

دراسة العوامل المؤثرة على ترسب الكبريت الحر في مواسير إنتاج الغاز في حقول الجبسة

طالب دكتوراه: م. محمود أسعد - كلية: هك ب - جامعة البعث
إشراف الدكتور: أ.د ديب ديب + د.م. جان سعد

الملخص:

تم في هذا البحث اقتراح استخدام نموذج نظري (theoretical model) للتنبؤ بسلوك ترسب الكبريت الحر $/S_8/$ في مواسير إنتاج الغاز الحامضي. وخلال النمذجة النظرية تم حساب بروفيل تدرج الضغط ودرجة الحرارة، وبعد ذلك تم الحصول على تغيرات الكبريت الحر على طول مواسير الإنتاج. فعندما يصل تركيز بخار الكبريت الأولي في تيار الغاز إلى قيمة انحلاله (تفاعله) مع الغاز الحامضي $/H_2S/$ يتم الحصول على مسافة الإشباع (saturation distance). وعلاوة على ذلك فإن الانخفاض في الضغط أو درجة الحرارة يؤدي إلى عدم الاستقرار الحراري (thermodynamic instability). ويبدأ ترسب الكبريت بمجرد التغلب على عتبة التغير في الطاقة الحرة. كما تم تحديد معدل تشكل نوى جزيئات الكبريت بمساعدة النظرية الكلاسيكية لتشكيل نوى الجزيئات. وتقدير التخرن والتكتل الجزيئي باستخدام النموذج التحليلي للباحث Smoluchowski. وإجراء تقييم لحجم الجزيئة العابرة. وبالنسبة للجزيئات الملامسة لسطح المعدن فقد تم تطبيق نموذج الباحث Tabakoff للتفاعل بين الجزيئات وسطح معدن الماسورة، وبالتالي يمكن تحديد مقدار المسافة العظمى التي تقطعها الجزيئة. كما تم توضيح تأثير كل من معدل الإنتاج الأولي وتركيز بخار $/S_8/$ والضغط ودرجة الحرارة على سلوكية ترسب $/S_8/$. وأخيراً تم اقتراح معدل هبوط الضغط الحرج لتقييم ما إذا كانت ترسبات الكبريت الحر المرئية تحدث ضمن جزء الماسورة المدروسة.

الكلمات المفتاحية: الكبريت الحر (S_8)، الانحلالية، نظرية تشكل النوى الكلاسيكية، التخرن والتكتل، وتفاعلات جدار - جزيئة، الترسب.

The study of factors affecting the Elemental sulfur deposition in the tubes of production of gas in Jbissah fields

Abstract

In this paper, a theoretical model is proposed to predict the behaviour of elemental sulfur (S_8) deposition in a sour-gas production tubes. During theoretical modeling, pressure and temperature profiles are firstly calculated. Then S_8 solubility alteration along the production tubes was acquired. When the initial sulfur-vapor concentration in the gas stream reached the solubility (reaction) value in sour gas $/H_2S/$, the saturation distance was obtained. Further, a decrease in pressure or temperature causes a thermodynamic instability. Once a threshold of free energy change is overcome, elemental sulfur is precipitated. The nucleation rate was determined from classic nucleation theory. Particle coagulation and agglomeration were approximated using the Smoluchowski's analytic model. As a result, transient particle size was assessed. As particles touched the metal surface, the Tabakoff's model was applied for the interaction between particles and the pipes metal surface. Consequently, the maximum travelling distance of the particles could be quantified. Furthermore, the effects of initial production rate, S_8 vapour concentration, pressure and temperature on S_8 deposition behaviours were characterized. Furthermore, a critical pressure drop rate was proposed to evaluate whether visible elemental sulfur deposition occurs inside a local subregion of pipes.

Keywords: Elemental sulfur (S_8), solubility, classic nucleation theory, coagulation and agglomeration, particle-wall interaction, deposition

المقدمة:

للكبريت أشكال متنوعة فعند درجة حرارة الغرفة والشروط الجوية تجتمع ذرات الكبريت لتشكل حلقة بنمائية عناصر على شكل تاج ويرمز لها بالرمز S_8 . وفي الشروط الطبقيّة أي عند الضغوط ودرجات الحرارة العالية فإن كمية كبيرة جداً من الكبريت الحر تتواجد في الشكل البخاري، مثل (H_2S_x) ، [8].

عندما يتدفق تيار الغاز الطبيعي الحامضي من الطبقة إلى مواسير الإنتاج فإن انخفاض ضغط ودرجة حرارة التيار الغازي المتدفق يُقلل من معدل انحلالية الكبريت S_8 . وعند الوصول لدرجة فوق الإشباع تبدأ عملية تشكل النوى. فعند سطح النواة (nuclei surface) يكون تركيز بخار S_8 منخفضاً جداً. حيث أن انتشار بخار الكبريت من أماكن تواجده بكثافة (bulk) إلى سطح النواة يساعد على نمو نواة S_8 . ونظراً لتشكيل نوى أخرى فلا بد من التفاعلات فيما بين هذه الجزيئات المتشكلة، حيث يظهر للعيان تخثر وتكتل الجزيئات. وبالتالي فإن الجزيئات المندمجة مع بعضها البعض قادرة على الانتقال لمسافات أبعد بسبب جرفها بواسطة التيار الغازي المضطرب جداً. وبمجرد لمسها لجدار المواسير إما أن تترسب على الجدار أو تنعكس بالاعتماد على قساوة الجزيئة (particle hardness) وخشونة المعدن (metal roughness) وقابلية ترطب السطح (surface wettability)، وهلم جرى [8].

ويمكن لجزيئات الكبريت المستقرة أن تسبب انسداد في الطبقة الغازية المنتجة أو تشكيل سدادة تؤدي إلى إغلاق مواسير الإنتاج جزئياً أو كلياً. فضلاً عن إتلاف المعدات اللاحقة مثل الصمامات وعدادات التدفق والفلاتر قيد الاستخدام [9].

إن تلامس الكبريت النقي والجاف مع الفولاذ (carbon steel) لا يشكل أي تهديد بالتآكل ولكن بوجود الماء يمكن أن يتفاعل الكبريت ليشكل أحماض الكبريتيد والكبريتي (sulfuric and sulphide acids) وإذا تم إشراك وسائط عدوانية (aggressive agents) مثل أيونات الكلوريد (chloride ions) سوف تسبب حفر تآكلية متمركزة (localized pitting corrosion) والتي يمكن أن تقود إلى عواقب وخيمة [9].

هدف البحث:

إن الهدف الأساسي من هذا البحث هو توضيح تأثير العوامل المختلفة على سلوكيات ترسب الكبريت الحر ومن هذه العوامل: معدل الإنتاج الأولي وتركيز بخار S_8 والضغط ودرجة الحرارة. وبمعرفة هذا التأثير يمكن الفهم الدقيق لأسباب هذه المشكلة والسعي للحد منها قدر الإمكان لما لها آثار سلبية على الإنتاج حيث تسبب مع مرور الزمن إغلاق لمواسير الإنتاج بشكل جزئي أو كلي وبالتالي كلفة اقتصادية عالية نتيجة التوقف عن الإنتاج وكلفة الصيانة والإصلاح.

أولاً: النمذجة والمنهجية:

إن التنبؤ الدقيق بعملية تشكل وترسب الكبريت الحر في مواسير إنتاج الغاز الحامضي يمثل تحدياً حاسماً بسبب عدم كفاية القياسات فضلاً عن عدم وجود نظريات دقيقة للتعامل مع تلك المسائل المطلوبة مثل قيم انحلالية S_8 ، وآلية تشكل النوى، ونمو وخسونة الجزيئة، والتفاعل المتبادل بين الجزيئة وجدار ماسورة الإنتاج. وعلى الرغم من ذلك فقد بينت الدراسة المرجعية أن هناك عدة نماذج للتنبؤ بعملية تشكل وترسب الكبريت نذكر منها نموذج الباحث Peng Robinson ونموذج متعدد كبريت الهيدروجين (hydrogen polysulphide model) ويعتبر النموذج الأخير هو الأكثر موثوقية للحصول على افتراض صحيح لتوافقه مع الشروط البئرية الحالية للبئر المدروس [2].

