

استخدام الطريقة الكيميائية لإزالة ترسبات الكبريت في مواسير إنتاج الآبار الغازية في حقول الجبسة

أ.د. ديب ديب* د. جان سعد** م. محمود أسعد***

الملخص:

تم في هذا البحث اقتراح مذيبي كيميائي لإزالة ترسبات الكبريت ضمن مواسير إنتاج الآبار الغازية التي تعاني من هذه المشكلة بكثرة. حيث تم إجراء دراسة مرجعية حول خصائص الكبريت وأشكال تواجده في الطبيعة وشرح المخطط الطوري للكبريت والشروط الواجب توافرها لترسب الكبريت الحر ضمن مواسير الإنتاج وتوضيح آلية الترسيب ومخطط مبسط لعملية تشكل نوى جزيئات الكبريت من البخار فوق المشبع. كما تم الاعتماد على المعطيات الحقلية للبئر المدروسين /جبسة-223، جبسة-220/ (المأخوذة من التقارير التشغيلية اليومية وذاتية البئر) في إجراء تجارب مخبرية بهدف المقارنة بين المذيب المستخدم حقلياً (NaOH) والمذيب المقترح (المذيب الكيميائي المنشط بالأمينات الدهنية) في هذه الدراسة لإذابة الكبريت المترسب ضمن مواسير الإنتاج وبالنتيجة تم رسم المنحنيات البيانية الناتجة عن عملية المقارنة والتوصية باستخدام المذيب المقترح في عمليات معالجة آبار الغاز الحامضي في حقول الجبسة التي تعاني من هذه المشكلة كونه المذيب الأكثر فعالية واقتصادية.

الكلمات المفتاحية: الكبريت الحر (S₈)، المعالجة، تشكل نوى جزيئات الكبريت، المذيب، بخار فوق المشبع، هيدروكسيد الصوديوم، الترسيب، المذيب المقترح.

* أستاذ في قسم الهندسة البترولية بجامعة البعث - ** أستاذ مساعد في قسم الهندسة البترولية بجامعة البعث.

*** مهندس بترول رئيس شعبة الدراسات التكنولوجية في الإدارة العامة للشركة السورية للغاز.

Using the chemical method to removal the sulfur deposition in the tubes of sour gas production in Jbissah fields

Abstract

In this paper, a proposal a chemical solvent to remove sulfur deposits within the tubes production of the wells that most suffer from this problem are done. Where the study was conducted on the referenced study about the characteristics and forms of sulfur in the nature, and explain the Scheme phasic of sulfur and required conditions for the deposition of elemental sulfur within the tubes production. And has been clarified the mechanism of deposition and the outline of a simplified process for the nuclei of molecules from supersaturation sulfur vapor. Has also been depend on the field data of the studied wells

/Jbissah-223, Jbissah-220/ (taken from the daily operational reports and Historical Biography of the wells), to conducting laboratory experiments in order to compare the between used solvent at field (NaOH) and proposed solvent (tallow amine activated diethyl disulfides) in this study in terms of the melt the deposited sulfur within the tubes production. and as a result, the curves resulting from the comparison process was drawn and recommending the use of the proposed solvent in treatment the acid gas wells in Jbissah fields that suffer from this problem where this solvent is the most effective and economical.

Keywords: elemental sulfur (S_8), treatment, nuclei of sulfur vapor molecules, solvent, vapor over saturated, Sodium hydroxide, deposition, solvent proposal.

المقدمة:

تُعاني العديد من الآبار المُنتجة للغاز الطبيعي الحامضي في حقول الجبسة من مشكلة ترسب الكبريت الحر ضمن مواسير الإنتاج وفي التجهيزات السطحية والجوفية للآبار وخصوصاً الآبار التي تُنتج من طبقة الكورشيينا دولوميت، وحتى الآن لم يتم التمكن من معالجة هذه المشكلة بشكل مرضي ونهائي، وإنما تُستخدم بعض الوسائل والإجراءات الآتية التي تخفف منها جزئياً ولكنها لا تؤمن الحل الدائم والمعالجة الناجحة لها، [1].

لذلك لا بد من البحث عن طريقة فعالة تعطي حلاً جذرياً واقتصادياً لهذه المشكلة، نظراً لما ينتج عن هذه المشكلة من آثار سلبية من انسداد جزئي أو كلي للقطر الداخلي لمواسير الإنتاج وأنايبب نقل الغاز وبالتالي التقليل من معدل تدفق التيار الغازي أو انعدامه وهذا ما يستدعي إيقاف البئر عن الإنتاج ريثما تتم عملية إزالة الكبريت المترسب وبالتالي كلفة اقتصادية عالية جداً (ناتجة عن كلفة توقف الإنتاج + كلفة الصيانة والإصلاح).

وبناءً عليه كان لا بد من تركيز الدراسة على أكثر الآبار التي تعاني من هذه المشكلة وهي الآبار /جبسة-223، جبسة-220/ والاعتماد على المعطيات الحقلية والتقارير التشغيلية اليومية وذاتية البئر للحصول على نتائج دقيقة قدر الإمكان وضمان إمكانية تطبيق النتائج المُقترحة على الآبار المدروسة.

هدف البحث:

- ❖ دراسة طرق المعالجة المناسبة واختيار الطريقة الأكثر فعالية واقتصادية والأكثر توافقية مع الظروف البئرية الحالية للآبار المدروسة بحيث نضمن تطبيقها على الآبار المدروسة بشكل ناجح وآمن.
- ❖ تقديم المُقترحات والتوصيات المساعدة على تقديم المعالجة الناجحة لحل هذه المشكلة.

1. مخطط الحالة الطورية للكبريت:

يمكن أن يتواجد الكبريت على هيئة كبريت سائل (S_L) وبخار (S_V) وبالتالي يشكل الكبريت أربعة أطوار، [3]:

الطور المعيني (S_R). الطور السائل (S_L).

الطور أحادي الميل (S_M). الطور البخاري (S_V).

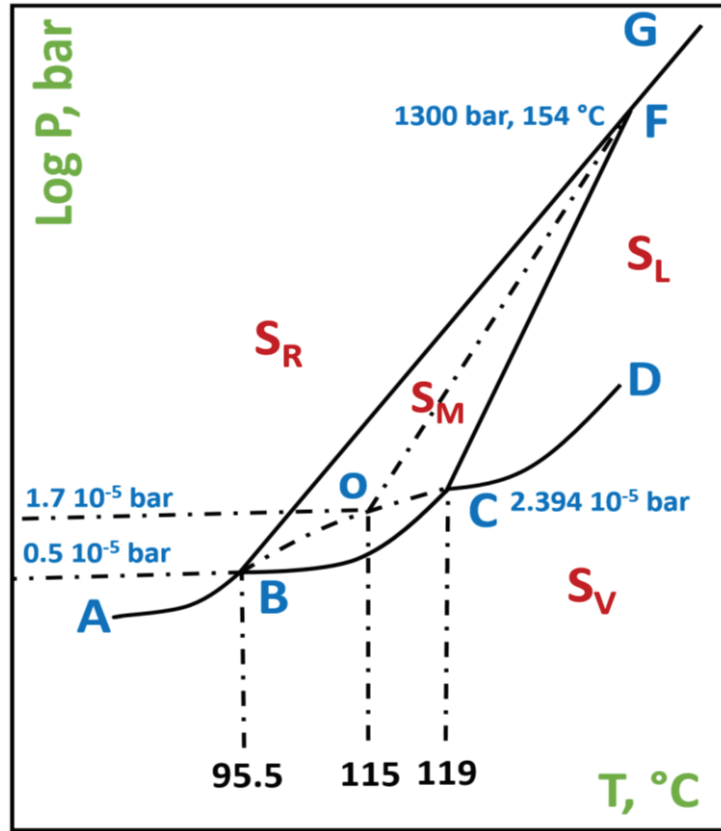
ويتضح من الشكل (1)، [3] أن الخطوط المستمرة تقسم المخطط إلى أربع مساحات توافق شروط الحالة التوازنية للبخار والسائل والشكلين البلوريين المتآصلين، وهذه المساحات هي:

BCF	DCFG	ABFG	ABCD
الطور أحادي الميل (S_M)	الطور السائل (S_L)	الطور المعيني (S_R)	الطور البخاري (S_V)

أما الخطوط (المنحنيات) فهي توافق الشروط التي يتوازن فيها طوران من الأطوار الأربعة، وهذه الخطوط هي:

تبخر الكبريت السائل	CD	تسامي الكبريت المعيني	AB
تحول الكبريت المعيني إلى أحادي الميل	BF	تسامي الكبريت أحادي الميل	BC
انصهار الكبريت المعيني	FG	انصهار الكبريت أحادي الميل	CF

وللكبريت أربع نقاط ثلاثية (triple point) بخلاف الكثير من العناصر التي لها نقطة ثلاثية وحيدة. ووفقاً للباحث تولير/Tuller/ [3] تُوضح النقاط الثلاثية الأربعة كما يلي:



الشكل (1) مخطط الحالة الطورية للكلبريت، [7].

