

التلوث البيئي لحقل المشراق بمحافظة الموصل: دراسة في الجغرافية البيئية

م. د. سعدي خلف احمد كنهير

وزارة التربية/ المديرية العامة لتربية محافظة كركوك

(Environmental Pollution of the Al-Mishraq Field in Mosul Governorate: A Study in Environmental Geography)

Dr. Saadi Khalaf Ahmed Kanhir

Ministry of Education/ General Directorate of Education in Kirkuk Governorate

المستخلص

الحاملة (زيادة المسامية ٤ أضعاف، وانخفاض قوة تحمل الانضغاط ٦ أضعاف) (القهوجي، ١٩٨٩؛ الصائغ، ١٩٨١)، مما خلق مخاطر جيولوجية كامنة متمثلة في "الهبوط الأرضي (Land Subsidence)"، وهو خطر موثق عالمياً لعملية فراش (Mullican, 1991; North Dakota Legislative Assembly, 2003). 3) التلوث الجوي الإرثي: تمثل في حرائق الكبريت الكارثية (٢٠٠٣ و ٢٠١٦) التي أطلقت كميات هائلة من SO_2 في الغلاف الجوي (National Aeronautics and Space Administration, 2016; U.S. Department of Veterans Affairs, 2025). المشراق يمثل "نقطة ساخنة" بيئية (UNEP Hot Spot) (United Nations Environment Programme [UNEP], 2004; UNEP, 2005)، لا بسبب التلوث الصناعي الفعال المتوقع، بل بسبب الإرث الهيدروجيولوجي والحيوتقني والكيماوي المتروك، مما يتطلب استراتيجيات إدارة بيئية طويلة الأمد تركز على مراقبة الاستقرار الجيوتقني ومعالجة مصادر التلوث المتبقية. (Ibrahim, 2011).

يحل هذا البحث الإشكالية البيئية المركبة لحقل كبريت المشراق من منظور الجغرافية البيئية، متجاوزاً التقييم الكيميائي التقليدي للملوثات. يركز البحث على "عملية فراش (Frasch Process)" كمحرك بشري أساسي، حيث تم حقن ما يزيد عن ٢١٣ مليون متر مكعب من المياه فائقة السخونة (١٦٠ درجة مئوية) في التكوينات الجيولوجية (تكوين الفارس الأسفل) خلال فترة الإنتاج (١٩٧٢-٢٠٠٢) (محمدعلي، غير مؤرخ؛ الشركة العامة لكبريت المشراق، غير مؤرخ). يكشف التحليل الجغرافي-البيئي عن ثلاثة أبعاد مترابطة للتلوث: ١) التلوث الهيدروجيولوجي: تمثل في "ظاهرة التسرب" التي لوّثت نهر دجلة بشكل حاد (حرارة ٨٠-١٠٠ درجة مئوية، وتراكيز H_2S تصل إلى ٦٠٠ ppm) أثناء التشغيل (الشركة العامة لكبريت المشراق، ٢٠١٠). وبعد توقف الإنتاج، يُظهر البحث استمرار تلوث المياه الجوفية (Legacy Groundwater Pollution) ك"إرث ملوث" مزمن (الشركة العامة لكبريت المشراق، ٢٠١٠). ٢) التدهور الجيوتقني: تسبب الحقن الحراري في تدهور الخواص الميكانيكية للصخور

2) Geotechnical Degradation: The thermal injection degraded the mechanical properties of the host rock (porosity increased 4-fold, compressive strength decreased 6-fold) (Al-Qahwaji, 1989; Al-Sayegh, 1981), creating latent geological hazards of "Land Subsidence," a globally documented risk of the Frasch process (Mullican, 1991; North Dakota Legislative Assembly, 2003). 3) Atmospheric Legacy Pollution: Represented by catastrophic sulfur fires (2003 and 2016) that released massive quantities of SO_2 (NASA, 2016; U.S. Department of Veterans Affairs, 2025). The research concludes that Al-Mishraq constitutes a UNEP "Hot Spot"

(UNEP, 2004; UNEP, 2005), not due to active industrial pollution (which has ceased), but because of the remaining hydrogeological, geotechnical, and chemical legacy, necessitating long-term environmental management strategies focused on geotechnical stability monitoring and remediation of remaining pollution sources (Ibrahim, 2011).

Keywords: Environmental Pollution, Environmental Geography, Al-Mishraq Field, Frasch Process, Land Subsidence,

الكلمات المفتاحية: التلوث البيئي، الجغرافية البيئية، حقل المشراق، طريقة فراش، الهبوط الأرضي، تلوث المياه، كبريتيد الهيدروجين (H₂S)، برنامج الأمم المتحدة للبيئة. (UNEP)

Abstract

This research analyzes the complex environmental problematic of the Al-Mishraq sulfur field from an environmental geography perspective, moving beyond traditional chemical assessments. The study focuses on the "Frasch Process" as the primary anthropogenic driver, where over 213 million cubic meters of superheated water (160°C) were injected into the geological formations (Lower Fars Formation) during the production period (1972–2002) (Mohammedali, n.d.; General Company for Mishraq Sulphur, n.d.). The geo-environmental analysis reveals three interconnected dimensions of pollution: 1) Hydrogeological Pollution: Manifested as the "leakage phenomenon" which acutely polluted the Tigris River (80–100°C, H₂S concentrations up to 600 ppm) during operation (General Company for Mishraq Sulphur, 2010). Post-shutdown, the research demonstrates persistent "Legacy Groundwater Pollution" as a chronic contaminated inheritance (General Company for Mishraq Sulphur, 2010).

Water Pollution, Hydrogen Sulfide

(H₂S), UNEP.

المقدمة

يُعد حقل كبريت المشراق، الذي يُصنف كأحد أضخم ترسبات الكبريت الطباقية ذات المنشأ العضوي (bio-epigenetic) في العالم (محمد علي، غير مؤرخ)، نموذجاً معقداً للتفاعلات البيئية القسرية الناتجة عن الأنشطة التعدينية المكثفة. لا تقتصر إشكالية التلوث في المشراق على النفايات الصناعية التقليدية، بل تمثل "إرثاً بيئياً" (Environmental Legacy) متعدد الأبعاد، يشمل تلوثاً هيدروكربونياً عميقاً، وتدهوراً في الخواص الجيوتقنية للأرض، وتلوثاً جويماً عرضياً ذا تأثيرات صحية خطيرة وموثقة.