ونظراً للظروف التشغيلية المعقدة للبئر الغازي المدروس وصعوبة الأخذ بالاعتبار كافة العوامل المؤثرة لا بُدَّ من إجراء بعض التبسيطات والفرضيات الضرورية لفهم الآلية الأساسية لترسب الكبريت S_8 بشكل نوعي وتقدير موقع ترسب الكبريت بشكل شبه كمي [2]:

- يعامل الكبريت S_8 النقي والتي لا تتضمن حالة شبه مستقرة (metastable).
- لا سوائل ترطب السطح الداخلي للمواسير ولا أوكسجين سيدخل إلى نظام الغاز الحامضي.
- كما يفترض أن تكون جزيئات S_8 قاسية بما فيه الكفاية وجدران المواسير ملساء بشكل كافي ولا يحدث تشوهات للجزيئة خلال تفاعلات جدار-جزيئة.

■ بالإضافة إلى ذلك فإن عملية تشكل نوى الكبريت لا تؤدي لتفاعلات غير عكوسة (irreversible reactions).

في هذا البحث يتضمن الترسيب الكلي لـ S_8 في مواسير إنتاج الغاز الحامضية ثلاث مناطق هي: منطقة التشبع ومنطقة تشكل النوى ومنطقة التخرثر والانتقال.

1-1- مسافة التشبع L_1 :

تعرف مسافة التشبع بأنها المسافة من الطبقة المنتجة إلى المكان الذي يصل فيه تركيز بخار الكبريت الأولي إلى قيمة انحلاله (تفاعله) مع الغاز الحامضي H_2S . في هذا البحث تم الحصول على انحلالية الكبريت الحر في أنظمة الغاز الحامضي من الباحث كاران وآخرون (Karan et al) [3]. واعتماداً على نموذجهم المقترح فإن قيم انحلالية S_8 المحسوبة توضح جميع السلوكيات النوعية (qualitative behaviours) في البيانات وتتوافق بشكل جيد مع البيانات التجريبية التي تغطي مجموعة واسعة من تركيبها. حيث أنه يمكن بالحصول على قيمة الضغط ودرجة الحرارة في مكان ما داخل ماسورة الإنتاج حساب قيمة انحلالية S_8 في ذلك الموقع المحدد. ولقد طور الباحث تشراستيل (Chrastil) [4] قانون تجريبي (empirical formula) اعتبر فيه أن انحلالية S_8 تابعة لضغط ودرجة حرارة النظام. وبالتالي يمكن أن نستنتج العلاقة التي تعبر عن تغير انحلالية S_8 في أي جزء من الماسورة كما يلي:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dS}{dt} \cdot dt = \int_1^2 \left(\frac{\partial S}{\partial P} \cdot \frac{dP}{dt} + \frac{\partial S}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dt} \right) \cdot dt \dots \dots \dots (1)$$

1-2- تغير الضغط:

أثناء تدفق الغاز وحيد الطور يمكن حساب هبوط الضغط بين بداية ونهاية الجزء المدروس من ماسورة الإنتاج باستخدام معادلة برنولي/Bernoulli، [4]:

$$\frac{p_1}{\rho_g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\rho_g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + (1 + \sum_{i=1}^N K_i) f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \dots \dots \dots (2)$$

حيث أن: $P, \rho, g, V, Z, K_i, f, D, L$ تمثل الضغط، الكثافة، الجاذبية الأرضية، السرعة، الارتفاع، معامل الضياع لكل المتممات الخاصة (على سبيل المثال الانحناء، التضيقات، الأكواع) معامل المقاومة الهيدروليكية، القطر، الطول، على التوالي [4]. وتدل الأرقام (1,2) على بداية ونهاية الجزء المدروس من ماسورة الإنتاج. وبدوره يعطى معامل المقاومة الهيدروليكية المذكور في المعادلة (1) بالعلاقة التالية:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{K_s}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \dots \dots \dots (3)$$

حيث أن: K_s, Re تدل على خشونة جدار ماسورة الإنتاج وعدد رينولدز على التوالي، [4].

1-3- هبوط درجة الحرارة:

إن هبوط درجة الحرارة أمر لا مفر منه عند انتقال الغاز ذو درجة الحرارة العالية من الطبقة المنتجة إلى مواسير الإنتاج ومن ثم عبر خطوط أنابيب النقل. ويمكن التعبير عن تدفق الفقد الحراري (flux of lost heat) لكل جزء مدروس بالمعادلة التالية، [3]:

$$q = \frac{T_f - T_{amb}}{\sum_{i=1}^N Ri} = \frac{T_f - T_{amb}}{R_{gas} + R_{metal} + R_{insulation} + R_{amb}} \dots \dots \dots (4)$$

حيث أن: $q, T_f, T_{amb}, R_{gas}, R_{metal}, R_{insulation}, R_{amb}$ تمثل تدفق الحرارة، درجة حرارة الغاز المتدفق، درجة حرارة الوسط المحيط، المقاومة الحرارية للغاز، المقاومة الحرارية للمعدن، المقاومة الحرارية لطبقة العزل، المقاومة الحرارية للوسط الخارجي المحيط، على التوالي. وبناءً على التوازن الحراري (heat balance) فإن تدفق الحرارة المفقودة سيقبل من الطاقة الحرارية لتيار الغاز عند تدفقه من بداية الجزء المدروس إلى نهايته [2]، أي:

$$T_{out} - T_{amb} = (T_{in} - T_{amb}) e^{-\frac{h_0 A_w}{m C_p}} \dots \dots \dots (5)$$

حيث أن: T_{in} , T_{out} , C_p , m ترمز معدل التدفق الكتلي، السعة الحرارية، درجة حرارة الدخل، درجة حرارة الخرج، على التوالي. إن العلاقة المتبادلة بين درجة حرارة الدخل والخرج يعبر عنها كما يلي [5]:

$$q = mC_p(T_{in} - T_{out}) \dots \dots \dots (6)$$

حيث أن: A_w , h_o ثابت من أجل المعامل الكلي للتبادل الحراري، مساحة السطح الكلية، على التوالي.

1-4- تغير انحلالية S_8 :

بناءً على تغير الضغط وهبوط درجة الحرارة يمكن حساب انحلالية S_8 في الجزء المدروس من ماسورة الإنتاج. ويمكن الحصول على مسافة التشبع L_1 بمجرد وصول التركيز البخاري للكبريت الحر ($C_{S8,0}$) إلى درجة انحلاليته أو عتبة الكبريت الحر (S_{S8}) في تيار الغاز الحامضي [2]، أي:

$$S_{S8}(P_{L1}, T_{L1}) \leq C_{S8} \dots \dots \dots (7)$$

1-5- مسافة فوق التشبع L_2 :

حسب نظرية تشكل النوى الكلاسيكية فإنه لن يحدث ترسب للكبريت الحر في اللحظة التي يصل فيها تركيز بخار الكبريت الأولي إلى قيمة الانحلالية فوراً، وإنما لا بد من التغلب على عتبة حاجز طاقة جيبس الحرة (Gibbs Free Energy barrier) التي تُعطى بالعلاقة التالية، [3].

$$J = Ke^{-\frac{\Delta G}{k_B T}} \dots \dots \dots (8)$$

حيث أن: T , k_B , ΔG , J , K تدل على معدل تشكل النوى، معامل أمثال العدد الآسي، طاقة جيبس الحرة، ثابت بولتزمان/Boltzmann constant، درجة الحرارة، على التوالي. وفي هذا البحث تحدد مسافة فوق الإشباع من نقطة الإشباع إلى الموقع الذي تُلاحظ فيه تشكل نواة أول جزيئة، وتُعرف أول جزيئة مرئية بمعدل تشكل النوى للجزيئة

الواحدة في المتر المكعب من الغاز في اليوم. وهكذا فإن مسافة فوق الإشباع تُعطى بالعلاقة، [5]:

$$L_2 = L_{J>J_{visible}} \dots \dots \dots (9)$$

حيث أن: $J_{visible}$ يمثل معدل تشكل النوى عند جزيئة $/S_8/$ المتشكلة المرئية. وبدوره يُعطى معامل أمثال العدد الآسي بالمعادلة التالية، [5]:

$$K = \theta \cdot \alpha_c \cdot v_s \cdot N^2 \sqrt{\frac{2\delta}{k_B T}} \dots \dots \dots (10)$$

