Journal of Insights in Basic and Applied Sciences
مجلة رؤى في العلوم الأساسية والتطبيقية
ISSN: 3106-1737
Volume 2, Issue 3, 2026, Pages: 513-540
Journal homepage: https://jibas.com.ly/index.php/jibas/en

Physicochemical Characteristics and Properties of Produced Water Associated with Oil Production in the Sarir Field, Libya

Faraj Akram Faraj Taher*
Environmental Protection Technician, Arabian Gulf Oil Company
Master's Degree in Natural Resources and Environmental Sciences/Graduate Studies Academy, Benghazi Branch, Libya

الخصائص والمواصفات الفيزيوكيميائية للمياه المصاحبة لإنتاج النفط بحقل السرير، ليبيا

فرج اكرم فرج طاهر*
فني حماية بيئة اول شركة الخليج العربي للنفط
ماجستير موارد طبيعية وعلوم البيئة/أكاديمية الدراسات العليا فرع بنغازي، ليبيا

*Corresponding author: f0925465866@gmail.com

Received: June 26, 2026	Accepted: July 27, 2026	Published: August 21, 2026

Copyright: © 2026 by the authors. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Abstract:
This study investigates produced water associated with oil production in the Sarir Field, located in the Sirte Basin, Libya. It aims to evaluate the physicochemical characteristics of produced water and to determine how these characteristics influence treatment options and the potential for safe reuse. Produced water is among the largest liquid waste streams generated by petroleum operations, occurring in substantial volumes that vary among wells and fields according to reservoir properties, geological formations, and formation-water composition.
The study examines selected physicochemical parameters, including specific gravity, salinity, total dissolved solids (TDS), cation and anion concentrations, as well as selected volumetric and thermal properties, such as thermal compressibility, formation volume factor, and viscosity. The findings indicate noticeable variations among the investigated wells in several measured parameters, reflecting differences in the geological and chemical conditions of the associated water. The results also reveal elevated levels of salinity, total dissolved solids, and ionic constituents in comparison with typical seawater characteristics.
A comparison using Stiff diagrams showed similarities among certain wells and differences among others within the studied fields. The study emphasizes the need to apply appropriate treatment technologies before produced water is discharged or reused. Such treatment can minimize environmental impacts and, once the required treatment standards are achieved, enable produced water to be considered a potential resource for selected applications in accordance with applicable environmental guidelines.

Keywords: Produced water; Formation water; Sarir Field; Oil wells; Physicochemical properties; Stiff diagrams; Water treatment.

الملخص
تتناول هذه الدراسة المياه المنتجة المصاحبة للنفط في حقل السرير الواقع ضمن حوض سرت، وتهدف إلى تقييم خصائصها الفيزيائية والكيميائية، وبيان انعكاس تلك الخصائص على خيارات المعالجة وإمكانات إعادة الاستخدام الآمن. وتكتسب المياه

المنتجة أهمية خاصة لكونها من أكبر المخلفات السائلة المتولدة في العمليات النفطية، إذ تُنتج بكميات كبيرة تتباين بين الآبار والحقول تبعًا لخصائص المكمن والتكوينات الجيولوجية وتركيب المياه الطبقية.
اعتمدت الدراسة على تحليل عدد من المؤشرات الفيزيائية والكيميائية، شملت الكثافة النوعية، والملوحة، والمواد الصلبة الذائبة الكلية، وتركيزات الأيونات الموجبة والسالبة، إلى جانب بعض الخصائص الحجمية والحرارية، مثل معامل الانضغاط الحراري ومعامل الحجم الطبقي واللزوجة. وأظهرت النتائج وجود تباين ملحوظ بين آبار الدراسة في عدد من الخصائص المقاسة، وهو ما يعكس اختلاف الظروف الجيولوجية والكيميائية للمياه المصاحبة. كما بينت النتائج ارتفاع بعض مؤشرات الملوحة والمواد الصلبة الذائبة والأيونات مقارنةً بالقيم المميزة لمياه البحر.
وأظهرت مقارنة النتائج بمخططات ستيف وجود تقارب في خصائص بعض الآبار واختلاف في أخرى ضمن الحقول المدروسة. وتؤكد الدراسة ضرورة تطبيق تقنيات معالجة مناسبة قبل تصريف هذه المياه أو إعادة استخدامها، بما يضمن الحد من آثارها البيئية وتحويلها، عند تحقيق متطلبات المعالجة، إلى مورد يمكن الاستفادة منه في استخدامات محددة وفق الضوابط البيئية المعتمدة.

الكلمات المفتاحية: المياه المنتجة، المياه الطبقية، حقل السرير، آبار النفط، الخصائص الفيزيائية والكيميائية، مخططات ستيف، معالجة المياه.

المقدمة:

تُعدّ المياه المصاحبة لإنتاج النفط والغاز من أهم القضايا التشغيلية والبيئية التي تواجه الصناعة النفطية، نظرًا إلى الكميات الكبيرة التي تُنتج معها وإلى تنوع خصائصها الفيزيائية والكيميائية. فوجود المياه في المكامن النفطية يُعد أمرًا طبيعيًا؛ إذ ترتبط تراكمات النفط والغاز غالبًا بمياه طبقية توجد داخل المسام الصخرية أو أسفل مناطق تجمع الهيدروكربونات. ولذلك، فإن إنتاج النفط من الآبار يصاحبه في معظم الحالات إنتاج كميات متفاوتة من المياه، وقد تزداد هذه الكميات مع مرور الزمن وانخفاض إنتاجية الآبار النفطية وتتباين خصائص المياه المصاحبة بين الآبار والحقول النفطية تبعًا لطبيعة التكوينات الجيولوجية، وخصائص المكمن، وضغطه ودرجة حرارته، وتركيب المياه الطبقية، ونظام الإنتاج المتبع. وتشمل هذه الخصائص الكثافة، واللزوجة، والملوحة، والمواد الصلبة الذائبة الكلية، ودرجة الحموضة، وتركيزات الأيونات الموجبة والسالبة، إضافة إلى بعض الخصائص الحجمية والحرارية. وتمثل معرفة هذه الخصائص أساسًا علميًا مهمًا لفهم سلوك المياه داخل المكمن، وتحديد تأثيرها في كفاءة الإنتاج، واتخاذ الإجراءات المناسبة للحد من المشكلات الناتجة عنها وتكتسب دراسة المياه المصاحبة أهمية كبيرة في مجال هندسة المكامن والإنتاج النفطي، إذ تساعد على تقدير حجم المياه المنتجة ومعدلات تدفقها واتجاه حركتها، كما تسهم في تشخيص مشكلات التشغيل، مثل مخروط الماء، والتآكل، وترسب الأملاح، وانسداد المسام، وتدهور كفاءة معدات الإنتاج والمعالجة. كذلك، تُستخدم بيانات التحليل الكيميائي للمياه في التعرف إلى مصادر المياه الداخلة إلى المكمن، وتقييم الاتصال بين الطبقات الحاملة للنفط، والتحقق من فعالية عمليات عزل المياه أو إغلاقها في الآبار المنتجة وفي عمليات الحقن المائي، تبرز أهمية التحليل الفيزيائي والكيميائي للمياه بصورة أكبر؛ إذ يساعد في تقييم مدى توافق مياه الحقن مع مياه المكمن والصخور الخازنة. ويحدّ هذا التقييم من احتمالية حدوث تفاعلات كيميائية قد تؤدي إلى تكوّن الرواسب أو انخفاض النفاذية أو انسداد المسامات، بما يؤثر سلبًا في كفاءة عملية الحقن والإنتاج. ومن ثم، فإن اختيار مياه مناسبة للحقن أو معالجتها قبل استخدامها يمثل شرطًا أساسيًا للحفاظ على سلامة المكمن واستدامة الإنتاج وتُعد المياه المنتجة من أكبر تيارات النفايات السائلة الناتجة عن عمليات النفط والغاز من حيث الحجم، وقد يؤدي تصريفها دون معالجة إلى أضرار بيئية محتملة، خاصة إذا احتوت على تراكيز مرتفعة من الأملاح والمواد الصلبة الذائبة وبقايا الزيوت والشحوم وبعض المركبات العضوية أو العناصر المعدنية. لذلك، أصبح من الضروري تطوير أساليب فعالة لإدارة هذه المياه ومعالجتها، سواء بغرض إعادة حقنها في المكمن، أو إعادة استخدامها في أغراض صناعية وزراعية محددة بعد استيفاء المعايير اللازمة، أو التخلص منها بطريقة آمنة تتوافق مع الضوابط البيئية المعتمدة، وفي ضوء ذلك، تتناول هذه الدراسة تقييم الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه المنتجة المصاحبة للنفط في حقل السرير النفطي، بهدف تحديد طبيعتها ومدى التباين بين آبار الدراسة، وتحليل أهم المؤشرات المؤثرة في عمليات الإنتاج والمعالجة. كما تسعى الدراسة

إلى إبراز أهمية معالجة هذه المياه وإعادة الاستفادة منها بوصفها موردًا مائيًا يمكن استثماره، بعد الوصول إلى مستويات المعالجة المناسبة التي تضمن حماية البيئة وتحقيق الاستخدام الآمن والمستدام.

شكل1: التخلص من المياه المنتجة في أحواض معزولة

تتباين المياه المنتجة المصاحبة للعمليات النفطية تباينًا واضحًا من حيث الكمية والنوعية والتركيب الكيميائي، الأمر الذي ينعكس مباشرةً على أساليب إدارتها ومعالجتها وإمكانات الاستفادة منها. وعلى الرغم من أن هذه المياه تُصنَّف في كثير من الحالات ضمن المخلفات الناتجة عن إنتاج النفط والغاز، فإن التطور في تقنيات المعالجة وإعادة الاستخدام أسهم في تغيير النظرة إليها؛ إذ يمكن، بعد معالجتها وفق المعايير المطلوبة، الاستفادة منها في بعض التطبيقات الصناعية أو في عمليات الحقن وإدارة المكامن، بما يجعلها موردًا ذا قيمة اقتصادية محتملة ومع ذلك، فإن التعامل مع المياه المنتجة يترتب عليه أعباء تشغيلية ومالية تشمل تكاليف الجمع والنقل والمعالجة والتخزين والتخلص الآمن أو إعادة الاستخدام. وتزداد أهمية الإدارة الكفؤة لهذه المياه لأن ارتفاع تكاليفها أو عدم كفاية وسائل معالجتها قد يؤثران سلبًا في الجدوى الاقتصادية للمشروع النفطي، وقد يحدّان من استمرار إنتاج بعض الآبار أو من إمكانية استغلال جزء من الاحتياطيات النفطية القابلة للاستخراج.

كما يجب أن تراعي عمليات معالجة المياه المنتجة المتطلبات البيئية والتنظيمية المعتمدة، إذ إن التصريف غير المنضبط أو المعالجة غير الكافية قد يسببان تلوثًا للتربة أو المياه السطحية والجوفية، ويعرضان المشغّل للمساءلة القانونية والإجراءات الرقابية. لذلك، تعتمد منهجية معالجة المياه المنتجة على مجموعة من العوامل، أهمها التركيب الفيزيائي والكيميائي للمياه، وحجم الإنتاج، وموقع الحقل، وطبيعة الاستخدام أو طريقة التخلص المستهدفة، ومدى توافر الموارد والتقنيات المناسبة.

مشكلة الدراسة

تتمثل مشكلة الدراسة في تزايد كميات المياه المنتجة المصاحبة لاستخراج النفط في الحقول النفطية، وما يترتب على ذلك من تحديات فنية واقتصادية وبيئية. فعلى الرغم من أن هذه المياه تُنتج بكميات كبيرة قد تصل إلى ملايين البراميل، فإن الاستفادة منها لا تزال محدودة في كثير من الحالات، حيث تُعامل بوصفها مخلفات سائلة تتطلب التخلص منها بدلًا من النظر إليها كمورد يمكن استثماره بعد المعالجة المناسبة.

وتكمن خطورة المشكلة في أن التخلص من المياه المنتجة دون معالجة كافية قد يسبب آثارًا سلبية في البيئة المحيطة، نتيجة احتوائها على نسب مرتفعة من الأملاح والمواد الصلبة الذائبة وبقايا الزيوت والشحوم وبعض المركبات والعناصر الأخرى. كما أن عدم إدارتها بصورة علمية يزيد من الأعباء التشغيلية والتكاليف الاقتصادية على الشركات النفطية، ويجعل التخلص منها أحد أبرز المشكلات المصاحبة لعمليات إنتاج النفط.

ومن هنا، تبرز الحاجة إلى دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه المنتجة، وتحديد مدى ملاءمة التقنيات المتاحة لمعالجتها، بما يسمح بإعادة تدويرها أو إعادة استخدامها في أغراض مناسبة وفق المتطلبات البيئية والفنية المعتمدة. وتسعى الدراسة إلى التعامل مع المياه المنتجة بوصفها موردًا طبيعيًا محتملًا يمكن الاستفادة منه عند تطبيق المعالجة الملائمة، بدلًا من بقائها موردًا مهدورًا يمثل عبئًا بيئيًا وتشغيليًا.

موقع الدراسة

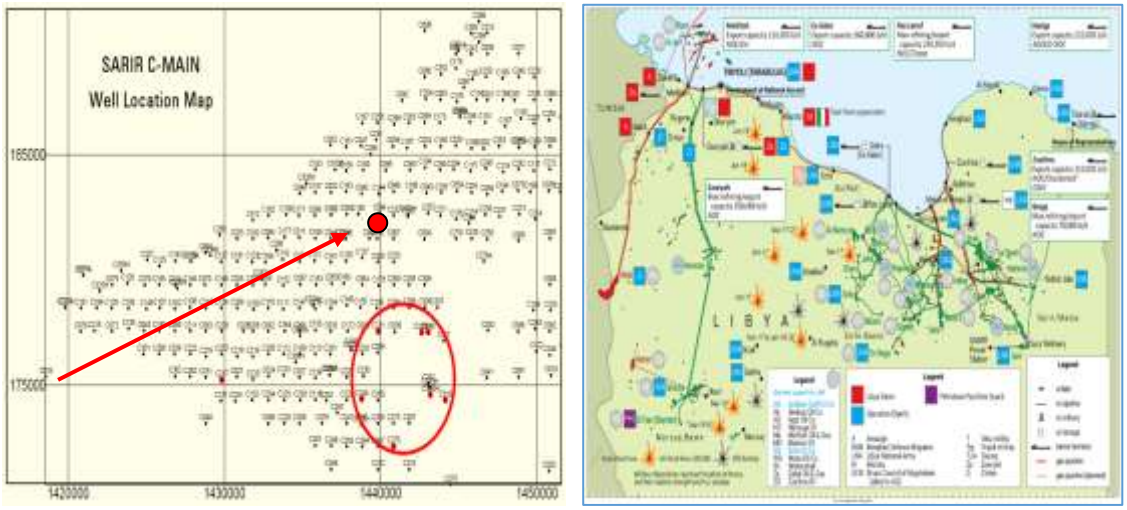
أُجريت هذه الدراسة على المياه المنتجة المصاحبة لإنتاج النفط في حقل السرير النفطي، الواقع ضمن حوض سرت في ليبيا. ويُعد الحقل من الحقول النفطية المهمة، وتنتج آباره كميات متفاوتة من المياه المصاحبة للنفط، الأمر الذي يستدعي دراسة خصائصها وتقييم أثرها في عمليات الإنتاج والمعالجة والإدارة البيئية. ويوضح الشكل (2) الموقع الجغرافي لحقل السرير النفطي محل الدراسة.