النقطة (O): يوجد عند هذه النقطة ثلاث أطوار بحالة توازن هي (S_R, S_L, S_V) .
 علماً أن هذه النقطة ليست نقطة توازن بالمعنى المألوف لأنها تمثل شروط شبه الاستقرار.

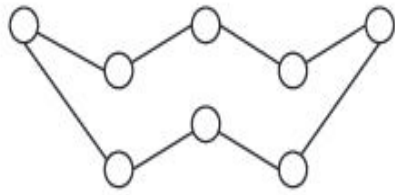
النقطة (B): تمثل تحول الكلبريت المعيني إلى أحادي الميل عند درجة (95.5°C) ويوجد عند هذه النقطة ثلاث أطوار في حالة توازن هي (S_R, S_M, S_V) .

النقطة (C): تمثل هذه النقطة درجة الانصهار (119°C) التي يتحول عندها الكلبريت أحادي الميل إلى سائل وبذلك يوجد عندها ثلاث أطوار في حالة توازن هي (S_L, S_M, S_V) .

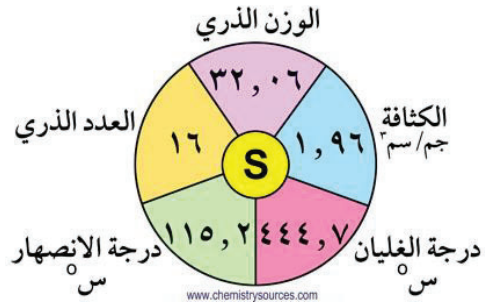
النقطة (F): يوجد عند هذه النقطة ثلاث أطوار في حالة توازن هي (S_R, S_L, S_M) . وتمثل هذه النقطة درجة الحرارة (154°C) والضغط (1300 bar) .

2. خصائص الكبريت العامة وأشكال تواجده في الطبيعة:

الكبريت هو العنصر الثاني من المجموعة $/\text{VI}/$ ، عدده الذري $/16/$ ، رمزه الكيميائي $/\text{S}/$ ، وهو العنصر السادس عشر في الجدول الدوري للعناصر (periodic table)، وله شكل حلقي، الشكل (2). وهو عنصر لا فلزي (non-metallic)، وعنصر الكبريت مكون أساسي من الغلاف الحيوي للأرض (biosphere). ويشكل الكبريت نحو 0.048% من الغلاف الصخري لقشرة الكرة الأرضية. ويوجد الكبريت حراً في الطبيعة، الشكل (1). وفي العديد من خامات الكبريتيدات والكبريتات مثل البيريت FeS_2 وكبريتيد الرصاص PbS وكبريتيد الزنك (التوتياء) ZnS وكبريتات كل من الكالسيوم والباريوم والسترونسيوم. ويوجد أيضاً في الغاز الطبيعي بشكل غاز كبريت الهيدروجين H_2S ، وفي النفط بشكل حر أو بشكل مركبات كبريتيدية،



حيث يعتبر المكون الذري الثالث (بعد الكربون والهيدروجين) من حيث نسبة تواجده في النفوط الخام (crude oils).



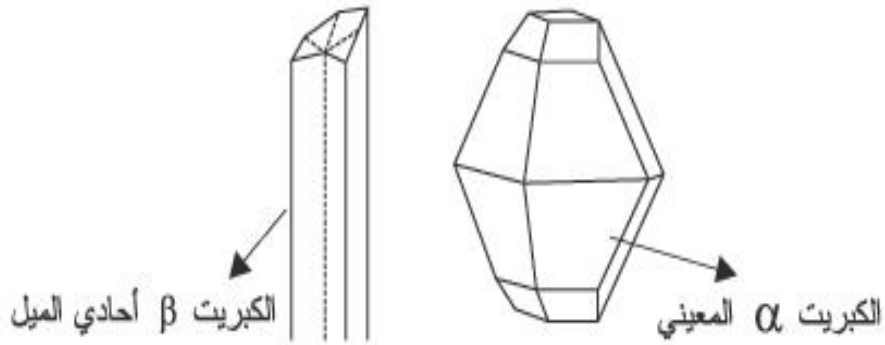
الشكل (2) خصائص الكبريت وشكله الحلقي، [3].

وقد وجد الكبريت بعدة أشكال تأصلية (Allotropes of sulfur) بحالات فيزيائية مختلفة هي الشكل المعيني (α) (Rhombic) والشكل أحادي الميل (β) (Monoclinic)، الشكلين (2-a) و (2-b). وكل شكل من هذين الشكلين ثابتاً ضمن مجال معين من درجة

الحرارة والضغط. وهناك شكل ثالث هو الكبريت عديم الشكل البلوري (غير مبلور) (Amorphous). وتتصف هذه الأشكال بما يلي، [3]:

2.1. الكبريت معيني الشكل (Rhombic):

صيغته (S_8)، وزنه الجزيئي (256.48 gr)، كثافته (2.07 gr/cm^3)، ينصهر عند درجة الحرارة ($112.8 \text{ }^\circ\text{C}$)، يغلي عند درجة الحرارة ($444.6 \text{ }^\circ\text{C}$). وهو مادة متبلورة صفراء ليمونية اللون وثابتة عند درجة حرارة الغرفة. يتألف جزئ الكبريت المعيني من ثماني ذرات. وتتطابق جزيئات هذا الشكل معاً بإحكام. وهو الشكل الأكثر استقراراً والأكثر شيوعاً في الغاز الطبيعي، الشكلين (3-a) و(3-b).



الشكل (3-a) الكبريت البلوري، [3].

2.2. الكبريت أحادي الميل (Monoclinic):

صيغته (S_8)، وزنه الجزيئي (256.48 gr)، كثافته (1.96 gr/cm^3)، ينصهر عند درجة الحرارة ($119.0 \text{ }^\circ\text{C}$)، يغلي عند درجة الحرارة ($444.6 \text{ }^\circ\text{C}$). وهو ثابت فقط ما بين ($120-95.5 \text{ }^\circ\text{C}$)، تعتبر درجة الحرارة $95.5 \text{ }^\circ\text{C}$ هي درجة حرارة تحول الكبريت وفق التالي:



ويتواجد على شكل بلورات إبرية طويلة عديمة اللون تقريباً. ويتألف جزيء الكبريت أحادي الميل من ثماني ذرات تكون الفراغات فيما بينها أوسع مما هي عليه في الشكل المعيني، الشكلين (3-a) و(3-b).



الشكل (3-b) الكبريت البلوري.

2.3. الكبريت عديم الشكل البلوري (غير ميلور) (Amorphous):

صيغته (S)، وزنه الجزيئي (32.02 gr)، كثافته (1.92 gr/cm^3)، ينصهر عند درجة الحرارة (120°C)، يغلي عند درجة الحرارة (444.6°C)، ناعم ولين ولزج ويتمدد كالمطاط. وكلاً من الكبريت أحادي الميل والكبريت غير المتبلور يتحولان إلى الكبريت المعيني الشكل عند درجة حرارة الغرفة. فإذا حُفظ الكبريت المعيني عند درجات حرارة تتراوح ما بين ($95.5^\circ \text{C} - 120^\circ \text{C}$) فإنه يتحول إلى الكبريت أحادي الميل. أما إذا سُخن الكبريت المعيني بشكل سريع يتحول مباشرةً إلى الطور السائل دون المرور بالكبريت أحادي الميل. شروط وآلية ترسب الكبريت الحر ضمن مواسير الإنتاج:

3.1. الشروط الواجب توافرها لترسب الكبريت الحر ضمن المواسير، [4, 5]:

- 1- تركيز الكبريت فوق المشبع. 2- الضغط ودرجة حرارة الغاز المناسبة.
- 3- تشكل النوى والبثور.
- 4- تشكل منطقة خاملة الحركة ضمن مواسير الإنتاج.