حيث أن:

$\theta, \alpha_c, V_s, N, \sigma$: تدل على عامل عدم تساوي الحرارة، عامل التكاثر، الحجم الجزيئي للمادة المذابة، عدد الجزيئات القابلة للتكاثر، التوتر البيني (interfacial tension) للمادة المذابة، على التوالي. وتُعطى عدد الجزيئات المتكاثفة بالعلاقة التالية، [5]:

$$N = \rho_M \cdot y_E \cdot N_A \dots \dots \dots (11)$$

حيث أن:

ρ_M, y_E, N_A : تدل على كثافة المزيج، الكسر المولي للمادة المذابة عند شروط الاستخراج (extraction conditions)، عدد أفوغادرو، على التوالي. ويُعطى التوتر البيني للكبريت الحر بالمعادلة التالية، [4]:

$$\sigma = P_c^{2/3} \cdot T_c^{1/3} \cdot \left[0.1207 \times \left(1 + \frac{T_{br} \cdot \ln P_c}{1 - T_{br}} \right) - 0.281 \right] \cdot (1 - T_r)^{1.222} \dots \dots (12)$$

حيث أن:

$P_c, T_c, T_{br}, T_b, T_r$: تدل على الضغط الحرج، درجة الحرارة الحرجة، درجة الحرارة المصغرة، درجة حرارة نقطة الغليان المصغرة، درجة حرارة نقطة الغليان، على التوالي.

1-6- التأثير غير المتجانس (Heterogeneous Effect):

في الواقع يوجد عدد كبير جداً من الملوثات في تيار الغاز، تتراوح بين ملوثات غازية (مثل غاز كبريت الهيدروجين، المركبتانات) والملوثات السائلة (مثل الرطوبة، الغليكول، الهيدروكربونات السائلة، مواد مثبطة) وحتى الملوثات الصلبة (الهيدروكربونات البارافينية، زيوت التزليق، الشحوم، نواتج التآكل). وهذه الملوثات قادرة على إنشاء عدد أكبر من جزيئات S_8 التي تشكلت نواها خلال عملية تشكل النوى غير المتجانسة. وفي هذه الحالة يمكن التعبير عن تغير طاقة جيبس الحرة (المذكورة بالمعادلة (8)) وفق المعادلة التالية [6]:

$$\Delta G = \frac{16\pi\sigma^3}{3(P_{sat}-P_{sys})^2} \cdot S(\theta) = \frac{16\pi\sigma^3}{3(P_{sat}-P_{sys})^2} \cdot \frac{(2+\cos\theta) \cdot (1-\cos\theta)^2}{4} \dots (13)$$

حيث أن: P_{sat} , P_{sys} , $S(\theta)$ ترمز إلى ضغط التشبع، ضغط النظام، عامل شكل الملوثات، على التوالي، [6].

ويمكن التعبير عن الفرق بين الضغط المشبع وضغط النظام في المعادلة السابقة كما يلي:

$$\Delta P = P_{sat} - P_{sys} = P_{sat} - \left(P_{inlet} - \frac{dP}{dt} \cdot \Delta t \right) \dots \dots \dots (14)$$

1-7- المسافة الأعظمية لتقل الجزيئة L_3 :

بمجرد وصول معدل تشكل النوى لدرجة معينة يكون التركيز المرافق من نوى S_8 المترسبة ضمن تيار الغاز كبير جداً وبالتالي لا بد من حدوث تفاعلات بينية جزيء-جزيء واصطدامات جزيء-جدار الماسورة. فالتفاعلات البينية جزيء-جزيء تفقد إلى تخثر وتكتل الجزيئات. بينما اصطدامات جزيء-جدار الماسورة تجعل الجزيئة ترتد أو تنزلق أو تدور أو تستقر وذلك اعتماداً على خواص الجزيئة (مثل الكثافة، الحجم، الكروية، القساوة) وشروط الجدار (مثل الخشونة والرطوبة) عند ملامستها لسطح الماسورة. ويمكن لهذه الجزيئات المندمجة أو المرتدة (coalesced or rebounded particles) أن تسافر لمسافة كبيرة بظروف البيئة المضطربة (turbulent environment) لتيار الغاز، [5].

1-8- مسار الجزيئة (Particle Trajectory):

يمكن تقدير مسافة انتقال الجزيئة من خلال تتبع مسارات الجزيئات. وفي هذا البحث، تم التنبؤ بمسارات الجزيئات عن طريق حل معادلة الحركة التي يمكن وصفها [3]، على النحو التالي:

$$\frac{d\vec{x}_p}{dt} = \vec{u}_p(\vec{x}_p, t) \dots \dots \dots (15)$$

حيث أن: \vec{x}_p , t , \vec{u}_p ترمز إلى موقع الجزيئة، الزمن، السرعة، على التوالي. وقد تم حساب سرعة الجزيئة من القانون الثاني لنيوتن، كما يلي:

$$m_p(t) \times \frac{d\vec{x}_p}{dt} = \sum \vec{F} \dots \dots \dots (16)$$

حيث أن: $\sum \vec{F}$, $m_p(t)$ تمثل كتلة الجزيئة المنتقلة، القوة الكلية متضمنة قوة السحب والجاذبية بالإضافة إلى قوة براونيان (Brownian force) التي تسري فقط عندما يكون حجم الجزيئات أقل من $2/\mu$ ميكرون.

1-9- تخثر الجزيئة (Particle Coagulation):

تم حساب حجم الجزيئة المنتقلة في المعادلة (15) اعتماداً على توازن كتلتها، [3]، أي:

$$N_{i+1} \cdot \rho \frac{4\pi r_{p,i+1}^3}{3} = \Delta m_i^{i+1} + N_i \cdot \rho \frac{4\pi r_{p,i}^3}{3} \dots \dots \dots (17)$$

حيث أن: Δm , r_p تمثل نصف قطر الجزيئة، كمية S_g / المترسبة في الجزء المدروس من ماسورة الإنتاج على اعتبار أن هناك اختلاف بانحلالية S_g / بين مدخل ومخرج الجزء المدروس. كما تم وصف سلوك تخثر الجزيئة باستخدام نموذج سمولوتشوسكي (Smoluchowski's model) [6]، كما يلي:

$$\frac{N_i}{N_0} = \frac{1}{1+2K \cdot N_0 \cdot t_i} = \frac{1}{1+2 \cdot \frac{2K_B T}{3\mu} \cdot N_0 \cdot t_i} \dots \dots \dots (18)$$

حيث أن: N_0 , K , μ تمثل العدد الأولي للجزيئات، معامل الاصطدام، لزوجة الغاز، على التوالي.

1-10- التفاعل البيئي جزيئة-جدار:

بينت الدراسة المرجعية وجود عدة نماذج لإجراء عملية محاكاة للتفاعل ما بين الجزيئات وجدار ماسورة الإنتاج لذلك تم في هذا البحث اختيار نموذج تاباكوف (Tabakoff's model) كونه الأكثر توافقية مع ظروف البئر المدروسة مع افتراض عدم وجود أي سوائل تبلل سطح المعدن، وفق المعادلات التالية، [6]:

$$\alpha_2 = \text{ctg}^{-1} \left(\frac{0.95 + 0.00055 \cdot \alpha_1}{1.0 - 0.02108 \cdot \alpha_1 + 0.000141 \cdot \alpha_1^2} \right) \cdot \text{ctg} \alpha_1 \dots \dots \dots (19)$$

$$\frac{V_{p2}}{V_{p1}} = (1.0 - 0.02108 \cdot \alpha_1 + 0.000141 \cdot \alpha_1^2) \cdot \sqrt{\frac{1 + \text{ctg}^2 \alpha_2}{1 + \text{ctg}^2 \alpha_1}} \dots \dots \dots (20)$$

حيث أن:

$\alpha_1, \alpha_2, V_{p1}, V_{p2}$: ترمز لزواوية الارتطام (impinging angle)، زاوية الانعكاس (reflecting angle) للجزيئات، سرعات الجزيئات قبل وبعد الاصطدام، على التوالي. وبالنتيجة يمكن بشكل تقريبي حساب مسافة الانتقال القصى L_3 / لجزيئة الكبريت.

