

التعرف على تداخل مياه البحر باستخدام المقاربة الهيدروكيميائية والمنطق الضبابي لمنطقة عين زارة ليبيا

أحمد إبراهيم خماج*
خيرى محمد العماري**

ARTICLE INFO

Vol. 7 No. 1 April, 2025

Pages (41- 55)

Article history:

Revised form 23 February 2025

Accepted 28 March 2025

Authors affiliation

* Department Soil & Water ,Tripoli
University

** Department Environmental Science
& Engineering, Libyan Academy.
khairi.alamari@academy.edu.ly

Keywords:

Hydrochemical Characteristics,
Seawater Intrusion Indicators, Fuzzy
Logic, Ain Zara, Libya.

المخلص

يعد تلوث الخزانات الجوفية العذبة الساحلية بمياه البحر المالحة تهديداً لجودة المياه الجوفية. ويعرف هذا التلوث بظاهرة تداخل مياه البحر (SWI). يعمل هذا التلوث على زيادة ملوحة المياه الجوفية، ويشكل تأثيراً بيئياً وصحياً كبيرين. تهدف الدراسة إلى تقييم تلوث المياه الجوفية بمياه البحر لمنطقة عين زارة الواقعة جنوبي مدينة طرابلس باستخدام كل من العلاقة بين درجة التوصيل الكهربائي (EC) وتركيز الكلوريد (Cl^-) في المياه الجوفية ونسبة سيمبسون (SR)، ومؤشر تأثير جودة المياه الجوفية بتداخل مياه البحر (GQI_{SWI})، ومؤشر الخلط بمياه البحر (SMI)، ومخطط تطور السحنات الهيدروكيميائية (HEF). بالإضافة إلى تطوير نموذج (FSWI) يعتمد على المنطق الضبابي يمكن من تقييم درجة تلوث الخزانات الجوفية بمياه البحر. تم تجميع 40 عينة مياه من آبار المياه الجوفية في منطقة الدراسة في شهر مارس لسنة 2023، وقدرت الخصائص الفيزيوكيميائية لعينات المياه الجوفية ذات الصلة بهذه الدراسة والتي تضمنت تقدير كل من التوصيل الكهربائي (EC) والأملاح الذائبة الكلية (TDS) ودرجة التفاعل (pH) والأيونات الذائبة الرئيسية التي شملت الصوديوم (Na^+)، والبوتاسيوم (K^+)، الكالسيوم (Ca^{2+})، والمغنيسيوم (Mg^{2+})، والكلوريد (Cl^-)، والبيكربونات (HCO_3^-)، والكبريتات (SO_4^{2-}). بالإضافة إلى حساب قيمة الملوحة الكامنة (PS). تم تضمين أربعة معايير نموذج (FSWI) شملت TDS (مليجرام/لتر)، وتركيز Cl^- (مليجرام/لتر)، وقيمة EC (ميكروسيمنس/سم)، PS (مليجرام/لتر). أظهرت النتائج ارتفاع قيم معامل الاختلاف لكل من الكلوريد والصوديوم والكالسيوم والأملاح الكلية الذائبة مقارنة ببقية الأيونات مما يعطي دلالة على تبيان مياه آبار المنطقة في محتواها الكيميائي. كما إن انخفاض معامل الاختلاف لكل من البيكربونات ودرجة التفاعل يعكس التباين المنخفض لهاتين الخاصيتين والتي قد تدل على الاستقرار النسبي لهما في المياه الجوفية. تكشف قيم مؤشرات تداخل مياه البحر المتحصل عليها أن المنطقة مهددة بخطر تداخل مياه البحر وإنها جميعها تتبع نفس نمط التوزيع المكاني، وإنه بالإمكان الاعتماد على نموذج (FSWI) الذي تم تطويره في تقدير مراقبة درجة تلوث الخزانات الجوفية بمياه البحر. إن النتائج المتحصل عليها تستوجب اتخاذ إجراءات عاجلة للحد من هذه المشكلة.

Identify of Seawater Intrusion Using Hydrochemical Approach and Fuzzy Logic for the Ain Zara, Libya.

Ahmed Ibrahim Ekhnaj* & Khairi Mohammed Alamari**

Coastal freshwater aquifer contamination by saline seawater is a significant threat to groundwater quality. This contamination is known as Seawater Intrusion (SWI). It leads to an increase in groundwater salinity, presenting both environmental and health risks. This study aims to assess seawater intrusion into the groundwater of the Ain Zara region, located south of Tripoli, by evaluating the relationship between Electrical Conductivity (EC) and Chloride (Cl^-) concentrations in the groundwater, as well as Simpson's Ratio (SR), the Groundwater Quality Index for Seawater Intrusion (GQI_{SWI}), the Seawater Mixing Index (SMI), and Hydrochemical Evolution Facies (HEF) diagrams. Additionally, a Fuzzy Seawater Intrusion Index (FSWI)

© 2025

Content on this article is an open access licensed under creative commons CC BY-NC 4.0.



model was developed, which uses fuzzy logic to assess the degree of seawater contamination in the aquifers. Forty groundwater samples were collected from wells in the study area in March 2023. The physico-chemical properties of the groundwater samples were Electrical Conductivity (EC), Total Dissolved Solids (TDS), pH, and major dissolved ions such as Sodium (Na^+), Potassium (K^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Chloride (Cl^-), Bicarbonate (HCO_3^-), and Sulfate (SO_4^{2-}). Additionally, the Potential Salinity (PS) was calculated. Four parameters were included in the FSWI model i.e., TDS (mg/L), Cl^- (mg/L), EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$), and PS (mg/L). The results showed high variation coefficients for Chloride, Sodium, Calcium, and Total Dissolved Solids compared to the other ions, indicating the distinct chemical composition of the region's well waters. Additionally, the low variation coefficients for Bicarbonate and pH reflect the relative stability of these properties in the groundwater. The values of the seawater intrusion indicators revealed that the area is at risk of seawater intrusion, and it is following the same spatial distribution pattern. The developed FSWI model can reliably estimate the degree of seawater contamination in the groundwater. The obtained results highlight the urgent need for measures to mitigate this issue.

