

المحاضرة 1

الفصل الأول

مكامن الغاز الطبيعي

1-1- التواجد الجيولوجي للغاز الطبيعي:

هناك بعض المستلزمات التي يجب توفرها للحصول على تجمعات هيدروكربونية تجارية وهي:

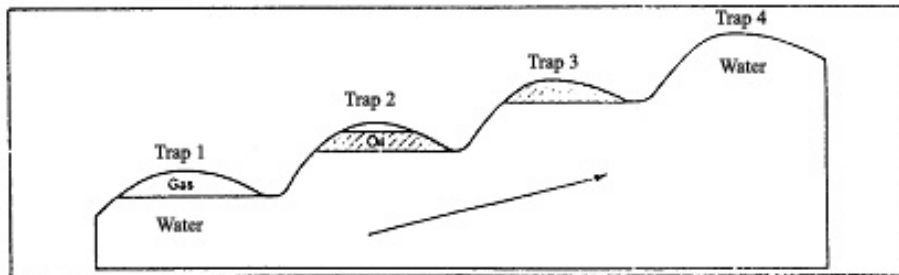
- 1- صخور المنشأ (a Source) وهي المادة الأساسية التي تنشأ منها الهيدروكربونات.
- 2- وجود طبقات (Beds) تتصف بالمسامية (Porosity) والنفوذية (Permeability) حيث يمكن للنفط المتواجد فيها أن يقوم بعملية الهجرة (Migration) وعملية التجميع (Accumulation) بعد تكوينه.
- 3- تواجد المصيدة (Trap) حيث تمنع النفط من الحركة إلى مسافة أبعد ومن ثم الحصول على تجمعات بكميات تجارية.

إن الغاز الطبيعي والنفط الخام يتولدان من مواد عضوية تحت تأثير درجة الحرارة والضغط مع مرور الزمن.

تقسم المادة العضوية إلى قسمين رئيسيين وذلك بالاعتماد على أصل نشوئها من أحياء (Organisms) تنمو على اليابسة أو في الماء. الاعتقاد السائد هو أن المواد العضوية الناتجة من اليابسة تتحول إلى غاز طبيعي بينما تنتج المواد العضوية المائية الخامات النفطية، وبناءً على هذا الاعتقاد يتم تقدير أقصى عمق لتواجد النفط الخام أو الغاز الطبيعي.

إن أقدم وأعمق الرسوبيات قد حصلت في الجرف القاري (Continental rift) وهي غنية بالمواد العضوية الأرضية وتغطي بترسبات بحرية حاوية على كميات وافرة من المواد العضوية المائية، حيث تظهر المقاطع الجيولوجية العمودية مواداً عضوية مولدة للغاز في القعر ومواد عضوية مولدة للنفط في الأعلى.

قد تنشأ حركة كل من النفط والغاز بعد تشكلها في المكامن، وهذه الحركة غالباً ما تكون بسبب الميلان الموضعي للطبقات. يرافق عملية الحركة فصل (Seperation) لكل من النفط والغاز وبالتالي تشكل مصائد متجاورة من الغاز والنفط أو مزيج من الاثنين سوية وهذا ما يسمى بالمصائد التفاضلية (Differential Entrapments). الشكل (1-1).



الشكل (1-1) الوضع النهائي للمصيدة التفاضلية في المصائد المتصلة على التوالي.

إن ارتفاع درجة الحرارة مع تزايد عمق الطبقات له الدور الفعال في تحديد تركيب المواد الهيدروكربونية الموجودة في مكانها. ومن المعروف أن النفوط الخام، تعتبر خلائط غير مستقرة. فكلما ارتفعت درجة الحرارة، يعاد تنظيم المواد الهيدروكربونية نحو الاستقرار بنسبة أكبر، وتؤدي إعادة التنظيم هذه إلى إعادة توزيع الهيدروجين وبالنهاية يعطي الميثان ومخلف صلب غني بالكربون. تبدأ التغيرات التي تطرأ على النفط بعملية التكاثف ثم التحول إلى غاز رطب وأخيراً إلى غاز جاف.

2-1- تركيب الغازات الطبيعية:

الغاز الطبيعي هو خليط من الغازات الهيدروكربونية مع بعض الغازات اللاعضوية كالتروجين وكبريت الهيدروجين H_2S وثنائي أكسيد الكربون CO_2 وغيرها. تدعى الغازات الحاوية على كميات ملحوظة من H_2S أو CO_2 أو كلاهما معاً بالغازات الحامضية (Sour or acid Gases)، ينبغي أن تزال هذه الشوائب قبل تصدير الغاز إلى نقاط الاستهلاك. تشمل الغازات الهيدروكربونية بشكل أساسي (الميثان، الايثان، البروبان، البزرو ونظامي البوتان.. إلخ) أي مركبات البارافينات الهيدروكربونية ذات الصيغة C_nH_{2n+2} ، حيث n يمثل عدد ذرات الكربون. إن التركيب الحقيقي للغاز الطبيعي يمكن أن يختلف بمجالات واسعة، حتى أنه قد يختلف من بئر لآخر ضمن نفس المكنن. لا بد من الإشارة إلى تركيب الغاز المنتج من مكنن ما قد يتغير مع الزمن وذلك نتيجة تكاثف السوائل في المكنن نتيجة لانخفاض الضغط (Pressure declines) ويحصل ما يسمى بمكنن التكاثف العكسي (Retrograde condensate Reservoir). وبما أن الغازات الطبيعية تحوي نسبة قليلة من المركبات الأثقل من الهبتان، فإن نسبة المركبات الثقيلة تُعطى بما يسمى فوق الهبتان أو (C_{7+}). نتيجة الدراسة الإحصائية التي قام بها بعض الباحثين لتحديد النسب المولية التقريبية للمركبات الهيدروكربونية واللاعضوية في مختلف أنواع الغازات الطبيعية تم التوصل إلى القيم الموضحة في الجدول (1-1).