ثانياً: إجراءات المحاكاة العددية الشاملة:

نظراً لاستحالة اجراء دراسة تجريبية على البئر المدروسة سواءً من الناحية الاقتصادية أو من ناحية عدم السماح لأي باحث بإجراء تجارب حقلية على أي بئر غازية منتجة كان لا بد من اجراء عملية محاكاة لظروف البئر المدروسة باستخدام نماذج ومعادلات تعكس إلى حد ما الظروف التشغيلية البئرية وقد تم الاستعانة ببرنامج (Microsoft Excel) لاختزال الزمن وتسهيل العمليات الحسابية وضمان دقة النتائج. ولذلك تم في البداية تقسيم ماسورة الإنتاج بالكامل إلى عدد من الأجزاء ومن ثم دراسة مدى التغير في الضغط وهبوط درجة الحرارة داخل كل جزء وبالتالي الحصول على الاختلافات بانحلالية S_8 بين مدخل ومخرج الجزء المدروس. وتحدد مسافة التشبع في النقطة التي يكون فيها تركيز بخار الكبريت الأولي مساوياً لقيمة انحلاليته في الغاز الحامضي H_2S /. ويتم لاحقاً حساب معدل تشكل النوى من خلال تطبيق نظرية تشكل النوى الكلاسيكية. وبمجرد أن يتجاوز معدل تشكل النوى عتبة معدل تشكل النوى المرئية سيتم تسجيل مسافة فوق التشبع.

إن كمية S_8 / المترسبة في كل جزء يتم تحديدها على أساس تغير الانحلالية. وبعد ذلك يتم تعقب مسارات الجزيئات (particle trajectories) من خلال حل معادلة الحركة. ويقدر حجم الجزيئة المنتقلة على أساس سلوك اندماج الجزيئة (particle coalescence behavior). كما يتم تطبيق نموذج انعكاس جزيئة-جدار عندما ترتطم الجزيئات بالجدار. ونتيجة لذلك يمكن بشكل تقريبي تحديد مسافة الانتقال القصوى للجزيئة التي تشكلت نواتها في موقع معين، [7].

ثالثاً: محتويات وطرق البحث:

تم في هذا البحث تصميم حالة أساسية للتحقيق في سلوك ترسب S_8 / مع الأخذ بالاعتبار البارامترات الأولية المتنوعة مثل معدل الإنتاج وتركيز الكبريت والضغط ودرجة الحرارة. ففي بداية ماسورة الإنتاج عند قاع البئر يكون تركيز بخار S_8 / حوالي 95%/ من انحلالية S_8 . ويوضح الجدول (1) بارامترات تصميم وتشغيل ماسورة الإنتاج المدروسة، في حين يبين الجدول (2) الكسر المولي لكل عنصر في تيار الغاز الحامضي المدروس، [1].

الجدول (1) بارامترات تصميم وتشغيل ماسورة الإنتاج للبئر المدروس (جبسة-223)، [1].

85 bar	ضغط البئر
156 bar	ضغط قاع البئر
$66 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{Day}$	الإنتاجية اليومية
157 °C	درجة الحرارة عند القاع
60 °C	درجة الحرارة عند الفالة
7"	قطر مواسير التغليف الإنتاجية
3 1\2 "	قطر مواسير الإنتاج
21.95 mm	سماكة الجدار

0.05 mm	الخشونة النسبية للسطح الداخلي
2070 kg/m ³	كثافة الجزيئة
4000 m	عمق البئر المدروسة
500 m	سماعة طبقة الكورثينا دولوميت المنتجة

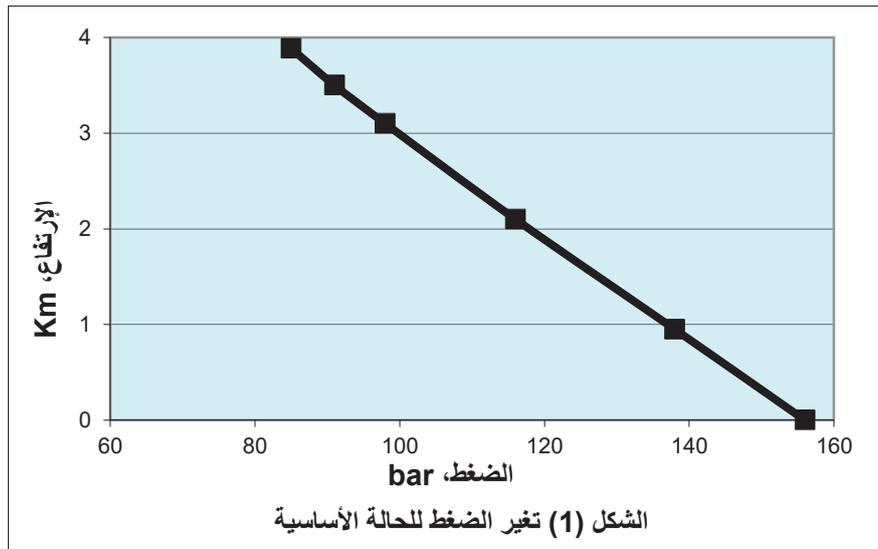
الجدول (2) تركيب الغاز الطبيعي للبئر (جبسة-223) المدروس، [1].

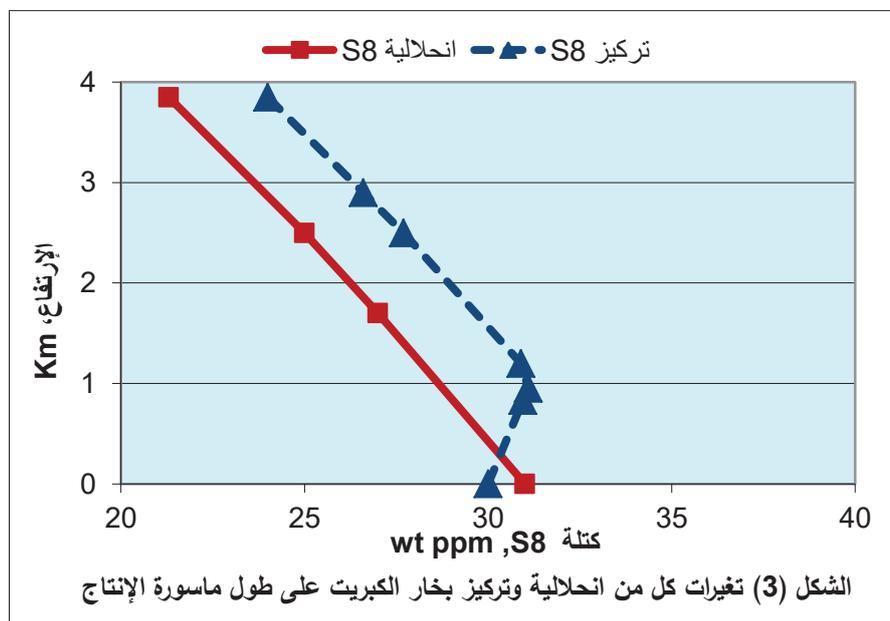
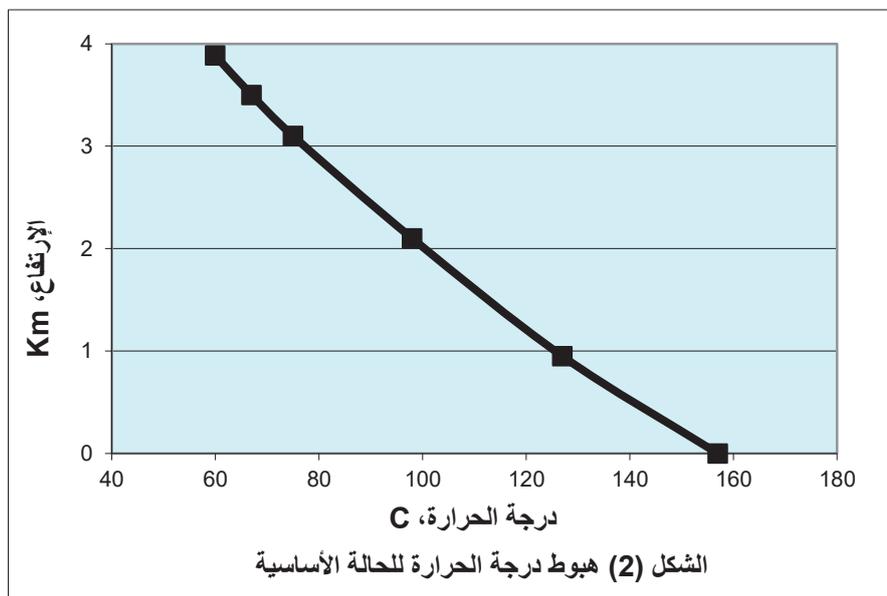
المركب	H ₂ S	CO ₂	N ₂	C ₁	C ₂	C ₃
الكسر المولي (%)	6.2	20	2.73	67.39	1.25	1.21
المركب	IC ₄	nC ₄	IC ₅	nC ₅	C ₆	C ₇₊
الكسر المولي (%)	0.47	0.52	0.15	0.07	0.007	0.003