3.2. آلية ترسب الكبريت الحر ضمن مواسير الإنتاج:

أثناء الإنتاج يحدث تدرج للضغط ودرجة الحرارة على طول مواسير الإنتاج فنقل انحلالية الكبريت في غاز كبريت الهيدروجين حتى نصل للتركيز فوق المشبع (supersaturate) عندها تتحقق شروط عملية desublimation (وهي تحول الكبريت من الحالة الغازية إلى الحالة الصلبة دون المرور بالحالة السائلة) فتبدأ عملية تتشكل النوى والبثور.

ومن ثم يحدث التخثر/الانعقاد ويلبها نمو الجزيئات وترسبها حيث يتشكل في البداية حلقة تترسب على الجدار الداخلي لمواسير الإنتاج عند المستوى D-D والتي تؤدي بدورها لتشكل دوامات ومنطقة خاملة الحركة ومع تقدم الإنتاج يحدث انسداد جزئي ومن ثم انسداد كامل وبالتالي التوقف عن الإنتاج [8, 2].

3.3. تشكل نوى جزيئات الكبريت في تيار الغاز الطبيعي ضمن مواسير الإنتاج:

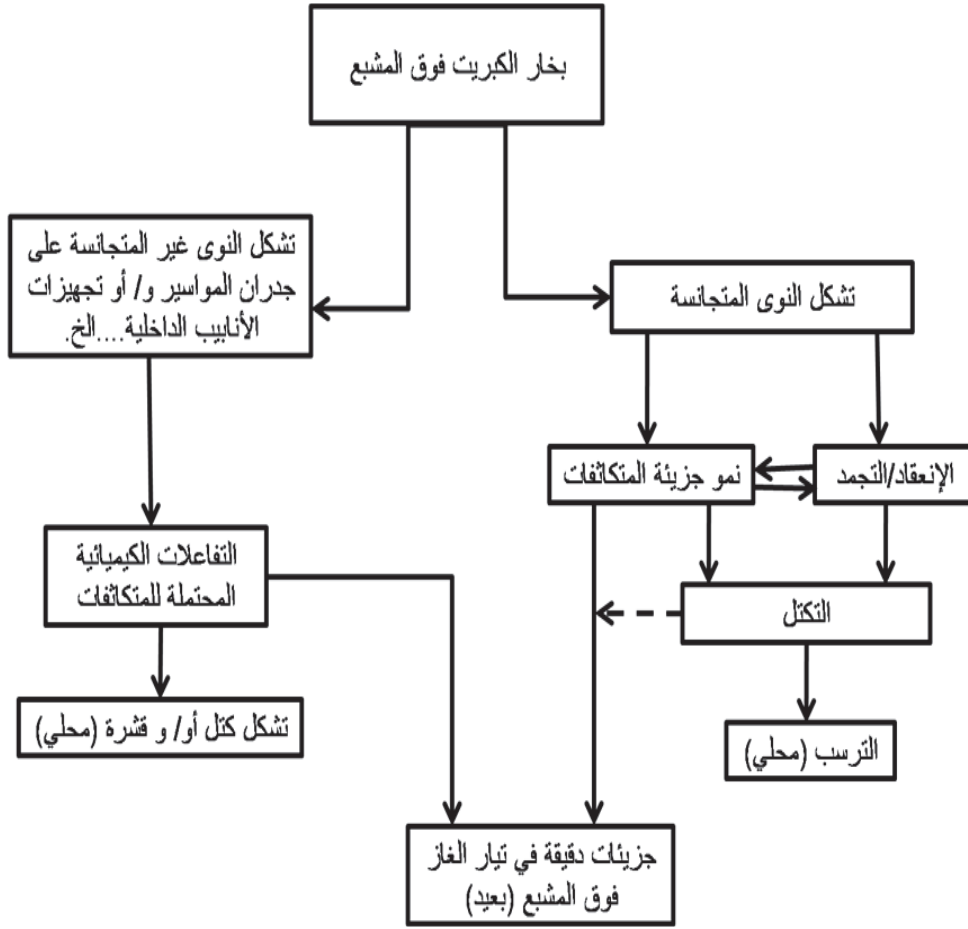
يمكن تعريف تشكل النوى بعملية تشكل الجزيئات الأولى القادرة على الترسب ضمن محلول مشبع غير مستقر ومن ثم النمو التلقائي (spontaneous growth) حتى تتشكل بلورات كبيرة من الحالة الصلبة الأكثر استقراراً. نسمي الجزيئات الأولى القابلة للنمو

(viable particles) بالنواة أو البثور (nuclei) والتي إما أن تتشكل من الجزيئات الصلبة الموجودة مسبقاً في المنظومة (تشكل غير متجانس للنوى) أو تتولد تلقائياً بواسطة المحلول فوق المشبع نفسه (تشكل متجانس للنوى).

وبالتالي يمكن تصنيف تشكل النوى إلى متجانسة (homogeneous) أو غير متجانسة (heterogeneous) حيث أن تشكل النوى المتجانسة يحدث من جزيئات البخار بغياب المواد الغريبة في حين تشكل النوى غير المتجانسة يحدث على سطح المادة الغريبة أو أي جزيئة صلبة. وقد أثبتت الدراسات المرجعية أن كلاً من الصنفين يمكن أن تحدث ضمن تيار الغاز الطبيعي، [6, 5].

بالإضافة إلى أن عمليات تشكل النوى يمكن أن تتضمن صنف واحد من الجزيئات (homomolecular) أو تتضمن صنفين أو أكثر (heteromolecular)، [6].

يُبين الشكل (4) رسم تخطيطي مُبسّط لعملية التشكل الجزيئي من البخار فوق المشبع مع الإشارة إلى صنفى تشكل النوى المسماة بالمتجانسة وغير المتجانسة، حيث يتضح أنه في كلا الصنفين وبعد تشكل النوى ونمو الجزيئة إما أن تترسب في حال توفرت الشروط المناسبة لذلك أو تتجرف الجزيئات مع تيار الغاز وكذلك الأمر بالنسبة للقشور.



الشكل (4) العمليات الفيزيا-حرارية (Thermo-physical) المبسطة ضمن تيار الغاز الطبيعي لتشكل الجزيئة، [5].

3. الطرق المحلية والعالمية المستخدمة لحل مشكلة ترسب الكبريت:

4.1. الطريقة الحقلية المتبعة حالياً لمعالجة البئر المدروسين، [1]:

تتم المعالجة باستخدام حمام قلوي (قشور الكوستك صودا) حيث يتم تحضير المحلول المطلوب بحل هذه القشور بالماء وفق النسبة المطلوبة (10%, 15%, 20%, 25%) على أن يستخدم أدنى تركيز فعال تجريبياً لتلافي التأثير على المعدن من جهة وتقليل الكلفة الاقتصادية من جهة ثانية. وتتطلب هذه العملية توقف البئر عن الإنتاج طيلة فترة المعالجة والتي تتراوح بين 3-10 ساعات حسب التركيز المستخدم وقد يتطلب الأمر إعادة العملية حتى ضمان نجاحها ويجب تكرارها بشكل دوري كل (8-10) يوم أو عند الانخفاض الكبير للضغط، [1].

4.2. الطرق المستخدمة عالمياً لإذابة الكبريت المترسب ضمن مواسير إنتاج الآبار الغازية الحامضية:

بينت الدراسات المرجعية أن هناك العديد من الطرق المستخدمة عالمياً لمعالجة مشكلة ترسب الكبريت ضمن مواسير الإنتاج، نذكر منها على سبيل المثال لا الحصر الطرق التالية ومن ثم اختيار الطريقة الأكثر توافقية مع ظروف البئر المدروسة لاستخدامها في هذا البحث:

1) طرق متعددة اعتمدت على استخدام بعض المذيبات العضوية مثل النفثالين أو الزيوت الساخنة أو dialkyl disulfide أو مزيج من ثنائي السلفيدات العضوية ومتعدد ثنائي السلفيدات ومتعدد الأمينات بالإضافة إلى استخدام بعض المركبات المحتوية على الكبريت حيث يتحرر عند تلامسها مع الحمض ثنائي كبريت الكربون (المعروف بخطورته) وتعمل كل من هذه المذيبات على تذويب ترسبات ورسادات الكبريت. ولكن سلبيتها إنها تتطلب استخدام مواد كيميائية خطيرة وغير صديقة للبيئة، [4].