الجدول (1-1): النسب المولية لمركبات الغاز الجاف والغاز الرطب

المركب	الغاز الجاف	الغاز الرطب أو المكثفات الغازية
الميثان	70-98	50-92
الايثان	1-10	5-15
البروبان	trace -5	2-14
البوتان	trace -2	1-10
البنتان	trace -1	trace -5

الهكسان	trace -0.5	trace -3
الهيبتان +	0 - trace	trace -15
النتروجين	trace -15	trace -10
ثنائي أكسيد الكربون	trace -1	trace -4
كبريت الهيدروجين	0 - trace	0-6
هيليوم	0-5	0

بشكل عام يشكل الميثان نسبة عالية % (80-99.5) في المكامن الغازية و % (50-94) في المكامن (غاز . كوندسات) و % (20-97) في المكامن (غاز . نפט).

إن نسبة الايثان تتراوح من 0.05 حتى 25% حجماً، وتكون هذه النسبة كبيرة في المكامن الغازية النفطية وبشكل أقل في مكامن الغاز والمكثفات الغازية.

تتواجد المركبات الهيدروكربونية في المكامن الغازية بشكل غاز، وعند انخفاض في الطبقة مع بقاء درجة الحرارة ثابتة، لا تحدث أي تحولات طورية عليها. أما في المكامن (المكثفات الغازية) فإن المركبات الهيدروكربونية تتواجد في أكثر من طور، حيث يترافق انخفاض الضغط تحول المركبات الثقيلة من الطور الغازي للطور السائل.

تعتبر معرفة تركيب الغاز أمراً من أجل تحديد مجالات استخدامه، إضافة إلى أنه من خلال تعيين نسب بعض المركبات يمكن تحديد نوعية المكمّن. عملياً، تعتمد النسبة $\alpha = \frac{iC_4H_{10}}{nC_4H_{10}}$ كميّار للتنبؤ بنوع المكمّن على الشكل التالي:

$\alpha > 1$ وضمن المجال (1.1-1.4) من أجل مكامن الغاز الحر.

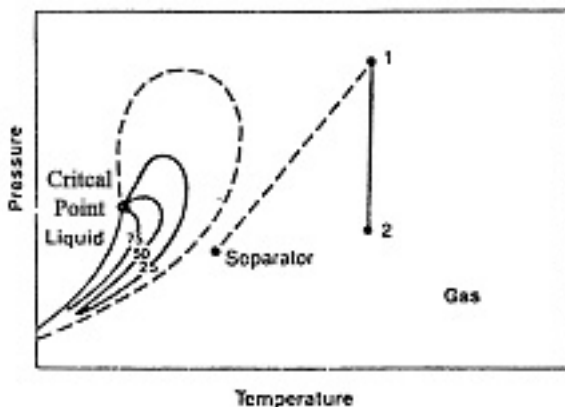
$\alpha \approx 1$ وضمن المجال (0.9-1.1) من أجل مكامن المكثفات الغازية.

$\alpha < 1$ وضمن المجال (0.5-0.8) يكون المكمّن نفطي . غازي أو نفطي مع مكثفات غازية.

3-1- أنواع المكامن الغازية (Types of Gas Reservoirs):

يمكن تصنيف المكامن الغازية اعتماداً على حالة تواجد الغاز إلى أربعة مجموعات (Categories):

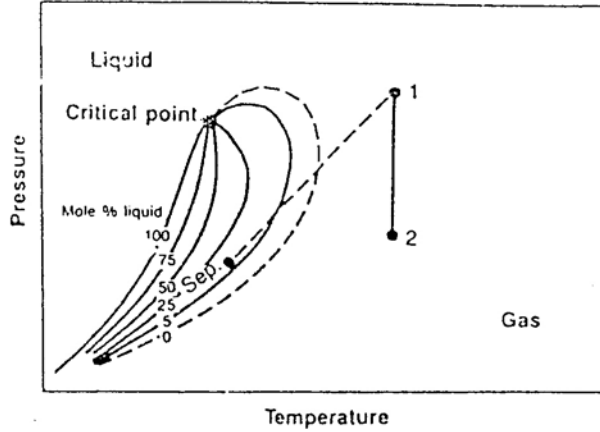
1- مكامن الغاز الجاف: يشكل غاز الميثان النسبة الغالبة في تركيب الغاز الجاف، حيث تصل نسبته إلى 98%. في هذا النوع من المكامن، يكون المائع الموجود بشكل غاز في شروط المكمّن وعلى



طول الطريق الذي يسلكه الغاز من الطبقة حتى عمليات الفصل والمعالجة، السائل الوحيد المصاحب للغاز هو الماء فقط. الشكل (1-2) يوضح المخطط الطوري للغاز الجاف.

الشكل (1-2) المخطط الطوري للغاز الجاف.

