خطوط أنابيب نقل السوائل. ومع ذلك يعرف معامل المرونة الحجمي بمقاومة السائل للانضغاط. عموماً إن للمركبات الهيدروكربونية الثقيلة السائلة انضغاطية صغيرة وهذا هو السبب الرئيسي لتغيرات الضغط المفاجئة [*Pressure Surge*] في أنظمة خطوط الأنابيب.

يمكن تعريف معامل المرونة الحجمي للسائل بأنه قيمة الضغط اللازم لإنتاج التغير في واحدة الحجم من السائل، ويعبر عنه بالشكل التالي:

$$K = -\partial P(V/dV) = \partial P(\rho/\partial\rho) \qquad (4.2)$$

حيث إن تمثل $[dV]$ التغير في الحجم الموافق لتغير الضغط بمقدار $[\partial P]$.

يعبر عن معامل المرونة الحجمي في واحدات الجملة الدولية [*SI Units*] بواحدة $[N/m^2 = Pa]$، أما في واحدات الجملة البريطانية [*Imperial Units*] بواحدة $[lbf/in^2]$.

تشير القيم الكبيرة لمعامل المرونة الحجمي إلى أن المائع يتمتع بانضغاطية قليلة جداً أو بمعنى آخر أن المائع غير قابل للانضغاط نسبياً.

Comparison of bulk modulus of some liquids

Bulk Modulus— *K*	SI Units (10^9 Pa, N/m^2)	Imperial Units (10^5 psi, lb$_f$/N/in^2)
Mercury	28.5	41.4
Crude oil	1.66	2.41
Oil (range)	1.4	2.03
Bitumen-condensate	1.53	2.22
Gasoline	1.07–1.49	1.55–2.16
Motor oil (SAE 30)	1.5	2.2
Seawater	2.34	3.39
Water	2.15	3.12

التمدد الحراري:

وهي بالتعريف الخاصية المميزة للسوائل بقدرتها على التمدد عند ارتفاع درجة حرارتها، ويمكن تحديدها من خلال معامل التمدد الحراري (*Coefficient of Thermal Expansion*) للسائل [α]. يمكن تعريف التمدد الحراري لواحدة الحجم من المائع على الشكل التالي:

$$\alpha = -\frac{1}{\partial T}\left(\frac{\partial \rho}{\rho}\right) \qquad (5.2)$$

حيث إنّ:

α: معامل التمدد الحراري.

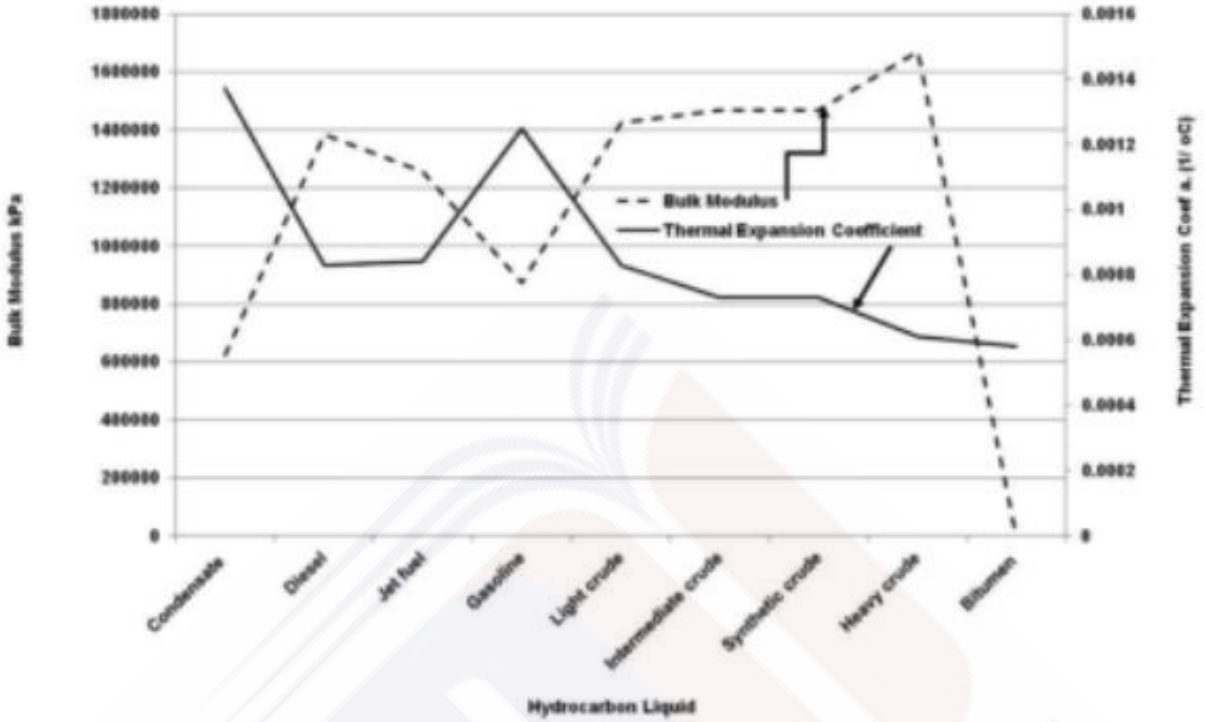
ρ: الكثافة.