Rosenthal, & Yechieli, 1999.);

المقدمة

(Todd, 1980) كما أظهرت المقاربات المعتمدة على العلاقة بين الخصائص الهيدروكيميائية للمياه الجوفية وتداخل مياه البحر فعاليتها في توفير نتائج موثوقة تساهم في تنفيذ استراتيجية إدارة طويلة الأجل للمياه الجوفية في المناطق الساحلية ((Boujila *et al.*, 2023)) تشمل هذه المقاربات كل من نسبة سيمبسون (SR)، مؤشر تأثير جودة المياه الجوفية بتداخل مياه البحر (GQI_{SWI})، مؤشر الخلط بمياه البحر (SMI)، مخطط تطور السحنات الهيدروكيميائية (HEF). لقد تم استخدام هذه المقاربات في العديد من حالات الدراسة على الصعيد المحلي والعالمي (خماج والرياني، 2021) (AL Farrah *et al.*, 2011; AL Farrah *et al.*, 2018; Trabils *et al.*, 2016; Forcada-Gimenez, 2010; Prusty *et al.*, 2020; Tomaszewicz *et al.*, 2014).

تمثل تقنية المنطق الضبابي (Fuzzy Logic) أحد التقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في دراسات جودة ونوعية المياه الجوفية. ويعتبر المنطق الضبابي مميّزًا بقدرته على ترجمة الأفكار والخبرات البشرية إلى مؤشرات، مما يتيح التعامل بشكل فعال مع المعلومات التي تتميز باللاخطية والشك والغموض (Oladipo *et al.*, 2021). إن تطبيقات استخدام تقنية المنطق الضبابي في دراسات جودة ونوعية المياه الجوفية تم تناولها في العديد من الدراسات (Luís *et al.*, 2009; شيخو وآخرون، 2019; Antara, 2014) وقد اتفقت هذه الدراسات على أنه بالإمكان دراسة وتحديد جودة نوعية المياه الجوفية بدقة وكفاءة عالية. على الرغم أن المنطق الضبابي قد تم استخدامه بشكل موسع ونسبي في دراسات جودة ونوعية المياه الجوفية على نحو عام، إلا أن هناك نقصاً في الأبحاث التي تتناول تطبيقاته في قضايا تلوث الخزانات الجوفية بمياه البحر. تحدف هذه الدراسة إلى التعرف وتقييم تلوث المياه الجوفية بمياه البحر لمنطقة عين زارة الواقعة جنوبي مدينة طرابلس باستخدام كل من العلاقة بين درجة التوصيل الكهربائي (EC) تركيز الكلوريد (Cl^-) (في المياه الجوفية (CI vs EC) ونسبة سيمبسون (SR)، ومؤشر تأثير جودة المياه الجوفية بتداخل مياه البحر (GQI_{SWI})، ومؤشر الخلط بمياه البحر (SMI)، ومخطط تطور السحنات الهيدروكيميائية (HEF). بالإضافة إلى تطوير نموذج يعتمد على المنطق الضبابي يمكن من تقييم درجة تلوث الخزانات الجوفية بمياه البحر.

المواد والطرق:

تقع منطقة الدراسة جنوب شرقي مدينة طرابلس بين دائري عرض 32.75728 و 32.81566 شمالاً، وبين خطي طول 13.25076 و 13.34468 شرقاً (الشكل (1)) تمتاز المنطقة كونها زراعية، ونتيجة الزحف العمراني أصبحت ذات كثافة سكانية عالية، تسودها الأنشطة الصناعية والخدمية. تمثل هذه المنطقة أحد مناطق سهل جفارة، توصف بأنها مستوية

تعتمد ليبيا بشكل أساسي على المياه الجوفية كمصدر رئيسي للإمداد المائي للاستخدامات المختلفة، حيث إن انخفاض معدلات الأمطار وقلة الجريان السطحي، عدا بعض الأودية الموسمية، جعلها تواجه تحديات كبيرة في تأمين إمدادات المياه المطلوبة. تفاقمت هذه المشاكل بسبب الزيادة السكانية المستمرة وتوسع المدن المتاخمة للبحر، مما أدى إلى استنزاف الخزانات الجوفية الساحلية وتدهور نوعية وجود المياه. يمثل تلوث مياه الجوفية بمياه البحر والذي يعرف اصطلاحاً بتداخل مياه البحر (Seawater intrusion) أحد أكبر المعضلات التي تواجه مستخدمي تلك المياه من حيث التأثير السلبي على الصحة العامة والنظم البيئية المختلفة. كما إن التحدي الأكبر الذي يمكن مواجهه إدارة المياه الجوفية في المناطق المتاخمة للبحر يكمن في تداعيات التغير المناخي وارتفاع مستوى سطح البحر مستقبلاً (Melloul and Colin, (Taylor *et al.*, 2013) (Appelo and Postma, 2005) 1989). لقد تم تناول موضوع تداخل مياه البحر في الكثير من الأدبيات العلمية منذ اقتراح الصيغة الكلاسيكية Ghyben-Herzberg لدراسة العلاقة بين المياه الجوفية والعذبة في المناطق الساحلية (Drabbe & Ghyben, (Herzberg, 1901), 1889), (Verruijt, 1968.) في الوقت الحالي، تم تشكيل وتوسيع نظام بحثي معقد لفهم أوسع لتداخل مياه البحر (SWI)، ليشمل العديد من الفروع المتخصصة مثل استراتيجيات إدارة المياه الساحلية، وحماية موارد المياه الجوفية، وتصريف المياه الجوفية تحت البحر (SGD) وتقنيات المراقبة الميدانية، والعلاقات الهيدروكيميائية للمياه الجوفية، والمحاكاة العددية. كما أصبح هناك إدراكاً على نحو متزايد بالتأثيرات البيئية المختلفة لعملية تداخل مياه البحر، حيث لوحظ أن التفاعل بين المياه الجوفية وتداخل مياه البحر أصبح له تأثيرات كبيرة في ملوحة المياه الجوفية (Ferguson & Gleeson, 2012; Cao, Han., & Song, 2021). تم تطوير العديد من النماذج الفيزيائية والرياضية لدراسة ظاهرة تداخل مياه البحر في الخزانات الجوفية والتي عادة ما تتطلب بيانات حقلية مثل سمك وهندسة أنظمة الترسيب ومعرفة الظروف الحدية والمتاخمة للحالة الدراسية والخصائص الجيوكيميائية للخزانات الجوفية بالإضافة إلى ضرورة توفر بيانات عن آبار المراقبة ومعدلات الضخ وغيرها من الإجراءات المعتادة والتي في مجملها مكلفة وتستغرق وقتاً طويلاً للحصول عليها، مما يحث ويقتد تنفيذها والتحقق منها على نطاق واسع (Supriyadi *et al.*, 2017). لقد أمكن تحديد التلوث بمياه البحر من خلال معرفة الملوحة والتركيبية الكيميائية للمياه الجوفية والعلاقات التي تربط الأيونات الذائبة ببعضها البعض، فعلى سبيل المثال يمثل وجود الأيونات مثل الكلوريد والصوديوم في المياه الجوفية في الغالب ناتجاً عن مياه البحر ويشير إلى شدة التداخل (Appelo & Postma, 2005) (Panteleit, *et al.*, 2011), (Jones, Vengosh, (Ekhnaj, Ezlit, & Elaallem, 2014)