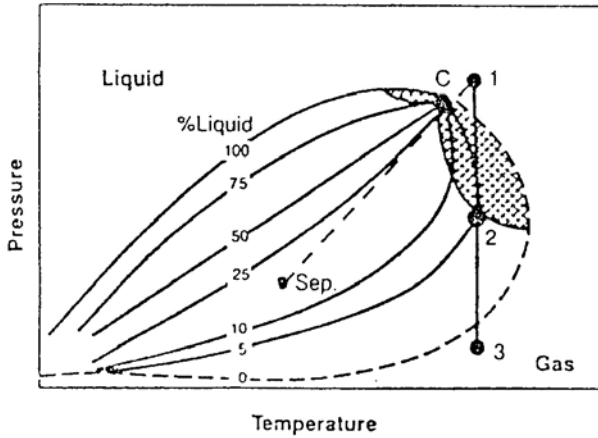
2- **مكامن الغاز الرطب:** يكون المائع الموجود في الممكن في الطور الغازي ويبقى كذلك رغم انخفاض الضغط في الممكن ما دامت درجة الحرارة ثابتة. خلال عملية إنتاج الغاز إلى السطح، تنخفض درجة الحرارة مؤدية إلى تكاثف بعض المركبات الهيدروكربونية في أنابيب الإنتاج والأنابيب السطحية والفواصل. الشكل رقم (1-3) يوضح السلوك الطوري للغاز الرطب.



الشكل (1-3) المخطط الطوري للغاز الرطب

3- **مكامن غاز المكثفات العكسية (Retrograde condensate Gas):**

في هذه المكامن يكون المائع موجوداً على شكل غاز عند الظروف الطبقيّة الأولى. عند انخفاض الضغط عند درجة حرارة الممكن، يتم عبور خط نقطة الندى ويتكون السائل في مسامات الطبقة المنتجة وأيضاً في مجموعة الأنابيب والفواصل. الشكل (1-4) يوضح المخطط الطوري.



الشكل (1-4) مخطط الطور،

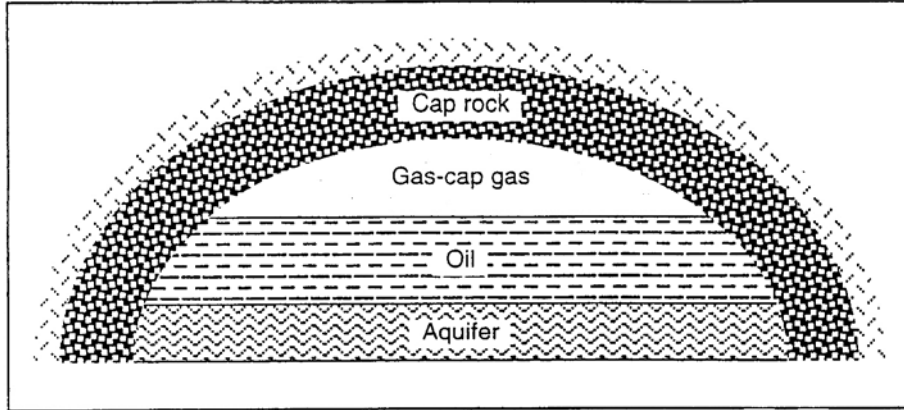
يوضح مناطق التكثف العكسي

4- **مكامن الغاز المرافق (Associated Gas):**

(Gas): يتواجد الغاز المرافق للنفط في الشروط

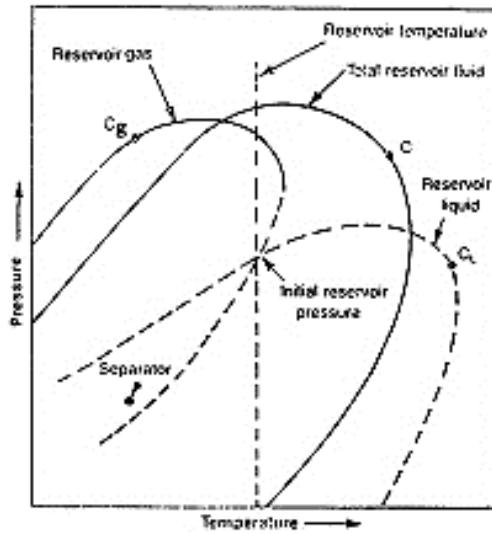
الطبيعية، إما على شكل قبة غازية (Gas

Cap) متوضعة فوق المجال النفطي أو بشكل غاز محلول في النفط تحت تأثير الضغط الطبقي كما هو موضح بالشكل (1-5).



الشكل (1-5) مقطع تخطيطي المكن نفطي مع الغاز المرافق

مخطط التحول الطوري لمكامن الغاز المرافق موضح بالشكل (1-6)، حيث نلاحظ وجود منحنين طوريين منفصلين للسائل والغاز يتقاطعان في نقطة تمثل الشروط الطباقية لتوازن الطورين على السطح الفاصل بينهما، (الضغط P_F ودرجة الحرارة T_F).
الغاز المنتج من هذه المكامن يأتي من القبة الغازية إضافة إلى الغاز المتحرر من النفط نتيجة انخفاض الضغط خلال عملية الإنتاج.