تتبع أهمية هذه الدراسة من اعتمادها على منظور "الجغرافية البيئية" (Environmental Geography)، الذي يتجاوز مجرد رصد الملوثات الكيميائية (Contaminants)، ليركز على تحليل العلاقة السببية (Cause-Effect) بين الفعل البشري (Human Action) واستجابة الأنظمة الطبيعية (Natural Systems Response). فمن منظور الجغرافية البيئية، لا يُنظر إلى الملوثات (مثل H₂S أو SO₂) بمعزل عن مصدرها، بل يُنظر إلى "عملية فراش" (Frasch Process) "بحد ذاتها كـ "فعل جغرافي-بيئي" (Geo-Environmental Act). تتمثل هذه العملية في ضخ كتلة هائلة (ماء) وطاقة هائلة (حرارة) إلى طبقة جيولوجية

محددة ومستقرة، مما يؤدي إلى تغيير قسري ودائم في خصائصها الفيزيائية والكيميائية (الصائع، ١٩٨١). إن سلسلة التأثير البيئي التي أحدثتها هذه العملية هي جوهر التحليل الجغرافي-البيئي. تبدأ السلسلة بحقن أكثر من ٢١٣ مليون متر مكعب من الماء الساخن (الشركة العامة لكبريت المشراق)، مما يؤدي إلى تغيير الخواص الفيزيائية والميكانيكية للصخور الحاملة (تكوين الفارس الأسفل) (الصائع، ١٩٨١). ينتج عن هذا التغيير خلق نظام هيدروكربوني اصطناعي ملوث (مياه تكنولوجية ساخنة مشبعة بالأملاح و H₂S) (الشركة العامة لكبريت المشراق، ٢٠١٠). هذا النظام بدوره يتسرب عبر قنوات طبيعية ومستحدثة إلى المستقبل المائي الرئيسي (نهر دجلة) (الشركة العامة لكبريت المشراق، ٢٠١٠). وفي الوقت نفسه، يتسبب هذا التدخل في إضعاف البنية الجيوتقنية للحقل، مما يخلق مخاطر "هبوط أرضي" (Land Subsidence) طويلة الأمد (الفهوجي، ١٩٨٩).

يهدف هذا البحث إلى تحقيق ما يلي:

١. تحليل حقل المشراق كنظام "جغرافي-بيئي" (Geo-Environmental System) "تتج عن التفاعل القسري بين النشاط البشري (التعدين بطريقة فراش) والبيئة الطبيعية (الجيولوجيا والهيدروكربونيات).
٢. تقييم الأثر الهيدروجيولوجي، والتميز بين التلوث "الحاد" (Acute) الذي شهدته نهر دجلة أثناء فترة التشغيل (قبل ٢٠٠٣)، والتلوث "المزمن" (Chronic) "المتمثل في إرث المياه الجوفية الملوثة (بعد ٢٠٠٣).
٣. كشف البُعد "الجيوتقني" للتلوث (تدهور الخواص الميكانيكية للصخور)، وتقييم مخاطر الهبوط الأرضي (Land Subsidence) المرتبطة به، بالاعتماد على دراسات مقارنة لحقول عالمية مشابهة.

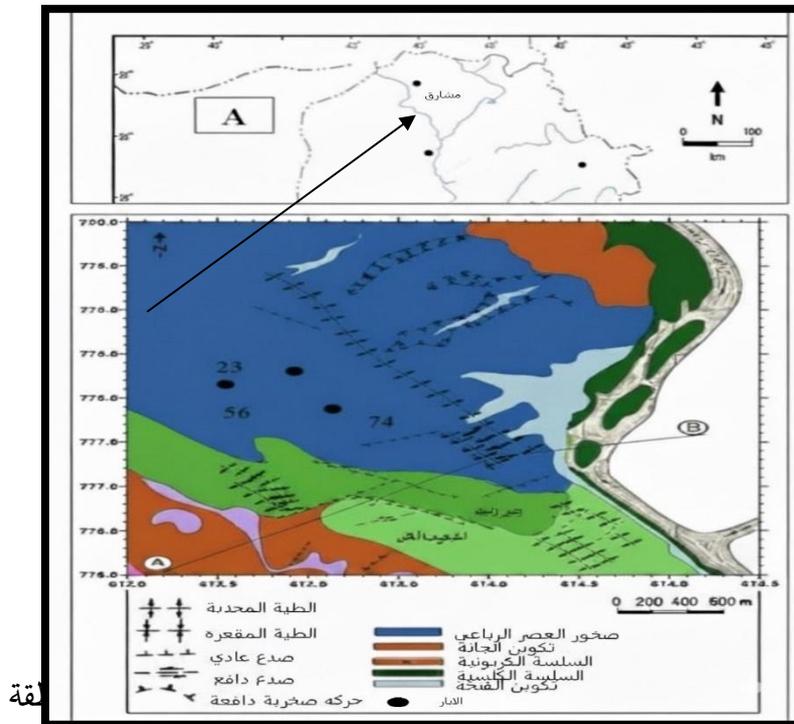
٤. تحليل التلوث "الإرثي (Legacy Pollution)" المتمثل في الحرائق الجوية الكارثية والمخلفات الحامضية المتروكة في الموقع وتأثيراتها الموثقة.

2.0 الإطار الجغرافي والجيولوجي لحقل المشراق

2.1 الموقع الجغرافي والنظام الهيدرولوجي

يقع حقل كبريت المشراق في الجزء الجنوبي الشرقي من محافظة الموصل، على الضفة الغربية لنهر دجلة، وتحديدًا عند نقطة التقاء نهر دجلة برفاده الرئيسي، الزاب الكبير (محمدعلي، غير مؤرخ؛ الصائغ، ١٩٨١). هذا الموقع بحد ذاته يمثل نقطة "ضعف بيئي" استراتيجية؛ حيث إن وقوع واحد من أضخم الحقول التعدينية في العالم على شريان مائي رئيسي (دجلة) وفي منطقة التقاء هيدرولوجي (Confluence) مع رافد رئيسي آخر (الزاب)، يعني أن أي تسرب أو خلل في العمليات الصناعية سيكون له تأثير فوري ومباشر وواسع النطاق على النظام المائي الأهم في العراق.

التركيب الجيولوجي العام للحقل عبارة عن طية محدبة (Anticline) كبيرة، يتجه محورها من الشمال الغربي إلى الجنوب الشرقي (محمدعلي، غير مؤرخ؛ الصائغ، ١٩٨١). ويقوم نهر دجلة والزاب بقطع هذا التركيب، مقسمين إياه إلى ثلاثة أجزاء رئيسية: مشراق (١) وهو موقع المنجم الرئيسي، ومشراق (٢) شرق دجلة وشمال الزاب، ومشراق (٣) شرق دجلة وجنوب الزاب (محمدعلي، غير مؤرخ؛ الصائغ، ١٩٨١).