2) الطريقة المتبعة لزيادة كمية الكبريت المذابة باستخدام المذيب dialkyl disulfide بعد تنشيطه بإضافة الأمينات الإلفاتية ذات الوزن الجزيئي المنخفض (أمين إكليي يحتوي بين 1-7 ذرة كربون) عند تراكيز قليلة حوالي (5 wt%) عند درجات حرارة بين

4. القسم العملي:

5.1. المعطيات الحقلية للآبار المدروسة (جبسة-223، جبسة-220):

تم الحصول على المعطيات الحقلية للآبار المدروسة من التقارير التشغيلية اليومية لحقول الجبسة وذاتية الآبار، الجدولين (2, 1).

الجدول (1) المعطيات الحقلية للبئر /جبسة-223/، [1].

Component	Mol%	البارامترات الحقلية	
H ₂ S	5.4	ضغط رأس البئر السكوني (bar)	164
CO ₂	20	الضغط العامل (bar)	85
N ₂	2.8	ضغط قاع البئر السكوني (bar)	231
C ₁	61.12	ضغط قاع البئر العامل (bar)	130
C ₂	6.12	درجة حرارة القاع (°C)	115
C ₃	3.2	درجة الحرارة عند الفالة (°C)	52
iC ₄	0.48	العمق (m)	4400
nC ₄	0.5	الإنتاجية (m ³ d)	66000
iC ₅	0.15	الطبقة المنتجة	K.D
nC ₅	0.11	قطر مواسير التغليف الإنتاجية	7"
nC ₆₊	0.12	قطر مواسير الإنتاج	3 ½"
∑ Xi	100	قطر فالة الإنتاج	25/64"

الجدول (2) المعطيات الحقلية للبئر /جبسة-220/، [1].

Component	Mol%	البارامترات الحقلية	
H ₂ S	6	ضغط رأس البئر السكوني (bar)	159
CO ₂	19.8	الضغط العامل (bar)	82
N ₂	2.93	ضغط قاع البئر السكوني (bar)	235
C ₁	60.39	ضغط قاع البئر العامل (bar)	133
C ₂	6.25	درجة حرارة القاع (°C)	120
C ₃	3.26	درجة الحرارة عند الفالة (°C)	55
iC ₄	0.49	العمق (m)	4000
nC ₄	0.52	الإنتاجية (m ³ d)	64000
iC ₅	0.15	الطبقة المنتجة	K.D
nC ₅	0.1	قطر مواسير التغليف الإنتاجية	7"
nC ₆₊	0.11	قطر مواسير الإنتاج	3 1/2"
∑ Xi	100	قطر فالة الإنتاج	22/64"

5.2. العمل التجريبي والمخبري:

5.2.1. تحضير المذيب الكيميائي ذو الأساس الأميني (المذيب المقترح S₃):

يتم تحضير المذيب المقترح لأغراض هذا البحث وفق الخطوات التالية:

- تُجهز المادة الأولية لتحضير المذيب الكيميائي ذو الأساس الأميني /diethyl disulfide/ بدرجة نقاوة لا تقل عن /95.5/.
- يتم إضافة حوالي /30 wt%/ من الأمين الدهني ذو الوزن الجزيئي العالي (الذي يمتلك أكثر من 12 ذرة كربون) إلى المذيب diethyl disulfide حيث يحدث ارتباط كيميائي وبالتالي يتم الحصول على الوزن الجزيئي العالي المطلوب

وقابلية التطاير المنخفضة المرتبطة بها وبالنتيجة تحسين قدرة ذوبانية الكبريت،
[9].

حيث أن الأمينات الدهنية المستخدمة في هذا البحث هي:

Duomeen T والمعروف بالاسم التجاري: **N-alkyl-1,3-diaminopropane**

والصيغة العامة لها: $/RNHCH_2CH_2CH_2NH_2/$ ، حيث أن المجموعة الألكيلية R اشتقت من الشحم (tallow) الذي يمتلك عدد وسطي من ذرات الكربون حوالي $/18/$.

5.2.2. تحضير الجهاز لإجراء التجارب:

تم في هذا البحث تصنيع جهاز يمثل بئر تمثيلية تحتوي على كمية من ترسبات الكبريت لمحاكات الآبار المدروسة التي تعاني من مشكلة ترسب الكبريت وذلك بالاستعانة بجهاز من تصميم الأستاذ الدكتور رياض صالح بعد إجراء بعض التعديلات عليه لزيادة مجال عمل الجهاز بحيث يصبح كافياً لكل التجارب المزمع إجراؤها والاقتراب ما أمكن من الشروط الحقيقية لعمل الآبار، وتتلخص هذه التعديلات بما يلي:

❖ زيادة قطر الأنبوبة الزجاجية ليصبح $/16\text{ mm}/$ بدلاً من $/8\text{ mm}/$ بهدف زيادة مجال عمل الجهاز.

❖ زيادة سعة خزان المذيب ليصبح $/3\text{L}/$ بدلاً من $/1\text{L}/$.

❖ إضافة مُسخن وخلّاط كهربائي لتوفير إمكانية تسخين المذيب بحيث يمكن دراسة تأثير تغيير درجة الحرارة على فعالية المذيب.

5.2.3. آلية إجراء التجارب:

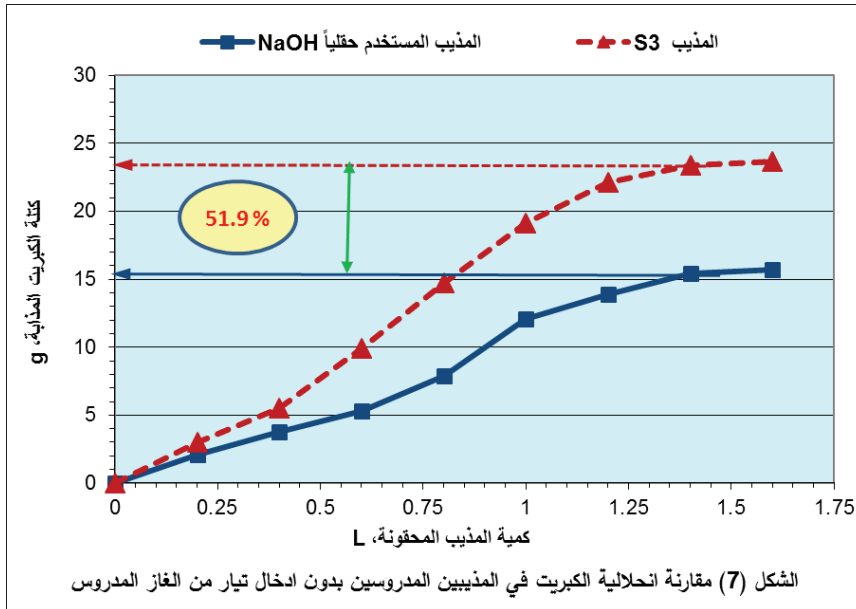
تم إجراء كافة التجارب في مخابر الشركة السورية للغاز – حقول الجبسة. وقبل البدء بكل تجربة يتم تجهيز الأنبوبة الزجاجية (ذات القطر 16 مم والطول 53 سم) بحقنها بمصهور الكبريت عند درجة حرارة أعلى من درجة انصهار الكبريت ($120\text{ }^\circ\text{C}$) وتترك حتى يبرد الكبريت بحيث تترسب على سطحها الداخلي طبقة من الكبريت بسماكة حوالي (1 مم).

ومن ثم يتم حقن المذيب عبر الأنبوبة الزجاجية (مع أو بدون غاز من البئر المدروس) ومن ثم حساب كمية الكبريت المنحلة في المذيب عن طريق وزن الأنبوبة قبل وبعد حقن المذيب.