الشكل (1-6) المخطط الطوري لنظام النفط والغاز المرافق

هناك من يصنف المكامن الغازية اعتماداً على قيمة الاحتياطي على الشكل التالي:

قيمة الاحتياطي	نوع المكامن
أكثر من 200 مليار M^3	عملاقة
أكثر من 30 مليار M^3	ضخمة
10-30 مليار M^3	متوسطة
حتى 10 مليار M^3	صغيرة

أثناء استثمار المكامن الغازية بأنواعها كافة، فإنه يترتب على المهندس المختص بعمليات الإنتاج تحريك الغاز من موضعه في المكنن إلى الأنبوب المستخدم في نقله إلى المكان المقصود. وهذا يتضمن جريان الغاز خلال الوسط المسامي إلى سطح الأرض عبر مواسير الإنتاج ومن ثم إلى الفواصل عن طريق مجموعة الأنابيب السطحية والضواغط إذا كانت هناك ضرورة للمحافظة على معدلات الجريان الكافية. لذلك يطلب من مهندس الإنتاج الإلمام بماهية كل من هندسة المكامن وهندسة إنتاج النفط والغاز، حيث يجب أن يكون قادراً على تحديد كمية الغاز المنتج والزمن اللازم لإنتاجه، وهذا يستلزم تحليلات خاصة لنظام عمل الآبار وتغييره عند انخفاض قيم الضغط والإنتاجية، كما أنه، يجب أن يتقن تحديد العلاقة بين معدل الجريان وانخفاض الضغط في أجزاء منظومة إنتاج الغاز كافة التي سنراها لاحقاً.

الفصل الثاني

الصفات الفيزيا - كيميائية

للغازات الطبيعية

إن القدرة على تحديد مؤثرات عمل منظومة إنتاج الغاز التي تتضمن الوسط المسامي والجريان ضمن البئر وأنابيب التجميع ومحطات النقل ثم المعالجة، تتطلب الإلمام الكامل بمواصفات الغاز وتغيراتها بالعلاقة مع الضغط والحرارة. وغالباً ما تكون الغازات الطبيعية على اتصال مع السوائل (كالماء والمكثفات الغازية)، لذلك يجب تقدير تأثير مثل هذه السوائل على صفات الغازات الفيزيائية والكيميائية.

2-1- معادلة الحالة للغازات:

يتم تحديد أغلب الصفات الفيزيائية للغازات الطبيعية، انطلاقاً من معادلة الحالة التي تربط بين قيم الضغط والحرارة والحجم، حيث أن هذه المعادلة يمكن أن تصف أي نظام غازي متجانس في حالة توازن ترموديناميكي. بالنسبة للغازات المثالية، حيث يهمل الحجم المولي مقارنة بالحجم الذي يشغله الغاز وتهمل قوى التأثير المتبادل بين الجزيئات، فقد اقترح العالمان كلايرون ومنديليف معادلة الحالة التالية:

$$P.v = G R T \quad (2-1)$$

حيث أن: P- الضغط المطلق. Pa

v- حجم الغاز M^3 .

G- كتلة الغاز kg.

T- الحرارة المطلقة k

R- الثابتة العامة للغازات ($j/(kg \cdot k^\circ)$)

من وجهة النظر الترموديناميكية فإن الغازات المثالية هي الغازات التي تحقق العلاقات:

$$\left(\frac{d_E}{dv}\right)_T = 0 \quad (2-2)$$

$$z = \frac{pv}{GRT} = 1 \quad (2-3)$$

حيث أن: d_E - الطاقة الداخلية لتشكل الغاز J/mol

z - معامل انحراف الغازات الحقيقية عن قانون الغازات المثالية.

يمكن كتابة المعادلة (2-1) على الشكل:

$$\frac{P \cdot V_M}{T} = R \quad (2-4)$$

حيث يمثل V_M حجم مول واحد من الغاز عند الضغط P والحرارة T . تعتبر قيمة R ثابتة لجميع

الغازات المثالية، ويمكن توضيح ذلك من خلال قانون أفوكادور:

$$V_{Ma} = V_{MB} \quad (2-5)$$

حيث أن V_{MB} و V_{Ma} حجم وزن جزئي واحد من الغازات A و B الموجودين تحت تأثير الضغط

P ودرجة الحرارة T . بتطبيق العلاقة (2-4) نجد:

$$\frac{R_A \cdot T}{P} = \frac{R_B \cdot T}{P} \quad (2-6)$$

وهذا يعني أن: $R_A = R_B$.

من أجل عدد من مولات الغاز n تصبح معادلة الغاز المثالي:

$$P \cdot v = nRT \quad (2-7)$$

ويمكن من خلال معادلة الحالة هذه الحصول على كثافة الغاز (ρ):

$$\left. \begin{aligned} P \cdot v &= \frac{m}{M} \cdot RT \\ \rho &= \frac{P \cdot M}{RT} \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

إن القيمة العددية للثابتة R تعتمد على وحدات القياس المستخدمة للتعبير عن درجة الحرارة والضغط

والحجم. الجدول (2-1) يوضح قيمة الثابتة R في مختلف أنظمة القياس.

جدول (2-1): قيم الثابتة R في مختلف جمل القياس

Units	R
atm, cc/g-mole, °k	82.06
BTU/lb-mole, °R	1.987
Psia, cu ft/lb-mole, °R	10.73
lb/sq ft abs, cu ft/lb-mole, °R	1544
atm, cu ft/lb-mole, °R	0.730
mm Hg, liters/g-mole, °k	62.37
in. Hg, cu ft/lb-mole, °R	21.85
cal/g-mole, °k	1.987
kPa, m ³ /kg-mole, °k	8.314
J/kg-mole, °k	8314

2-2- انحراف الغازات الحقيقية عن قانون الحالة للغازات المثالية:

هناك بعض الافتراضات التي أخذت بالاعتبار أثناء استنباط معادلة الحالة للغازات المثالية، إلا أن هذه الافتراضات لا تعتبر صحيحة بالنسبة للغازات الحقيقية التي تختلف في سلوكها الترموديناميكي عن الغازات المثالية وخصوصاً عند الضغوط العالية. اقترح العالم الفيزيائي فان درفالس الأخذ بالاعتبار تأثير حجم الجزيئات وقوى التجاذب المتبادل فيما بينها وبنتيجة أبحاثه استطاع إضافة بعض الحدود للمعادلة (2-1).