أهداف الدراسة

تهدف هذه الدراسة إلى توصيف الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه المنتجة في حقل السرير، من خلال تحديد مكوناتها الكيميائية وتراكيزها ودرجة ملوحتها وكميات إنتاجها، بما يوفر قاعدة بيانات تساعد في فهم طبيعة هذه المياه وسلوكها داخل منظومة الإنتاج النفطي.

كما تهدف إلى تحديد المكونات التي قد تتجاوز متطلبات جودة المياه اللازمة للاستخدامات المفيدة، والكشف عن العناصر أو المركبات التي يمكن أن تمثل تحديًا أمام عمليات المعالجة أو إعادة الاستخدام. وتسعى الدراسة كذلك إلى تقييم مدى ملاءمة تقنيات معالجة المياه المنتجة، بما يشمل تقنيات إزالة المواد العضوية والجسيمات العالقة، وتقنيات التحلية، وإدارة المياه المالحة، وعمليات المعالجة اللاحقة، وذلك في ضوء الخصائص الفعلية للمياه محل الدراسة.

وتهدف الدراسة أيضًا إلى تحديد بعض المعاملات الهندسية المؤثرة في سلوك المياه المنتجة، مثل الكثافة واللزوجة والانضغاطية ومعامل الحجم الطبقي، وبيان أهميتها في دعم الدراسات المكمنية وعمليات الإنتاج والمعالجة واتخاذ القرارات الفنية المناسبة.



شكل 2: خريطة توضح الحقول النفطية ومواقع حقول الدراسة (AGOCO, 2018)

أهمية الدراسة

تكتسب هذه الدراسة أهميتها من ارتباطها بإدارة المياه المنتجة المصاحبة للعمليات النفطية، والتي تمثل أحد أكبر المخرجات السائلة في الحقول النفطية من حيث الحجم. وتبرز أهمية الدراسة في ضرورة التعامل مع هذه المياه وفق أسس علمية وفنية تضمن الحد من آثارها السلبية في البيئة، خاصةً عند احتوائها على تراكيز مرتفعة من الأملاح والمواد الصلبة الذائبة وبقايا الزيوت والمواد العضوية والعناصر المعدنية.

كما تسهم الدراسة في التأكيد على أهمية معالجة المياه المنتجة قبل تصريفها، بما يحد من احتمالية تلوث التربة والمياه الجوفية والمسطحات المائية المحيطة. ولا تقتصر أهمية المعالجة على الجانب البيئي فقط، بل تمتد إلى الجانب الاقتصادي؛ إذ يمكن النظر إلى المياه المنتجة بوصفها موردًا يمكن الاستفادة منه بعد الوصول بها إلى مستويات المعالجة المناسبة.

وتتمثل أهمية الدراسة كذلك في إبراز إمكان إعادة تدوير المياه المنتجة واستخدامها في بعض الأغراض المناسبة، مثل الحقن في المكامن النفطية، أو الاستخدامات الصناعية والخدمية التي تتوافق مع خصائص المياه المعالجة. ومن ثم، فإن

الاستفادة من هذه المياه يمكن أن تسهم في خفض الاعتماد على مصادر المياه العذبة، وتقليل تكاليف التخلص منها، ودعم توجهات التنمية المستدامة في قطاع النفط.
وتوفر الدراسة أيضًا معلومات علمية عن خصائص المياه المنتجة في حقل السرير، بما يساعد المختصين على اختيار أساليب المعالجة والإدارة المناسبة، وتقليل المشكلات التشغيلية المرتبطة بالتآكل والترسبات وانسداد المعدات والمنشآت النفطية.

منهجية الدراسة

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، من خلال جمع عينات من المياه المنتجة المصاحبة لإنتاج النفط في حقل السرير خلال فترة الدراسة. وقد جُمعت العينات بصورة دورية من مواقع الإنتاج المحددة، مع مراعاة الإجراءات اللازمة لحفظ العينات ونقلها وتجهيزها للتحليل، بما يضمن الحصول على نتائج تعكس خصائص المياه المنتجة في مواقع الدراسة.
وأُجريت الفحوصات والتحاليل في المختبرات الميدانية والمختبر المركزي التابع للحقول النفطية، باستخدام الأجهزة والتقنيات التحليلية الملائمة لتحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه. وشملت التحاليل تقدير تراكيز عدد من العناصر والمكونات الكيميائية باستخدام تقنية الامتصاص الذري، وتقنية قياس شدة اللهب، إلى جانب الفحوصات المختبرية الأخرى اللازمة لتقييم نوعية المياه.
وتناولت الدراسة مجموعة من الخصائص الفيزيائية للمياه المنتجة، تمثلت في درجة الحموضة، والكثافة النوعية، واللزوجة، والتوصيلية الكهربائية. وتُعد هذه الخصائص من المؤشرات المهمة لفهم سلوك المياه المصاحبة أثناء عمليات الإنتاج والنقل والمعالجة، ولتقدير مستوى الملوحة وتأثيرها المحتمل في المعدات والمنشآت النفطية.
كما شملت الدراسة تقدير الخصائص الكيميائية للمياه، مثل العسرة الكلية، والمواد الصلبة الذائبة الكلية، وتركيزات الكالسيوم والمغنيسيوم والصوديوم والبوتاسيوم والأمونيا والكبريتات، إلى جانب المكونات الأخرى ذات الصلة بطبيعة المياه المنتجة. وبعد استكمال التحاليل، جرى تنظيم النتائج ومقارنتها بين الآبار والعينات المدروسة لتحديد أوجه التباين في الخصائص، وتقييم العناصر التي قد تمثل تحديًا أمام المعالجة أو إعادة الاستخدام.

الدراسات السابقة

أوضحت الدراسات السابقة أن المياه المنتجة المصاحبة لاستخراج النفط والغاز تُعد من أكبر المخرجات السائلة الناتجة عن الصناعة النفطية من حيث الحجم. وقد بيّن دو وزملاؤه أن تزايد نضج الحقول النفطية يؤدي إلى ارتفاع كميات المياه المصاحبة المنتجة، نتيجة زحف المياه داخل المكمن أو استخدام الحقن المائي للمحافظة على الضغط وتحسين الاستخلاص النفطي.(Du et al., 2005) وأشار خاتيب وفيربيك إلى أن إنتاج المياه المصاحبة يمثل تحديًا متزايدًا في صناعة النفط، بسبب ارتفاع نسبة المياه إلى النفط في كثير من الحقول الناضجة، وما يترتب على ذلك من أعباء تشغيلية واقتصادية وبيئية .(Khatib & Verbeek, 2003) كما أوضح غيرا وزملاؤه أن بعض آبار النفط يمكن أن تنتج عدة براميل من المياه مقابل كل برميل من النفط، وأن هذه النسبة قد ترتفع بصورة ملحوظة مع تقدم العمر الإنتاجي للآبار.(Guerra et al., 2011)
وبيّن فيل وزملاؤه أن المياه المنتجة تمثل نسبة مرتفعة من إجمالي المخلفات السائلة الناتجة عن عمليات النفط والغاز، الأمر الذي يفسر الاهتمام المتزايد بإدارة هذه المياه ومعالجتها وإعادة استخدامها أو إعادة حقنها في المكامن النفطية .(Veil et al., 2004, 2008, 2009)كما أشاروا إلى أن مصادر المياه المنتجة قد تشمل المياه المتدفقة من أعلى أو أسفل أو داخل المنطقة الحاملة للهيدروكربونات، إضافة إلى المياه الناتجة عن السوائل المحقونة والمواد المضافة المستخدمة خلال أنشطة الإنتاج.(Veil et al., 2004)
وتؤكد الدراسات أن خصائص المياه المنتجة تختلف اختلافًا كبيرًا تبعًا للموقع الجغرافي للحقل، وطبيعة التكوينات الجيولوجية، والخصائص الجيوكيميائية للمك للمكمن، ونوع الهيدروكربونات المنتجة، ونوع البئر، سواء كان منتجًا للنفط أو الغاز (Veil et al., 2004; Joel et al., 2010; Jacobs et al., 1992) وقد تتغير كمية المياه المنتجة وخصائصها خلال مراحل عمر البئر، الأمر الذي يتطلب إجراء فحوصات دورية لتحديد الأسلوب المناسب لمعالجتها أو إدارتها.(Joel et al., 2010) وتتميز المياه المنتجة عادةً بارتفاع درجة الملوحة واحتوائها على مواد صلبة ذائبة

ومواد عالقة وبقايا هيدروكربونية ومركبات عضوية وعناصر معدنية، إلى جانب بعض المواد الكيميائية المستخدمة في عمليات استخراج النفط والغاز. وقد تحتوي كذلك على مواد مشعة طبيعية، وهو ما يزيد من أهمية معالجتها قبل تصريفها أو إعادة استخدامها.(Guerra et al., 2011; Al-Haleem et al., 2010; Jacobs et al., 1992) كما أوضحت بعض الدراسات أن تركيزات المعادن والأملاح في المياه الناتجة عن آبار الغاز قد تكون أعلى من تلك الموجودة في المياه المصاحبة لآبار النفط، ويرتبط ذلك بطبيعة التكوين الجيولوجي وخصائص المكمن ونوع النشاط الإنتاجي .(Jacobs et al., 1992; Al-Haleem et al., 2010) وبناءً على ذلك، لا يمكن اعتماد طريقة موحدة لمعالجة جميع أنواع المياه المنتجة، بل ينبغي اختيار تقنية المعالجة وفق خصائص المياه وتركيز مكوناتها وحجم الإنتاج والاستخدام المستهدف والمتطلبات البيئية المعتمدة.

أولت دراسات عديدة اهتمامًا واسعًا بدراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه المنتجة المصاحبة للنفط والغاز، لما قد تسببه من آثار بيئية عند تصريفها دون معالجة مناسبة. وقد أشار نيف إلى أن المياه المنتجة قد تحتوي على بقايا نفطية تصل إلى نحو 48 جزءًا في المليون، إضافة إلى احتوائها على تراكيز متفاوتة من المواد العضوية والأملاح الذائبة .(Neff, 1987) كما بينت الدراسات أن غالبية المياه المنتجة تتميز بملوحة تفوق ملوحة مياه البحر، وهو ما يجعلها غير ملائمة للاستخدام المباشر ويزيد من احتمالية تأثيرها السلبي في البيئة والكائنات الحية.(Neff, 1987; Joel et al., 2010)

وأوضح مارتل فالس وزملاؤه أن المياه المنتجة قد تحتوي على تراكيز مرتفعة من أيونات الكلوريد، قد تتراوح بين 150 و180 غرامًا لكل لتر، في حين يبلغ متوسط تركيز الأملاح في مياه البحر نحو 35 غرامًا لكل لتر-(Martel-Valles et al., 2013). ويؤدي الارتفاع الكبير في مستويات الملوحة إلى زيادة سمية المياه بالنسبة إلى كثير من الكائنات الحية، كما يحد من إمكان إعادة استخدامها دون تطبيق تقنيات معالجة مناسبة.

وقد تحتوي المياه المنتجة كذلك على إضافات كيميائية تُستخدم في عمليات الحفر والإنتاج، مثل المواد المانعة للتآكل، والمبيدات الحيوية، والمواد المساعدة على فصل النفط عن الماء، وغيرها من المركبات المستخدمة لتحسين كفاءة العمليات النفطية. وأشار كلارك وفيل إلى أن وجود هذه المواد في المياه المنتجة يزيد من تعقيد معالجتها وإدارتها البيئية .(Clark & Veil, 2009) كما أوضح جويل وزملاؤه أن بعض هذه المواد قد يؤثر في كفاءة فصل النفط عن الماء، ودرجة السمية، وقابلية المواد للتحلل الحيوي، ومدى بقائها أو انتشارها في البيئة المحيطة(Joel et al., 2010) وأكد سميث وزملاؤه وجود تأثيرات بيئية سلبية للمياه المنتجة في البيئة الإندونيسية، بما يبرز أهمية الالتزام بالمعالجة المناسبة قبل التصريف أو إعادة الاستخدام(Smith et al., 1998) كما أشار أوبوه وزملاؤه إلى أن المياه المنتجة في بعض حقول النفط احتوت على تراكيز مرتفعة من الأيونات المعدنية وإجمالي الهيدروكربونات، وهي مكونات قد تشكل خطرًا على البيئة إذا لم تُعالج بصورة فعالة.(Oboh et al., 2009)

ودرس جويل وزملاؤه مكونات المياه الطبقية، وخلصوا إلى أن المعرفة الدقيقة بتركيب المياه المنتجة تعد ضرورية للالتزام بالمتطلبات التنظيمية، وتحديد أساليب الإدارة أو المعالجة أو التخلص الملائمة. كما أكدوا أن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه المنتجة تتباين بدرجة كبيرة بحسب الموقع الجغرافي للحقل النفطي وطبيعة المكمن ونوع الإنتاج وظروف التشغيل(Joel et al., 2010) وفي سياق متصل، أشار فيل وكوين إلى أن إنتاج النفط الثقيل يتجه إلى الزيادة لتعويض التراجع النسبي في إمدادات النفط الخام الخفيف. ويتطلب إنتاج النفط الثقيل كميات مناسبة من المياه والطاقة، لذلك ينبغي للمشغلين تقييم مدى توافر المياه والطاقة عند التخطيط للمشروعات النفطية الجديدة، مع مراعاة أثر ذلك في إدارة المياه المنتجة والتكاليف التشغيلية للمشروع.(Veil & Quinn, 2008)

كما قدم فيل وكلارك دراسة تفصيلية عن حجم المياه المنتجة في الولايات المتحدة، وأوضحت نتائجها أن تقديرات عام 2007 كانت أكثر شمولًا مقارنة بالتقديرات الوطنية السابقة، لاعتمادها على منهجية أكثر تفصيلًا في جمع البيانات وتحليلها. وبينت الدراسة أن جزءًا كبيرًا من المياه المنتجة في الحقول البرية يُدار عن طريق الحقن في التكوينات الجيولوجية، سواء بهدف تعزيز استخلاص النفط أو لأغراض التخلص الآمن منها، حيث أشارت إلى أن نسبة كبيرة من المياه المنتجة تُحقن في باطن الأرض ضمن إجراءات تنظيمية معتمدة(Veil & Clark, 2009)