5.2.3. التجارب المخبرية:

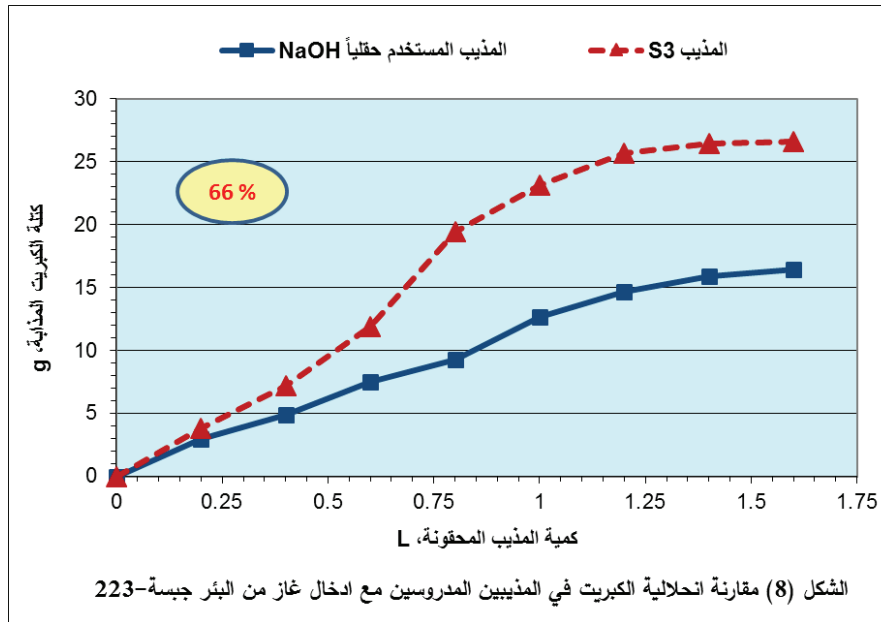
(1) مقارنة بين قيم انحلالية الكبريت في المذيبين المدروسين (هيدروكسيد الصوديوم، المذيب المُقترح S_3) بدون إدخال تيار من الغاز المدروس:

تم في هذا البحث إجراء عملية مقارنة بين المذيب المُقترح (المذيب الكيميائي الأميني) والمذيب المستخدم في الحقول المدروسة (NaOH) لتحديد إمكانية كل منهما بإذابة الكبريت عند نفس الشروط. حيث تم في هذه التجربة حقن كميات متساوية من كل مذيب على حدا في الأنبوبة الزجاجية بدون إدخال تيار غازي وحساب كمية الكبريت المُذابة في كلا المذيبين حتى الوصول لأعلى قيمة ممكنة. وبناءً عليه تم الحصول على المنحني المبين في الشكل (7) الذي يوضح أن المذيب المُقترح ذو فعالية أعلى بإذابة الكبريت بنسبة /51.9% عند نفس الشروط.



2) مقارنة بين قيم انحلالية الكبريت في المذيبين المدروسين مع إدخال تيار من غاز البئر جبسة-223:

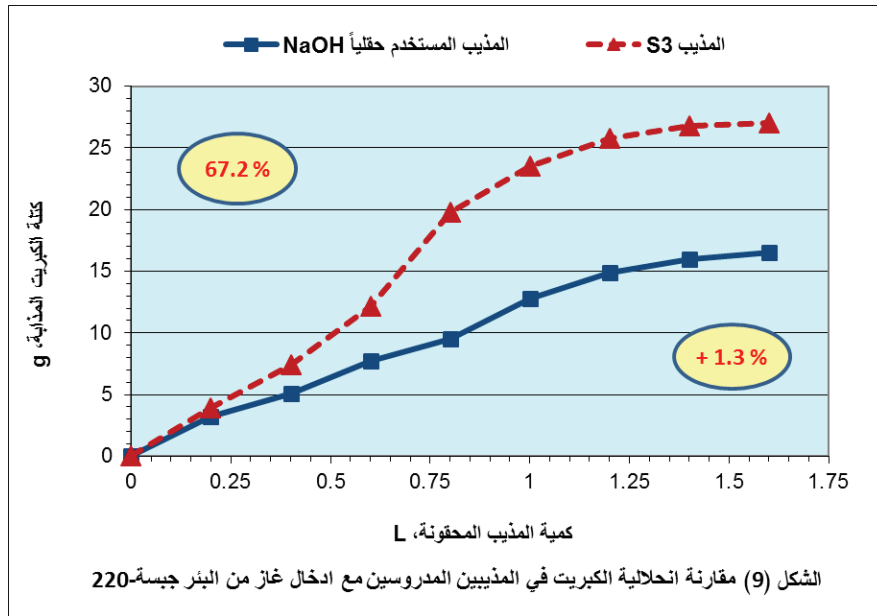
تم أيضاً إجراء نفس عملية المقارنة السابقة مع اختلاف وحيد يتمثل بإدخال تيار من غاز البئر جبسة-223. وبحساب كمية الكبريت المذابة عند كل كمية من كلا المذيبين مع تدفق الغاز يمكن الحصول على المنحني المبين في الشكل (8) الذي يبين أن فعالية كل من المذيبين تزداد عند إدخال تيار من غاز البئر جبسة-223، ويكون المذيب المُقترح ذو فعالية أعلى بإذابة الكبريت عند نفس الشروط بنسبة 66% .



ومن خلال دراسة الشكلين (7, 8) السابقين واجراء عملية مقارنة لكمية الكبريت المنحلة في المذيب المُقترح مع وبدون إدخال غاز تبين إن إدخال الغاز مع المذيب المُقترح يزيد فعالية إذابة الكبريت بشكل ملحوظ بمعدل حوالي (12.8%) .

(3) مقارنة بين قيم انحلالية الكبريت في المذيبين المدروسين مع إدخال تيار من غاز البئر جبسة-220:

تم اتباع نفس الخطوات السابقة مع استبدال الغاز المحقون بغاز من البئر جبسة-220 لنحصل على المنحني المبين في الشكل (9) الذي يبين أن المذيب المُقترح ذو فعالية أعلى إذابة الكبريت عند نفس الشروط بنسبة 67.2% .



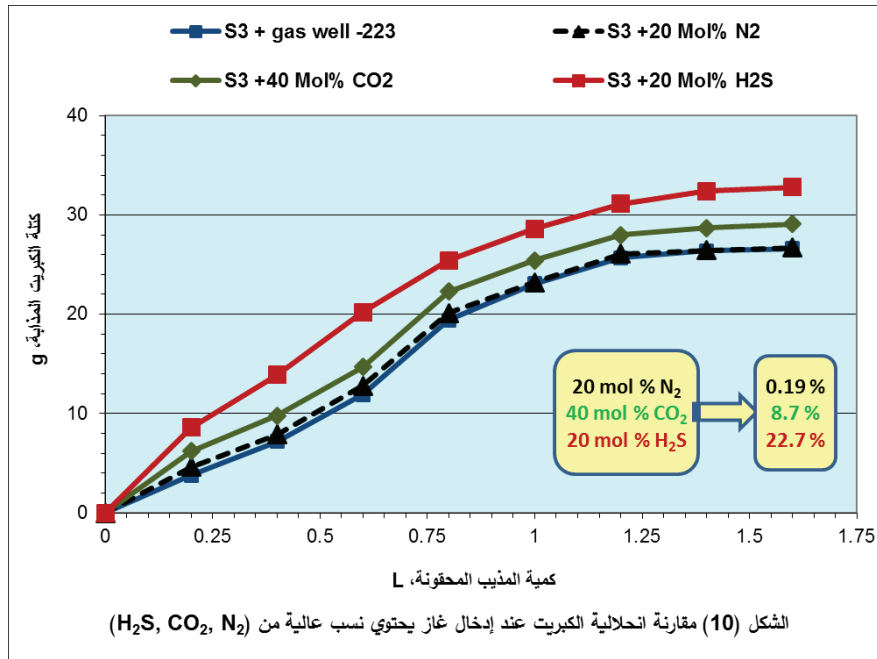
كما تبين أن فعالية المذيب المُقترح عند إدخال غاز البئر جبسة-220 تكون أكبر من فعاليته عند إدخال غاز البئر جبسة-223، ويُفسر ذلك (كما سيتضح لاحقاً) لاحتواء غاز البئر جبسة-220 على نسبة أعلى من غاز H_2S .