تم الاعتماد في هذه الدراسة على بعض المؤشرات المستخدمة لتقييم تلوث المياه الجوفية بمنطقة الدراسة بمياه البحر والمتمثلة في:

العلاقة بين درجة التوصيل الكهربائي (EC) وتركيز الكلوريد (Cl^-) في المياه الجوفية

تم استخدام الوصف البياني لدرجة التوصيل الكهربائي (ميكروسيمنس/سم) مقابل الكلوريد (مليجرام/لتر) لاستخلاص المعلومات المتعلقة بتداخل مياه البحر. ووفقاً لهذه الطريقة فقد صنف (Klassen, et al., 2014) المياه الجوفية بأنها عادية، أو مختلطة، أو ملوثة بمياه البحر (SWI). إن عينات المياه الجوفية التي تحتوي على تركيز من الكلوريد يتجاوز 200 (مليجرام/لتر) و EC يتجاوز 1000 (ميكروسيمنس/سم) من المرجح أن تكون متأثرة بتداخل مياه البحر، في حين أن عينات المياه الجوفية التي تتميز بتركيز كلوريد يتراوح بين 100-200 (مليجرام/لتر) وموصلية كهربائية تتراوح بين 600-2000 (ميكروسيمنس/سم) تمثل مزيجاً بين المياه العذبة والمياه المالحة، كما إن المياه التي تحوي تركيزات من الكلوريد تقل عن 100 (مليجرام/لتر) وتقل فيها درجة التوصيل الكهربائي عن 2000 (ميكروسيمنس/سم) توصف بأنها مياه عادية (Washington State Department of Ecology, 2005).

مؤشر سيمبسون (SR) Simpson Ration

تعرف نسبة سيمبسون (SR) على أنها مؤشر لتحديد مدى تلوث المياه الجوفية بمياه البحر. تم استنباط هذه النسبة من قبل (Simpson, 1946) حيث افترض أن الكلوريد الذائب هو السائد في مياه البحر بينما البيكربونات والكربونات الذائبة هي الأيونات السائدة في المياه الجوفية وتتواجد بتركيزات منخفضة نسبياً في مياه البحر تم حساب نسبة سيمبسون المستخدمة لوصف مدى تأثير المياه الجوفية بالتلوث بمياه البحر، وفقاً للمعادلة (1) التالية:

$$SR = \frac{Cl^-}{(HCO_3^- + CO_3^{2-})} \quad (1)$$

تدل (SR) على نسبة سيمبسون (بدون وحدات)، Cl^- تركيز أيون الكلوريد الذائب في المياه الجوفية (مليجرام/لتر)، HCO_3^- تركيز أيون البيكربونات الذائبة في المياه الجوفية (مليجرام/لتر) CO_3^{2-} تركيز أيون الكربونات الذائبة في المياه الجوفية (مليجرام/لتر). تصنف المستويات المتوقعة لتلوث المياه الجوفية بمياه البحر وفقاً لقيم نسبة سيمبسون (SR) على النحو التالي: أقل من 0.5 لا يوجد تلوث، (0.5 - 1.30) تلوث طفيف، (1.30 - 2.80) تلوث معتدل، (2.8 - 6.60) تلوث مرتفع، (6.60 - 15.50) تلوث شديد، وأعلى من 15.5 تلوث حاد.

مؤشر تأثير جودة المياه الجوفية بتداخل مياه البحر (GQI_{SWI})

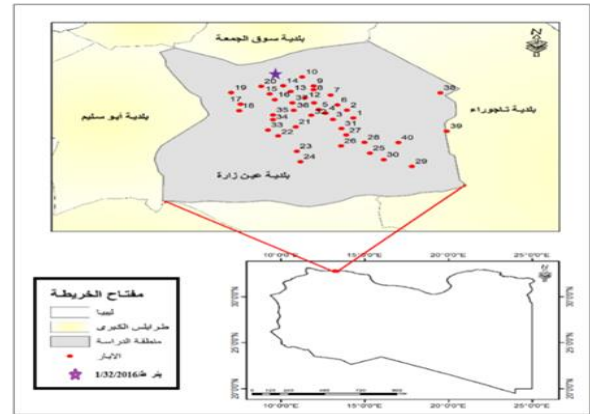
تم الاعتماد على مؤشر تأثير جودة المياه الجوفية بتداخل مياه البحر لتفسير تلوث المياه الجوفية بمياه البحر الناشئ عن عملية التداخل. طور هذا المؤشر (Tomazkiewics et al., 2014) وفقاً لتفسير تصنيف المياه والسيادة الأيونية في مخطط باير. توضح المعادلات (2)، (3) (4) كيفية حساب هذا المؤشر.

$$GQI_{SWI} = \frac{GQI_{Piper(mix)} + GQI_{fsea}}{2} \quad (2)$$

بالإمكان معرفة حدوث الخلط بين المياه الجوفية ومياه البحر بتقدير قيم مؤشر جودة المياه الجوفية المستنبطة من مخطط باير والمحددة ضمن مجال منطقة الخلط $GQI_{Piper(mix)}$ والممثل بالخط الأفقي المار خلال مركز مخطط باير، على النحو الموضح في الشكل (3). وبشكل عام فإن موقع المياه المالحة في المخطط يتحدد في النطاق الثاني (II) والمياه العذبة في النطاق الأول (I) يتم حساب $GQI_{Piper(mix)}$ بناء على المعادلة (3).

$$GQI_{Piper(mix)} = \left(\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{TCC} + \frac{HCO_3^-}{TAC} \right) \times 50 \quad (3)$$

بصفة عامة. يسود التركيب الجيولوجي للخرانات الجوفية بالمنطقة طبقات من الرمال، والحجر الرملي، والحصى، والحجر الجيري على النحو الموضح في الشكل (2). مناخياً تصنف المنطقة بأنها جافة وشبه جافة، مع انخفاض معدلات هطول الأمطار السنوي، ومع ذلك يعتبر المطول في الشتاء المصدر الرئيسي لتغذية المياه الجوفية حيث تتجمع مياه الأمطار في مناطق مستجمعات المياه وتتسرب إلى طبقة المياه الجوفية. تتراوح أعماق مستويات المياه في طبقة المياه الجوفية العلوية غير المحصورة بين 10 إلى 160 متراً تحت سطح الأرض، في حين يتراوح سمك الطبقة المشبعة من حوالي 10 متر إلى 90 متراً. معظم الآبار في هذه الطبقة الجوفية توفر إنتاجية تتراوح بين 20-50 متر مكعب في الساعة. (Ekhnaj, et al., 2014).