وتتجه إدارة المياه المنتجة عمومًا إلى ثلاثة مسارات رئيسة تتمثل في تقليل كمية المياه المنتجة قدر الإمكان، وإعادة تدويرها أو إعادة استخدامها بعد المعالجة، ثم التخلص منها عند تعذر الاستفادة منها ويُعد تقليل كميات المياه المنتجة هدفًا مهمًا في تصميم وتشغيل الآبار والمنشآت النفطية، إلا أن الحاجة إلى معالجة جزء من هذه المياه أو التخلص منه تظل

قائمة. وتُعاد حقن كميات كبيرة من المياه المنتجة في التكوينات الجوفية، إما للمساعدة في تعزيز إنتاج النفط والغاز أو للتخلص منها وفق التصاريح والضوابط التنظيمية المعمول بها. أما في الحقول البحرية، فقد يتم تصريف المياه المعالجة إلى البحر بعد استيفاء المتطلبات البيئية المحددة. وقد أسهمت جهود البحث والتطوير في توفير عدد من الحلول والتقنيات التي يمكن تكييفها بحسب خصائص المياه وظروف كل حقل نفطي (Technology Subgroup of the Operations & Environment Task Group, 2011). وأشارت دراسة مكتب المساءلة الحكومية في الولايات المتحدة إلى أن عمليات إنتاج النفط والغاز تنتج كميات كبيرة من المياه بصورة يومية. وقدرت إحدى الدراسات أن إنتاج المياه في الحقول البرية بلغ عشرات الملايين من البراميل يوميًا، مع الإشارة إلى أن هذه التقديرات قد لا تعكس الحجم الفعلي بصورة كاملة بسبب محدودية البيانات المتاحة في بعض المناطق (United States Government Accountability Office, 2012). كما أكدت الدراسة أن كمية المياه المنتجة وخصائصها تختلف اختلافًا واسعًا من بئر إلى آخر، تبعًا لنوع الهيدروكربون المنتج، والموقع الجغرافي للبئر، وطريقة الإنتاج المستخدمة، وتبين الدراسات أن آبار الغاز قد تنتج كميات كبيرة من المياه في المراحل المبكرة من الإنتاج، في حين قد تنتج آبار النفط كميات أقل في البداية ثم تزداد نسبة المياه تدريجيًا مع تقدم عمر البئر. كما أن جودة المياه المنتجة غالبًا ما تكون منخفضة بسبب ارتفاع ملوحتها واحتوائها على مواد ذائبة وعالقة ومركبات أخرى، ولذلك لا يمكن استخدامها في أغراض أخرى دون معالجة مسبقة. إلا أن درجة الجودة والتركيب الكيميائي للمياه يختلفان باختلاف خصائص الحقل والمكمن ونوع الإنتاج والظروف التشغيلية.(United States Government Accountability Office, 2012)

مكونات المياه المصاحبة لإنتاج النفط والغاز

تتكون المياه المصاحبة لإنتاج النفط والغاز من خليط معقد من المواد العضوية وغير العضوية، وتتباين مكوناتها وتراكيزها بحسب طبيعة المكمن والعمليات الإنتاجية والمواد المضافة المستخدمة في الحقل. وتشمل المكونات العضوية بقايا النفط والزيوت والشحوم، والتي قد توجد على هيئة قطرات مشتتة في الماء أو مركبات مذابة. كما قد تحتوي المياه على مركبات هيدروكربونية ذائبة، تتفاوت في نوعها وتركيزها وفق خصائص النفط المنتج وظروف الفصل والمعالجة.

وتتضمن المكونات غير العضوية الأملاح الذائبة والمواد الصلبة والأيونات المختلفة، مثل الصوديوم والكالسيوم والمغنيسيوم والبوتاسيوم والكلوريد والكبريتات والبيكربونات. وقد تؤدي التراكيز المرتفعة لهذه المكونات إلى زيادة ملوحة المياه وعسرتها، وتسبب مشكلات تشغيلية، مثل التآكل والترسبات وانسداد الأنابيب والمعدات. لذلك، فإن تحديد مكونات المياه المصاحبة وتركيزاتها يمثل خطوة أساسية لاختيار تقنية المعالجة المناسبة، وتقييم مدى إمكان إعادة استخدامها أو التخلص منها بصورة آمنة.

الزيت المشتت

يُعد الزيت المشتت من الملوثات المهمة في المياه المنتجة، نظرًا إلى ما قد يسببه من آثار سلبية في البيئة المائية عند تصريفه دون معالجة كافية. ويتكون الزيت المشتت من قطرات نفطية دقيقة معلقة في الطور المائي، وقد تبقى هذه القطرات مستقرة نسبيًا في المياه نتيجة صغر حجمها أو وجود مواد تساعد على تكوين المستحلبات.

وعند وصول الزيت المشتت إلى البيئة البحرية، قد تترسب بعض قطراته في قاع البحر وتختلط بالرواسب، مما قد يؤدي إلى تراكم الهيدروكربونات والتأثير في الكائنات القاعية. كما قد ترتفع قطرات أخرى إلى سطح الماء وتنتشر مكوّنة طبقة لامعة، وهو ما يمكن أن يحد من تبادل الأكسجين بين الهواء والماء ويزيد من الطلب الحيوي على الأكسجين في منطقة التصريف أو الخلط.(Stephenson, 1992)

وتتأثر كمية الزيت المشتت في المياه المنتجة بعدة عوامل، من أهمها كثافة النفط، والتوتر البيني بين الزيت والماء، ونوع المواد الكيميائية المستخدمة في المعالجة وكفاءتها، وكفاءة معدات الفصل الفيزيائي. وقد تسهم بعض المواد العضوية الذائبة والمواد الكيميائية المضافة في خفض التوتر البيني بين الطورين، الأمر الذي يؤدي إلى تكوين قطرات نفطية أصغر وأكثر صعوبة في الفصل.

كما تؤثر حركة المياه الناتجة عن المد والجزر والتيارات والأمواج والاختلاط الرأسي في انتقال قطرات الزيت وتوزيعها وتراكمها. ولأن حجم بعض القطرات المشتتة قد يتراوح بين أربعة وستة ميكرومترات، في حين أن أنظمة

المعالجة التقليدية قد لا تتمكن من إزالة القطرات الدقيقة جدًا بكفاءة، فإن وجود هذه القطرات قد يشكل تحديًا أمام عمليات معالجة المياه المنتجة.(Bansal & Caudle, 1999)

المكونات العضوية الذائبة

تحتوي المياه المنتجة على عدد من المركبات العضوية الذائبة التي تنتقل من النفط الخام إلى الطور المائي أثناء عمليات الإنتاج والفصل. وقد تزداد قابلية ذوبان بعض المركبات العضوية في المياه تبعًا لطبيعة النفط الخام وخصائصه، ولا سيما إذا كان النفط غنيًا بالمكونات القطبية. كما تتأثر ذوبانية هذه المركبات بدرجة الحرارة ودرجة الحموضة وظروف الضغط داخل المكمن وفي أثناء الإنتاج(McFarlane et al., 2002) وتشمل المكونات العضوية الذائبة الأحماض العضوية، والمركبات العطرية متعددة الحلقات، والفينولات، والمركبات المتطايرة، وغيرها من الهيدروكربونات الذائبة. وقد تسهم هذه المركبات في زيادة سمية المياه المنتجة، خاصةً عندما تتواجد مجتمعة؛ إذ قد يؤدي التفاعل بين مكوناتها إلى تأثير تراكمي، حتى وإن كانت سمية كل مركب منفرد محدودة عند تركيزه الموجود في المياه (Glickman, 1998) وتتطلب إدارة هذه المركبات فهمًا أعمق للعمليات الكيميائية المؤثرة في تكوينها وانتقالها ودرجة سميتها وقابليتها للتحلل. وقد ركزت بعض الجهود البحثية على توصيف المواد العضوية الذائبة في المياه المنتجة وتقييمها، بهدف تطوير وسائل تحد من إنتاجها أو تخفض تركيزاتها قبل تصريف المياه أو إعادة استخدامها (McFarlane et al., 2002).

المواد الصلبة المصاحبة للمياه المنتجة

قد تحتوي المياه المنتجة على مواد صلبة مترسبة أو عالقة، مثل الرمل والطمي والطين والكربونات ومنتجات التآكل والجسيمات الدقيقة الناتجة عن التكوين الجيولوجي أو عن عمليات حفر الآبار وإنتاج النفط. وتختلف كمية هذه المواد وطبيعتها باختلاف خصائص المكمن، ومعدل الجريان، وحالة معدات الإنتاج، وعمليات المعالجة المطبقة.

وقد يؤدي تراكم المواد الصلبة إلى حدوث انسداد في الآبار أو خطوط الجريان أو وحدات معالجة المياه، كما يمكن أن يخفض كفاءة معدات فصل الزيت عن الماء. فالجزئيات الدقيقة قد ترتبط بقطرات الزيت أو تثبتها في الماء، مما يزيد من صعوبة الفصل ويرفع تركيز الزيت والشحوم في المياه المصروفة.(Cline, 1998)

كما قد تتجمع هذه المواد داخل معدات الإنتاج والمعالجة مكوّنة حمأة زيتية تتطلب الإزالة والتخلص الدوريين ولذلك، فإن التحكم في المواد الصلبة يمثل خطوة أساسية في تحسين كفاءة معالجة المياه المنتجة وحماية المعدات من الانسداد والتآكل.

القشور والترسبات المعدنية

تتكون القشور أو الترسبات المعدنية عندما تتفاعل الأيونات الذائبة في المياه المنتجة وتتجاوز حدود ذوبانها، خاصةً عند تغير الضغط ودرجة الحرارة ودرجة الحموضة أثناء انتقال المياه من المكمن إلى السطح كما قد تتكون القشور عند اختلاط مياه مختلفة التركيب، مثل اختلاط مياه المكمن بمياه الحقن.

ومن أكثر القشور شيوعًا كربونات الكالسيوم، وكبريتات الكالسيوم، وكبريتات الباريوم، وكبريتات السترونتيوم، وكبريتات الحديد. وتؤدي هذه الرواسب إلى تضييق أو انسداد خطوط الجريان والصمامات والمضخات والمعدات، وقد تسهم في تكوين الحمأة الزيتية أو المستحلبات التي يصعب فصلها.(Cline, 1998)

وتؤثر القشور سلبًا في كفاءة الإنتاج والمعالجة، إذ تزيد من تكاليف الصيانة وتقلل من كفاءة انتقال الموائع ولذلك، يتطلب الحد من تكونها إجراء تحاليل دورية للمياه واستخدام المعالجات المناسبة لمنع الترسب أو تقليل آثاره.

البكتيريا

قد تحتوي المياه المنتجة على أنواع مختلفة من البكتيريا التي تؤثر في عمليات الإنتاج والمعالجة. ويمكن لبعض هذه الكائنات الدقيقة أن تنمو داخل الأنابيب والخزانات والمعدات، فتسهم في تكوين أغشية حيوية أو رواسب قد تؤدي إلى انسداد خطوط الجريان وتقليل كفاءة معدات المعالجة.

كما قد تساعد بعض أنواع البكتيريا في تكوين مستحلبات ثابتة يصعب فصل الزيت عنها، مما يزيد من تعقيد معالجة المياه المنتجة. وتكتسب البكتيريا المختزلة للكبريتات أهمية خاصة؛ لأنها قد تنتج كبريتيد الهيدروجين، وهو غاز سام وقابل للتآكل، وقد يؤدي إلى تدهور معدات الإنتاج وخطوط الأنابيب وزيادة المخاطر التشغيلية.

لذلك، تستخدم في بعض العمليات النفطية مواد كيميائية مخصصة للحد من نمو البكتيريا، مع ضرورة اختيارها واستخدامها بعناية لتقليل تأثيراتها البيئية المحتملة.

المعادن

تختلف تراكيز المعادن في المياه المنتجة تبعًا لعمر المكمن وطبيعة تكويناته الجيولوجية وخصائص المياه الطبقية والعمليات التي تتعرض لها المياه أثناء الإنتاج. ولا توجد بالضرورة علاقة مباشرة بين تراكيز المعادن في النفط الخام وتراكيزها في المياه المنتجة، لأن انتقال المعادن وتوزعها يرتبطان بالتفاعلات الكيميائية وظروف الذوبان والترسيب.

ومن المعادن التي قد توجد في المياه المنتجة الزنك والرصاص والمنغنيز والحديد والباريوم. وقد تكون تراكيز بعض هذه المعادن أعلى من تراكيزها في مياه البحر. إلا أن تأثيرها البيئي يتأثر بدرجة التخفيف في الوسط المستقبِل، وبمدى ارتباط المعادن بالرواسب أو بقائها في صورة ذائبة قابلة للانتقال والامتصاص بواسطة الكائنات الحية (Stephenson, 1992).

وإلى جانب آثارها البيئية، قد تسبب المعادن مشكلات تشغيلية. فعلى سبيل المثال، يمكن أن يتفاعل الحديد الذائب مع الأكسجين عند تعرض المياه للهواء، مكوّنًا مواد صلبة قد تتراكم في معدات المعالجة أو تسهم في انسداد الطبقات عند إعادة حقن المياه داخل المكمن(Bansal & Caudle, 1999) كما قد تؤدي بعض المعادن إلى ظهور ترسبات أو تغيرات لونية في مواقع التصريف البرية.

درجة الحموضة

تُعد درجة الحموضة من المؤشرات المهمة في تقييم نوعية المياه المنتجة، لأنها تؤثر في ذوبانية العناصر والمعادن، وفي كفاءة عمليات الفصل والمعالجة، وفي قابلية تكوّن القشور والترسبات. وقد يؤدي انخفاض درجة الحموضة أو ارتفاعها بصورة كبيرة إلى اضطراب عملية فصل الزيت عن الماء، وإلى زيادة احتمالية تآكل المعدات وخطوط الأنابيب.

كما قد تتأثر درجة الحموضة بالمواد الكيميائية المستخدمة في المعالجة، خاصةً المواد الحمضية المخصصة لإزالة القشور أو تنظيف المعدات ولذلك، ينبغي قياسها بصورة دورية والتحكم فيها ضمن الحدود الملائمة قبل تصريف المياه أو إعادة استخدامها.

الكبريتات

تؤثر تركيزات الكبريتات في السلوك الكيميائي للمياه المنتجة، إذ تسهم في التحكم في ذوبانية عدد من العناصر، ولا سيما الكالسيوم والباريوم والسترونتيوم. وعند توافر هذه العناصر بتركيزات مناسبة، قد تتفاعل الكبريتات معها لتكوين رواسب معدنية صعبة الذوبان، مثل كبريتات الباريوم وكبريتات الكالسيوم.

وقد تؤدي هذه الرواسب إلى انسداد المعدات وخطوط الإنتاج وتقليل كفاءة عمليات الفصل والمعالجة لذلك، يعد قياس الكبريتات وتقييم تفاعلها مع الأيونات الأخرى أمرًا مهمًا عند اختيار طريقة المعالجة أو عند التخطيط لعمليات الحقن المائي.