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = R.T \quad (2-9)$$

حيث أن:

$$v = \frac{V}{G} : \text{الحجم النوعي للغاز } M^3/\text{kg}$$

$\frac{a}{v^2}$: تجاذب الجزيئات pa أو بعبارة أخرى الضغط الداخلي ويضاف إلى الضغط الخارجي P.

b: معامل تصحيح على الحجم المولي M^3 .

تعتبر المعاملات a, b تابعة للحجم ودرجة الحرارة وشكل الجزيئات الغازية. بالنسبة للحالة الحرجة للمادة يمكن كتابة:

$$\left(\frac{dp}{dv}\right)_{T_{cr}} = \left(\frac{d^2p}{dv^2}\right)_{T_{cr}} = 0 \quad (2-10)$$

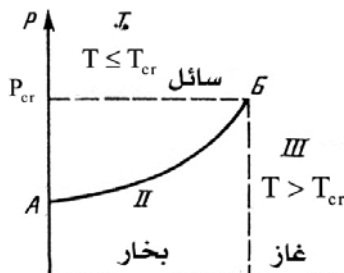
وبذلك يمكن التعبير عن المعاملات a, b من خلال الضغط الحرج P_{cr} والحرارة الحرجة T_{cr} بالشكل التالي:

$$\alpha = \frac{27 T_{cr}^2 \cdot R_2}{64 P_{cr}} \quad , \quad b = \frac{R \cdot T_{cr}}{8 P_{cr}} \quad (2-11)$$

$$R = \frac{P V}{T} = \frac{1.033 \times 9.8 \times 10^4 \times 22.41}{273} = 8314.3 \text{ j}/(\text{kmol.k}^\circ) \quad \text{حيث أن:}$$

الحرارة الحرجة: هي درجة الحرارة العظمى التي يمكن أن يتواجد فيها الطور الغازي والطور السائل في حالة توازن، أو بمعنى آخر هي درجة الحرارة الموافقة لتساوي الطاقة الحركية الوسطية المولية مع طاقة تجاذب الجزيئات.

يسمى الضغط البخاري للمادة الموافق لدرجة الحرارة الحرجة بالضغط الحرج، كما يسمى حجم مول واحد من المادة بالحجم النوعي الحرج. والجدول رقم (2-2) يبين القيم الحرجة لمركبات المزيغ الغازي. يبين الشكل (2-1) علاقة الضغط (مرونة البخار المشبع) للمادة النقية مع درجة الحرارة. هذه العلاقة تصف تغير صفات الغازات الحقيقية عند قيم للضغط أقل من 10Mpa ودرجة الحرارة حتى 293k ولكنها غير صالحة لخلاتط الغازات الطبيعية المتعددة المكونات.



الشكل (2-1) علاقة الضغط مع درجة الحرارة

للمادة النقية

من هنا، كان لابد من البحث عن معادلة الحالة التي يمكن أن تصف الغازات الطبيعية التي تتواجد في شروط من الضغط والحرارة تصل حتى 100Mpa وحوالي 573k خلال عمليات الإنتاج، وتنخفض لتصل حتى 223-93k أثناء معالجة الغازات الطبيعية.

قام العالمان براون وكاتس بدراسة تجريبية لمعامل انحراف الغازات الحقيقية z عن قوانين الغازات المثالية، حيث تم التوصل إلى أنه، إذا كانت قيم الضغط والحرارة المصغرة (reduced pressure and temperature) للغازات الطبيعية متماثلة (Pr, Tr) ، فإن هذه الغازات تتواجد في حالات متماثلة وتكون فيها الصفات الفيزيائية (z, ρ, v, T, P) متطابقة، أي أن $z = z(Pr, Tr)$.

المؤشرات المصغرة للمركبات الغازية المنفردة هي قيم بدون واحدة قياس، وتشير إلى أن بارامترات

الغاز الفعلية (z, ρ, v, T, P) أكبر أم أصغر من القيم الحرجة:

$$z_r = \frac{z}{z_{cr}}, P_r = \frac{P}{P_{cr}}, T_r = \frac{T}{T_{cr}}, V_r = \frac{V}{V_{cr}}, \rho_r = \frac{\rho}{\rho_{cr}}$$

جدول (2-2) البارامترات الحرجة لبعض عناصر المزيغ الغازي

اسم العنصر	الصيغة الكيميائية	البارامترات الحرجة		
		P_c [bar]	V_c [m ³ / Kg]	T_c [K]
الهواء	-	37.66	0.00328	132.46
الماء	H ₂ O	221.29	0.00310	647.30
الآزوت	N ₂	33.93	0.00318	126.16
ثنائي أكسيد الكربون	CO ₂	73.83	0.00214	304.20
ثنائي أكسيد الكبريت	SO ₄	78.85	0.00190	430.66
الهيدروجين	H ₂	12.94	0.00324	32.99
كبريت الهيدروجين	H ₂ S	89.63	0.00284	373.56
أول أكسيد الكربون	CO	35.00	0.00332	133.16
الأوكسجين	O ₂	50.40	0.00229	154.96
الميثان	CH ₄	46.40	0.00617	190.66
الإيثان	C ₂ H ₆	48.62	0.00488	305.43