3-1- ترسب الكبريت الحر في الحالة الأساسية:

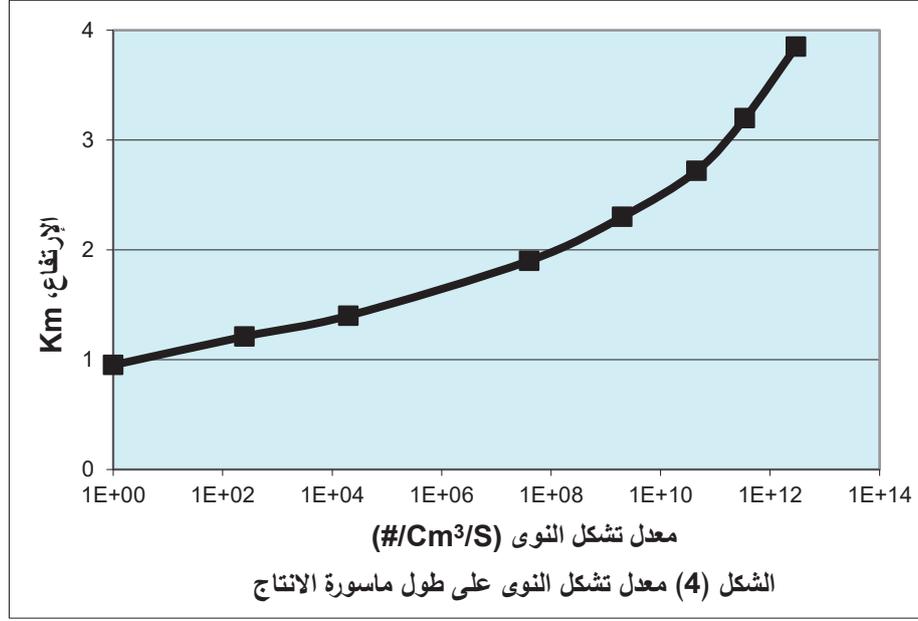
توضح الأشكال (1, 2) تغير الضغط وهبوط درجة الحرارة على طول الجزء المدروس من ماسورة الإنتاج للحالة الأساسية، على التوالي.

كما يوضح الشكل (3) تغيرات انحلالية S₈ مبيناً أنها تتناقص على طول ماسورة الإنتاج. فعند تركيز بخار الكبريت الأولي حوالي /95%/ من انحلالية S₈ تم حساب كل من مسافة التشعب (L₁) حوالي /420 m/ ومسافة فوق التشعب (L₂) حوالي /530 m/. وبالتالي يمكن أن تلاحظ أول جزيئة S₈ في النقطة التي تبعد حوالي / L₁+ L₂= 950m / عن الطبقة المنتجة باتجاه السطح، [4].

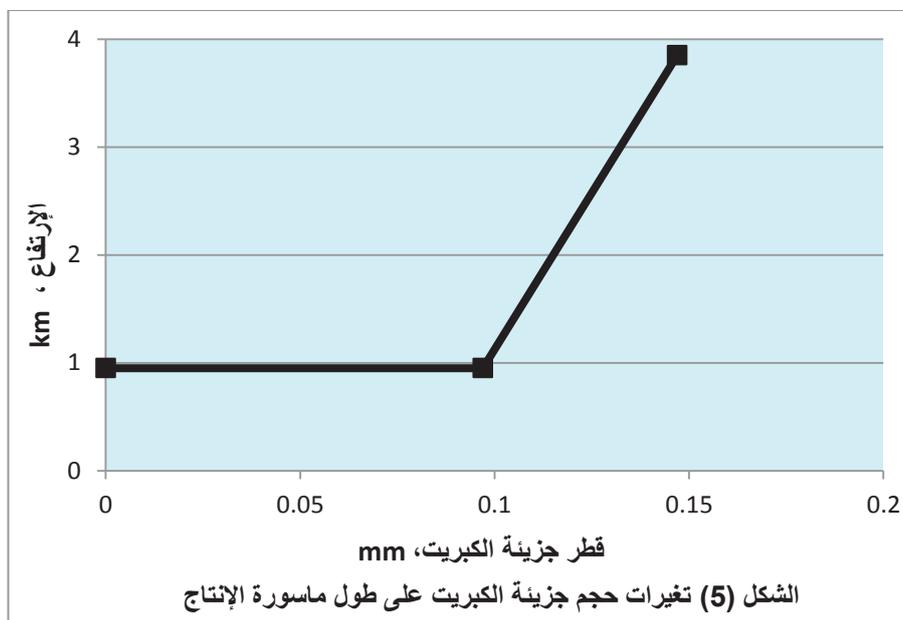




يوضح الشكل (4) تغير معدل تشكل النوى على طول ماسورة الإنتاج، مشيراً إلى أن ترسب الكبريت الحر يمكن أن يستمر حتى السطح.



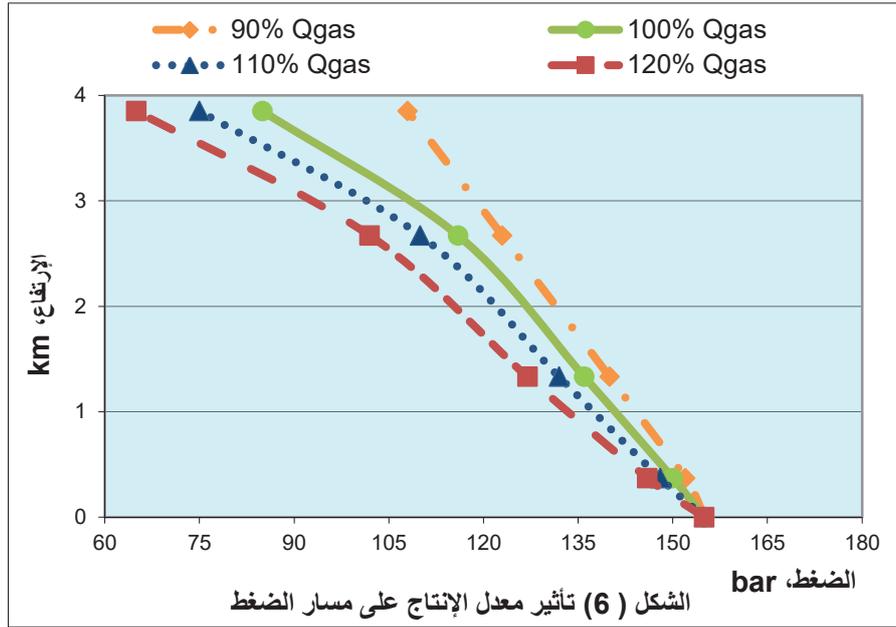
ويبين الشكل (5) نمو جزيئة S_8 على طول الماسورة. كما يمكن ملاحظة أن النواة الصغيرة (tiny nuclei) تنمو بسرعة عندما تكون عمليات تخثر وتكتل الجزيئة جارية.