الشكل (1): خريطة موقع الدراسة

الوصف الصخري	السمك بالمتر	النسبة المئوية	
		من	إلى
رمل سطحية	10	0	10
حجر جيري مع طين	30	40	10
حجر جيري صلب	50	90	40
طين أخضر اللون مع حجر جيري	30	120	90
طين أخضر اللون مع حجر جيري	180	200	120
حجر جيري رمادي اللون مع طين أخضر اللون	100	300	200
حجر جيري أصفر	80	380	300
حجر رملي مع سلت	2	382	380
حجر رملي دقيق الحبيبات	68	450	382
حجر رملي فاتح	30	480	450
طين محمص اللون	5	485	480

الشكل (2) تتابع الطبقات الجيولوجية للبئر ط/1/32/2016 لمنطقة الدراسة.

(المصدر: وزارة الموارد المائية، 2021)

تجميع وتحليل العينات

تم تجميع 40 عينة مياه من آبار المياه الجوفية في منطقة الدراسة في شهر مارس لسنة 2023، وحددت مواقع الآبار بدقة بواسطة جهاز تحديد المواقع الجغرافي (GPS). تراوحت أعماق الآبار ما بين (45-120 متر) تحت مستوى سطح الأرض. تم تقدير الخصائص الفيزيوكيميائية لعينات المياه الجوفية ذات الصلة بهذه الدراسة والتي تضمنت تقدير كل من التوصيل الكهربائي (EC) والأملاح الذائبة الكلية (TDS) ودرجة التفاعل (pH) والأيونات الذائبة الرئيسية التي شملت الصوديوم (Na^+)، والبوتاسيوم (K^+)، الكالسيوم (Ca^{2+})، والمغنيسيوم (Mg^{2+})، والكلوريد (Cl^-)، والبيكربونات (HCO_3^-)، والكبريتات (SO_4^{2-}). أجريت التحاليل بمعامل مركز بحوث الطاقة وفقاً للطرق المشار إليها من قبل (APHA وآخرون، 1992).

مؤشرات تداخل مياه البحر

بالإمكان تصنيف قيم (SMI) وفقاً لدراسة (Aladejana *et al.*, 2021). إلى المستويات التالية: أقل من 1 مياه عذبة، بين 1 و 2 مياه طافية التلوث بمياه البحر، بين 2 و 6 مياه متوسطة التلوث بمياه البحر، بين 6 و 10 مياه ملوثة بمياه البحر على نحو خطير، 10 و 150 مياه ملوثة بمياه البحر على نحو خطير جداً، أعلى من 150 توصف بأنها مياه البحر.

مخطط تطور السحنات الهيدروكيميائية (HEF) Hydrochemical Evolution Facies

تم تطبيق مخطط HEF كمخطط بياني يمكن من تمثيل العمليات الكيميائية الرئيسية التي تحدث في خزانات المياه الجوفية الساحلية لفهم السحنات الهيدروكيميائية مما يسمح بالتعرف على مراحل تقدم أو تراجع عملية تداخل مياه البحر (Giménez-Forcada, 2010). يصف مخطط HEF التوزيع النسبي للأيونات السائدة في المياه العذبة والمالحة وذلك على النحو الذي يشير إلى السيادة النسبية لأي منها. ففي حالة المياه العذبة تكون الأيونات السائدة في المياه العذبة هي البيكربونات والكبريتات، في حين أن الكلوريد هو الأيون الأكثر سيادة في مياه البحر. إن التبادل الكاتيوني المتوقّع حدوثه ينشأ بين كل من أيوني الصوديوم والبوتاسيوم وأيون الكالسيوم (Gugulothu, 2022). يوضح الشكل (4) وصفاً للتفاعلات الكيميائية الرئيسية التي تحدث خلال تداخل مياه البحر وعند التخفيف بسبب عمليات التغذية للخزانات الجوفية بالمياه العذبة. وبناءً على التركيز النسبي للأيونات الرئيسية المتمثلة في الصوديوم والبوتاسيوم والكالسيوم والبيكربونات والكلوريد، يمكن تصنيف مياه الخزانات الجوفية إلى 16 سحنة هيدروكيميائية مشار إلى موقعها في المخطط بالأرقام من 1 حتى 16. فالسيادة التركيبية الكيميائية الأيونية في المياه وفقاً لذلك تكون على النحو التالي:

1: الصوديوم مع البيكربونات والكبريتات، 2: الصوديوم مع خليط من البيكربونات وخليط من الكبريتات، 3: الصوديوم مع خليط من الكلوريد، 4: الصوديوم مع الكلوريد، 5: خليط من الصوديوم مع البيكربونات والكبريتات، 6: خليط من الصوديوم مع خليط من البيكربونات وخليط من الكبريتات، 7: خليط من الصوديوم مع خليط من الكلوريد، 8: خليط من الصوديوم مع الكلوريد، 9: خليط من الصوديوم مع البيكربونات والكلوريد، 10: خليط من الكالسيوم مع خليط من البيكربونات وخليط من الكبريتات، 11: خليط من الكالسيوم مع خليط من الكلوريد، 12: خليط من الكالسيوم مع الكلوريد، 13: الكالسيوم مع البيكربونات والكبريتات، 14: الكالسيوم مع خليط من البيكربونات وخليط من الكبريتات، 15: الكالسيوم مع خليط من الكلوريد، 16: الكالسيوم مع الكلوريد. تجدر الإشارة إلى أن مفهوم الخليط يعني بأن النسبة المئوية للكاتيونات أو الأنيون أقل من 50٪ ولكنها في نفس الوقت أكبر من النسبة المئوية لأي من الكاتيونات والأنيونات الأخرى. يمثل الخط (A) حد الخلط بين مياه البحر (SW) والمياه العذبة (FW). ويمثل الخط (B) تطور السحنات الهيدروكيميائية في مرحلة التداخل أما الخط (C) فيشير إلى تطور السحنات الهيدروكيميائية في مرحلة التخفيف. على جانبي خط الخلط، هناك انتقالان يشيران إلى تطور عينات المياه وفقاً لعمليات تداخل مياه البحر (الخط B- والتخفيف (الخط C-). بالإمكان تحديد مراحل فرعية مختلفة خلال عمليات التطور وذلك باستخدام تطور الملوحة المقدرة من خلال نسبة الكلوريد (Dieu *et al.*, 2022). مثلث العمليات الأولية للخلط خلال مرحلة التداخل والتخفيف بالأسهم (I', I)، على التوالي. أما تفاعلات التبادل الكاتيوني العكسي والمباشر فمثلت بالأسهم (II', II)، على التوالي. تمثل الأسهم (III', III) تفاعلات الخلط خلال المراحل المتأخرة لكلا العمليتين (التداخل والتخفيف)، على التوالي، حتى الوصول إلى التوازن الكيميائي بين السحنات الكيميائية خلال التدفقات المائية (Giménez-Forcada, 2010).