(4) دراسة تأثير دراسة بعض العوامل على فعالية المذيب المُقترح S_3 :

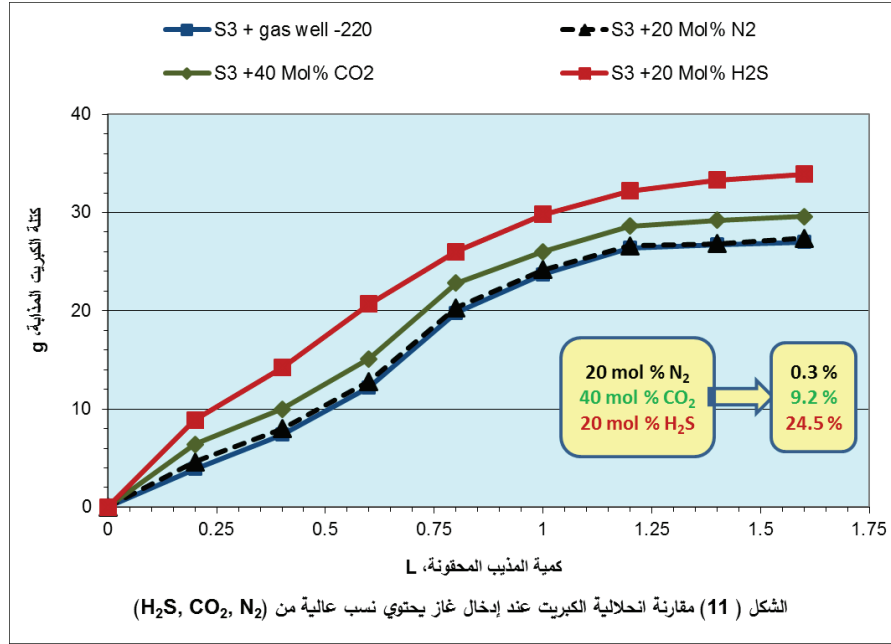
(a) مقارنة انحلالية الكبريت في المذيب المُقترح عند إدخال تيار من غاز يحتوي نسبة عالية من كلاً من (H_2S, CO_2, N_2) :

تم اجراء التجارب لنحصل على المنحنيات المبينة في الأشكال (10, 11) التي توضح أن غاز N_2 ليس له تأثير يُذكر أما بوجود غاز H_2S تزداد فعالية

المذيب المُستخدم بشكل واضح وأكثر من فعاليته بوجود CO_2 ، ونسب الزيادة موضحة على الأشكال. ويُفسر زيادة فعالية المذيب بوجود H_2S يتفاعل الأمينات مع غاز H_2S لينتج ببسلفيد الأمونيوم ذو الأيون السالب الذي يتفاعل بدوره مع الكبريت الحر لإنتاج متعدد كبريتات الأمين الأيونية.

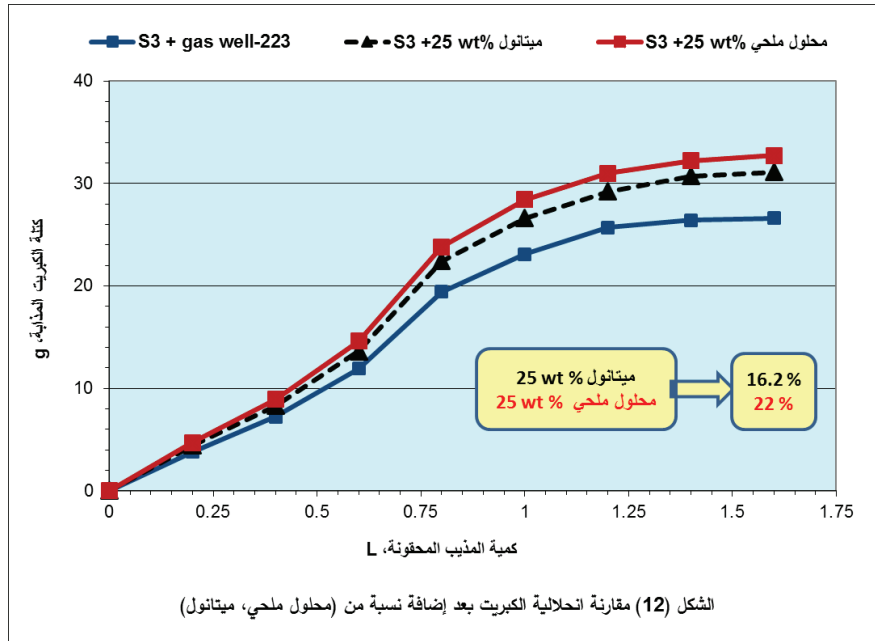


يتضح من الشكل (10) أن فعالية المذيب المقترح (البئر المدروس جبسة-223) تزداد بنسبة /22.7 %/ عند إدخال غاز يحتوي نسبة عالية من H_2S وتزداد بنسبة /8.7 %/ عند إدخال غاز يحتوي نسبة عالية من CO_2 في حين تكون الزيادة بنسبة /0.19 %/ فقط عند إدخال غاز يحتوي نسبة عالية من N_2 .



(b) مقارنة انحلالية الكبريت في المذيب المقترح عند إضافة نسبة من إحدى المذيبات القطبية (محلول ملحي، ميثانول) مع إدخال غاز من البئر جبسة-223:

أجريت هذه التجارب بهدف دراسة تأثير هذه المذيبات القطبية على فعالية المذيب (S₃)، وبالنتيجة تم الحصول على المنحنيات المبينة في الشكل (12) الذي يوضح أن كمية الكبريت المذابة باستخدام المذيب المقترح تزداد بوجود المذيبات المشتركة القطبية، ويعزى هذا التأثير إلى ذوبان متعدد كبريتات الأمين في المذيبات المشتركة القطبية وبالتالي السماح لجزيئات الأمين الموجودة في المذيب المقترح (التي لم تتفاعل نتيجة اللزوجة العالية) من الوصول والتفاعل مع حبيبات الكبريت المتبقية وبالنتيجة زيادة كمية الكبريت المنحلة في المذيب المستخدم.

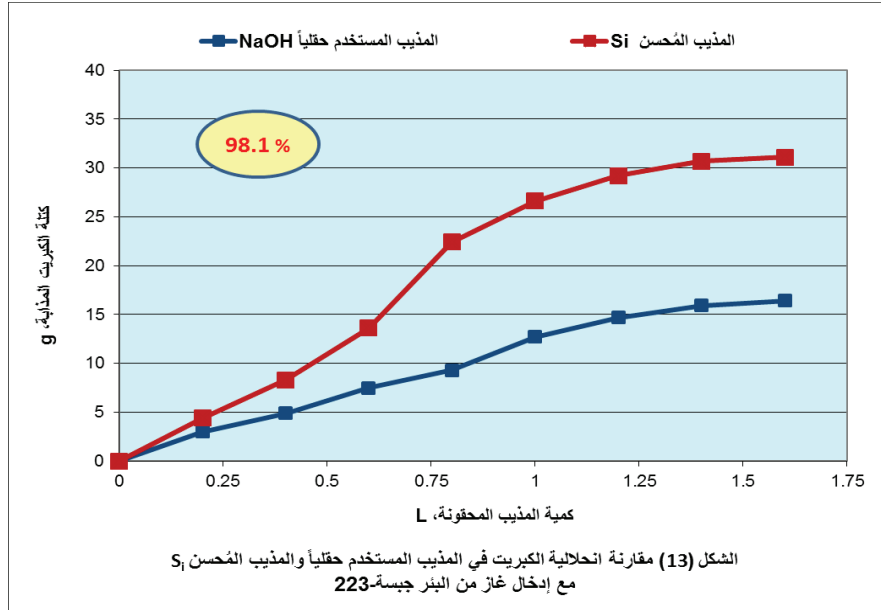


حيث تزداد فعالية المذيب المقترح بإضافة المحلول الملحي بنسبة /22 %/ في حين تكون هذه الزيادة بإضافة الميتانول بنسبة /16.2 %/.