المواد المشعة الطبيعية

قد تحتوي المياه المنتجة على مواد مشعة طبيعية مصدرها التكوينات الجيولوجية الحاملة للنفط والغاز. ويمكن أن تنتقل هذه المواد إلى السطح مع المياه المنتجة، كما قد تترسب في الأنابيب والخزانات والمعدات مع القشور والمواد الصلبة.

ومن أكثر العناصر المشعة الطبيعية شيوعًا في المياه المنتجة الراديوم بنظيريه الرئيسيين، وهما الراديوم مئتان وستة وعشرون والراديوم مئتان وثمانية وعشرون. وينشأ هذان العنصران من التحلل الطبيعي لليورانيوم والثوريوم الموجودين في بعض الصخور والطين داخل المكمن.

وتستلزم إدارة هذه المواد اتخاذ احتياطات خاصة عند التعامل مع الرواسب والقشور والحمأة الناتجة عن عمليات الإنتاج والمعالجة، لضمان حماية العاملين والبيئة والالتزام بالضوابط الصحية والبيئية.

الملوحة

تشير الملوحة إلى كمية الأملاح والمواد الصلبة الذائبة الموجودة في الماء، وتُعد من أهم المؤشرات المستخدمة في تقييم المياه الطبقية والمياه المنتجة. وتزداد الملوحة عادةً بارتفاع تركيز الأيونات الذائبة، مثل الصوديوم والكلوريد والكالسيوم والمغنيسيوم والكبريتات والبيكربونات.

وغالبًا ما تُقدّر الملوحة من خلال قياس التوصيلية الكهربائية للماء؛ لأن الأيونات الذائبة تساعد على توصيل التيار الكهربائي. كما يمكن قياس كمية المواد الصلبة الذائبة الكلية، والتي تُعبّر عادةً بوحدة مليغرام لكل لتر أو جزء في المليون، بينما تُقاس التوصيلية الكهربائية بوحدة الميكروسيمنز لكل سنتيمتر.(Horpestad et al., 2009)

وتُعد المياه ذات التوصيلية الكهربائية المرتفعة مياهًا مالحة، وقد يؤدي ارتفاع الملوحة إلى الحد من إمكان استخدامها دون معالجة. كما تؤثر الملوحة في اختيار تقنيات المعالجة، وفي احتمالية تكوّن القشور والتآكل، وفي مدى توافق المياه مع عمليات الحقن أو الاستخدامات الأخرى.

المواد الكيميائية المستخدمة في المعالجة

تُستخدم في عمليات إنتاج النفط ومعالجة المياه المنتجة مواد كيميائية متعددة لتحسين كفاءة التشغيل، مثل المواد المانعة لنمو البكتيريا، والمواد المانعة للتآكل، والمواد المساعدة على فصل المستحلبات، والمواد المانعة لتكوّن القشور. وعلى الرغم من أهمية هذه المواد في حماية المعدات وتحسين عمليات الفصل والمعالجة، فإن بعضًا منها قد يسهم في زيادة سمية المياه المنتجة.

وأوضح غليكمان أن بعض المواد الكيميائية قد تتفاعل أو تتحلل أثناء العمليات، مما يؤدي إلى خفض سميتها أو انتقال جزء منها إلى الطور النفطي بدلًا من بقائها في المياه المصروفة. إلا أن بعض المواد قد تظل ذات تأثير سام حتى عند تراكيز منخفضة جدًا، وهو ما يستوجب تقييمها عند دراسة أثر المياه المنتجة في البيئة المائية.(Glickman, 1998)

لذلك، ينبغي اختيار المواد الكيميائية المستخدمة في المعالجة وفق أسس فنية وبيئية، ومتابعة تراكيزها في المياه المنتجة، مع اعتماد تقنيات معالجة تقلل من بقائها في المياه قبل التصريف أو إعادة الاستخدام.

خواص الماء الطبقي

يوجد الماء الطبقي داخل المسام والفراغات الصخرية في المكامن النفطية والغازية، ويرتبط بوجود النفط والغاز داخل التكوينات الجيولوجية. وتكتسب معرفة خصائص هذا الماء أهمية كبيرة في الدراسات النفطية، لأنه يؤثر في سلوك الموائع داخل المكمن، وفي معدلات الإنتاج، وفي عمليات الحقن، وفي تصميم برامج معالجة المياه المصاحبة.

وتشمل أهم خصائص الماء الطبقي الكثافة واللزوجة والانضغاطية ومعامل الحجم والملوحة والتوصيلية الكهربائية ودرجة الحموضة وقابلية ذوبان الغاز. وتساعد معرفة هذه الخصائص في تفسير حركة المياه والنفط داخل المكمن، وتقدير حجم المياه المنتجة، والتنبؤ بالمشكلات المحتملة، مثل تكوّن القشور والتآكل وانسداد المسامات.

تركيب الماء الطبقي

تحتوي جميع المياه الطبقية على مواد صلبة ذائبة، ويأتي كلوريد الصوديوم في مقدمة الأملاح الموجودة فيها؛ ولذلك يشار إلى هذه المياه غالبًا بالمياه المالحة أو الأجاج. إلا أن المياه الطبقية لا تشبه مياه البحر بالضرورة من حيث تركيز الأملاح أو توزيع الأيونات، إذ تتأثر خصائصها بطبيعة التكوينات الجيولوجية وظروف المكمن والتفاعلات الكيميائية التي تحدث داخله.

وتتميز المياه الطبقية في كثير من المكامن بارتفاع تركيز المواد الصلبة الذائبة مقارنةً بمياه البحر وقد تتراوح تراكيز المواد الصلبة الذائبة فيها من مستويات منخفضة نسبيًا تصل إلى نحو مئتي جزء في المليون، إلى مستويات مرتفعة جدًا قد تقترب من ثلاثمائة ألف جزء في المليون في المياه شديدة الملوحة وفي المقابل، يبلغ متوسط تركيز المواد الصلبة الذائبة في مياه البحر نحو خمسة وثلاثين ألف جزء في المليون.

وتتضمن الأيونات الموجبة الشائعة في المياه الطبقية الصوديوم والكالسيوم والمغنيسيوم، وقد توجد كذلك أيونات البوتاسيوم والباريوم والليثيوم والحديد والسترونتيوم. أما الأيونات السالبة فتشمل الكلوريد والكبريتات والبيكربونات، وقد توجد بنسب متفاوتة أيونات أخرى مثل النترات والبروميد واليوديد والبورات والكبريتيد.

وتساعد معرفة تراكيز هذه الأيونات في تحديد طبيعة المياه الطبقية وتقييم احتمالية تكوّن الرواسب والقشور، واختيار طريقة المعالجة الملائمة، وتقدير مدى توافق المياه مع عمليات الحقن أو إعادة الاستخدام. ويوضح الجدول الخاص بالمياه الطبقية الطرق المختلفة المستخدمة للتعبير عن تركيز المواد الصلبة الذائبة فيها.

جدول 1: التعبير عن تركيز المواد الصلبة الذائبة في الماء الطبقي.

المصطلح	الرمز	التعريف	المعادلات
المولالية Molality	C_m	$\frac{g\ mole\ solid}{1000\ g\ pure\ water}$	
المولارية Molarity	C_M	$\frac{g\ mole\ solid}{1000\ ml\ brine}$	
العيارية Normality	C_N	$\frac{eq\ wt\ solid}{1000\ ml\ brine}$	
مليمكافئ/لتر Milliequivalent/liter	$C_{meq/l}$	$\frac{meq\ wt\ solid}{1000\ ml\ brine}$	$C_{meq/l} = 1000 \text{ x } C_N = \frac{C_{mg/l}}{eq\ wt}$
وزن المواد الصلبة% Weight percent solid	C_w	$\frac{meq\ wt\ solid}{100\ g\ brine}$	$C_w = C_{ppm} \text{ x } 10^{-4}$
جزء لكل مليون Parts per million	C_{ppm}	$\frac{g\ solid}{10^6\ g\ brine}$	$C_{ppm} = C_w \text{ x } 10^{-4} = \frac{C_{mg/l}}{\rho_w}$
مليجرام لكل لتر Milligrams per liter	$C_{mg/l}$	$\frac{g\ solid}{10^6\ ml\ brine}$	$C_{mg/l} = C_{ppm} \text{ x } \rho_w = \rho_w x C_w\ 10^4$
حبيبة لكل جالون Grains per gallon	$C_{gr/gal}$	$\frac{grains\ solid}{gal\ brine}$	$C_{gr/gal} = 17.1 \text{x} C_{mg/l} = 17.1x\ C_{ppm} \text{ x } \rho_w$
where ρ_w is in g/cc at standard conditions			

مخططات ستيف

تُستخدم مخططات ستيف بوصفها إحدى الوسائل البيانية المهمة لتمثيل نتائج التحاليل الكيميائية للمياه الطبقية، إذ تساعد في عرض تراكيز الأيونات الموجبة والسالبة بصورة يسهل من خلالها مقارنة عينات المياه وتحديد أوجه التشابه والاختلاف بينها. وتكتسب هذه المخططات أهمية خاصة عندما تتضمن التحاليل عددًا كبيرًا من الأيونات والعناصر؛ لأنها تحول البيانات الرقمية إلى نمط شكلي يوضح طبيعة المياه وتركيبها الأيوني بصورة مباشرة.

وتُرسم الأيونات الموجبة على الجانب الأيسر من خط رأسي يمثل نقطة الصفر، بينما تُرسم الأيونات السالبة على الجانب الأيمن. ويُعبر طول الخط المرسوم لكل أيون عن تركيزه بوحدة ملي مكافئ لكل لتر، بحيث ينتج عن ربط النقاط شكل مميز لكل عينة مائية. ويُستخدم هذا الشكل في المقارنة بين المياه الطبقية في الآبار المختلفة، وفي دراسة احتمالية اتصال الطبقات أو اختلاف مصادر المياه أو تغير تركيبها الكيميائي.

وتتطلب عملية إعداد مخططات ستيف توحيد وحدات القياس أولًا، ثم تحويل تراكيز الأيونات إلى وحدة ملي مكافئ لكل لتر. وتُحوَّل تراكيز العناصر والأيونات من وحدة جزء في المليون إلى وحدة مليغرام لكل لتر، مع مراعاة كثافة الماء عند الحاجة إلى التحويل. كما يمكن تحويل تركيز المواد الصلبة الذائبة الكلية إلى نسبة مئوية بقسمة القيمة بوحدة جزء في المليون على مليون، ثم استخدام هذه القيمة في تقدير كثافة المياه الطبقية من خلال المخططات أو الجداول الخاصة بذلك.

وبعد تحديد التركيز بوحدة مليغرام لكل لتر، يُحسب التركيز بوحدة ملي مكافئ لكل لتر بالاعتماد على الوزن المكافئ للأيون، وفق المعادلة الآتية:

التركيز بالملي مكافئ لكل لتر=الوزن المكافئ التركيز بالمليغرام لكل لتر

ويُحسب الوزن المكافئ للأيون من خلال قسمة الكتلة الذرية أو الجزيئية على تكافؤ الأيون. وبعد إتمام هذه التحويلات، تُرسم تراكيز الأيونات الرئيسة في المخطط، مثل الصوديوم والكالسيوم والمغنيسيوم على الجانب الأيسر، والكلوريد والكبريتات والبيكربونات على الجانب الأيمن، وفق المقياس المعتمد في الملحق الخاص بالمخططات.(Stiff, 1951)

تعيين خصائص الماء الطبقي باستخدام المضاهات

يمكن تقدير عدد من الخصائص الهندسية للمياه الطبقية بالاعتماد على العلاقات التقريبية والمخططات الحسابية، خاصةً في الحالات التي لا تتوافر فيها قياسات مخبرية مباشرة تحت ظروف المكمن وتشمل هذه الخصائص معامل الحجم الطبقي للماء، والكثافة، والانضغاطية، واللزوجة، والمقاومة الكهربائية. وتُستخدم هذه الخصائص في الدراسات المكمنية، وحسابات تدفق الموائع، وتقييم سلوك المياه المصاحبة خلال مراحل الإنتاج والحقن.

معامل الحجم الطبقي للماء

يمثل معامل الحجم الطبقي للماء النسبة بين حجم كمية معينة من الماء المالح تحت ظروف المكمن وحجم الكمية نفسها تحت الظروف السطحية القياسية. ويعكس هذا المعامل التغير الذي يطرأ على حجم الماء نتيجة اختلاف الضغط ودرجة الحرارة بين المكمن والسطح.

ويتأثر معامل الحجم الطبقي للماء بعدة عوامل، أهمها تحرر الغاز المذاب عند انخفاض الضغط، وتمدد الماء نتيجة تغير الضغط، وتقلص حجمه عند انخفاض درجة الحرارة. ويمكن تقدير هذا المعامل باستخدام قيم التغير الحجمي الناتج عن الضغط والتغير الحجمي الناتج عن درجة الحرارة، وفق المعادلة الآتية:

$$Bw = (1 + \Delta Vwp)(1 + \Delta Vwt)$$

وتُستخرج قيم التغيرات الحجمية من المخططات أو العلاقات التقريبية التي تربط بين ضغط المكمن ودرجة حرارته وملوحة الماء، ثم تُستخدم لتقدير معامل الحجم الطبقي للماء في ظروف المكمن (McGraw, 1950).

كثافة الماء الطبقي

تُعد كثافة الماء الطبقي من الخصائص الأساسية التي تؤثر في حسابات الموائع داخل المكمن، وفي عمليات الفصل والنقل والمعالجة. وترتبط كثافة الماء بدرجة ملوحته ودرجة حرارته وضغطه، إذ تزداد الكثافة عادةً بزيادة تركيز الأملاح الذائبة، بينما قد تتغير بفعل الضغط ودرجة الحرارة.

وتُستخدم كثافة الماء في تحويل تراكيز المكونات الكيميائية بين الوحدات المختلفة، وفي تقدير بعض الخصائص الحجمية، وفي تحليل سلوك المياه المنتجة داخل المكمن وخلال انتقالها إلى السطح.

معامل انضغاط الماء

يعبر معامل انضغاط الماء عن مقدار التغير النسبي في حجم الماء عند تغير الضغط مع ثبات درجة الحرارة. ويكون انضغاط الماء أقل من انضغاط النفط في العادة، إلا أن تأثيره يظل مهمًا في الحسابات المكمنية، خاصةً في المكامن التي تعتمد على دفع المياه أو عمليات الحقن.