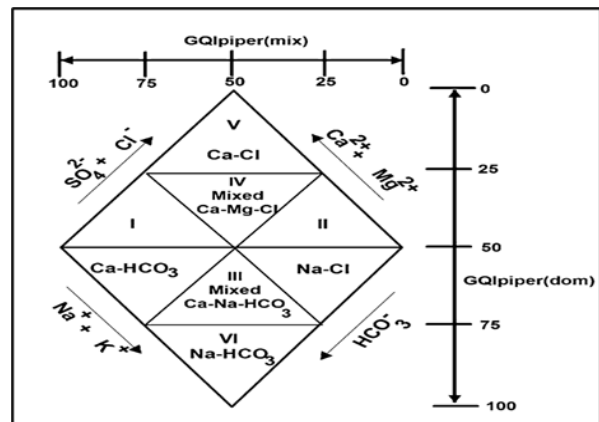
يتم تصنيف الفئات الفرعية في هذا المخطط بناءً على التركيز النسبي للكلوريد ودرجة التملح في عينات المياه الجوفية. تشمل الفئات الفرعية لمرحلة التخفيف التي تمثل تركيبة المياه العذبة إلى الفئات F1, F2, F3, F4, Fw، بينما تشمل الفئات الفرعية للمياه المالحة التي تمثل تركيبة المياه المالحة الفئات i1, i2, i3, i4, SW. لكي يصل الخزان الجوفي إلى مرحلة المياه العذبة (FW)، والتي تبدأ من الحالة الأولية حيث يكون الخزان الجوفي مشبعاً تماماً بمياه المالحة، واتجاه هذه العملية من اليابسة نحو الساحل، حيث تبدأ المياه المتغذية في غسل الخزان الجوفي وإعادة

حيث تمثل TCC و TAC المجموع الكلي للكاتيونات والأنيونات الذائبة في المياه الجوفية، على التوالي. إن وحدات التركيز المستخدمة في المعادلة (3) هي وحدات (ملليمكاف/لتر).

$$GQI_{fsea} = (1 - f_{sea}) \times 100 \quad (4)$$

تعرف GQI_{fsea} بأنها مؤشر لجودة المياه الجوفية المعتمدة على نسبة تلوثها بمياه البحر وتتراوح قيمها بين 0 لمياه البحر و 100 للمياه الجوفية العذبة (Moorthy *et al.*, 2024). وذلك على النحو الذي تشير إليه المعادلة (4). حيث تشير قيم f_{sea} إلى نسبة مساهمة مياه البحر في المياه الجوفية. تعتمد قيم f_{sea} المحسوبة وفقاً للمعادلة (5) على تركيز الكلوريد (ملليمكاف/لتر) في عينات المياه الجوفية mCl_{sample} ، والمياه العذبة $mCl_{freshwater}$ ومياه البحر $mCl_{seawater}$ وتتراوح قيمتها بين 0 لمياه البحر و 1 للمياه الجوفية العذبة.

$$f_{sea} = \frac{mCl_{sample} + mCl_{fresh}}{mCl_{sea} - mCl} \quad (5)$$



الشكل (3) نطاقات مخطط باير بالاعتماد على قيم مؤشرات

Tomaszkoewicz *et al.*,) $GQI_{piper(dom)}$ و $GQI_{piper(mix)}$ (2014)

تتراوح القيم المتحصل عليها لمؤشر تأثير جودة المياه الجوفية بتداخل مياه البحر (GQI_{SW}) بين (0 – 100). بالإمكان تصنيف هذا المؤشر وفقاً لتأثير المياه الجوفية بمياه البحر على النحو التالي: أعلى من 75 مياه عذبة، بين 50 و 75 مياه جوفية مختلطة بمياه البحر، و القيم الأقل من 5 تصنف على أنها مياه مالحة أو مياه بحر (Ezzeldin, 2022)

مؤشر الخلط بمياه البحر (SMI) Seawater Mixing Index

يستعمل مؤشر (SMI) في معرفة حدوث الخلط بين المياه المالحة ومياه البحر مع المياه الجوفية (Park and Aral, 2008), (Edet, 2016) يتم تقدير قيم هذا المؤشر وفقاً للمعادلة التالية:

$$SMI = a \times \frac{CNa^+}{TNa^+} + b \times \frac{CMg^{2+}}{TMg^{2+}} + c \times \frac{CCl^-}{TCl^-} + d \times \frac{CSO_4^{2-}}{TSO_4^{2-}} \quad (6)$$

تمثل قيم الثوابت a, b, c, d التركيز النسبي للأيونات الصوديوم والمغنيسيوم والكلوريد والكبريتات في مياه البحر، على التوالي. كما تمثل CNa^+ , CMg^{2+} , CCl^- , CSO_4^{2-} تركيز كل من أيونات الصوديوم والمغنيسيوم والكلوريد والكبريتات في المياه الجوفية بوحدات (ملليجرام/لتر)، على التوالي. تشير قيم T إلى قيم عتبة التركيز للأيونات الصوديوم والمغنيسيوم والكلوريد والكبريتات في المياه الجوفية والتي يمكن الحصول عليها باستخدام منحنيات التوزيع الاحتمالي التراكمي لتلك الأيونات. تدل قيم SMI الأعلى من 1 على حدوث خلط للمياه الجوفية بمياه البحر، في حين قيم SMI الأقل من 1 تدل على عدم حدوث الخلط (Jeen *et al.*, 2021).

الصيغة الشرطية مثل (IF- Then، إذا - فإن) و (إذا - و - أو - فإن، If- and- or- then)، (Jang *et al.*, 2004).

تم استخدام المنطق الضبابي لتطوير مؤشر يمكن من تقدير مستويات تلوث المياه الجوفية بمياه البحر. تم اختيار أربعة متغيرات والتي استعملت كمدخلات لتحديد مستويات تلوث المياه الجوفية بمياه البحر وهي تركيز الكلوريد (مليجرام/لتر) ومجموع الأملاح الكلية الذائبة (مليجرام/لتر)، ودرجة التوصيل الكهربائي (ميكروسيمنس/سم) والملوحة الكامنة (مليجرام/لتر)، لقد أظهرت العديد من الدراسات أنه بالإمكان الاعتماد على هذه البارامترات لتقييم تداخل مياه البحر (Zhang Bin *et al.*, 2013, Klassen, *et al.*, 2014, Simpson, 1946, Ekhnaj *et al.*, 2014

لغرض تطبيق المنطق الضبابي في تقييم تأثير المياه الجوفية بتداخل مياه البحر، تم استخدام التقييم المباشر المبني على حدود تصنيف (Zhang Bin *et al.*, 2013) للمياه الجوفية بناء على درجة تأثرها بتداخل مياه البحر، كما تم الاستعانة ببعض آراء الخبراء والمختصين في وصف تلك الحدود وبيان قيمها. يوضح الجدول (1) حدود تأثير المياه الجوفية بتداخل مياه البحر بالاعتماد على تركيز الكلوريد، درجة التوصيل الكهربائي، ومجموع الأملاح الكلية الذائبة والملوحة الكامنة.