المصدر: من عمل الطالب اعتمادا علي خريطة العراق الجيولوجية بمقياس ١:٢٥٠٠٠

2.2 الجيولوجيا الطباقية (Stratigraphy)

تعود الترسبات الحاملة للكبريت في منطقة المشراق إلى تكوين "الفارس الأسفل" (أو تكوين الفتحة)، الذي ترسب في عصر المايوسين الأوسط (محمدعلي، غير مؤرخ)؛ ينقسم العمود الجيولوجي في الحقل بشكل أساسي إلى قسمين: "الطبقات الغطائية (Overburden)" و "الطبقات الإنتاجية (Productive Beds) (الصائع، ١٩٨١)

تتكون الطبقات الغطائية، التي يتراوح سمكها بين ١٠٠ و ١٨٧ متراً (محمدعلي، غير مؤرخ)، من تعاقب صخور الجبس، والمواد الطينية، والترسبات الجيرية (الصائع، ١٩٨١). أما الطبقات الإنتاجية، فتتقسم إلى ثلاث طبقات كبريتية رئيسية (الأولى، والثانية، والثالثة)، تفصل بينها طبقات من الحجر الجيري الدولوميتي الخالي من الكبريت والمشبع أحياناً بالمواد الهيدروكربونية

إن الصخور الحاضنة للكبريت (Host Rocks) هي بشكل أساسي "الكلس المعاد التبلور (Recrystallized Limestone)"، والذي يتصف بنيوياً باحتوائه على "الفراغات والفجوات هذه البنية الجيولوجية هي مفتاح فهم كل من الجدوى الاقتصادية والكارثة البيئية للحقل؛ فالطبيعة الجيولوجية (صخور جبسية وكلسية) هي التي سمحت بترسب الكبريت (عبر اختزال الصخور الجبسية بفعل البكتيريا اللاهوائية وبوجود المواد الهيدروكربونية) (الصائع، ١٩٨١)، وهي نفسها التي سهلت عملية استخراجها بطريقة "فراش" (حيث سمحت الفجوات للماء الحار بالانتشار وصهر الكبريت)، وهي ذاتها التي تسببت في الكارثة البيئية، نظراً لأن هذه الصخور (الجبس والكلس) قابلة للذوبان والتدهور والتحلل عند تعرضها لمياه حارة ومضغوطة لفترات طويلة.

2.3 الهيدروجيولوجية الطبيعية

قبل التدخل البشري، كان الحقل يتميز بنظام هيدروجيولوجي معقد يتكون من تسع طبقات حاوية للمياه الجوفية، يمكن تقسيمها إلى ثلاث مجموعات رئيسية:

١. المجموعة الأولى: خمس طبقات سطحية ضمن التكوين الرباعي والطبقات الغطائية.
٢. المجموعة الثانية: ثلاث طبقات ضمن الطبقات الإنتاجية الحاملة للكبريت.
٣. المجموعة الثالثة: طبقة واحدة عميقة في تكوين الفرات الجيري (الصائع، ١٩٨١).

الأمر الحاسم من منظور الجغرافية البيئية هو أن اتجاه الجريان العام للمياه الجوفية في الحقل هو من الغرب إلى الشرق، أي باتجاه نهر دجلة. هذا يعني أن النظام الهيدروجيولوجي الطبيعي للحقل كان مهياً لتصريف أي سائل زائدة (طبيعية أو صناعية) مباشرة إلى النهر. لم تكن عملية فراش تحارب الطبيعة، بل استخدمت مساراتها الطبيعية لتصريف مياهها التكنولوجية الملوثة.

الأهمية الاستراتيجية لكبريت المشراق

يتمتع قطاع استخراج الكبريت في حقول المشرق بجدوى اقتصادية عالية وميزة تنافسية راسخة، تستند بشكل رئيس إلى وفرة الاحتياطيات الجيولوجية وانخفاض الكلف التشغيلية للإنتاج، فضلاً عن تراكم الخبرات الفنية الوطنية وتوفر الأيدي العاملة المتخصصة. وتتعرّز هذه المكانة بضمان منافذ تسويقية استراتيجية، سواء على المستوى المحلي عبر صناعة الفوسفات، أو إقليمياً لتلبية احتياجات صناعة الأسمدة في دول الجوار. وفي ظل التوقعات الديموغرافية العالمية التي تشير إلى تزايد السكان وتنامي الحاجة للأمن الغذائي، يبرز الدور الحيوي للكبريت كمكون أساسي في صناعة الأسمدة الزراعية. وبناءً على ذلك، تتطلب استدامة هذه الصناعة تبني استراتيجيات تطوير مستقبلية تركز على التأهيل البيئي والتقني للوحدات الإنتاجية، والتحول نحو منتجات ذات قيمة مضافة كالكبريت الحبيبي، بالإضافة إلى الانفتاح على الشراكات الاستثمارية الدولية لتعزيز القدرات الإنتاجية ومواكبة المعايير العالمية (هناك علي بدون تاريخ)

3.0 المحرك البشري: تحليل عملية فراش (Frasch Process) كعامل تغيير جيوبئي

3.1 آلية العملية

تعتمد عملية استخراج الكبريت في المشرق على طريقة "الصهر الجوفي" المعروفة بـ "طريقة فراش" (Frasch Process). تعتمد هذه الطريقة على حقن ماء فائق السخونة بدرجة حرارة تصل إلى 160 درجة مئوية وتحت ضغط يتراوح بين 7-8 كغم/سم² (محمدعلي، غير مؤرخ). يتم ضخ هذا الماء عبر آبار مصممة خصيصاً بأربعة أنابيب متداخلة، حيث يخرج الماء الحار من مرشح علوي ليصهر الكبريت في الطبقات الحاملة، مكوناً "بحيرة من الكبريت السائل" حول قاعدة البئر. بعد ذلك، يُستخدم الهواء المضغوط لرفع الكبريت المنصهر إلى السطح عبر أنبوب الاستخراج.