البروبان	C ₃ H ₈	42.65	0.00453	370.00
إيزو البوتان	i-C ₄ H ₁₀	36.47	0.00445	408.14
نظامي البوتان	n-C ₄ H ₁₀	37.96	0.00438	425.17
إيزو البنتان	i-C ₅ H ₁₂	33.33	0.00423	460.96
نظامي البنتان	n-C ₅ H ₁₂	33.74	0.00421	469.78
إيزو الهكسان	i-C ₆ H ₁₄	30.34		498.06
نظامي الهكسان	n-C ₆ H ₁₄	30.31		507.86
نظامي الهبتان	n-C ₇ H ₁₆	27.36		540.17

من المعلوم أن الغازات الطبيعية، عبارة عن خلطات لمجموعة من المركبات التي تمتلك جزيئاتها أشكالاً مختلفة، فمنها المركبات البسيطة (ميثان . هيليوم . أرغون.. إلخ)، حيث يكون لجزيئاتها شكل كروي. أما المعقدة منها فيكون لجزيئاتها أشكال معقدة وبالتالي يجب الأخذ بالاعتبار قوى التجاذب والتدافع فيما بينها، وهو ما تم التعبير عنه بعامل اللامركزية ω . وبهذا الشكل يصبح المعامل z تابعاً لثلاثة مؤشرات:

$$z = z(Pr, Tr, \omega) \quad (2-12)$$

أو بشكل آخر:

$$z_{mix} = z_0(Pr, Tr) + z_1(Pr, Tr)\omega_{mix} \quad (2-13)$$

حيث أن: $z_0(Pr, Tr)$. معامل انضغاط الغاز البسيط.

$z_1(Pr, Tr)$. يمثل تصحيحاً لقيم معامل انضغاط الغازات المعقدة.

ω_{mix} . عامل المركزية لمزيج الغازات (من أجل الغازات البسيطة $\omega_{mix} = 0$).

$$\omega_{mix} = \sum_{i=1}^n y_i \omega_i \quad (2-14)$$

تحسب قيمة ω_i من أجل كل مركب في المزيج من علاقة ايدمستيرا:

$$\omega_i = \frac{3}{7} \left[\frac{\text{Lg} \frac{P_{cri}}{P_{at}}}{\frac{T_{cri}}{T_{b0}} - 1} \right] - 1 \quad (2-15)$$

حيث أن: P_{at} : الضغط الجوي و T_{b0} : حرارة غليان المركب عند الضغط الجوي.

يتم تحديد النسبة $\frac{T_{cri}}{T_{b0}}$ من الصيغة التي وضعها العالم غوريفتنا:

$$\frac{T_{cr}}{T_{b0}} = 2.1898 - 0.1735 \frac{T_{cr}}{100} + 0.006854 \left(\frac{T_{cr}}{100} \right)^2 \quad (2-16)$$

لابد من الإشارة، إلى أن المؤشرات المصغرة لخلائط الغازات الطبيعية تمثل نسبة قيمتها الفعلية إلى القيم الوسطية الحرجة:

$$P_{r\text{mix}} = \frac{P}{P_{cr}} , \quad \bar{V}_{r\text{mix}} = \frac{V}{V_{cr}} , \quad \bar{z}_{r\text{mix}} = \frac{z}{z_{cr}} \quad (2-17)$$

$$T_{r\text{mix}} = \frac{T}{T_{cr}} , \quad \bar{\rho}_{r\text{mix}} = \frac{\rho}{\rho_{cr}} .$$

يتم حساب قيم المؤشرات الوسطية ($\bar{P}_{cr}, \bar{V}_{cr}, \bar{\rho}_{cr}, \bar{z}_{cr}, \bar{T}_{cr}$)، على الشكل التالي:

$$\bar{P}_{cr} = \sum_{i=1}^n y_i P_{cri} , \quad \bar{T}_{cr} = \sum_{i=1}^n y_i T_{cri} , \quad \bar{z}_{cr} = \sum_{i=1}^n y_i z_{cri} \quad (2-18)$$

$$\bar{V}_{cr} = \sum_{i=1}^n y_i V_{cri} , \quad \bar{\rho}_{cr} = \sum_{i=1}^n y_i \rho_{cri}$$

حيث أن: y_i . الكسر المولي للمركب i في المزيج الغازي.

n . عدد المركبات في المزيج.

V_{cr} . الحجم المولي الحرج.

في أغلب الأحيان، يُعطى تركيب الغازات الطبيعية حتى البوتان (C_4H_{10}) أو الهكسان (C_6H_{14}). أما بقية المركبات الثقيلة ونظراً لنسبها القليلة فإنها تُوصف بقيمة واحدة هي (C_{5+}) أو (C_{7+})، ويمكن حساب كتلتها المولية، إما بمعرفة نسبة كل مركب فيها أو بطريقة تناقص درجة حرارة تجمد البنزول عند إضافتها إليه، ويتم الحساب وفق العلاقة:

$$M_{C_{5+}} = \frac{G_k}{G_b} \left(\frac{5120}{\Delta t} \right) (1 - 0.011 \Delta t) \quad (2-19)$$

G_k . كتلة المركبات الثقيلة المضافة إلى محلول البنزول.

G_b . كتلة محلول البنزول.

Δt . تناقص درجة حرارة تجمد البنزول.