جدول (1) قيم المؤشرات لدرجات مختلفة من تداخل مياه البحر

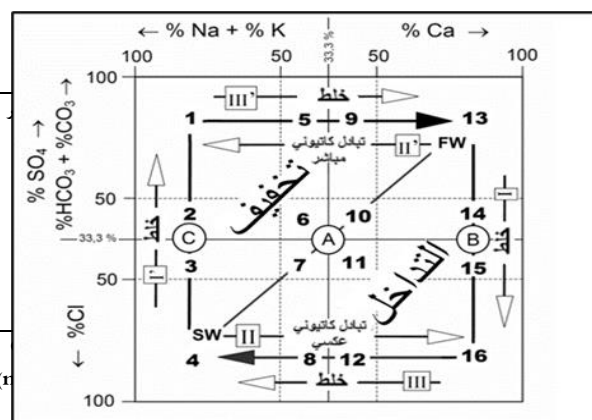
IV		III		II		I	
تداخل خطير		تداخل متوسط		تداخل طفيف		انعدام التداخل أو تداخل خفيف	
مياه مالحة		مياه شبه مالحة		مياه قليلة الملوحة		مياه عذبة أو متأثرة بالملوحة	
القيمة	مدى القيم	القيمة	مدى القيم	القيمة	مدى القيم	القيمة	مدى القيم
المتمثلة		المتمثلة		المتمثلة		المتمثلة	
1000	-825 3000	750	-375 1000	375	125- 500	125	250>
6075	3250- 15000	4200	-1775 4200	1775	625- 2350	625	1250>
3275	-1800 15000	1800	-1000 2300	1000	-350 1300	350	700>
36.5	-24.5 90	24.3	-12.5 32	12.5	4.25- 16.5	4.25	8.5>

في حين كانت المخرجات ممثلة في مؤشر تداخل مياه البحر (FSWI) وبناء على ذلك، تم تعيين دوال الانتماء لمدخلات المتغيرات والمخرجات كما هو موضح في الشكل (5). صنف المدخلات لغوياً إلى أربع مجموعات وهي مياه عذبة أو متأثرة بالملوحة (A)، مياه قليلة الملوحة (B)، مياه شبه مالحة (C)، مياه مالحة (D). إن القيم العددية المناظرة لهذه الأوصاف موضحة في الجدول (1). كانت أشكال دوال الانتماء شبه منحرف (Trapezoid) وذلك للمجموعتين الأولى والرابعة، في حين كانت مثلثية (Triangle) الشكل للمجموعتين الثانية والثالثة. أعطيت أربع أوصاف لغوية لمؤشر تداخل مياه البحر على النحو التالي: انعدام التداخل أو تداخل خفيف (I) بقيمة (1)، تداخل طفيف (II) بقيمة (2)، تداخل متوسط (III) بقيمة (3)، تداخل شديد (IV) بقيمة (4). وقد كانت أشكال دوال الانتماء شبه منحرف وذلك للمجموعتين الأولى والرابعة، في حين كانت مثلثية الشكل للمجموعتين الثانية والثالثة. أيضاً تم اعتماد طريقة مامداني (Mamdani) كأسلوب للاستدلال استناداً إلى الدالة المنطقية "إذا- فإن"، و الدالة (إذا، و، فإن) والتي استخدمت في العديد من الدراسات المشابه لتقييم جودة المياه الجوفية باستعمال المنطق الضبابي منها على سبيل المثال لا الحصر (Gayathri and Pieus, 2022) و (Raman *et al.*, 2009 و Oladipo *et al.*, 2021). حددت القواعد المستعملة لدوال الانتماء سواء للمدخلات والمخرجات المستخدمة في عملية الاستدلال الضبابي. القواعد الأولى هي لغوية وتعرف أيضاً باسم (إذا - ثم). تظهر القواعد أدناه مثلاً على القواعد المستخدمة في هذه الدراسة:

If (Chloride is A) and (iEC is A) and (iTDS is A) and (PS is A)
then (FSWI is I) (1)

التوازن مع مرحلة الملوحة التي تتميز بوجود تراكيز مرتفعة من Na Cl. إن الفئة الأولى في عملية التخفيف هي الفئة (f1)، وتتميز بتوافر السحنة Cl-MixNa، ويتغير التكوين الكيميائي للمياه تدريجياً نحو الفئات (f2)، (f3)، (f4) والتي تتميز بالسحنات الكيميائية المكونة من (MixNa-MixHCO₃، Ca-، (MixNa-MixCl)، (Ca⁺، Na⁺ HCO₃⁻)، على التوالي.

أما مرحلة التملح (SW) فإنها تبدأ تدريجياً مع التغير في التركيبة الكيميائية للمياه الجوفية من مياه عذبة نحو تكوين أول سحنة من الملوحة ممثلة (Cl-MixNa). خلال هذه العملية يتغير التكوين الكيميائي للمياه الجوفية من الفئة (i) بسحنة كيميائية مكونة من (MixHCO₃) نحو الفئة (i2) والتي تتميز بوجود السحنة (Ca-MixCl، MixCa- (MixCl نحو الفئة (i3) وبسحنة (Ca-Cl)، وأخيراً نحو الفئة (i4) والتي تتميز بسيادة السحنة (MixCa-Cl، MixNa-Cl) حيث تكون نسبة الكلوريد في المياه بين 50 و66.6% وفي النهاية تحمين مرحلة سيادة كلوريد الصوديوم (NaCl) في المياه الجوفية على جميع الخزان الجوفي (Forcada-Gimenez, 2010)