10-14-2025 Tue 13:06:02



P150 #T08

Camera 01

10-14-2025 Tue 13:07:58



Camera 01

صورة (٢٠١) مناطق استخراج الكبريت

3.2 مقياس التدخل الهيدرولوجي (Quantifying the Injection) لتحليل الأثر البيئي لعملية فراش،

يجب أولاً تحديد حجم هذا التدخل. إن الأرقام التي تكشف عنها السجلات الإنتاجية للشركة العامة لكبريت

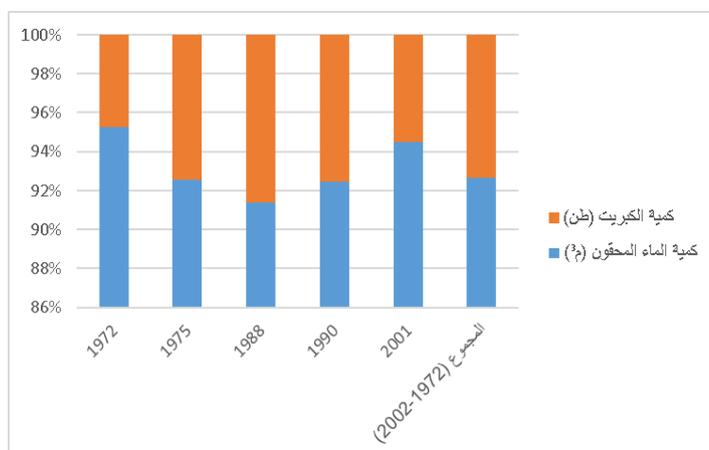
المشراق هائلة، وتمثل "المتغير المستقل (Independent Variable) "الذي تسبب في جميع "المتغيرات التابعة (Dependent Variables) "البيئية اللاحقة.

خلال فترة الإنتاج الممتدة من ١٩٧٢ إلى ٢٠٠٢، تم حقن ما مجموعه 213,325,117 متر مكعب من المياه التكنولوجية (المعالجة حرارياً وكيميائياً) مباشرة في نظام المياه الجوفية لتكوين الفارس الأسفل (الشركة العامة لكبريت المشراق، غير مؤرخ). يوضح الجدول (١) عينة من حجم الضخ السنوي مقارنة بالإنتاج.

جدول ١: كميات المياه التكنولوجية المحقونة والإنتاج السنوي للكبريت

السنة	كمية الماء المحقون (م ^٣)	كمية الكبريت (طن)
1972	3,130,292	155,410
1975	8,917,140	718,782
1988	12,566,435	1,188,063
1990	12,581,734	1,029,854
2001	6,070,836	354,666
المجموع (1972-2002)	213,325,117	16,912,084

المصدر: الشركة العامة لإنتاج الكبريت



شكل (٢) كميات المياه المحقونة وإنتاج الكبريت

ان ضخ أكثر من ٢١٣ مليون متر مكعب من المياه الساخنة لم يكن مجرد عملية تعدين، بل كان عملية "هندسة جيولوجية عكسية (Geo-engineering) "غير مقصودة، خلقت نظاماً هيدرولوجياً اصطناعياً ملوثاً بالكامل تحت سطح الأرض.

4.0 تحليل الأبعاد الجغرافية للتلوث البيئي أدى هذا التدخل البشري الهائل إلى توليد ثلاثة أبعاد متداخلة من التلوث البيئي، شكلت مجتمعة "إرث" المشراق الملوثة.

4.1.1 البُعد الهيدرولوجي: تلوث المياه السطحية والجوفية

" 4.1.1.1 ظاهرة التسرب" (فترة التشغيل: قبل ٢٠٠٣) يكشف تقرير فني متخصص عن "الجيولوجيا البيئية" للحقل عن وجود "قناة تسرب رئيسية" يتراوح طولها بين ٤٠٠ و ٦٠٠ متر، تمتد من الطبقة الإنتاجية الأولى باتجاه نهر دجلة (الشركة العامة لكبريت المشراق، ٢٠١٠). ويشير التقرير إلى أن هذه القناة كانت موجودة على الأرجح حتى قبل بدء الإنتاج.

تسببت عمليات الإنتاج (الحقن الهائل للماء الساخن والضغط المصاحب له) في "توسع" هذه القناة بشكل كبير، مما أدى إلى تسرب كارثي للمياه التكنولوجية (الشركة العامة لكبريت المشراق، ٢٠١٠). بينت الدراسات أن نسبة المياه المتسربة إلى النهر تراوحت ما بين ٦٠% إلى ٨٧% من إجمالي كمية المياه المحقونة للأغراض الإنتاجية. (Al-Jubori & Al-Hadidy, 2018)

لم يكن هذا التسرب خفياً، بل ظهر على شكل "عيون كبريتية حارة (Artificial hot springs) "تتبع مباشرة داخل مجرى نهر دجلة، بلغت درجة حرارتها ما بين ٨٠ إلى ١٠٠ درجة مئوية ، (Al-Jubori & Al-Hadidy, 2018). ورغم محاولات المعالجة عبر إنشاء "حاجز هيدروليكي" (بضخ ماء خام لحجز المياه الساخنة)، إلا أن التقرير يقر بأن هذا الحاجز "لم يحل المشكلة ولكن خفف من تأثيرها". لقد تغلب حجم الضخ البشري (٢١٣ مليون م³) على الإجراءات الهندسية، محولاً نهر دجلة فعلياً إلى "مُستقبل نفايات (Receptor) "رئيسي للنظام الصناعي. (Ibrahim, 2011)



صورة (٤،٣) مظاهر التلوث بالمنطقة

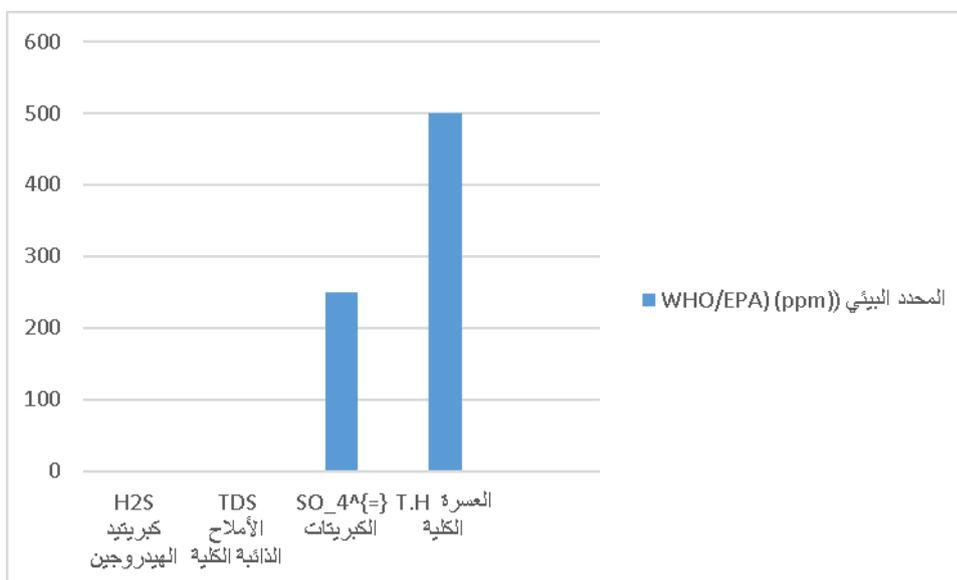
4.1.2 التقييم الكيميائي لتلوث المائي الحاد (قبل ٢٠٠٣)

كانت المياه المتسربة إلى النهر قبل عام ٢٠٠٣ ذات خصائص شديدة التلوث، كما يوضح الجدول (2).