أما المؤشرات الحرجة، فيمكن الحصول عليها من العلاقات:

$$P_{crC_{7+}} = 0.1 \left(\frac{3570}{M_{C_{7+}}} \right) \left(\frac{\rho_{C_{7+}}}{0.8} \right) \quad (2-20)$$

$$T_{crC_{7+}} = \left(353.5 + 22.35 M_{C_{7+}}^{0.5} \right) \left(\frac{\rho_{C_{7+}}}{0.8} \right)^{0.5} \quad (2-21)$$

يمكن تطبيق العلاقتين (2-20) ، (2-21) ضمن الحدود:

$$0.70 \leq \rho_{C_{7+}} \leq 0.95 \quad \text{و} \quad 100 \leq M_{C_{7+}} \leq 240$$

وإذا لم تتوفر الإمكانية لمعرفة الكتلة المولية، فيمكن من خلال الكثافة النسبية حساب المؤشرات

الحرجة:

$$P_{cr\text{mix}} = 0.1 \left(55.3 - 10.4 \bar{\rho}_{\text{mix}}^{0.5} \right) , \text{Mpa} \quad (2-22)$$

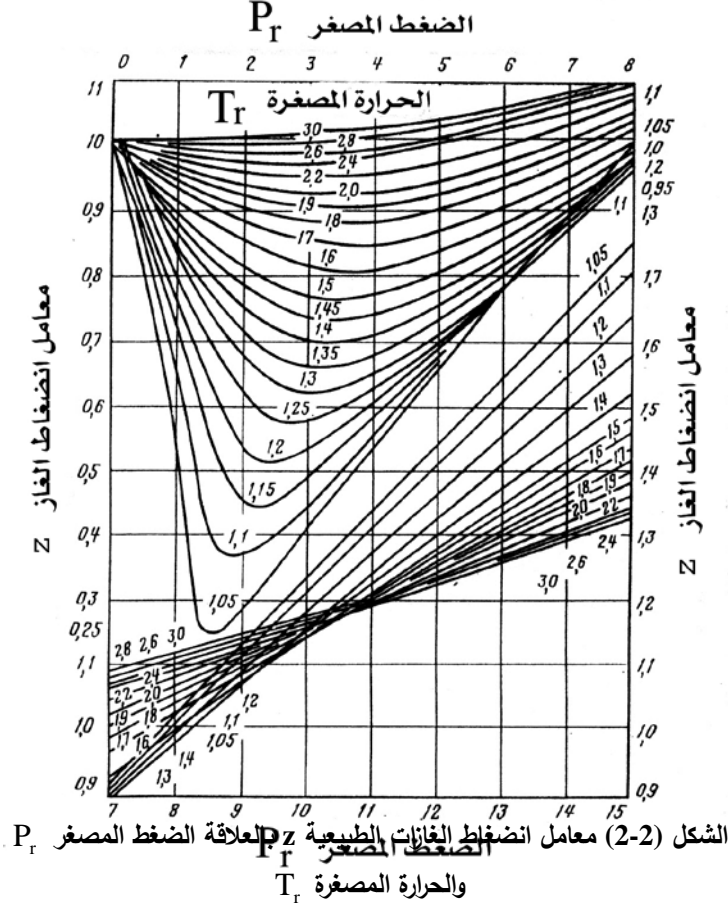
$$T_{cr\text{mix}} = 12 + 238 \rho_{\text{mix}}^{0.5} , \text{k}^\circ$$

بحيث تكون قيمة $\bar{\rho}_{mix}$:

$$0.5 \leq \bar{\rho}_{mix} \leq 1$$

وبهذا الشكل يمكن تحديد معامل انضغاط الغاز z (Compressibility Factor) للغازات الطبيعية

بيانياً بعد معرفة $P_{r mix}$ و $T_{r mix}$ حسب طريقة العلماء (كاتس وبراون) من الشكل (2-2).



عند التحديد الدقيق لمعامل الانضغاط z لابد من إجراء تصحيح، يأخذ بالاعتبار وجود المركبات

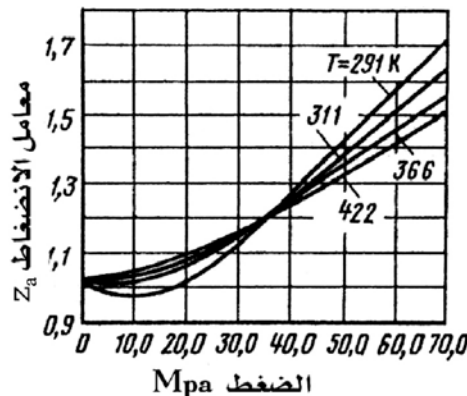
اللاعضوية (N_2, CO_2, H_2S). فمثلاً عند وجود الآزوت وبحسب z كما يلي:

$$z = y_a \cdot z_a + (1 - y_a) z_y \quad (2-23)$$

y_a . نسبة الآزوت في المزيج الغازي.

z_a, z_y . معامل انضغاط الآزوت والجزء الهيدروكربوني على الترتيب.

يحدد z_a من الشكل (2-3).



الشكل (2-3) معامل انضغاط الآزوت بالعلاقة مع الضغط ودرجة الحرارة.