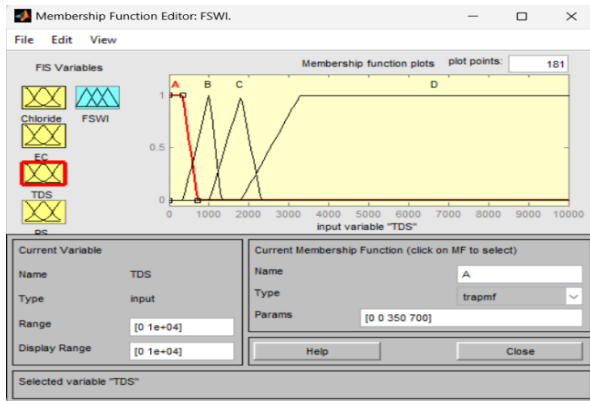
الشكل (4) مخطط تطور السحنات الهيدروكيميائية HEF. (Gimenez-Forcada, 2010)

مؤشر تداخل مياه البحر (FSWI) Fuzzy Seawater Intrusion
يعرف المنطق الضبابي على أنه منطق متعدد القيم يمكنه من صياغة العلاقة بين المدخلات والمخرجات وتحديد قيم وسطية بين منطقتين مختلفتين مثل قيم صحيحة أو خاطئة، قيم عالية ومنخفضة (Klenner *et al.*, 2010). تتضمن عملية نظام الاستدلال الضبابي المنطوق Fuzzy Inference System (FIS) ثلاث مقومات أساسية وهي:

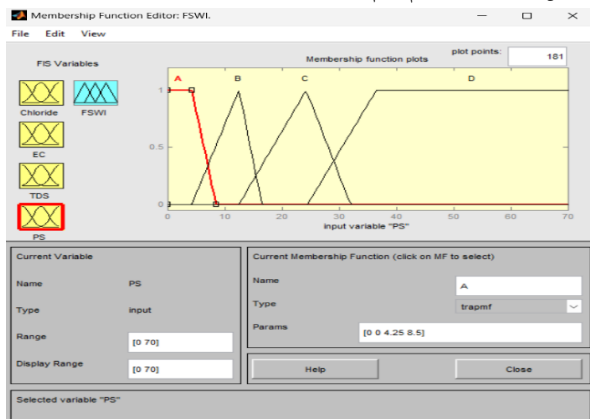
1- دوال الانتماء (Membership Function) والتي تستخدم في خطوات التضييب (Fuzzification) والذي يعمل على ربط قيم الإدخال الرقمية مع المجموعة الضبابية ويكافئ التحويل العددي إلى لغوي، بالإضافة إلى فك الضبابية (Defuzzification) والتي تربط المجموعة الضبابية مع القيم العددية وتكافئ التحويل اللغوي إلى العددي (Lakov, D, 1996).

2- المجموعات الضبابية (Fuzzy Sets) وهي امتداد للمجموعات التقليدية، وتعبر عن درجة انتماء العناصر لمجموعة ما بشكل غير قطعي حيث لا يكون العنصر إما داخل المجموعة أو خارجها بشكل صارم بل يمكن أن ينتمي إليها بدرجة معينة تتراوح بين 0 و1 مما يسمح بالتعامل مع المعلومات غير الدقيقة أو الغامضة بشكل أكثر مرونة (Klir and Folger, 1988).

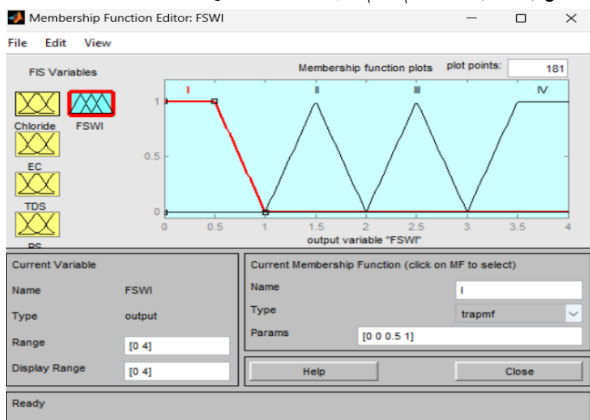
3- قواعد الاستدلال (Inference Rules) وهي مجموعة من القواعد التي تستخدم لاستنتاج نتائج بناء على مدخلات ضبابية في نظم التحكم الضبابي (Suganthi and Samuel, 2012). تقوم هذه القواعد بدمج المعلومات التي يتم التعبير عنها بواسطة المجموعات الضبابية لتوليد نتائج أو استنتاجات ضبابية جديدة وعادة ما تستخدم القاعدة في



الشكل (5-د). التصميم العام لدوال الانتماء TDS



الشكل (5-هـ). التصميم العام لدوال الانتماء للملوحة الكامنة



الشكل (5-و). التصميم العام لدوال الانتماء للمؤشر تداخل مياه البحر

الشكل (5) التصميم العام لنموذج المنطق الضبابي المستخدم ودوال الانتماء للمدخلات والمخرجات المختلفة.

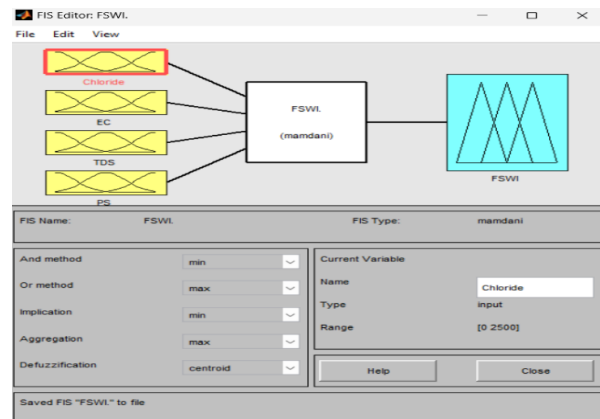
لفك الضبابية تم استخدام طريقة المركز (Centroid Method) والتي تعتبر من الطرق الدقيقة والشاملة في معظم الحالات (Taylor, 2004).

البرمجيات المستخدمة

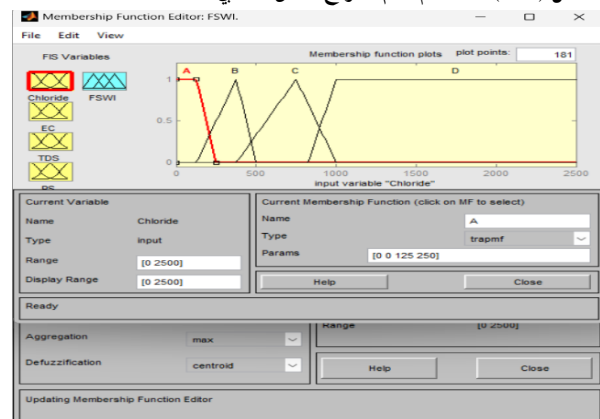
تم استخدام برنامج *Surfer®* (Golden Surfer version 10.1.561) *Software, LLC, 2011*) لرسم خرائط التوزيع المكاني للخصائص الفيزيوكيميائية ومؤشرات تداخل مياه البحر، ولتقدير الخصائص الإحصائية تم الاستعانة ببرنامج *Minitab 20222*, version 21.2). لبناء نموذج FSWI تم استخدام أداة المنطق الضبابي. صندوق الأدوات في برنامج MATLAB®.