جدول ٢: الخصائص الهيدروكيميائية للعيون الصناعية (منطقة التسرب) في نهر دجلة (قبل ٢٠٠٣)

المؤشر (الوحدة)	التركيز (ppm)	المحدد البيئي (WHO/EPA) (ppm)
H ₂ S كبريتيد الهيدروجين	٦٠٥~متوسط 337 - 685	1.0
TDS الأملاح الذائبة الكلية	2232 - 3744	500 - 1000
SO ₄ ⁼ الكبريتات	778 - 2132	250
T.H العسرة الكلية	995.9 - 1906.6	500

المصدر: الشركة العامة لكبريت المشراق (2010)



شكل (٣) الخصائص الهيدروكيميائية للعيون الصناعية

تظهر البيانات تلوثاً كارثياً. تركيز H₂S ، وهو غاز "سام وخانق ومميت" (الشركة العامة لكبريت المشراق، ٢٠١٠)، تجاوز الحد المسموح به بأكثر من ٦٠٠ ضعف. كما تجاوزت تراكيز الأملاح الذائبة (TDS) والكبريتات (SO₄⁼) والعسرة الكلية (T.H) الحدود البيئية بشكل كبير. أدى هذا إلى "تغير الخصائص الأساسية (الكيميائية والفيزيائية والبيولوجية) لمياه نهر دجلة" (الشركة العامة لكبريت المشراق، ٢٠١٠)، مما تسبب في حالة تلوث بيئي حادة. (Acute Environmental Pollution).

4.1.3 تقييم الوضع الراهن (بعد ٢٠٠٣): التلوث الإرثي مقابل التعافي النهري

يقدم التقرير الفني (الشركة العامة لكبريت المشراق)، بيانات حيوية تم جمعها عام ٢٠١٠، أي بعد سبع سنوات من توقف الإنتاج، مما يسمح بتقييم الوضع الراهن. تكشف هذه البيانات عن اتجاهين متناقضين:

١. تعافي ملحوظ في مياه النهر السطحية.

٢. استمرار التلوث العميق في المياه الجوفية (إرث ملوث).

أ) تعافي نهر دجلة: تُظهر بيانات ٢٠١٠ (الجدول ٤) انخفاضاً هائلاً في الملوثات داخل مجرى النهر. انخفض تركيز H₂S من متوسط ~٦٠٠ ppm إلى ~١,٤٧ ppm رغم أنه لا يزال أعلى من الحد ١ ppm، وانخفض TDS من متوسط ~٣٤٠٠ ppm إلى نطاق ٣٤٠-٤٠٠ ppm أصبح ضمن الحدود المسموحة، وعادت درجة الحرارة إلى مستواها الطبيعي (٢٢-٢٣ درجة مئوية).

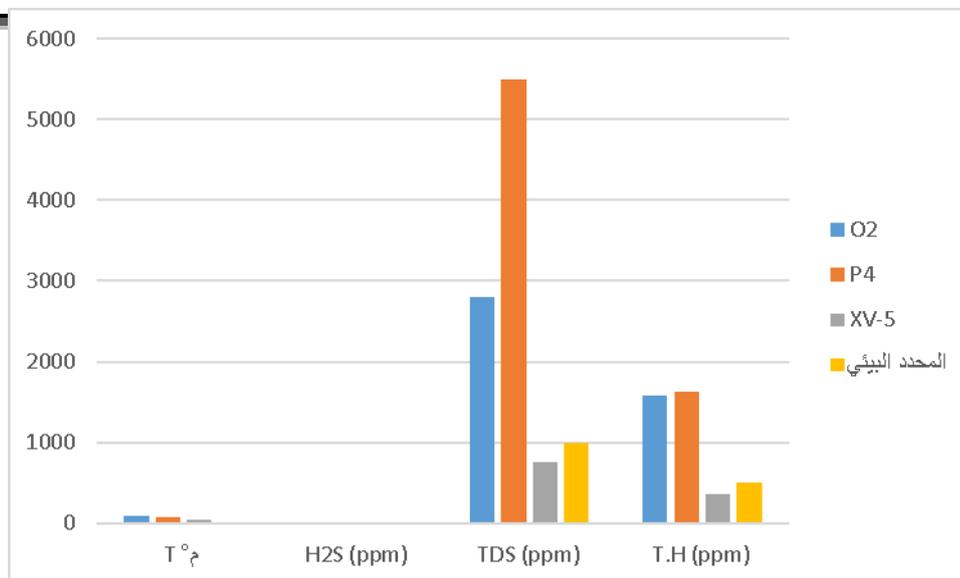
ب) استمرار تلوث المياه الجوفية: على النقيض تماماً، تُظهر بيانات الآبار (الجدول ٣) أن المياه الجوفية في الطبقات الإنتاجية لا تزال "ساخنة" تصل إلى ٩٠ درجة مئوية في البئر ولا تزال "شديدة الملوحة" TDS يصل إلى ٥٤٩٠ ppm في البئر (P4)، ولا تزال "عالية العسرة (T.H)" تصل إلى ١٦٣٦ ppm ولا يزال H₂S خارج الحدود 12.24 ppm في البئر

الاستنتاج الجغرافي-البيئي: إن توقف "المحرك البشري" (عملية الحقن) أدى إلى توقف التلوث "الحاد" للنهر. لكن هذا التدخل ترك "إرثاً ملوثاً" (Legacy Pollution) هائلاً محبوساً في نظام المياه الجوفية. ما يتسرب إلى النهر الآن هو مزيج مخفف من هذا التلوث المزمن والمياه الجوفية الطبيعية (Al-Jubborry, 2009). وتؤكد دراسات أخرى هذا الاستنتاج، مشيرة إلى أن التلوث الحالي في النهر "متوسط" ومعظمه من مصادر طبيعية، لكن المياه الجوفية والبرك السطحية في الموقع لا تزال تمثل خطراً (Ibrahim, 2011; Al-Jubori & Al-Hadidy, 2018).