ويُعرف معامل انضغاط الماء بالعلاقة الآتية:

$$cw = -Vw1(\partial P \partial Vw)T$$

وغالبًا ما يُفضَّل الحصول على معامل انضغاط الماء من التجارب المخبرية تحت ظروف الضغط والحرارة المناسبة، إلا أن هذه القياسات قد لا تكون متاحة في جميع الحالات، ولذلك تُستخدم المضاهات والمخططات الحسابية لتقديره. وتتراوح قيم انضغاط الماء غير المشبع بالغاز عادةً بين:

$$2 \times 10 - 6$$

و:

$$4 \times 10 - 6$$

لكل رطل على البوصة المربعة، بينما تستخدم قيمة تقريبية شائعة تبلغ:

$$3 \times 10 - 6$$

لكل رطل على البوصة المربعة .(Wahl, 1958) أما المياه التي تحتوي على غاز مذاب فقد تظهر قيم انضغاطية أعلى، تبعًا للضغط ودرجة الحرارة وكمية الغاز الذائب فيها.(Arps, 1956)

معامل انضغاط الماء عند الضغط الأعلى من ضغط نقطة الفقاعة

عند ارتفاع الضغط فوق ضغط نقطة الفقاعة، يكون الماء في حالة لا يتحرر فيها الغاز المذاب منه، ويُحسب معامل انضغاطه من التغير النسبي في الحجم الناتج عن تغير الضغط عند ثبات درجة الحرارة، وفق العلاقة الآتية:

$$cw = -Vw1(\partial P\partial Vw)T$$

وتُستخدم هذه العلاقة في تقدير مقدار انكماش الماء أو تمدده تحت ظروف المكمن، كما يمكن الاستعانة بالمخططات التجريبية الخاصة بالماء النقي أو الماء المالح لاستخراج معامل الانضغاط الحراري عند درجات الحرارة والضغوط المختلفة.

لزوجة الماء الطبقي

تمثل لزوجة الماء الطبقي مقاومته الداخلية للجريان، وهي من الخصائص المهمة في حسابات تدفق المياه داخل المسام الصخرية وخطوط الإنتاج ومعدات المعالجة. وتزداد اللزوجة عادةً مع زيادة الملوحة، بينما تنخفض غالبًا بارتفاع درجة الحرارة.

وتُقاس لزوجة الماء في الدراسات النفطية بوحدة السنتيبواز، وتؤثر قيمتها في معدل حركة المياه داخل المكمن، وفي القدرة المطلوبة للضخ، وفي كفاءة عمليات الفصل والمعالجة. لذلك، فإن معرفة لزوجة المياه المنتجة ضرورية عند تصميم المعدات واختيار ظروف التشغيل المناسبة.

المقاومة الكهربائية للماء الطبقي

لا يكون الماء النقي موصلًا جيدًا للكهرباء، إلا أن وجود الأملاح والأيونات الذائبة في المياه الطبقية يجعلها قادرة على توصيل التيار الكهربائي. وتحدث عملية التوصيل نتيجة حركة الأيونات الذائبة داخل الماء عند تعرضه لفرق في الجهد الكهربائي.

وتُقاس مقاومة الماء الطبقي بوحدة أوم متر، بينما تمثل التوصيلية الكهربائية مقلوب المقاومة. ويمكن التعبير عن المقاومة النوعية للماء بالعلاقة الآتية:

$$\rho = RLA$$

وتُعد المقاومة الكهربائية من المؤشرات المهمة في الدراسات الجيوفيزيائية والنفطية، إذ ترتبط بدرجة ملوحة المياه وتركيز الأيونات الذائبة فيها. فكلما زادت الملوحة والتوصيلية الكهربائية انخفضت المقاومة النوعية للماء.

النتائج والمناقشة

معدلات إنتاج المياه

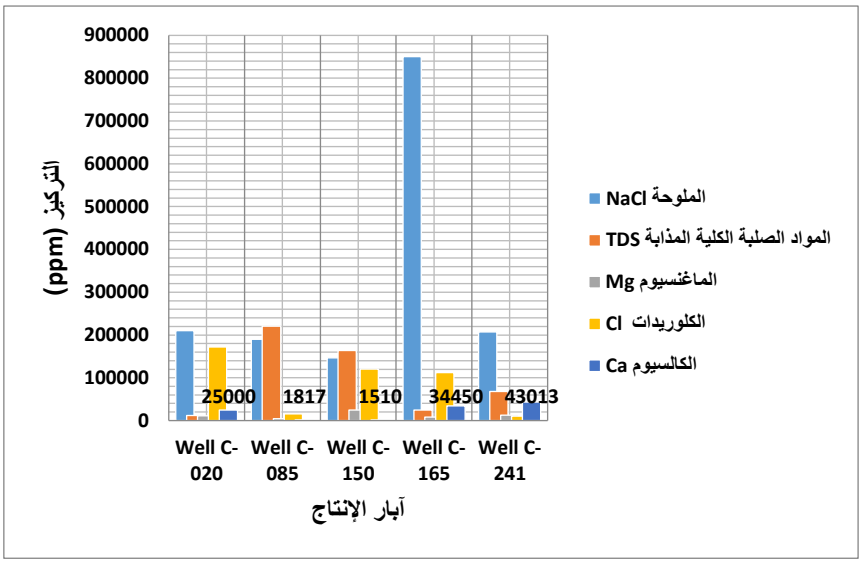
يوضح الشكل الخاص بمعدلات إنتاج المياه اليومية كميات المياه المنتجة المصاحبة لإنتاج النفط في الآبار الخمسة محل الدراسة. وقد أظهرت النتائج وجود تباين واضح في معدلات إنتاج المياه بين هذه الآبار، وهو ما قد يرتبط باختلاف خصائص المكامن والطبقات المنتجة وظروف التشغيل ونسبة الماء إلى النفط في كل بئر.

وسُجل أعلى معدل يومي لإنتاج المياه في البئر المشار إليه بالرمز سي-085، إذ بلغ نحو 1500.2 برميل يوميًا، في حين سُجل أدنى معدل في البئر المشار إليه بالرمز سي-165، إذ بلغ نحو 465.3 برميل يوميًا، كما هو مبين في الجدول الخاص بمعدلات الإنتاج. ويشير هذا التفاوت إلى ضرورة متابعة إنتاج المياه بصورة دورية، لأن ارتفاع معدلاتها قد ينعكس في تكاليف المعالجة والتخلص، وفي كفاءة الإنتاج النفطي، وفي اختيار الاستراتيجية المناسبة لإدارة المياه المنتجة.

جدول 2: الخواص الفيزيوكيميائية للماء الطبقي بحقل السرير

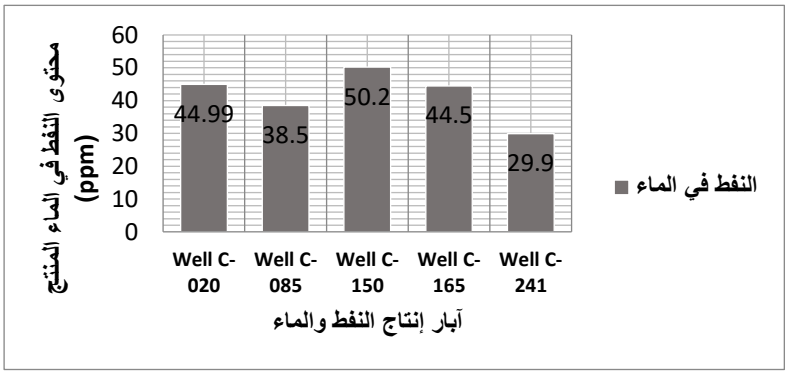
Well C-241	Well C-165	Well C-150	Well C-085	Well C-020	الوحدة	رقم البئر
						المعاملات
						الخواص الفيزيائية
5.15	8.20	7.20	6.50	6.08	---	الأس الهيدروجيني pH @ 25°C
1.140	1.113	1.120	1.220	1.133	جم/سم^3	الكثافة النوعية SP. Gr. @60°F
75400	23800	22000	66400	111200	s/cmμ	التوصيلية الكهربية
0.75	0.64	0.85	0.82	0.90	cst	اللزوجة
						الخواص الكيميائية
68210	24654	163540	220700	11900	ppm	المواد الصلبة الكلية المذابة TDS
43013	34450	1510	1817	25000	ppm	الكالسيوم Ca^{++}
12400	8346	24830	4387	11500	ppm	الماغنسيوم Mg^{++}
970	950	840	990	895	ppm	الصوديوم Na^{+}
14.9	10.15	2.50	2.90	21.16	ppm	الحديد Fe^{++}
160	100	178	268	140	ppm	البيكربونات HCO_3^-
Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	ppm	الكربونات CO_3^{--}
10400	112110	120499	15950	172001	ppm	الكلوريدات Cl^-
280	550	360	220	290	ppm	الكبريتات SO_4^-
1.45	2.30	3.99	1.40	1.50	ppm	الفوسفات PO_4^-
1.02	1.54	1.35	2.10	1.45	ppm	النيترات (NO_3-N)
0.88	0.90	0.75	0.22	0.45	ppm	النيتريت (NO_2-N)
8.90	16.5	10.20	4.10	9.90	ppm	الأمونيا (NH_3)
207090	185020	146325	190090	210000	ppm	الملوحة NaCl
320741.2						المتوسط
29.90	44.5	50.20	38.5	44.99	ppm	النفط في الماء
41.62						المتوسط
745.7	465.3	1410.2	1500.2	1134.06	BWPD	معدلات الإنتاج
1051.09						المتوسط

Tr = traces BWPD = barrel of water per day برميل ماء/يوم



شكل 3 : معدلات إنتاج الماء في آبار النفط

محتوى النفط في الماء المُنتج من جهةٍ أخرى يوضح الشكل 4 محتوى النفط في المياه المنتجة، حيث سجل البئر Well C-150 أعلى درجة تلوث (50.2 ppm)، بينما كان أقل محتوى في البئر Well C-241 (29.9 ppm).

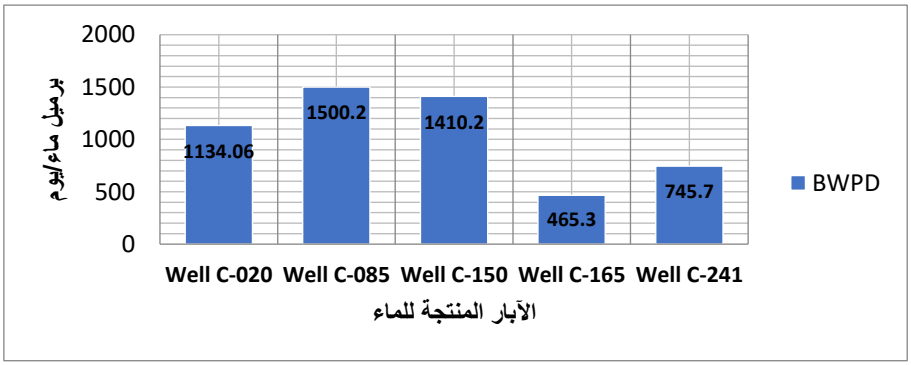


شكل 4 :محتوى النفط بالماء المنتج

لقد أظهرت النتائج تبايناً في قيم الخواص الكيميائية كما بالشكل 5، حيث سجل البئر Well C-165 أعلى قيمة لمحتوى الملوحة في الماء مقارنة بباقي الآبار (185020 ppm)، في حيت تفاوتت القيم الأخرى من بئرٍ لآخر.

مخططات ستيف Stiff Diagrams

تستخدم مخططات ستيف للمقارنة بالأنماط النموذجية للمياه الطبقية والتي تتراوح ما بين 6 إلى 10، وتحديد مدى الاختلاف بين المياه قيد الدراسة وهذه الأنماط النموذجية (ملحق 1).



شكل 5 توزيع المكونات الكيميائية في الماء المنتج

لرسم مخططات ستيف من خلال تحويل التركيزات إلى mg/l. الجدول 3 يبين تحويل التركيزات إلى مليجرام/لتر، كما يبين الجدول 4 تعيين كثافة الماء الطبقي.

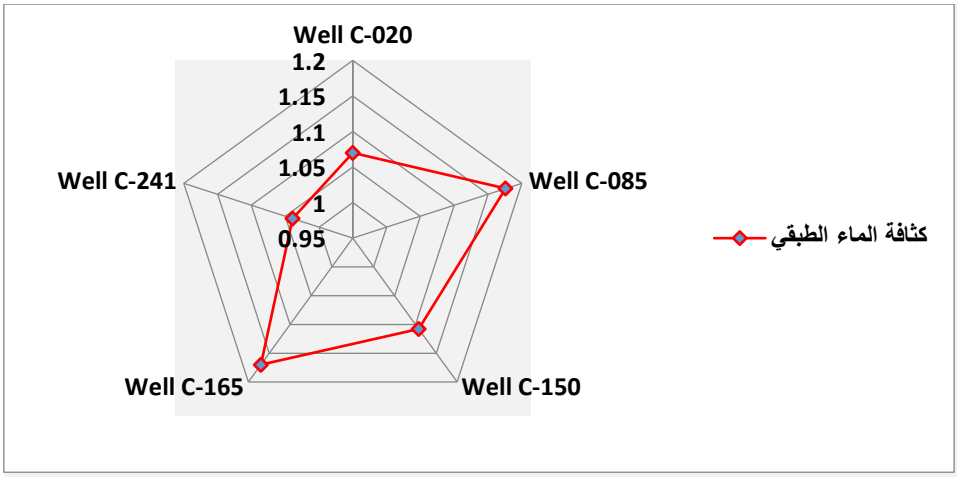
جدول 3 :تحويل التركيزات إلى مليجرام/لتر

الآبار	Well C-020	Well C-085	Well C-150	Well C-165	Well C-241
الكاتيونات والأنيونات					
الكالسيوم Ca^{++}	26750	2136.80	1673.08	40306.5	44690.51
الماغنسيوم Ca^{++}	1230.5	5159.11	27511.64	9764.82	10805.6
الصوديوم Na^{+}	224700	223545.84	162128.10	216473.40	215166.51
الكلوريدات Cl^{-}	184041.07	18757.20	133512.89	13115.70	10805.60
الحديد Fe^{2+}	22.64	3.41	2.77	11.88	15.48
الكبريتات SO_4	310.30	258.72	398.88	643.50	290.92
البيكربونات HCO_3	149.80	315.17	197.22	117.00	166.24
الكربونات CO_3^{--}	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr

جدول 4 :تعيين كثافة الماء الطبقي

الآبار / المعاملات	الوحدة	Well C-020	Well C-085	Well C-150	Well C-165	Well C-241
المواد الصلبة الكلية المذابة TDS	ppm	11900	22070	163540	24654	6821
المواد الصلبة الكلية المذابة TDS	%	11.90	22.07	16.35	24.65	6.82
كثافة الماء الطبقي	lb/cu ft	66.85	73.45	69.20	73.10	64.90
الكثافة (ρ_w)	g/cc	1.070	1.176	1.108	1.170	1.039

الشكل البياني 6 يبين كثافة الماء الأُجاج المنتج حيث كانت أعلى القيم في البئر (1.176Well C-g/cm^3) وأقل القيم في البئر Well C-241 (1.039 g/cm^3).