$\partial\rho$: التغير في الكثافة.

∂T: التغير في درجة الحرارة.

تعتمد قيمة معامل التمدد الحرارية بشكل رئيسي على كل من الضغط ودرجة الحرارة. ولاتتغير قيمة هذا المعامل بشكل كبير بالنسبة للسوائل الهيدروكربونية الثقيلة ضمن مجال درجات الحرارة شائعة الاستخدام في خطوط أنابيب النقل. وبالمقابل فإن قيمة هذا المعامل يمكن أن تتغير بشكل ملحوظ في حالة السوائل الهيدروكربونية الخفيفة.

يمكن تقدير قيمة معامل التمدد الحراري من مصطلح تصحيح درجة الحرارة في معادلة [*API*]. يظهر الشكل (1.2) قيم معاملي المرونة الحجمي والتمدد الحراري للنفوط الخام والمنتجات الخفيفة.



الشكل (1.2)، قيم معاملي المرونة الحجمي والتمدد الحراري للنفوط الخام والمنتجات الخفيفة.

حساب معامل المرونة الحجمي لمختلف الموائع:

في أغلب الأحيان، لايمكن لأدبيات الاختصاص إعطاء قيم معامل المرونة الحجمي لمختلف الموائع. ولكن بالمقابل تتوافر العديد من المعادلات التي من شأنها تحديد معامل المرزونة الحجمي وكثافة الموائع عند شروط مختلفة من الضغط ودرجة الحرارة. يمكن التعبير عن كثافة السوائل عند ضغوط ودرجات حرارة مختلفة من خلال العلاقة التالية:

$$\rho = \rho_b \left[\left(1 + \frac{P_1 - P_2}{K}\right) - \alpha(T_1 - T_2)\right] \qquad (6.2)$$

حيث إنّ:

ρ_b: الكثافة عند الشروط القياسية.

P_2, P_1: الضغط الأولي والضغط النهائي على التوالي.

T_2, T_1: درجة الحرارة الأولية والنهائية على التوالي.

α: معامل درجة حرارة السائل للكثافة.

K: معامل المرونة الحجمي.

في حال ثبات الضغط فإن $\frac{P_1-P_2}{K}=0$ وبالتالي فإن المعادلة (6.2) تأخذ الشكل التالي:

$$-\alpha=\frac{\frac{\rho_1-\rho_2}{\rho_b}}{T_1-T_2}=\frac{\Delta\rho}{\rho_b\Delta T} \qquad (7.2)$$

حيث تمثل $\Delta\rho=\rho_1-\rho_2$ التغير في الكثافة.

أما في حال ثبات درجة الحرارة فإن $T_1-T_2=0$ وبالتالي فإن المعادلة (6.2) تأخذ الشكل التالي:

$$\rho=\rho_b\left[1+\frac{P_1-P_2}{K}\right] \qquad (8.2)$$

أو

$$K=\frac{\Delta P}{\Delta\rho}\rho_b \qquad (9.2)$$

حيث إنّ ($\Delta P=P_1-P_2$) التغير في الضغط.