عند حل المسائل المتعلقة بإنتاج الغاز، فإنه إضافة للطريقة البيانية، يمكن تحديد z من معادلة الحالة التي اعتمدها العلماء (Cvonka – Redlek).

$$\left(P + \frac{a}{T^{0.5} \cdot v(v+b)} \right) (v-b) = R T \quad (2-23)$$

أو بشكل آخر:

$$z^3 - z^2 + z(a^2 - b^2 p - b) - a^2 b p^2 = 0 \quad (2-24)$$

حيث أن:

$$a = 0.4278 T_{cr}^{2.5} / P_{cr} T^{2.5} \quad (2-25)$$

$$b = 0.0867 T_{cr} / P_{cr} \cdot T \quad (2-26)$$

بمقارنة قيم z المحسوبة بالعلاقة (2-25) مع القيم التجريبية، تبين أن نسبة الخطأ لا تتجاوز 2% ضمن مجالات قيم الضغط والحرارة المصغرة التالية:

$$0.01 \leq P_r \leq 12 \quad , \quad 1.05 \leq T_r \leq 1.6$$

مثال 2-1: احسب معامل انضغاط الغاز z للمزيج (غاز . كوندسات) بطريقة

(Katz – Braon) وطريقة (Cvonka – Redlek) إذا علمت أن النسب المئوية في المزيج هي:

CH ₄	82.55	n-C ₄ H ₁₀	1.26
C ₂ H ₆	9.01	i-C ₅ H ₁₂	0.32
C ₃ H ₈	4.62	n-C ₅ H ₁₂	0.225
i-C ₄ H ₁₀	0.74	C ₆ H ₁₄	0.38
		CO ₂	0.90

وأن $T = 310.9K^\circ$, $P = 13.6Mpa$ ، علماً أنه تم تحديد z تجريبياً وكانت $z = 0.7495$.

الحل: المعطيات اللازمة لحساب قيم المؤشرات الحرجة لمركبات المزيج ومن ثم حساب قيمها

المصغرة موضحة أدناه:

المركب	M_i	P_{cri}	$T_{cri,k}$	V_{cri}^3 CM ³ /mol	z_{cri}	ω_i	النسبة المئوية y_i	$y_i \cdot P_{cri}$	$y_i \cdot T_{cri}$
CH ₄	16.04	45.80	190.7	99.5	0.290	0.013	0.8255	37.900	157.50
C ₂ H ₆	30.07	48.60	306.0	148.0	0.285	0.105	0.0901	4.380	27.55
C ₃ H ₈	44.09	43.40	369.8	200.0	0.277	0.152	0.0462	2.050	17.06
i-C ₄ H ₁₀	58.12	37.20	407.2	263.0	0.283	0.192	0.0074	0.275	3.02
n-C ₄ H ₁₀	58.12	35.70	425.2	255.0	0.274	0.201	0.0126	0.450	5.35
i-C ₅ H ₁₂	72.15	32.80	461.0	308.0	0.268	0.208	0.0032	0.105	1.47
n-C ₅ H ₁₂	72.15	33.00	470.4	311.0	0.269	0.252	0.0022	0.073	1.03
C ₆ H ₁₄	86.17	29.60	508.0	368.0	0.264	0.290	0.0038	0.113	1.93
C ₇ H ₁₆	100.20	27.00	540.3	426.0	0.259	0.352	-	-	-

N ₂	28.02	34.60	126.1	90.1	0.291	0.040	-	-	-
CO ₂	44.01	74.96	304.2	94.0	0.274	0.420	0.0090	0.676	2.74
H ₂ S	34.08	88.90	373.6	95.0	0.268	0.100	-	-	-
H ₂ O	18.02	225.65	647.45	56.0	0.230	0.348	-	-	-
المجموع							1.0000	46.022	217.65

$$T_r = \frac{310}{217.65} = 1.43 \quad , \quad P_r = \frac{136}{46} = 2.95$$

باستخدام طريقة (Katz – Braon). من الشكل رقم (2-2) نلاحظ أن $z = 0.749$. وبتطبيق طريقة (Cvonka – Redlek):

$$a^2 = 0.4278 \frac{217.65^{2.5}}{46 \times 310.9^{2.5}} = 3.8 \times 10^{-3}$$

$$b = 0.0867 \frac{217.65}{46 \times 310.9} = 1.32 \times 10^{-3}$$

$$(a^2 - b^2 p - b)p = 0.305 \quad , \quad a^2 b p^2 = 0.0926$$

$$z^3 - z^2 + 0.305 z - 0.926 = 0 \quad , \quad z = 0.754$$

2-3- كثافة الغازات الطبيعية والمكثفات الغازية:

تتعلق كثافة الغاز بشكل أساسي بقيم الضغط والحرارة، ويتم حسابها في الشروط الفيزيائية القياسية أي $T = 293 \text{ k}^\circ$ و $P = 0.1013 \text{ Mpa}$ بالعلاقة:

$$\rho_{st} = \frac{M}{24.04} \quad (2-27)$$

أما كثافة الغاز عند الدرجة $T = 273 \text{ k}^\circ$ فتعطى بالعلاقة:

$$\rho_0 = \frac{M}{22.4} \quad (2-28)$$

حيث أن:

M . الكتلة المولية للغاز، ويتم حسابها بالنسبة للمزيج الغازي بالعلاقة:

$$M_{mix} = X_1 M_1 + X_2 M_2 + X_3 M_3 \dots \dots X_i M_i = \sum_{i=1}^{i=n} X_i M_i \quad (2-29)$$

بمعرفة كثافة الغاز ρ_{st} ، يمكن حساب قيمتها عند مختلف قيم الضغط والحرارة:

$$\rho_{(t,p)} = \frac{\rho_{st} \cdot P \cdot T_{st}}{z \cdot P_{st} \cdot T} \quad (2-30)$$

غالباً ما يستخدم في الحسابات العملية مفهوم الكثافة النسبية:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_{st}}{\rho_a} \quad (2-31)$$

ρ_a . كثافة الهواء وتساوي 1.293 kg/M^3 عند الدرجة $T = 273 \text{ k}^\circ$ و 1.205 kg/M^3 عند الدرجة $T = 293 \text{ k}^\circ$.