شكل 6 :كثافة الماء الطبقي المصاحب لإنتاج النفط

تحويل تركيزات الكاتيونات والأنيونات من مليجرام/لتر إلى مليمكافئ/لتر

يتم تحويل وحدات مليجرام/لتر إلى وحدات مليمكافئ/لتر لكلٍ من الكاتيونات والأنيونات للماء الطبقي، وذلك من خلال حساب الوزن الذري (g/g mole) وتكافؤ العنصر (eq wt/g mole) ومن ثم يتم حساب الوزن المكافئ له.

لتحويل تركيزات الكاتيونات والأنيونات من مليجرام/لتر إلى مليمكافئ/لتر للبئر Well C-020 نتبع الخطوات التالية:

الكالسيوم Calcium (Ca^{++})

الوزن الذري للكالسيوم هو 40.08، وهو ثنائي التكافؤ من ثم فإن الوزن المكافئ له هو:

For Ca, $\frac{40.08\ \frac{g}{g\ mole}}{2\ \frac{eq\ wt}{g\ mole}}$ = 20.04 g/eq wt = 20.04 mg/meq.

والمليمكافئ له يكون:

$\frac{26750\ \frac{mg}{l}}{20.04\ \frac{mg}{meq}}$ = 1334.83 meq/l

وبنفس الطريقة يتم حساب المليمكافئ لباقي الكاتيونات والأيونات كالتالي:

- الصوديوم Sodium (Na^{+})

For Na, $\frac{22.99\ \frac{g}{g\ mole}}{1\ \frac{eq\ wt}{g\ mole}}$ = 22.99 g/eq wt. = 22.99 mg/meq.

$\frac{224700\ \frac{mg/liter}{g\ mole}}{22.99\ \frac{mg}{mg/meq}}$ = 9773.82 meq/l

- الماغنسيوم Magnesium (Mg^{++})

For Mg, $\frac{24\ \frac{g}{g\ mole}}{2\ \frac{eq\ wt}{g\ mole}}$ = 12 g/eq wt. = 12 mg/meq.

$\frac{1230.5\ \frac{mg/liter}{g\ mole}}{12\ \frac{mg}{mg/meq}}$ = 102.54 meq/l

- الكلور Chlorine (Cl^{-})

For Cl^{-}, $\frac{35.5\ \frac{g}{g\ mole}}{1\ \frac{eq\ wt}{g\ mole}}$ = 35.5 g/eq wt. = 35.5 mg/meq.

$$\frac{184041.07\ \frac{mg/liter}{g\ mole}}{35.5\ \frac{mg}{mg/meq}} = 5184.26\ \text{meq/l}$$

- الحديد Iron (Fe^{3+})

For Fe, $\frac{56\ \frac{g}{g\ mole}}{3\ \frac{eq\ wt}{g\ mole}} = 18.7$ g/eq wt. = 18.7 mg/meq.

$$\frac{22.64\ \frac{mg/liter}{g\ mole}}{18.7\ \frac{mg}{mg/meq}} = 1.22\ \text{meq/l}$$

- الكبريتات Sulphate (SO_{4-})

For SO_4, $\frac{96\ \frac{g}{g\ mole}}{2\ \frac{eq\ wt}{g\ mole}} = 48$ g/eq wt. = 48 mg/meq.

$$\frac{310.30\ \frac{mg/liter}{g\ mole}}{48\ \frac{mg}{mg/meq}} = 6.46\ \text{meq/l}$$

- البيكربونات Bicarbonate (HCO_{3-})

For HCO_3, $\frac{61\ \frac{g}{g\ mole}}{2\ \frac{eq\ wt}{g\ mole}} = 30.5$ g/eq wt. 30.5 mg/meq.

$$\frac{149.80\ \frac{mg/liter}{g\ mole}}{30.5\ \frac{mg}{mg/meq}} = 4.91\text{meq/l}$$

لقد أجريت نفس طريقة الحسابات على باقي الآبار وسجلت النتائج بالجدول 5.

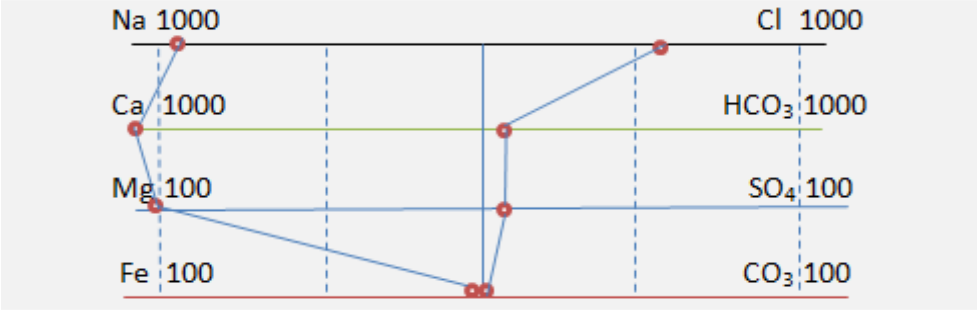
جدول 5 :التحويل من مليجرام/لتر إلى مليمكافئ/لتر للكاتيونات والأنيونات

الكاتيونات والأنيونات	التركيز الأيوني والكاتيوني (مليمكافئ/لتر)				
	well C-020	well C-085	well C-150	well C-165	well C-241
الكالسيوم Ca^{++}	1334.83	106.63	83.34	2011.30	2230.07
الماغنسيوم Ca^{++}	102.54	429.93	2292.64	813.74	900.47
الصوديوم Na^{+}	9773.82	9723.61	7052.11	9415.98	9359.14
الكلوريدات Cl^{-}	5184.26	528.37	3760.93	369.46	304.38
الحديد Fe^{+2}	1.22	0.182	0.148	0.635	0.828
الكبريتات SO_4^{--}	6.46	5.39	8.31	13.41	6.06
البيكربونات HCO_3^{--}	4.91	10.33	6.47	3.84	5.45
الكربونات CO_3^{--}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

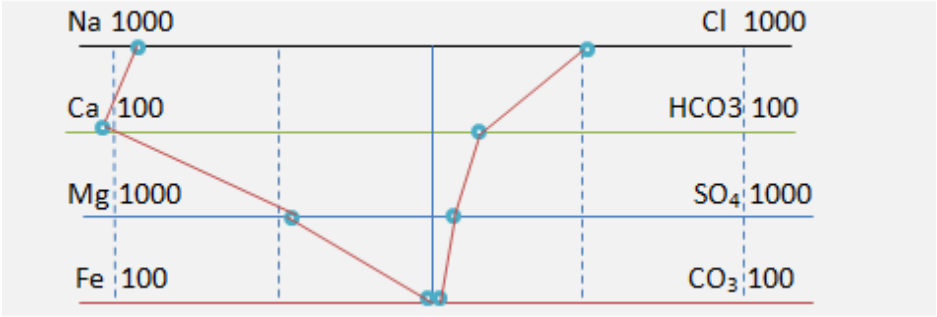
فمن خلال النتائج التي حصلنا عليها يمكن رسم مخططات ستيف للماء الطبقي في الآبار الخمسة بحقل السرير كما بالأشكال من 7 إلى 11.

لقد أظهرت النتائج من خلال رسم مخططات ستيف للماء الطبقي بوجود تشابه في بعض الآبار لمخططات ستيف واختلاف في البعض الآخر، وهذا الاختلاف بطبيعة الحال يعزو إلى طبيعة الماء الطبقي من حيث

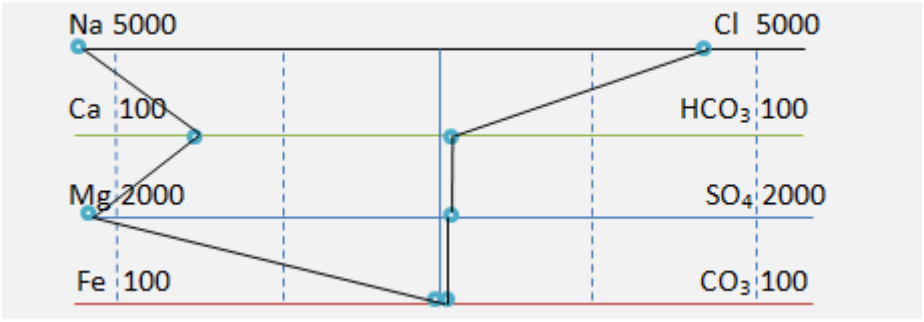
التركيب الكيميائي والذي يتباين من بئرٍ لآخر ويعود هذا التباين في الأساس إلى بيئة تشكل وتكون هذه المياه في التكوينات الصخرية.



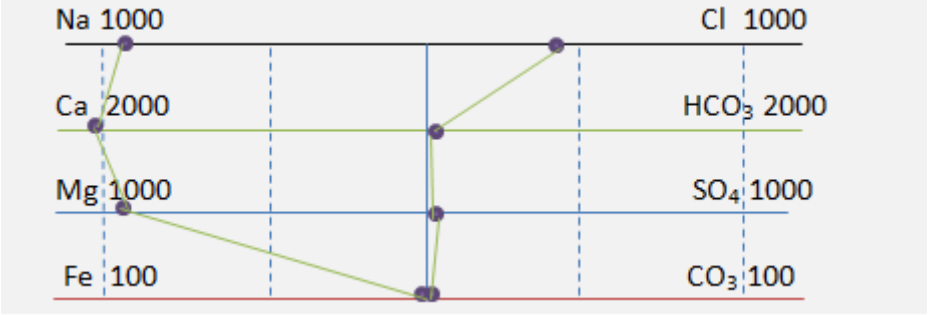
شكل 7 :مخطط ستيف للبئر C-020



شكل 8 :مخطط ستيف للبئر C-085



شكل 9 :مخطط ستيف للبئر C-150



شكل 10 :مخطط ستيف للبئر C-165

شكل 11 :مخطط ستيف للبئر C-241

تعيين مواصفات الماء الأُجاج باستخدام المضاهات Brine Characterizations

معامل الحجم الطبقي للماء الأجاج Brine Formation Volume Factor (B_w)

بمعلومية كل من الضغط ودرجة الحرارة تم حساب معامل الحجم الطبقي للماء الأُجاج باستخدام المضاهاة بالملحق 2 و 3 وتطبيق المعادلة 1. الجدول 6 يعطي نتائج حسابات معامل الحجم الطبقي للماء عند الضغوط ودرجات الحرارة المكمنية، لقد كانت النتائج متباينة من بئرٍ لآخر وهذا التباين يعزو بطبيعة الحال إلى عاملي الضغط والحرارة المكمنيين.

جدول 6 :معامل الحجم الطبقي للماء الأُجاج

رقم البئر	الوحدة	Well C-020	Well C-085	Well C-150	Well C-165	Well C-241
المعاملات						
الضغط	Psia	2600	2945	3025	2090	2200
الحرارة	°F	170	185	190	200	160
ΔV_{wT}	--	0.034	0.036	0.037	0.039	0.023
ΔV_{wP}	--	-0.0032	-0.0045	-0.0049	-0.0028	-0.0022
معامل الحجم الطبقي (B_w)	bbl/stb	1.031	1.032	1.032	1.039	1.021

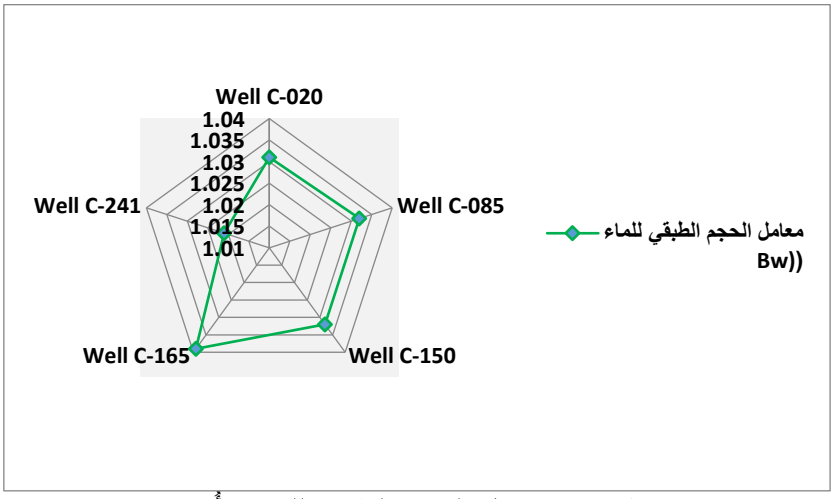
معامل الانضغاط الحراري Isothermal compressibility Coefficient (C_w)

تم حساب معامل الانضغاط الحراري للماء بمعلومية كلٍ من الضغط ودرجة الحرارة وباستخدام المضاهاة بالملحق 4 (جدول 7). لقد كانت قيم معامل الانضغاط الحراري للماء في آبار الدراسة متقاربة فيما بينها وهذا يعزو إلى عدم الفارق الكبير بين كلٍ من الضغط والحرارة لهذه الآبار.

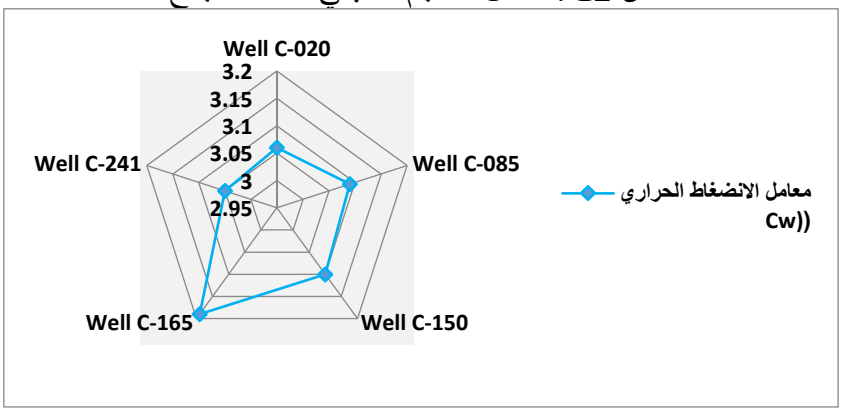
جدول 7 :معامل الانضغاط الحراري للماء الأُجاج (C_w)

رقم البئر	الوحدة	Well C-020	Well C-085	Well C-150	Well C-165	Well C-241
المعاملات						
الضغط	Psia	2600	2945	3025	2090	2200
الحرارة	°F	170	185	190	200	160
معامل الانضغاط الحراري (C_w)	$psi^{-1} \times 10^6$	3.06	3.09	3.10	3.19	3.05

يُعتبر كل من عاملي الحجم الطبقي والانضغاط الحراري من المعاملات الهامة لخصائص المياه المصاحبة لإنتاج النفط والغاز على حدٍ سواء، لذا ينبغي معرفتهما على وجه التحديد نظراً لأهميتهما من الناحية الإنتاجية، فمعامل الحجم الطبقي من خلاله يتم حساب حجوم المياه المنتجة الفعلية في الظروف القياسية (السطحية) مقارنةً بالحجوم المكمنية، كما أن معامل الانضغاط الحراري يدخل في الكثير من الحسابات الهندسية. الشكل البياني 12 يوضح تباين في قيم معامل الحجم الطبقي، كما يوضح الشكل 13 الاختلاف أيضاً في قيم معامل الانضغاط الحراري، ويعزو هذا الاختلاف في كليهما إلى الظروف المكمنية من حيث الضغط ودرجة الحرارة.