جدول ٣: الخصائص الهيدروكيميائية للمياه الجوفية (الآبار) بعد توقف الإنتاج (٢٠١٠)

البئر (الطبقة)	°T	H ₂ S (ppm)	TDS (ppm)	T.H (ppm)
O2	90	----	2800	1574
P4	82.7	---	5490	1636
XV-5	51.6	12.24	760	364
المحدد البيئي	< 35	1.0	1000	500

المصدر: في الشركة العامة لكبريت المشراق 2010

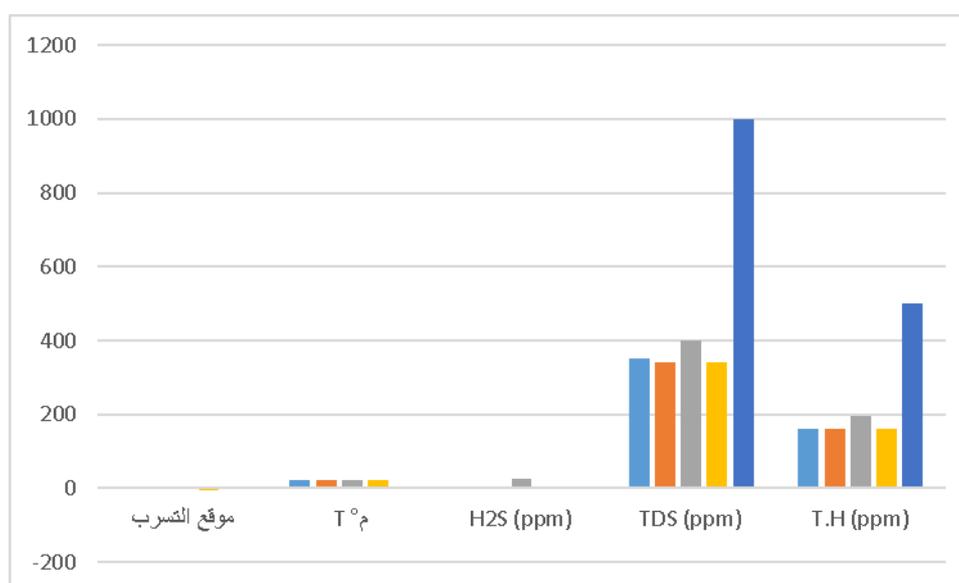


شكل (٤) الخصائص الهيدروكيميائية للمياه الجوفية بعد توقف الإنتاج

جدول ٤: الخصائص الهيدروكيميائية لنهر دجلة عند منطقة التسرب بعد توقف الإنتاج

موقع التسرب	T °C	H2S (ppm)	TDS (ppm)	T.H (ppm)
(1)	22	1.47	350	161
(2)	23	1.47	340	162
(3)	23	26.06	400	194
(4)	22	1.47	340	160
المحدد البيئي	< 35	1.0	1000	500

المصدر الشركة العامة لكبريت المشراق (2010)



شكل (٥) الخصائص الهيدروكيميائية لنهر دجلة عند منطقة التسرب بعد توقف الإنتاج

4.2. البُعد الجيوتقني: تدهور الأرض ومخاطر الهبوط

هذا هو البُعد الأكثر خطورة والأقل وضوحاً للتلوث في المشرق. منظور الجغرافية البيئية لا يرى التلوث كمادة كيميائية فقط، بل ك "تدهور (Degradation) "في النظام الطبيعي. عملية فراش هي عملية "تدهور جيوتقني متعمد. (Deliberate Geotechnical Degradation) "

تتمثل آلية التدهور في أن حقن الماء الساخن (١٦٠ درجة مئوية) في صخور رسوبية (الجبس، المارل، الكلس) بالإضافة إلى استخراج الكبريت نفسه، يؤدي إلى تغيير جذري في الصفات الميكانيكية لهذه الصخور. تشير دراسة جيولوجية (الصائغ، ١٩٨١) ورسالة ماجستير متخصصة في الجيوتكنيك للمنطقة (القهوجي، ١٩٨٩) إلى حقيقتين خطيرتين:

١. **زيادة المسامية (Porosity):** مسامية الصخور الكلسية الحاملة للكبريت "ترتفع لتصل إلى ما يقارب أربعة مرات أعلى مما كانت" بعد عملية الصهر.
٢. **فقدان قوة التحمل:** تفقد الصخور "الكثير من قابليتها لمقاومة الانضغاط"، حيث تصل في صخور الكلس الكبريتية إلى "٦ مرات أقل من قابليتها الأصلية" (القهوجي، ١٩٨٩؛ الصائغ، ١٩٨١).

النتيجة الحتمية لهذه التغيرات (زيادة الفراغات وانخفاض القوة) هي "ازدياد ضغط الطبقات الغطائية على الطبقات المنتجة التي تعجز عن تحمل هذا الثقل مما يحدث انضغاطاً وتكسيراً في الصخور" (الصائغ، ١٩٨١). وتكون النتيجة المباشرة هي "حدوث هبوط أرضي يصل أحياناً إلى عدة أمتار على سطح الأرض" (الصائغ، ١٩٨١). تحذر دراسة القهوجي (١٩٨٩) من هذه المشاكل، مشيرة إلى "الهبوط الأرضي وانفجار الصخور (Rock burst) كأخطار رئيسية ناتجة عن الفجوات المتكونة تحت السطح

هذا الخطر ليس نظرياً، بل هو النتيجة الحتمية والموتقة عالمياً لعملية فراش. تشير الدوريات الجيوتقنية الأجنبية إلى أن تعدين الكبريت بطريقة فراش (Frasch sulfur mining) قد تسبب في "الانهيار والهبوط الأكثر كارثية (most catastrophic subsidence and collapse) "في القباب الملحية (Salt Domes)، حيث أظهرت ١٢ من ١٤ قبة ملحية تم الإنتاج منها أدلة على الهبوط (Mullican، 1991). تصف هذه الدراسات العملية بأنها "انهيار جوفي (subsurface caving) "و "فشل هش" (brittle failure). يُعرّف "الانهيار الكارثي (Catastrophic collapse) "بأنه "الفشل المفاجئ والكامل للطبقات العلوية بسبب إزالة المواد السفلية" (North Dakota Legislative Assembly, 2003) ، وهو بالضبط ما تفعله عملية فراش بإذابة الكبريت واستخراجه من الطبقات الحاملة.