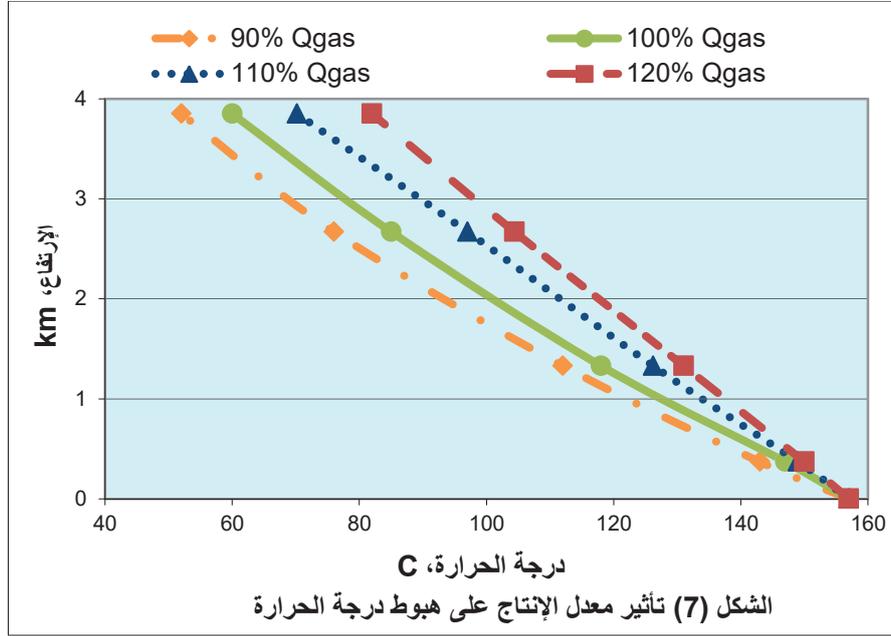


3-2- دراسة العوامل المؤثرة على ترسب S_8 :

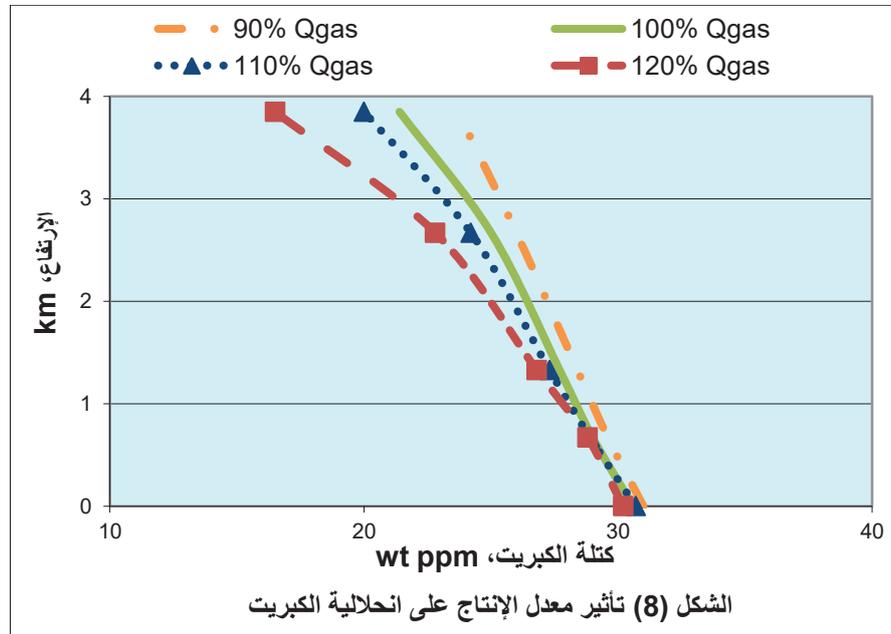
☒ تأثير معدل الإنتاج على ترسب S_8 :

لفهم تأثير معدل الإنتاج على سلوكيات ترسب وتوضع S_8 تم بحث أربع حالات بمعدلات إنتاج تتراوح بين $(90\% Q_{gas,0}, 120\% Q_{gas,0})$ عند تركيز بخار الكبريت الأولي حوالي (95%) من انحلالية S_8 . أي تمت الدراسة بمعدلات إنتاج أكبر من معدل إنتاج البئر الفعلي بزيادة $(10\%, 20\%)$ أو أقل منه بمقدار (10%) بهدف دراسة كافة الاحتمالات الممكنة. كما أن الضغط ودرجة الحرارة الأولية تكون مشابها لما يقابلها في الحالة الأساسية. وكما يتضح من الأشكال (6, 7) فإن معدل الإنتاج المرتفع سوف يزيد من هبوط الضغط في حين سيقبل من هبوط درجة الحرارة.





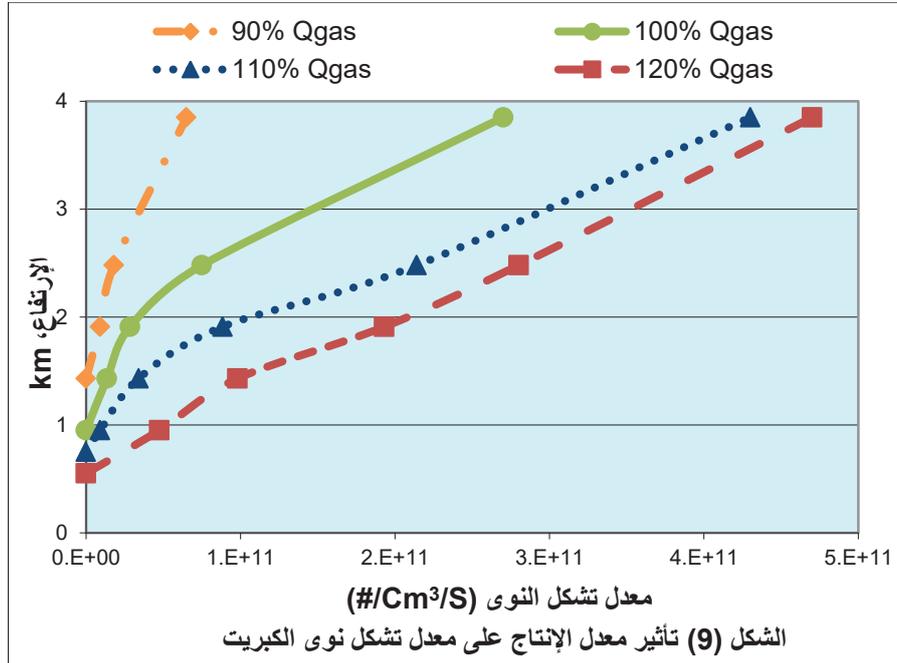
ويبين الشكل (8) اختلاف انحلالية S_8 على طول الماسورة تبعاً لتغير معدلات الإنتاج، حيث تقل انحلالية S_8 بشكل أكبر مع زيادة معدل الإنتاج.