مثال

إذا علمت أنه يراد نقل $[CO_2]$ السائل عبر خط أنابيب، فإذا علمت أن:

- مقدار هبوط الضغط بين بداية الخط ونهايته هي $[3100\ KPa]$،
- أن كثافة السائل عند الشروط القياسية من الضغط ودرجة الحرارة هي $[968.5\ Kg/m^3]$،
- قيمة الضغط ودرجة الحرارة والكثافة عند بداية الخط هما على التوالي $[13100\ KPa]$، $[-20^oC]$ و$[1073.5\ Kg/m^3]$،

- قيمة الضغط ودرجة الحرارة والكثافة عند نهاية الخط هما على التوالي $[10000\ KPa]$، $[20^oC]$ و$[1064\ Kg/m^3]$.

والمطلوب:

1. حساب معامل المرونة الحجمي $[K]$:

الحل:

من معطيات المسألة نجد أن :

$$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2 = 1073.5 - 1064 = 9.5\ Kg/m^3$$

عندئذ يمكن حساب معامل المرونة الحجمي من العلاقة التالية:

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta\rho}\rho_b = \frac{3100}{9.5} \times 968.5 = 316016\ KPa$$

2. حساب معامل التمدد الحراري من العلاقة التالية:

$$-\alpha = \frac{\Delta\rho}{\rho_b \Delta T} = \frac{9.5}{968.5 \times 40} = -2.4 \times 10^{-4}\ {}^oC^{-1}$$

تقنيات أخرى لحساب معامل المرونة الحجمي:

يمكن لبعض المعايير القياسية مثل $[API\ 1101]$ تقديم الصيغ والمعادلات الملائمة والمناسبة لحساب معامل المرونة الحجمي للسوائل الهيدروكربونية وذلك اعتماداً درجة API. على سبيل المثال يمكن حساب معامل المرونة الحجمي باستخدام المعادلة الموجودة في المعيار القياسي $[API\ 1101]$:

$$K = 10^{(5.722708 - 0.00819 \times {}^\circ API - 0.00219 \times T)} \qquad (10.2)$$

حيث إنّ:

K: معامل المرونة الحجمي، $[psig]$.

T: درجة الحرارة، [°F]

ويمكن أن نذكر من المعادلات الأخرى المستخدمة في حساب معامل المرونة الحجمي، معادلة [$Caragoe$] التالية:

$$K(PSI) = 100000 \times exp\left[1.9947 - 0.00013427 \times T - \frac{0.79392}{SG^2} - 0.002326 \times \frac{T}{SG^2}\right] \quad (11.2)$$

,بالمقابل يمكن تقدير معامل المرونة الحجمي للسوائل الهيدروكربونية الأثقل إما باستخدام مصطلح تصحيح الضغط لمعادلة [API] المعطاة أعلاه. أو من خلال معادلة [$Arco$] التالية:

$$K = 2.619 * 10^6 + 9.203 * P - 1.417 * 10^5 * T^{1/2} + 73.05 * T^{3/2} - 341.0 * (°API)^{3/2} \quad (12.2)$$

حيث إنّ:

P: الضغط، [$psig$].

T: درجة الحرارة [$°R$].

$°API$: درجة API للسائل.

وبشكل عام يمكن القبول بأن لمعامل المرونة الحجمي للسوائل الهيدروكربونية الأثقل [مثل الخامات النفطية] قيمة ثابتة نسبياً بالعلاقة مع الضغط، وبالمقابل تنخفض قيمة هذا المعامل مع ارتفاع درجة حرارة السائل وتزداد قيمته مع انخفاض درجة الحرارة.

وبالمقابل تتغير قيمة معامل المرونة الحجمي للسوائل الهيدروكربونية الخفيفة [مثل البروبان] بشكل كبير مع تغير شروط الضغط ودرجة الحرارة المطبقة عليها.