صورة (٦،٥) مخاطر الهبوط والتلوث الارضي

جدول ٥: ملخص التدهور الجيوتقني لصخور تكوين الفارس الأسفل بفعل عملية فراش

الحالة بعد الحقن الحراري (أثر عملية فراش)	الحالة قبل الحقن الحراري	الخاصية الجيوتقنية
زيادة تصل إلى ٤ أضعاف القيمة الأصلية	قيمة أساس	المسامية (Porosity)
انخفاض يصل إلى ٦ مرات أقل من القيمة الأصلية	قيمة أساس	قوة مقاومة الانضغاط
طبقات ضعيفة، غير قادرة على حمل الطبقات الغطائية	طبقات مستقرة	النتيجة البيئية
هبوط أرضي (Land Subsidence)، انفجارات صخرية (Rock bursts)	لا يوجد	الخطر الجغرافي

المصدر: الشركة العامة لإنتاج كبريت المشراق

4.3 البُعد الجوي: التلوث الإرثي العرضي

لم يتوقف التلوث البيئي في المشراق بتوقف الإنتاج عام ٢٠٠٣. بل تحول الخطر من تلوث مائي (تشغيلي) إلى تلوث جوي (إرثي) ناتج عن المخزون الهائل المتروك من الكبريت والمخلفات.

حريق يونيو ٢٠٠٣: اندلع حريق هائل في مخزون الكبريت بالمنشأة واستمر "ما يقرب من شهر" (U.S. Department of Veterans Affairs, 2025). وكالة الفضاء الأمريكية (NASA)، التي قدرت أن الحريق أطلق "٢١ كيلوطن من ثاني أكسيد الكبريت السام (SO₂) يومياً" (NASA, 2016). "ولتوضيح حجم هذه الكارثة، فإن هذه الكمية تعادل "أربعة أضعاف" ما ينبعث يومياً من أكبر مصدر انبعاث SO₂ في العالم (مصهر نوريلسك في روسيا) (NASA, 2016).

حريق ٢٠١٦: تكرر هذا السيناريو الكارثي في أكتوبر ٢٠١٦، باندلاع حريق آخر في نفس المنشأة، أطلق "كميات هائلة" من SO₂ رصدتها الأقمار الصناعية مجدداً. (NASA, 2016)

الآثار الصحية الموثقة: وثق تقرير حكومي أمريكي صادر عن وزارة شؤون المحاربين القدامى (U.S. Department of Veterans Affairs, 2025) الآثار الصحية الخطيرة على الجنود الأمريكيين الذين شاركوا في إطفاء حريق ٢٠٠٣.

- **الملوثات الرئيسية**: ثاني أكسيد الكبريت (SO₂) و "كبريتيد الهيدروجين" (H₂S) بمستويات وُصفت بأنها "خطرة فورياً على الصحة والحياة" (U.S. Department of Veterans Affairs, 2025).
- **الأعراض المباشرة**: تهيج، حروق طفيفة، مخاط أنفي ملطخ بالدم، تهيج العين والأنف والحنجرة، وسعال. (U.S. Department of Veterans Affairs, 2025).
- **الآثار طويلة الأمد (الخطيرة)**: ارتبط التعرض بحالات نادرة ولكنها خطيرة من تلف الرئة، تُعرف باسم "التهاب القصيبات المقيد (constrictive bronchiolitis) و"وحالة شبيهة بالربو تُعرف باسم "متلازمة الخلل الوظيفي التفاعلي لمجرى الهواء (reactive airway dysfunction syndrome) (U.S. Department of Veterans Affairs, 2025).
- **5.0 التقييم البيئي الراهن والإرث التلوثي (Legacy Pollution)**

نتيجة لهذا الإرث المركب (المائي، والجيوتقني، والجوي)، صنف برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP) موقع المشراق كواحد من ١٠ "نقاط ساخنة" بيئية (Environmental Hot Spots) ذات أولوية في العراق بعد عام ٢٠٠٣. (Shareef et al., 2024). ركز تقييم UNEP لعام ٢٠٠٥ على المواقع التي تشكل "أكبر المخاطر البيئية المباشرة على صحة الإنسان" (UNEP, 2005)، وتم اختيار المشراق بسبب "تلوث التربة والمياه الجوفية" الناتج عن حرائق الكبريت وعمليات التعدين. (UNEP, 2004)

إن المشكلة الحالية في المشراق ليست التلوث "الفعال" (الذي توقف إلى حد كبير بتوقف الإنتاج)، بل التلوث "الكامن" (Dormant/Legacy) "الذي ينتظر محفزاً (مثل الأمطار الغزيرة، أو عدم الاستقرار الجيوتقني). تشير الدراسات الأكاديمية وتقارير UNEP إلى أن الموقع في حالته "الخاملة" الحالية يمثل "خطراً منخفضاً (low risk) بشكل عام، لكنه يحتوي على مصادر خطر محددة متبقية (Ibrahim, 2011):



صورة (٧) تلوث الهواء الممتد في منطقة الدراسة

١. البرك السطحية الحامضية: (Acidic surface water ponds) الجريان السطحي ومياه الأمطار المتجمعة في البرك وقنوات الصرف القريبة من مناطق المعالجة وأكوام المخلفات تحتوي على "مستويات خطيرة من الحامض. (Ibrahim, 2011) (hazardous levels of acid) "
٢. المياه الجوفية الملوثة: كما نوقش في (٤,١,٣)، لا يزال النظام الجوفي ملوثاً بالكبريتات و H₂S (Ibrahim, 2011).
٣. مخزون الكبريت ومخلفاته: المخزون المتبقي لا يزال يشكل خطر حريق هائل.

يحذر تقرير (UNEP نقلاً عن Ibrahim, ٢٠١١) (بوضوح من أنه "في غياب الإجراءات التصحيحية، قد ترتفع مستويات الخطر بعد بضعة عقود."