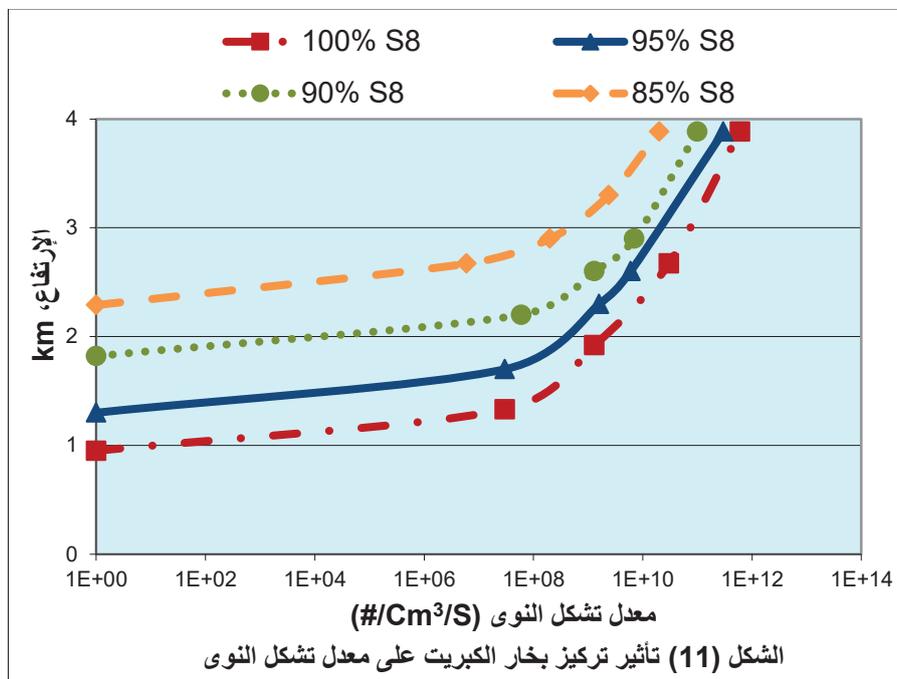
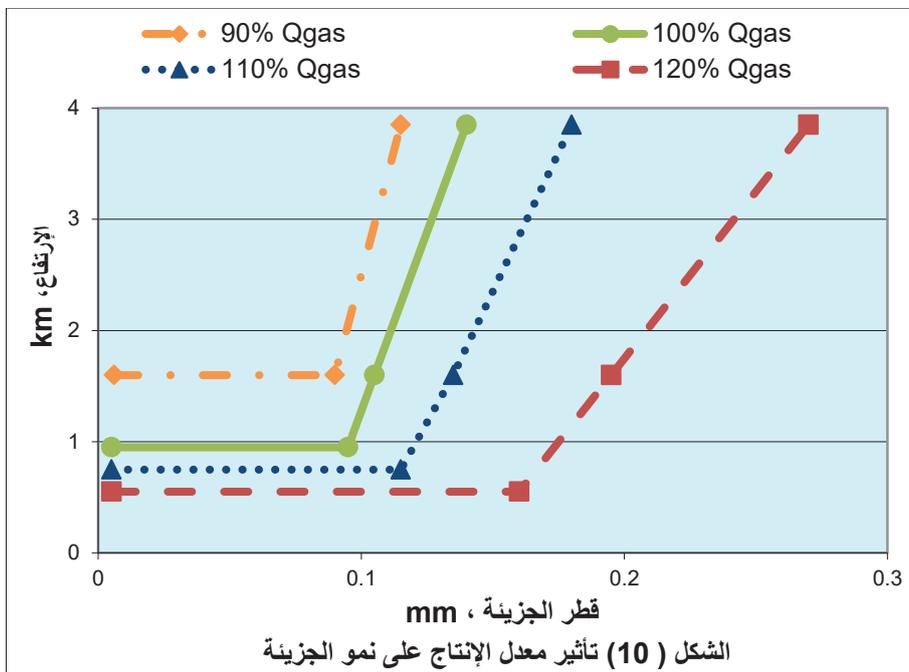


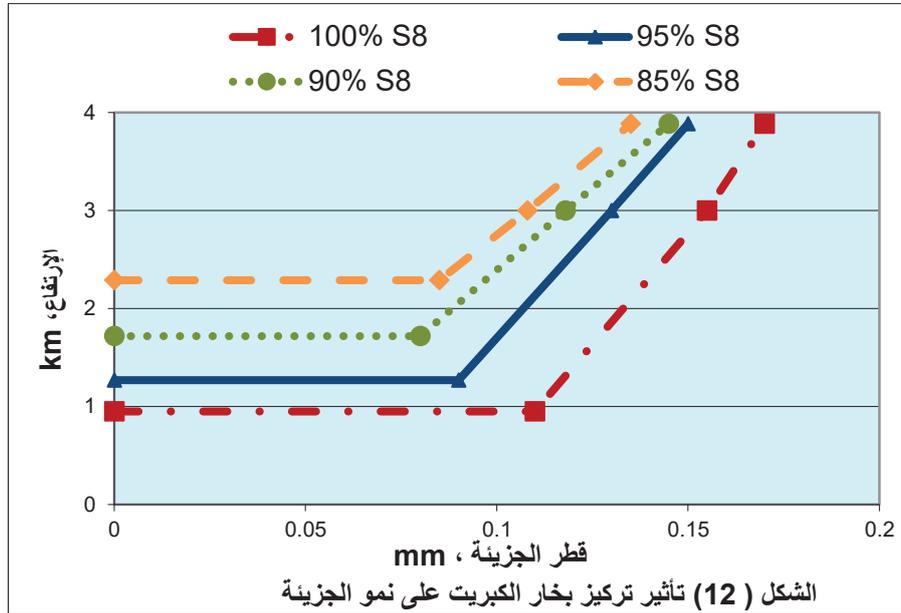
وتوضح الأشكال (9, 10) تأثير معدل الإنتاج على معدل تشكل نواة الجزيئة وسلوك نمو الجزيئة، على التوالي. حيث أن المعدل العالي لإنتاج الغاز الحامضي يميل إلى إنتاج معدل تشكل نوى عالي، مما يؤدي إلى جزيئات S_8 أكبر.

☒ تأثير تركيز بخار الكبريت الحر الأولي على ترسب S_8 :

لدراسة تأثير تركيز بخار الكبريت الحر الأولي على سلوك ترسب S_8 ، تم بحث أربع حالات لتركيز بخار S_8 الأولي هي (85%, 90%, 95%, 100%) من انحلالية S_8 . توضح الأشكال (11, 12) معدل تشكل النوى، الموقع الأولي لعملية /desublimation/، نمو الجزيئة مع الأخذ بالاعتبار تركيز بخار S_8 الأولي. وقد تبين أن التركيز الأولي المنخفض من بخار S_8 سيؤجل عملية /desublimation/ للكبريت (S_8) ويكون حجم الجزيئة أصغر.



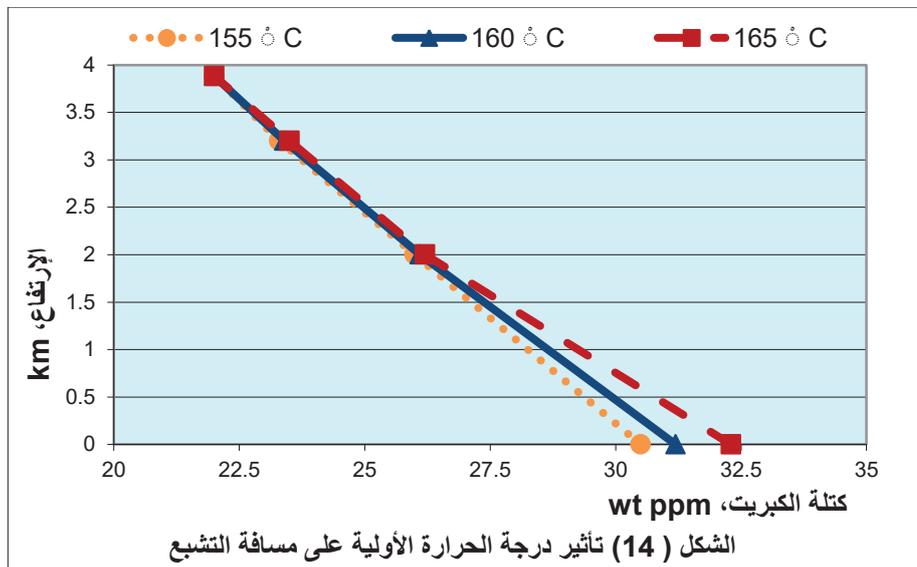
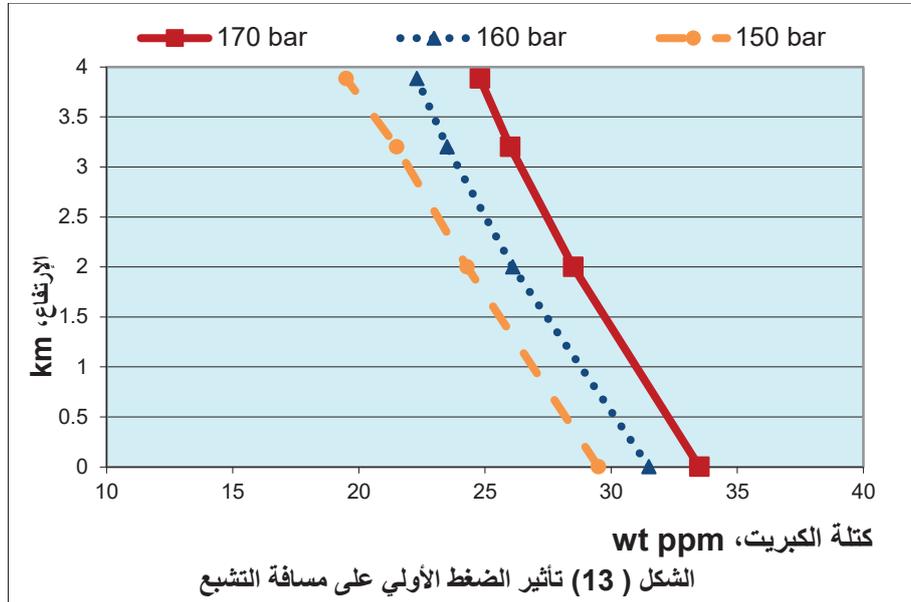