شكل 12 :معامل الحجم الطبقي للماء الأجاج



شكل 13 :معامل الانضغاط الحراري للماء المنتج

معامل لزوجة الماء الأُجاج Brine Viscosity Coefficient (μ_w)

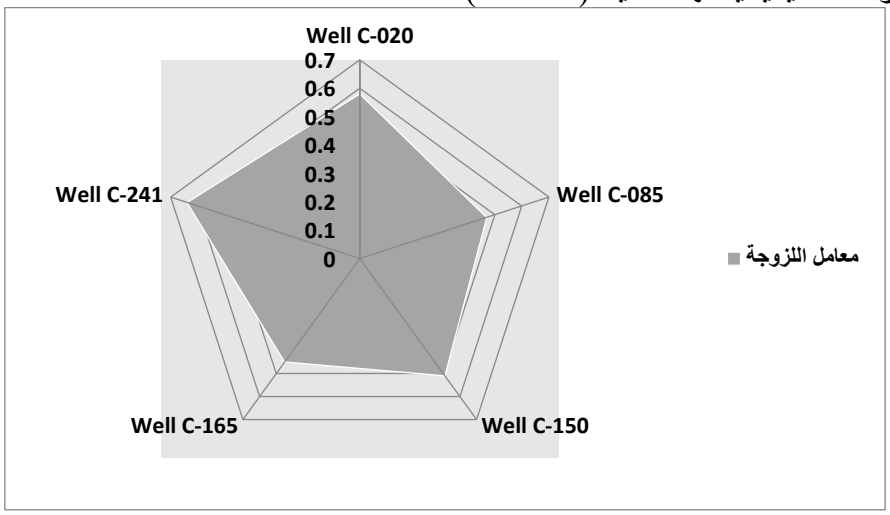
لقد تم تقدير معامل لزوجة الماء الطبقي بمعلومية كلٍ من درجة الحرارة والملوحة (NaCl) للماء الطبقي، وذلك بعد تحويل الوحدات إلى (%) بقسمة وحدات الجزء في المليون على 10^6، وباستخدام المضاهاة بالملحق 5. الجدول 8 يوضح نتائج معامل اللزوجة والتي كانت أعلى قيمة في البئر Well C-241 بينما كانت أقل قيمة في البئر Well C-165.

جدول 8 :معامل لزوجة الماء الطبقي

رقم البئر	الوحدة	Well C-020	Well C-085	Well C-150	Well C-165	Well C-241
المعاملات						
الملوحة NaCl	ppm	210000	190090	146325	185020	207090
الملوحة	(%)	21.00	19.00	14.6	18.5	20.71

الحرارة	°F	170	185	190	200	160
معامل اللزوجة	μ_w	0.58	0.47	0.51	50.4	0.64

لقد تبين من خلال النتائج وجود اختلاف ليس بالجوهري لقيم معامل اللزوجة للماء الطبقي، وهذا الاختلاف يعود إلى المكونات الكيميائية لهذه المياه (شكل 14).



شكل 14 :معامل اللزوجة للماء الطبقي لآبار النفط

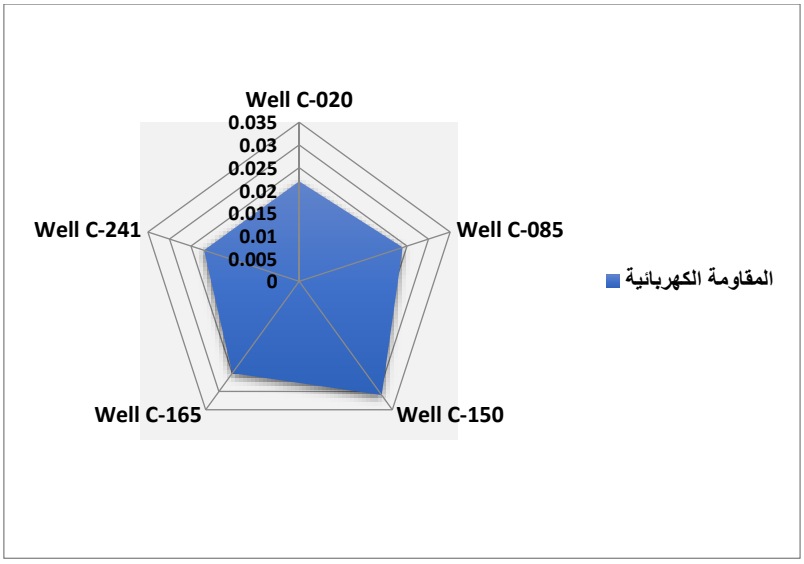
المقاومة الكهربائية للماء الطبقي Resistivity of Formation Water

تم تعيين المقاومة الكهربائية بمعلومية كلٍ من درجة الحرارة والملوحة (NaCl) بوحدة ppm أو بعد تحويلها لحبيبة عند 75°F واستخدام الملحق 6، حيث دونت النتائج في الجدول 9. لقد أظهرت النتائج قيماً متفاوتة للمقاومة الكهربائية من بئرٍ لآخر وهذا التباين يعزو بطبيعة الحال إلى درجة الملوحة، حيث كلما زات الملوحة قلة المقاومة والعكس صحيح.

جدول 9 :المقاومة الكهربائية للماء الطبقي

رقم البئر	الوحدة	Well C-020	Well C-085	Well C-150	Well C-165	Well C-241
المعاملات						
الملوحة NaCl	ppm	210000	190090	146325	185020	207090
الحرارة	°F	170	185	190	200	160
المقاومة الكهربائية	Ω	0.022	0.024	0.031	0.025	0.022

من جهةٍ أخرى الشكل 15 يبين قيم المقاومة الكهربائية للمياه المنتجة، والتي تُظهر اختلافاً من بئرٍ لآخر، وهذا الاختلاف يرجع لعدة عوامل أهمها محتوى الماء من المواد الصلبة المذابة ومحتوى الملوحة، فكلما زادت الملوحة قلت المقاومة نظراً لزيادة التوصيلية والعكس صحيح.



شكل 15 :المقاومة الكهربائية للماء الطبقي لآبار النفط

الخلاصة Conclusion

في ضوء هذه الدراسة التي أجريت على حقل السرير الواقع في حوض سرت، والتي تناولت دراسة خصائص ومواصفات المياه المنتجة مع النفط والغاز لبيان إمكانية استخدامها كمورد طبيعي هام، يتسنى لنا استخلاص النقاط التالية:

1. كانت كمية المياه المصاحبة للنفط كبيرة جداً، إذ بلغ متوسط الإنتاج في آبار الدراسة 1015.09، برميل/يوم في حقل السرير وكانت نسبة النفط في الماء 41.62 ppm. بينما وصلت نسبة الملوحة إلى 320741.2 ppm ويعزو هذا التباين في القيم إلى عوامل عدة منها التركيب الكيميائي للمياه المنتجة والتكوين الطبقي وبعض العوامل الجيولوجية.
2. من خلال دراسة المواصفات الفيزيوكيميائية للماء الطبقي وتمثيلها على مخططات ستيف فقد أظهرت النتائج تشابه في بعض الآبار لمخططات ستيف واختلاف في البعض الآخر، وهذا الاختلاف بطبيعة الحال يعزو إلى طبيعة الماء الطبقي من حيث التركيب الكيميائي والذي يتباين من بئرٍ لآخر ويعود هذا التباين في الأساس إلى بيئة تشكل وتكون هذه المياه في التكوينات الصخرية.
3. أظهرت النتائج لحساب معامل لزوجة الماء الطبقي بمعلومية كلٍ من درجة الحرارة والملوحة (NaCl) للماء الطبقي، فقد تفاوتت القيم من بئرٍ لآخر في حقل الدراسة، ويعزو ذلك إلى طبيعة التركيب للمادة الهيدروكربونية ونوعية النفط وخصائصه الفيزيائية.
4. بيَّنت النتائج وجود اختلاف في المعاملات و تركيز الكاتيونات والأنيونات في الماء الطبقي، فقد تفاوتت نسب تركيز كلٍ من المواد الصلبة الكلية المذابة والملوحة بدرجة كبيرة في أبار المياه، ويرجع ذلك إلى التركيب الكيميائي للماء، كما أظهرت أيضاً نسب توزيع الكاتيونات والأنيونات تبايناً واضحاً.
5. من خلال تعيين مواصفات الماء الأُجاج باستخدام المضاهات مثل معامل الحجم الطبقي عند الضغوط ودرجات الحرارة المكمنية لكافة آبار الدراسة بالحقول الثلاثة، فقد كانت النتائج متباينة من بئرٍ لآخر وهذا التباين يعزو بطبيعة الحال إلى عاملي الضغط والحرارة المكمنيين.
6. لقد أسفرت قيم معامل الانضغاط الحراري للماء المتحصل عليها من النتائج بمعلومية كلٍ من الضغط ودرجة الحرارة في آبار الدراسة أنها متقاربة فيما بينها وهذا يعزو إلى عدم الفارق الكبير بين كلٍ من الضغط والحرارة لهذه الآبار.
7. لقد أوضحت النتائج الخاصة بحساب المقاومة الكهربائية للماء الطبقي بمعلومية كلٍ من درجة الحرارة والملوحة (NaCl) بوحدة ppm أو بعد تحويلها لحبيبة عند 75°F قيماً متفاوتة للمقاومة

الكهربائية من بئرٍ لآخر وهذا التباين يعزو بطبيعة الحال إلى درجة الملوحة، حيث كلما زات الملوحة قلة المقاومة والعكس صحيح، حيث كان تركيز الملوحة يختلف من حقلٍ لآخر أيضاً.

8. بشكلٍ عام يمكن القول بأن كمية المياه المنتجة المصاحبة لإنتاج النفط والغاز تُعد كميات هائلة جداً ويتم التخلص منها بطرق غير آمنة على الوسط البيئي مما ينجم عنه أضرار بيئية تلحق بالتربة أو المياه الجوفية عند إعادة حقن هذه المياه في المكمن للحفاظ على الضغط المكمني.
9. في إطار التقنيات الحديثة يمكن إعادة تدوير هذه المياه واستخدامها في أغراض شتى بعد الوصول بها لمستويات المعالجة المطلوبة التي تسمح باستخدامها وفق الإرشادات البيئية.
10. تعتبر هذه المياه أحد الموارد المائية الهامة المهدورة، وبتدويرها قد تحقق التنمية المستدامة المرجوة.

التوصيات Recommendations

تبَينّ من خلال النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة أنه يمكن طرح عدة توصيات تتضمن النقاط التالية:

1. في إطار نتائج خواص ومواصفات هذه المياه المهدورة بكميات هائلة، فإنه يمكن إعادة تدويرها بعد إجراء معالجتها بتطبيق التقنيات الحديثة التي تتناسب مع طبيعة هذه المياه.
2. يجب استخدام هذه المياه أيضاً من خلال إعادة حقنها في المكامن عبر آبار الحقن للتخلص منها بشكلٍ آمن والحفاظ على الضغط المكمني لتعزيز معدلات إنتاج النفط.
3. أخذ الحيطة والحذر بعدم وصول المياه المحقونة إلى الخزان الجوفي المائي لتجنب تلوث المياه الجوفية.
4. يمكن تخزين هذه المياه في مكامن تخزين تحت سطحية وإعادة استعمالها وقت الضرورة.
5. إذا لزم الأمر للتخلص منها في المنافذ السطحية يتعين صرفها في برك أو أحواض مبطنة بالخرسانة لمنع تسربها في الطبقات والتربة.
6. إجراء الدراسات الدورية ومراقبة خصائص ومواصفات وكميات هذه المياه المصاحبة لإنتاج النفط والغاز.
7. يتعين على الشركات النفطية التقيد بالإرشادات واللوائح البيئية التي تتعلق بتصريف هذه المياه.
8. يتحتم عليهم أيضاً التنسيق مع الجهات المعنية بشؤون البيئة لإيجاد الحلول المناسبة للاستفادة من هذه المياه.
9. تُعد هذه المياه المُنتجة بكميات ضخمة بمثابة مورد طبيعي ذي أهمية يجب استغلاله لتحقيق التنمية المستدامة.

المصادر References

[1] Al-Haleem, A. A., Abdulah, H. H. and Saeed, E. A.-J., (2010) "Components and treatments of oilfield produced water", Al-Khwarizmi Engineering Journal, 6 (1): 24 - 30, 2010.

[2] AGOCO (2014, 2018) Arabian Gulf Oil Company, Libya

[3] Arps, J. J. (1956)Estimation of primary oil reserves, Transactions of Aim.

[4] Bansal, KM; Caudle, DD (1999). Interferences with Processing Production Water for Disposal, 9th Produced Water Seminar, Houston, TX, Jan. 21-22.

[5] Cline, JT (1998). Treatment and Discharge of Produced Water for Deep Offshore Disposal, presented at the API Produced Water Management Technical Forum and Exhibition, Lafayette, LA, Nov. 17-18.

[6] Collins, A. G. (1987) Properties of Produced Waters. Petroleum Engineering Handbook, H. B. Bradley et al. (eds), SPE, Richardson, TX24-1-24-23.

[7] Du, Y., Guan, L. and Liang, H., (2005) “Advances of produced water management”, Canadian International Petroleum Conference, 7-9 June, Calgary, Alberta, 2005.

[8] Glickman, AH (1998). Produced Water Toxicity: Steps You Can Take to Ensure Permit Compliance, presented at the API Produced Water Management Technical Forum and Exhibition, Lafayette, LA, Nov. 17-18.

[9] Guerra, K., Dahm, K. and Dundorf , S., (2011) "Oil and gas produced water management and beneficial use in the Western United States", U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Science and Technology Program Report No. 157, Technical Service Center. Sep. 2011.

[10] Horpestad, G., Nkeng, G. E., KamgaFouamno, H. L. and Antai, S. P., "Effect of crude oil effluent (produce water) on brackish water fish and microbial growth in aquarium environment", The Pacific Journal of Science and Technology, 10 (2): 619-625, 2009.

[11] Jacobs, R. P. W. M., Grant, E., Kwant, J., Marqueine J. M. and Mentzer, E., (1992) "The composition of produced water from shell operated oil and gas production in the North Sea", In: J. P. Ray and F. R. Englehart, Eds., Produced Water, Technological /Environmental Issues and Solutions, Plenum Press, New York, 13-21, 1992.