6.0 الاستنتاجات والتوصيات

6.1 الاستنتاجات

١. يقدم حقل المشراق نموذجاً شاملاً "للتلوث الجغرافي-البيئي"، حيث تسببت "عملية فراش" (المحرك البشري) في تغييرات جذرية ودائمة في الأنظمة الطبيعية (الهيدرولوجية والجيوتقنية) عبر حقن ٢١٣ مليون م³ من الماء والطاقة الحرارية.
٢. كان التلوث المائي (الهيدرولوجي) "حاداً (Acute) "خلال فترة التشغيل (قبل ٢٠٠٣)، ملوثاً نهر دجلة بكميات هائلة من H₂S تصل إلى ٦٠٠ ppm والحرارة (تصل إلى ١٠٠ درجة مئوية) عبر "ظاهرة التسرب" (الشركة العامة لكبريت المشراق، ٢٠١٠).

٣. أظهر نهر دجلة قدرة واضحة على "التعافي السطحي" بعد توقف الحقن عام ٢٠٠٣، حيث عادت معظم مؤشرات التلوث (TDS)، الحرارة (إلى قرب مستوياتها الطبيعية. لكن نظام المياه الجوفية لا يزال "ملوثاً بشكل مزمن (Chronic Pollution)"، ويحتفظ بالحرارة والملوثات (H₂S, TDS)، مما يمثل إرثاً طويلاً الأمد (الشركة العامة لكبريت المشراق، ٢٠١٠).
٤. إن الأثر الأخطر والأكثر ديمومة هو "التلوث الجيوتقني" المتمثل في التدهور الميكانيكي المتعمد للصخور الحاملة للكبريت (زيادة المسامية ٤ أضعاف وانخفاض القوة ٦ أضعاف) (القهوجي، ١٩٨٩؛ الصائغ، ١٩٨١). خلق هذا فراغات جوفية واسعة وأدى إلى خطر حقيقي وموثق عالمياً لـ "الهبوط الأرضي الكارثي (Mullican, 1991; North Dakota Legislative Assembly, 2003).
٥. "الإرث التلوثي (Legacy Pollution)" للموقع، المتمثل في البرك الحامضية ومخزون الكبريت الهائل، أثبت خطورته عبر حرائق كارثية (٢٠٠٣، ٢٠١٦) أطلقت كميات SO₂ تفوق أكبر المصادر العالمية، مع آثار صحية خطيرة وموثقة (NASA, 2016; U.S. Department of Veterans Affairs, 2025).

6.2 التوصيات

- بناءً على منظور الجغرافية البيئية، الذي يركز على المخاطر الموروثة في الأنظمة الطبيعية، يوصي البحث بما يلي:
١. **لإدارة الحقل:** يجب الانتقال من منظور "التلوث الكيميائي" التقليدي إلى منظور "إدارة المخاطر الجغرافية". يتطلب هذا إجراء مسوحات جيوفيزيائية ورصد (Monitoring) دقيق ومستمر لعلامات الهبوط الأرضي (Subsidence) لتقييم الاستقرار الجيوتقني للحقل وحماية البنية التحتية المحيطة ونهر دجلة.
٢. **للباحثين:** إجراء دراسات نمذجة (Modeling) هيدرولوجية متقدمة لتحديد مصير الـ ٢١٣ مليون م³ من المياه الملوثة المحبوسة في الطبقات الجوفية، وتحديد معدلات التسرب المزمن المتبقية إلى نهر دجلة.
٣. **للسياسات البيئية:** التطبيق الفوري للإجراءات التصحيحية التي أوصى بها برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP)، وتحديد معالجة "البرك الحامضية" السطحية (Acid Ponds)، وتأمين مخزون الكبريت ومخلفاته المتبقية بشكل فعال لمنع تكرار كوارث التلوث الجوي (Ibrahim, 2011).

المصادر

١. القهوجي، ليث ذنون يونس. (1989). *دراسة جيوتكنيكية مختبرية لصخور تكوين الفارس الأسفل (الفتحة) لمشروع منجم كبريت المشراق رقم [2] رسالة ماجستير، جامعة الموصل*
٢. الصائغ، عامر حسن. (1981). *جيبولوجيا حقل كبريت المشراق. المنشأة العامة لكبريت المشراق.*
٣. الشركة العامة لكبريت المشراق. (2010). *الجيبولوجيا البيئية*. تقرير فني
٤. الشركة العامة لكبريت المشراق. (غير مؤرخ). *بيانات إنتاجية وكميات مياه محقونة ١٩٧٢-٢٠٠٢*. [بيانات داخلية
٥. *آفاق استخراج وتصنيع الكبريت العراقي في الشركة. محمدعلي، هناء إبراهيم. (غير مؤرخ)*. [وثيقة داخلية]. الشركة العامة لكبريت المشراق، قسم الإنتاج. *العامة لكبريت المشراق*
6. Al-Jubori, M. A., & Al-Hadidy, A. H. (2018). Assessment of Environmental Pollution of Soil and Water in Mishraq Sulphur State Company Before and After Production Stopped in 2003 Mosul - Iraq. *Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)*, 13(3), 221-236.
7. Al-Juborry, A. I. (2009). The effect of Al-Mishraq sulfur mine seepage on the Tigris River water quality. *Iraqi Bulletin of Geology and Mining*, 5(1), 59-70.
8. Ibrahim, J. A. (2011). POLLUTION OF MINING INDUSTRY SULFUR PURIFICATION PLANT AT AL MISHRAQ. *Journal of Engineering*, 17(5), 1159–1173.
9. Jasim, H., Halo, T., & Al jbouri, M. (2021). A Study of the chemical nature of sulfur-containing rocks and Frasch sulfur in the Al-Mishraq Sulfur field. *J Educ Sci*, 30(1), 1–9.
10. Mullican, W. F. (1991). Land subsidence and collapse in the Texas Gulf Coast. In *Land Subsidence: Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence* (IAHS Publication No. 200, pp. 63-72). International Association of Hydrological Sciences.
11. National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2016, October 20). *Sulfur Dioxide Spreads Over Iraq*. NASA Earth Observatory.
12. North Dakota Legislative Assembly. (2003). *North Dakota Administrative Code § 43-02-02.2: Definitions*.
13. Shareef, S. S., Halo, T. A., & Abdulla, M. O. (2024). Recovery of sulfur from the acidic waste (foam) of the Al-Mishraq sulfur mine in Iraq using the Carsul method. *Journal of Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*, 11(2), 335-344.
14. United Nations Environment Programme (UNEP). (2004, August 25). *UNEP to Assess and Clean-up Environment in Post-Conflict Iraq*.
15. United Nations Environment Programme (UNEP). (2005). *Assessment of environmental "Hot Spots" in Iraq*. Post-Conflict and Disaster Management Branch.
16. U.S. Department of Veterans Affairs. (2025, August 13). *Public Health: Sulfur Fire at Mishraq State Sulfur M*