5) مقارنة انحلالية الكبريت في المذيب المحسن (المذيب S₃ + ميتانول 25wt%) مع

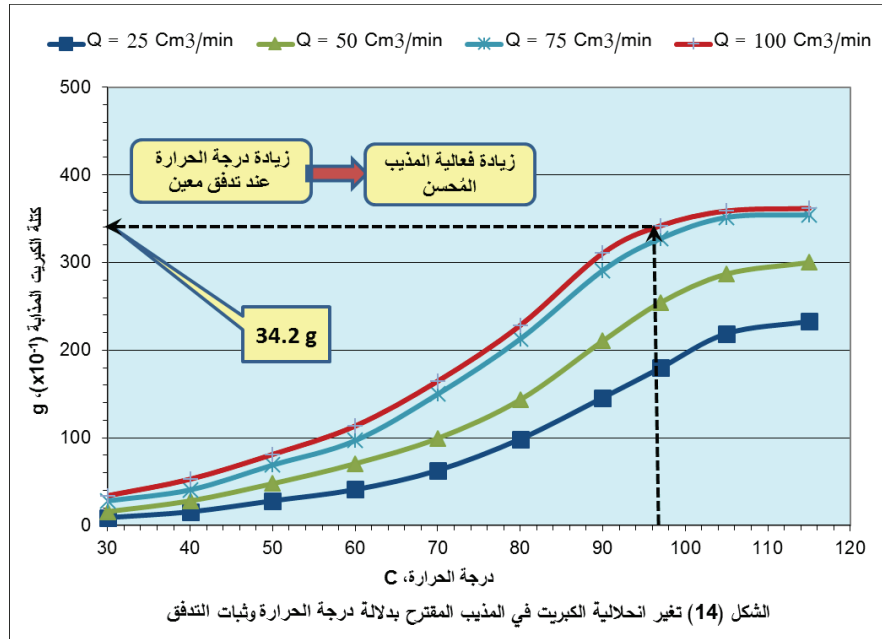
المذيب المستخدم حقلياً مع إدخال غاز من البئر جيسة-223:

بالرغم من أن إضافة المحلول الملحي تُعطي فعالية أفضل إلا أن التأثير التآكل له يحول دون استخدامه لذلك تم اعتماد إضافة الميتانول الذي يتميز بخواص مانعة للتآكل لنحصل على المذيب المحسن S₃. حيث تبين من المقارنة أن فعالية المذيب المحسن تزيد عن فعالية المذيب المستخدم حقلياً بنسبة /98.1 %/، الشكل (13).



(6) دراسة تغير قيم انحلالية الكبريت في المذيب المُحسن S_i بدلالة درجة الحرارة وثبات التدفق:

لدراسة تأثير درجة الحرارة بثبات تدفق المذيب تم معايرة مقياس التدفق ليحافظ على تدفق معين خلال فترة كل تجربة وتم قياس وزن الأنبوبة الزجاجية عند كل درجة حرارة مع وجود تيار من الغاز الطبيعي. ومن ثم حساب كمية الكبريت المذابة عند كل درجة حرارة لنحصل على المنحنيات في الشكل (14) الذي يبين أنه عند ثبات التدفق تزداد فعالية المذيب المُحسن S_i بزيادة درجة الحرارة.



الشكل (14) تغير انحلالية الكبريت في المذيب المقترح بدلالة درجة الحرارة وثبات التدفق

5. دراسة الجدوى الاقتصادية:

تم إجراء دراسة الجدوى الاقتصادية باستخدام الطريقة المُتبعة من قبل العديد من الشركات العالمية العاملة في قطاع الصناعة النفطية والغازية في سورية مثل شركات توتال وشل وبتروكندا وستروي ترانس غاز الروسية. حيث يتم دراسة الجدوى الاقتصادية لاستخدام المذيب المُحسن بدلاً من المذيب الحقلي المُستخدم حالياً لمعالجة الآبار المدروسة.

يتم في هذه الدراسة إجراء الحسابات الاقتصادية اللازمة انطلاقاً من الفرضيات والمعطيات الأساسية للمشروع (Input Data) وصولاً بالنتيجة إلى إظهار قيم المؤشرات الاقتصادية والتي يتم بناء عليها تقييم المشروع أي تحديد إن كان المشروع مجدٍ اقتصادياً أم لا.

ويتبين من النتائج التجريبية وفقاً للشكل (14) أنه عند معدل الحقن ($100 \text{ cm}^3/\text{min}$) من المذيب المُحسن ودرجة الحرارة (97°C) تقدر كمية الكبريت المذابة بحوالي (34.2 g). وبالتالي يقدر معدل الحقن المطلوب لمنع تشكل الكبريت بحوالي (560 L/day)

وذلك بالاعتماد على التركيز المتوقع لبخار الكبريت فوق المشبع (2.98 g/m^3) في المزيج الغازي المدروس.

❖ الأسعار:

- **سعر صرف الدولار:** تم اعتماده مساوياً لوسطي سعر الصرف عن ثلاثة أرباع عام 2014 في السوق السوداء (الحرّة)، وذلك كون أسعار المضخة والخزان والمواد الكيميائية اللازمة لتحضير المذيب المقترح مرتبطة بشكل مباشر بسعر الصرف في السوق السوداء وليس بأسعار مصرف سورية المركزي.
- **سعر المذيب المُحسن:** تم افتراضه بناءً على وسطي أسعاره في السوق السوداء (الحرّة) عن وسطي ثلاثة أرباع عام 2014.

❖ تعاريف المؤشرات الاقتصادية الناتجة:

▪ صافي القيمة الحالية (Net Present Value, NPV):

تعبّر عن صافي التدفقات النقدية بعد الأخذ بالاعتبار القيمة الزمنية للنقود، أي يتم إرجاع كافة التدفقات النقدية إلى سنة الأساس بعد ضربها بمعامل الخصم في تلك السنة.

▪ فترة الاسترداد (Pay Out Time, POT):

هي الفترة الزمنية بدءاً من إقلاع المشروع حتى تتحول صافي التدفقات النقدية من القيمة السالبة إلى الموجبة أي حتى يستعيد المشروع كافة تكاليفه من خلال الأرباح التي يحققها.

▪ معدل العائد على الاستثمار (Profit Investment Ratio, PIR):

هو الربح الصافي الذي يحققه المشروع بالنسبة لإجمالي التكاليف الاستثمارية.

❖ فرضيات الدراسة Assumptions:

تُبين الجداول (3)، (4)، (5) أهم الفرضيات والمعطيات التي تم استخدامها لإنجاز الدراسة الاقتصادية:

الجدول (3) المعطيات اللازمة للمذيب المُستخدم حقلياً		
طريقة الاستخدام	حمام دوري	

وسطي فترة الحمام	6	ساعة
وسطي تكرار الحمام	8	يوم
كمية المحلول الحقلي في كل حمام	4,000	لتر
سعر لتر المحلول الحقلي	110	ل.س/لتر
التكاليف التشغيلية	10%	من تكلفة المحلول

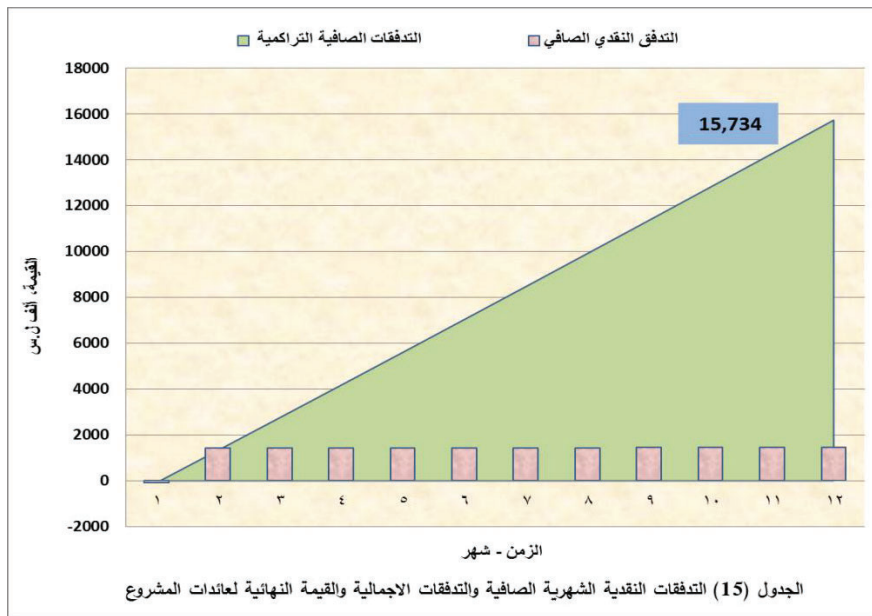
الجدول (4) المعطيات اللازمة لاستخدام المذيب المُحسن		
طريقة الاستخدام	حقن مستمر	
وسطي فترة الحمام	ثابت	
معدل حقن المذيب المُحسن	560	لتر/ يوم
سعر لتر المذيب المُحسن	250	ل.س/ لتر
سعر المضخة	1,800,000	ل.س
سعر الخزان	350,000	ل.س
التكاليف التشغيلية	10%	من تكاليف الأصول