[12] Joel, O. F.,Amajuoyi, C.A. and Nwokoye, C. U., (2010) "Characterization of formation water constituents and the effect of fresh water dilution from land rig location of the Niger Delta, Nigeria", Journal Applied Sci. Environ. Management, 14 (2): 37 – 41, 2010.

[13] Khatib, Z. and Verbeek, P., (2003) "Water to Value – Produced Water Management for Sustainable Field Development of Mature and Green Fields," Journal of Petroleum Technology, 26-28, Jan., 2003.

[14] MaCGraw-Hill, (1950) Chemical Engineer's Handbook. International Critical Tables II, 79, 157.

[15] MaCGraw-Hill,(1962) Petroleum Production Handbook. 22-23.

[16] Martel-Valles, J. F., Benavides-Mendoza, A., Valdez-Aguilar, L. A., Juárez-Maldonado, A. and Ruiz-Torres, N. A., (2013) "Effect of the application of produced water on the growth, the concentration of minerals and toxic compounds in tomato under greenhouse", Journal of Environmental Protection, 4: 138-146.

[17] McFarlane, J; Bostick, DT; Luo, H (2002). Characterization and Modeling of Produced Water, presented at the 2002 Ground Water Protection Council Produced Water Conference, Colorado Springs, CO, Oct. 16-17. (Paper available at:

[18] http://www.gwpc.org/Meetings/PW2002/Papers- Abstracts.htm).

[19] Neff, J. M., (1987) "Biological effects of drilling fluids, drill cuttings and produced waters", in Boesch, D. F. and Rabalais N. N. (eds.). Long-Term Environmental Effects of Offshore Oil and Gas Development, Elsevier Applied Science Publishers, London, 469-538, 1987.

[20] Patton, C. C. (1981) Oil Field Water Systems, Campbell Petroleum Series, Norman, Oklahoma.

[21] Oboh, I., Aluyor, E. and Audu, T., (2009) "Post-treatment of produced water before discharge using lorffa cylindrical", Learndo Electronic Journal of Practices and Technologies, 14: 57-64.

[22] Reynolds Rodney R.: "Produced Water and Associated Issues," a manual for independent operator, Petroleum Technology Transfer Council (2003).

[23] Schlumberger Well Services, Log Interpretation Charts, Houston (1986) 5.

[24] Smith, J. P., Tyler, A. O. and Sabeur, Z. A., (1998) "Ecotoxicological assessment of produced waters in Indonesia", Environmental Toxicology and Water Quality, 13(4): 323-336.

[25] Stephenson, MT; (1992). A Survey of Produced Water Studies, In: Produced Water, J.P. Ray and F.R. Englehart (eds.), Plenum Press, New York .

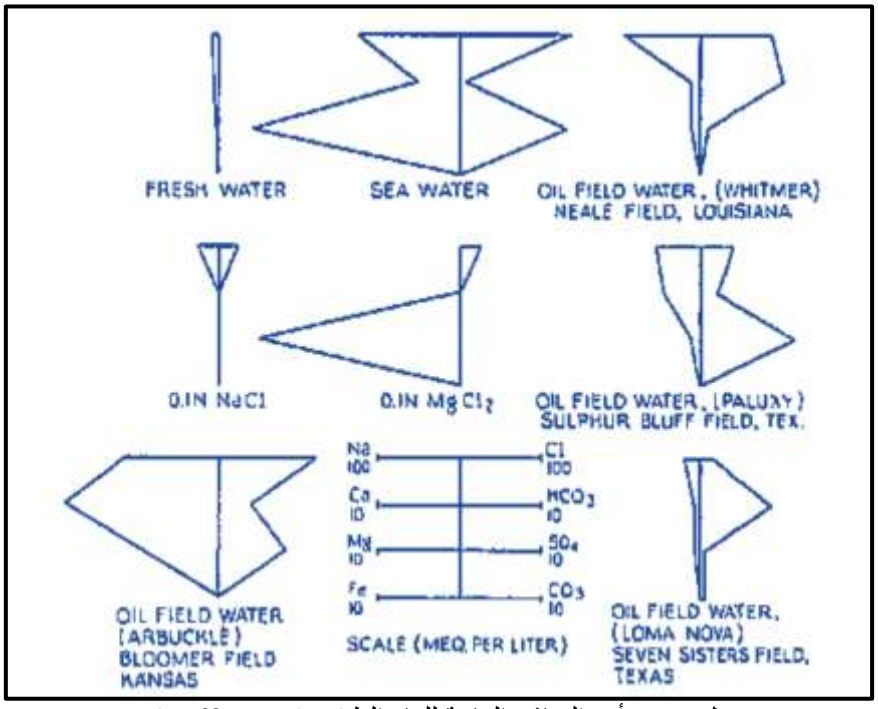
[26] Stiff, H. A., Jr. (1951) The Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Patterns, Trans., AIME, 192, 376-379.

[27] Veil, J. A., Pruder, M. G., Elcock, D. and Redweik, R. J., (2004) "A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane", prepared by Argonne National Laboratory for U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory.

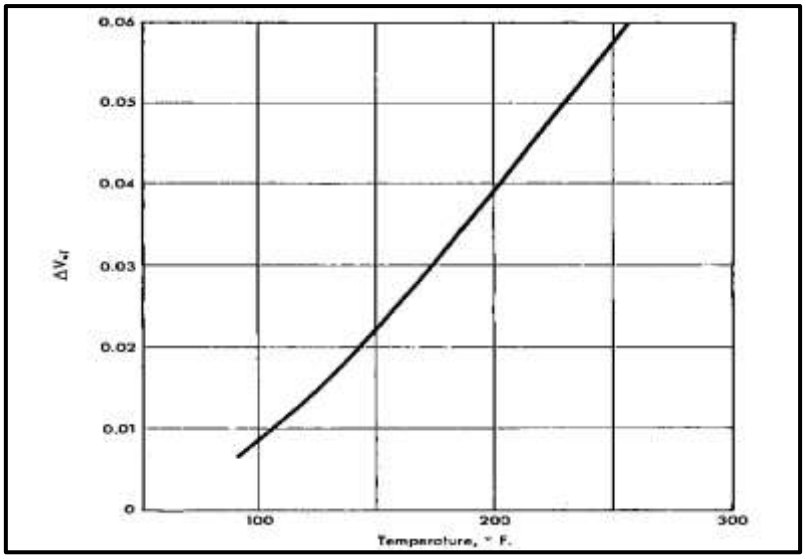
[28] Veil, J. A. and Clark, C. E. (2009) Produced Water Volumes and Management Practices in the United States.. Environmental Science Division, Argonne National laboratory. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory.

[29] Wahl, W. L., L. D. (1958) Mullins, and E. B. Elfrink, "Estimation of ultimate recovery from solution gas drive reservoirs," Journal of Petroleum Technology.

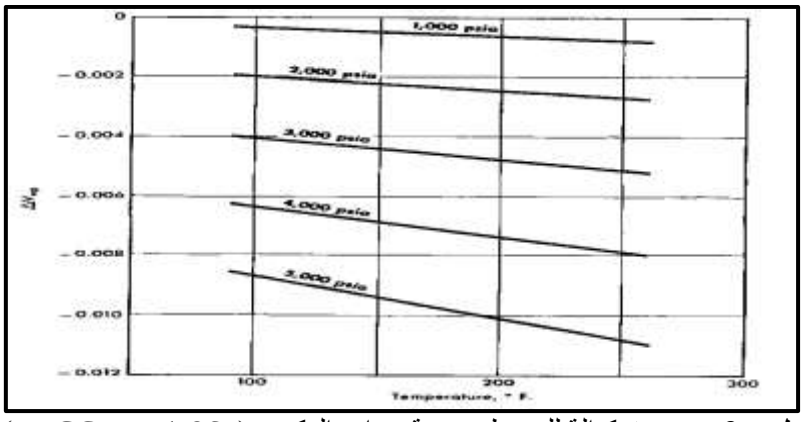
Appendices الملاحق



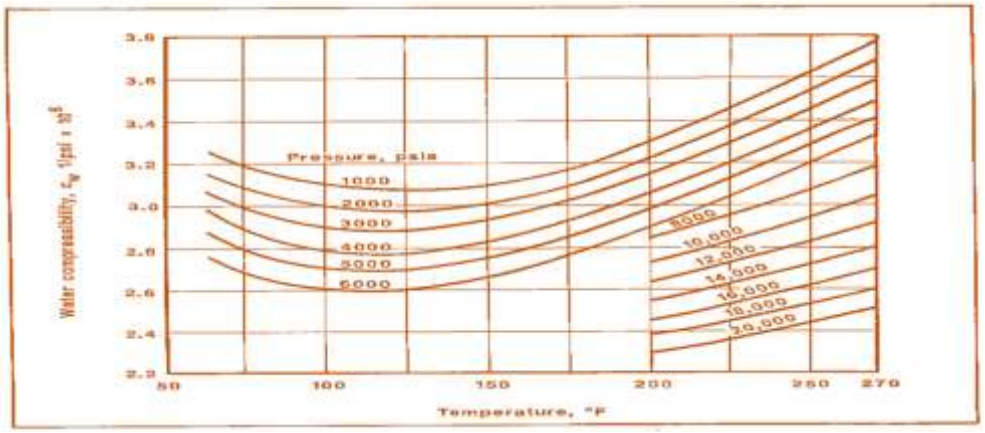
ملحق 1 : أهم النماذج المائية للماء الطبقي (Stiff, 1951)



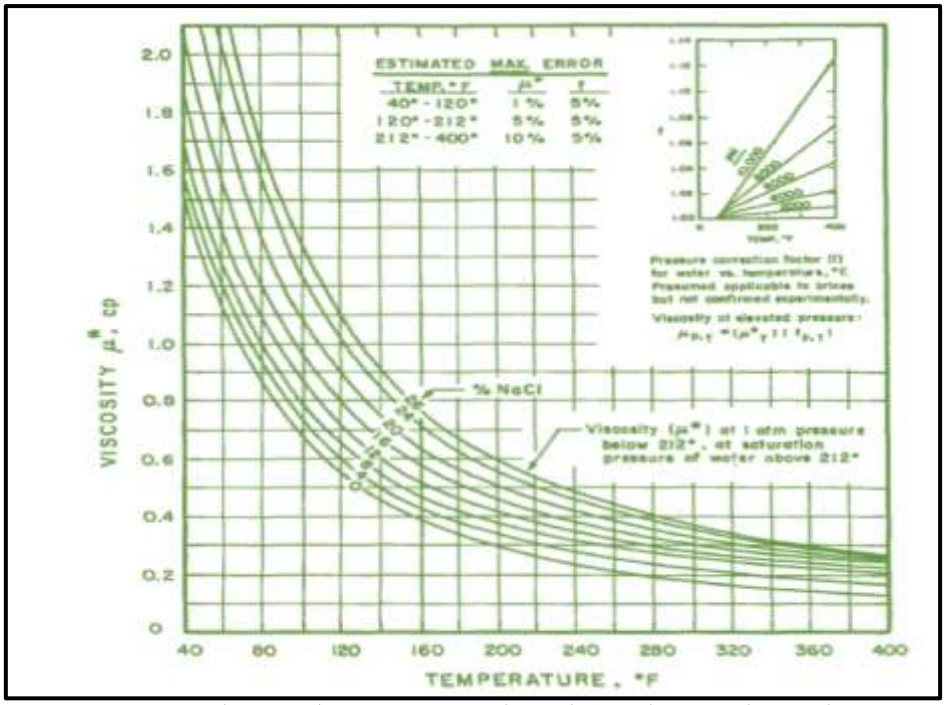
ملحق 2: ΔV_{wT} كدالة لدرجة حرارة المكمن (MaCGraw, (1950)



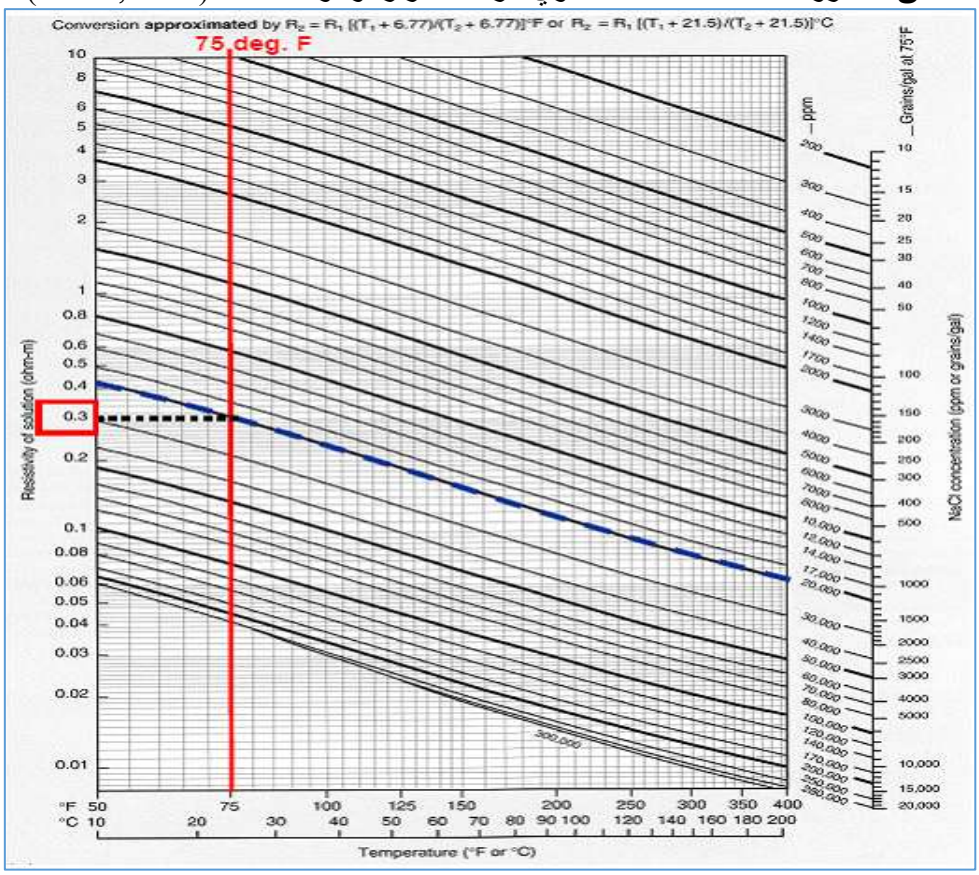
ملحق 3 : ΔV_{wP} كدالة للضغط ودرجة حرارة المكمن (MaCGraw, (1962)



ملحق 4 : معامل الانضغاط الحراري للماء (Collins, 1987)



ملحق 5 : لزوجة الماء عند الضغط الجوي لدرجات حرارة وملوحة مختلفة (Patton, 1981)



ملحق 6 : مقاومة محاليل كلوريد الصوديوم (Schlumberger Well Services, 1986)

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **JIBAS** and/or the editor(s). **JIBAS** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.