☒ تأثير الضغط ودرجة الحرارة الأولية على ترسب S_8 :

لدراسة تأثير الضغط الأولي على سلوك ترسب S_8 تم بحث ثلاث حالات من خلال تغيير الضغط الأولي المقاس (initial gauged pressure) وفق القيم (170, 160, 150 bar) عند قيمة ثابتة لتركيز بخار الكبريت الأولي (95%) من انحلالية S_8 بالإضافة إلى البارامترات الأولية الأخرى في الحالة الأساسية. يُبين الشكل (13) اختلاف انحلالية S_8 بالعلاقة مع الضغط الأولي، مما يدل على أن زيادة الضغط الأولي ستمدد منطقة التشبع.

ويُبين الشكل (14) تأثير درجة الحرارة الأولية على تغيير انحلالية S_8 . وبشكل مشابه تم دراسة ثلاث حالات لدرجة الحرارة الأولية وفق القيم (165, 160, 155 C) وتبين أن درجة الحرارة الأولية العالية تؤخر بدء عملية /desublimation/ للكبريت (S_8). ونتيجة لذلك، فإن ضغط ودرجة حرارة المكنن العالية سوف تؤخر حدوث عملية /desublimation/ للكبريت (S_8).



رابعاً: النتائج والتوصيات:

- (1) عندما يصل تركيز بخار S_8 إلى قيمة انحلاله في الغاز الحامضي فإن هبوطاً أياً من الضغط أو درجة الحرارة سوف يحرض عدم الاستقرار الترموديناميكي (thermodynamic instability). وبشكل طبيعي سيسعى النظام إلى حالة من الطاقة الحرة الأخفض، مولداً كتلة من جزيئات S_8 البخاري بهيئة نوى.
- (2) إن الاختلاف ما بين تركيز بخار S_8 داخل تيار الغاز الكلي وتركيزه ذو القيمة المهملة عند سطح النوى سيدفع لتشكيت كمية أكبر من بخار S_8 إلى النوى مما يؤدي إلى نموها. وفي الوقت نفسه فإن انتشار بخار الكبريت الحر باتجاه الجزيئات الموجودة يستنفذ تركيز بخار S_8 بين الجزيئات. وعندما تتصل المنطقة المُستنفذة (depleted region) من الجزيئات المتجاورة ببعضها البعض فإنه لن يحدث تشكل نوى إضافية. أما إذا كان حجم منطقة بخار S_8 المُستنفذة أقل من البعد بين الجزيئات الموجودة فإنه سيتم تشكل نوى جزيئات إضافية بين الجزيئات الموجودة. وبالتالي فإن نمو نوى S_8 يقلل الكثافة العددية الإجمالية لـ S_8 .
- (3) إن المنافسة بين نمو وتشكل نوى S_8 يعتمد على مجموعة متنوعة من البارامترات التشغيلية بما في ذلك الضغط السكوني (hydrostatic pressure) ودرجة حرارة النظام وحالة التشبع بالإضافة إلى الوقت المسموح به لنمو S_8 .
- (4) إن هبوط الضغط في كل جزء من المواسير المدروسة ليست لحظية بل يحدث على مدى فترة زمنية محدودة. ويتأثر زمن تشكل النوى بالفترة الزمنية التي يحدث بعدها عدم الاستقرار الترموديناميكي في الجزء المدروس.
- (5) إن الهبوط السريع بانحلالية S_8 يسبب عدم استقرار ترموديناميكي كبير. وبمعنى آخر، إن النظام ذو معدل هبوط الضغط العالي يدعم عملية تشكل النوى.
- (6) عند معدل تدفق الغاز العالي خلال عمليات التشغيل الفعلية تخضع مواسير الإنتاج لمعدل هبوط عالي للضغط في حين يكون معدل هبوط درجة الحرارة أقل.

(7) إذا تم تركيب جهاز ما (كعداد التدفق أو صمام) على الجزء المدروس ستقل فعالية تيار الغاز المار عبره، حيث ينخفض الضغط بشكل كبير في هذا الجزء ونقل انحلالية بخار الكبريت إلى حد كبير. وهذا ما يفسر ترسب S_8 بشكل متكرر في أماكن تركيب المعدات التي تسبب خنق لتيار الغاز.

(8) لذلك فإن معدل هبوط الضغط العالي ينسجم مع طاقة جيبس الحرة الأخفض، في تفضيل عملية تشكل النوى. وكما سبق ذكره، تكون جزيئة S_8 المتشكلة مرئية فقط عندما يصل معدل تشكل النوى إلى قيمة معينة. ويمكن الاستعانة بالمعيار التالي للتأكد من استقرار S_8 التي يمكن رؤيتها:

$$J \geq J_{critical}$$

وخلاف ذلك تكون جزيئات S_8 المتشكلة صغيرة جداً ومن الصعب رؤيتها بالعين المجردة. لذلك يمكن تحقيق معدل هبوط الضغط الحرج من خلال تعويض المعادلة (22) في المعادلة (7). وبالنتيجة عندما يتجاوز معدل هبوط الضغط (في الجزء المدروس متساوي درجة الحرارة) معدل هبوط الضغط الحرج سوف يكون ترسب الكبريت الحر مرئي، ويعبر عن ذلك كما يلي:

$$\frac{dp}{dt} \geq \left. \frac{dp}{dt} \right|_{critical}$$

خامساً: المراجع:

1 - باللغة العربية:

- 1- تقارير التشغيل اليومية لأبار حقول الجبسة ، الشركة السورية للغاز - مديرية تطوير واستثمار الغاز الطبيعي - شعبة الدراسات التكنولوجية، حمص.

2 - باللغة الإنكليزية:

2. E. Brunner, M.C. Place Jr, W.H. Woll, "Sulfur Solubility in Sour Gas", JPT, 40 (1988) 1587-1592.
3. J.B. Hyne, "Controlling Sulfur Deposition in Sour Gas Wells", World Oil, 197 (1983) 35-39.
4. X. Guo, Z. Du, X. Yang, Y. Zhang, D. Fu, "Sulfur Deposition in Sour Gas Reservoirs: Laboratory and Simulation Study", Pet. Sci., 6 (2009) 405-414.
5. K.W. Lee, "Change of Particle Size Distribution during Brownian Coagulation", J. Colloid Interface Sci., 92(1983) 315-325.
6. M. Ardekani, R. H. Rangel, "Numerical Investigation of Particle-particle and Particle-wall Collisions in a Viscous Fluid", J. Fluid Mech., 596 (2008) 437-466.
7. R.C. Reid, J.M. Prausnitz, B.E. Poling, The Properties of Gases and Liquids, McGraw-Hill: New York, 1987.
8. R. Steudel, "Elemental Sulfur and Sulfur-Rich Compounds II", Topics in Current Chemistry, 231 (2003) p.127.
9. P. Cézac, J.P. Serin, J.M. Reneaume, J. Mercadier, G. Mouton, "Elemental Sulfur Deposition in Natural Gas Transmission and Distribution Networks", J. of Supercritical Fluids, 44 (2008) 115-122.