الجدول (5) الفرضيات الأساسية.		
وسطي سعر صرف الدولار	160	ل.س
إنتاجية البئر	2666.7	م ³ / ساعة
	64000	م ³ / يوم
سعر الغاز	77.0	ل.س/م ³
معامل التضخم السنوي	4%	أسعار العام 2014
معامل التضخم الشهري	0.33%	
الاهتلاك السنوي	10%	
الاهتلاك الشهري	0.83%	
الضريبة	30.80%	

استخدام الطريقة الكيميائية لإزالة ترسبات الكبريت في مواسير إنتاج الآبار الغازية في حقول الجبسة

	0.50%	معامل الخصم الشهري
--	-------	--------------------

والمخطط البياني المُبين في الجدول (15) يوضح التدفقات النقدية الشهرية الصافية وكذلك التدفقات الاجمالية والقيمة النهائية لعائدات المشروع:



يتضح من الجداول (6-1)، (6-2) التي تمثل الحسابات الاقتصادية والمؤشرات الاقتصادية النهائية ومن الشكل (15)، أنه يتم استرداد كامل رأس مال هذا المشروع خلال (32) يوم والوفر السنوي الناتج عن تطبيق هذه الطريقة يقدر بحوالي /15.734/ مليون ليرة سورية مقارنةً مع الطريقة المستخدمة حاليًا.

الشهر	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
المذيب الحظي	1000 sp												
التكاليف التشغيلية	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650
تكاليف المحلول	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650
توقف الانتاج من الغاز	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000
المسلة نتيجة التوقف	4622	4622	4622	4622	4622	4622	4622	4622	4622	4622	4622	4622	4622
التدفقات النقدية	-6437	-6437	-6437	-6437	-6437	-6437	-6437	-6437	-6437	-6437	-6437	-6437	-6437
التدفقات النقدية بعد التضخم	-6459	-6480	-6502	-6523	-6545	-6567	-6589	-6611	-6633	-6655	-6677	-6699	-6699
المذيب الحسن	1000 sp												
تكاليف الأصول	2150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
التكاليف التشغيلية	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215
تكاليف المحلول	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200
التدفقات النقدية	-55130	-4415	-4415	-4415	-4415	-4415	-4415	-4415	-4415	-4415	-4415	-4415	-4415
التدفقات النقدية بعد التضخم	-56299	-4444	-4459	-4474	-4489	-4504	-4519	-4534	-4549	-4564	-4580	-4595	-4595
التدفقات الاجمالية	22642	2036	2043	2049	2056	2063	2070	2077	2084	2091	2098	2105	2105

استخدام الطريقة الكيميائية لإزالة ترسبات الكبريت في مواسير إنتاج الآبار الغازية في حقول الجبسة

الجدول (6-1) الحسابات الاقتصادية التفصيلية لاستبدال المذيب الحقلي بالمذيب المُحسن.

		1000 sp										حساب ضريبة دخل الأرباح	
		الأهالي										1000 sp	
		التدفق النقدي القاصم المغربية										التدفق النقدي القاصم المغربية	
		قيمة المغربية										قيمة المغربية	
		التدفق النقدي الصافي										التدفق النقدي الصافي	
		التدفقات الصافية التراكمية										التدفقات الصافية التراكمية	
17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	215
2087	2080	2073	2066	2059	2052	2045	2038	2031	2025	2018	2018	-146	22427
642.7	640.5	638.4	636.3	634.1	632.0	629.9	627.8	625.7	623.6	621.5	621.5	45.0	6907
1461.9	1457.1	1452.2	1447.4	1442.7	1437.9	1433.1	1428.4	1423.6	1418.9	1414.2	1414.2	-83.2	15734
15.734	14272	12815	11363	9916	8473	7035	5602	4174	2750	1331	-83		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0		
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	1.8	
													فترة الاسترداد / يوم

		1000 sp	المؤشرات الاقتصادية النهائية
0	15191	NPV @ 0.5%	صافي القيمة الحالية
-	7.07	PIR	معدل العائد على الاستثمار
شهر	1.06	POT	فترة الاسترداد
يوم	31.76		

الجدول (6-2) الحسابات الاقتصادية التفصيلية والمؤشرات النهائية.

6. النتائج والمقترحات:

1. المذيب المقترح S_3 ذو فعالية أعلى من المذيب المستخدم حقلياً بإذابة الكبريت عند نفس الشروط بدون إدخال تيار من الغاز المدروس بمعدل حوالي (51.9%).
2. تزداد فعالية كل من المذيبين المدروسين بعد إدخال تيار من الغاز الطبيعي المدروس وتبقى فعالية المذيب المقترح أعلى بمعدل حوالي (66%).
3. بمقارنة فعالية المذيب المقترح مع وبدون إدخال غاز وإجراء عملية تناسب نجد أن إدخال الغاز مع المذيب المقترح يزيد فعالية إذابة الكبريت بشكل ملحوظ بمعدل حوالي (12.8%).
4. تزداد فعالية المذيب المقترح بإضافة إحدى المذيبات القطبية ويكون المحلول الملحي ذو فعالية أعلى من الميثانول.
5. نظراً لخواص الميثانول المانعة للتآكل نقترح إضافته للمذيب المقترح لضمان عدم حدوث أي تآكل طوال فترة المعالجة لنحصل على المذيب المحسن S_i (المذيب S_3 / +25 wt% / ميثانول).
6. تزداد فعالية المذيب المحسن عن فعالية المذيب المستخدم حقلياً بنسبة /98.1% عند إدخال غاز من البئر جيسة-223. وتقدر كمية الكبريت المذابة بحوالي (34.2 g) عند معدل الحقن ($100 \text{ cm}^3/\text{min}$) من المذيب المحسن.
7. عند ثبات التدفق تزداد فعالية المذيب المحسن S_i بزيادة درجة الحرارة.
8. من خلال الدراسة الاقتصادية ودراسة السلبيات والإيجابيات لكل مذيب نجد أن المذيب الأكثر فعالية واقتصادية والأنسب بيئياً لمعالجة البترين المدروسين /جيسة-223، جيسة-220/ بخاصة ولحقول جيسة الغازية بعامة هو المذيب المحسن S_i (المذيب الكيميائي المنشط بالأمينات الدهنية (S_3) مع إضافة نسبة 25 /wt% من الميثانول). لذلك نقترح تطبيق هذه الطريقة على الآبار الغازية الحامضية لحقول الجيسة وكافة الحقول التي تعاني من هذه المشكلة (وفق الطريق المقترحة في

الدراسة الاقتصادية) مع الأخذ بالاعتبار الظروف البئرية والتشغيلية الخاصة بكل بئر.

7. المراجع:

A - باللغة العربية:

- 1- تقارير التشغيل اليومية وذاتية آبار حقول الجبسة، الشركة السورية للغاز - مديرية تطوير واستثمار الغاز الطبيعي - شعبة الدراسات التكنولوجية، حمص.
- 2- صالح، د.رياض، 2007 «دراسة فنية حول منع ترسب الكبريت في مواسير إنتاج الغاز في تركيب الجبسة» مجلة جامعة البعث، المجلد 29-العدد 4، 9-37.

B - باللغة الإنكليزية:

3. W.N. Tuller, The Sulfur Data Book, McGraw-Hill: New York, 123. (2002) 201-225.
4. J.B. Hyne, "Controlling Sulfur Deposition in Sour Gas Wells", World Oil, 197 (1995) 35-39.
5. 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.
6. R. Steudel, "Elemental Sulfur and Sulfur-Rich Compounds II", Topics in Current Chemistry, 231 (2003) p.127.
7. A.B. Chesnoy, D.J. Pack, "S8 Threatens Natural Gas Operations", Oil Gas J., 95 (2004) 74-79.
8. M. Ardekani, R. H. Rangel, "Numerical Investigation of Particle-particle and Particle-wall Collisions in a Viscous Fluid", J. Fluid Mech., 596 (2008) 437.

9. D. Eddy, “mitigation of S8 deposition during production of hydrocarbon gases”, BP corporation north American, (2013) p.3-10.

استخدام الطريقة الكيميائية لإزالة ترسبات الكبريت في مواسير إنتاج الآبار الغازية في حقول الجبسة