If (Chloride is C) then (FSWI is III) (1)

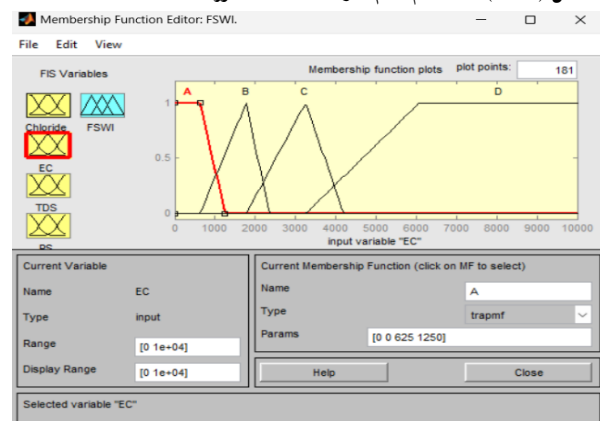
يوضح الشكل (5) التصميم العام المستخدم لنموذج المنطق الضبابي ودوال الانتماء للمدخلات والمخرجات المختلفة.



الشكل (5-أ). التصميم العام لنموذج المنطق الضبابي



الشكل (5-ب). التصميم العام لدوال الانتماء للكلوريد



الشكل (5-ج). التصميم العام لدوال الانتماء لدرجة التوصيل الكهربائي

النتائج والمناقشة:

جدول (2). الخصائص الإحصائية للمياه الجوفية بمنطقة الدراسة.

البارامتر	المتوسط الحسابي	أقصى قيمة	أقل قيمة	الانحراف المعياري	معامل الاختلاف
عمق البئر (متر)	82.05	120.0	45.0	20.0	24.38
pH	7.49	8.0	7.01	0.24	3.19
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2320.04	63630.0	500.0	1773.62	76.45
TDS (mg/l)	2133.90	7100.0	363.60	1737.72	81.43
Ca^{++} (mg/l)	150.76	606.0	24.0	146.62	97.25
Mg^{+2} (mg/l)	60.47	132.30	18.57	35.25	58.30
Na^{+} (mg/L)	235.39	838.30	39.0	234.10	99.45
K^{+} (mg/L)	6.12	14.0	2.00	2.58	42.19
HCO_3^{-} (mg/L)	196.87	289.0	121.10	43.97	22.33
Cl^{-} (mg/L)	578.14	2243.0	60.35	600.21	103.82
SO_4 (mg/L)	60.73	190.0	9.0	41.33	68.05

الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية.

يوضح الجدول (2) إحصائية نتائج التحليل الفيزيائي والكيميائي للأيونات الرئيسية بالمواقع التي تم أخذ العينات منها. أظهرت النتائج أن قيم درجة التفاعل (pH) في المياه الجوفية بمنطقة الدراسة تراوحت بين 7.01 وذلك للبئر 13 و 8 للبئر 39 ومعامل الاختلاف (3.19%) وبانحراف معياري في حدود (0.24)، ومتوسط حسابي (7.49). يظهر الشكل (6-أ) التوزيع المكاني لقيم درجة التفاعل، والذي يلاحظ من خلاله الانخفاض نسبي في قيم pH في الجهة الشمالية والشمالية الغربية مقارنة ببقية المناطق، في حين كانت القيم المرتفعة من pH تتزايد في الاتجاه الشرقي. إن درجة التفاعل للمياه الجوفية تعتبر مؤشراً مهماً جداً لجودتها ويتم التحكم بها من خلال كمية ثاني أكسيد الكربون المذاب والكربونات والبيكربونات (Ghandour, et al. 1985) وكما هو موضح بالشكل (1) فإن التركيبة الكيميائية للطبقات الحاملة للمياه في المنطقة يسودها الحجر الجيري (كربونات الكالسيوم)، وأن احتمال تجانس طبيعة تلك الطبقات قد يفسر التباين المنخفض في قيم pH بين عينات المياه المختلفة.

أيضاً تراوحت قيمة TDS بين 363.60 (ملليجرام/لتر) في البئر (39) و 7100 (ملليجرام/لتر) للبئر رقم (10) وبلغت قيمة معامل الاختلاف (81.43%) والمتوسط الحسابي 2133.90 (ملليجرام/لتر) والانحراف المعياري 1737.72 (ميكروسيمنز/سم). ومن خلال الشكل (6-ب) الذي يوضح التوزيع المكاني لمجموع الأملاح الذائبة الكلية في عينات مياه آبار منطقة الدراسة فإن أقصى قيمة كانت في الجهة الشمالية والشمالية الغربية لمنطقة الدراسة. إن الأملاح الكلية الذائبة تعكس وبطريقة مباشرة محتوى المياه من الأيونات الذائبة ودرجة التوصيل الكهربائي لها، حيث تزداد تلك القيم مع ارتفاع الأملاح الذائبة الكلية.

وفيما يتعلق بدرجة EC لعينات مياه الآبار في منطقة الدراسة والواردة بالجدول (2) فقد تراوحت قيمها بين 500 (ميكروسيمنز/سم) وذلك في عينة البئر (39) و 6360 (ميكروسيمنز/سم)، وذلك للبئر (32)، كما كان الانحراف المعياري 1773.62 (ميكروسيمنز/سم)، ومتوسط حسابي 2320.04 (ملليجرام/لتر)، ومعامل اختلاف (76.45%)، ومن خلال الشكل (6-ج) الذي يبين التوزيع المكاني لدرجة التوصيل الكهربائي EC فقد لوحظ ارتفاع نسبي في قيمة التوصيل الكهربائي في الجهة الشمالية والشمالية الغربية مقارنة ببقية المناطق.

تراوحت قيم تركيز Na^{+} في عينات مياه الآبار بين 39 (ملليجرام/لتر) والتي كانت في البئر (39) و 838.3 (ملليجرام/لتر) في البئر (10)، وكانت قيم الانحراف المعياري ومعامل الاختلاف ومتوسط تركيز الصوديوم في مياه منطقة الدراسة 234.10 (ميكروسيمنز/سم)، و 99.45%، و 235.39 (ملليجرام/لتر)، على التوالي. يلاحظ من خلال الشكل (6-د) أن المنطقة الشمالية والشمالية الغربية هي المناطق أكثر ارتفاعاً في تركيز الصوديوم. وعادة ما يتواجد الصوديوم بتركيزات منخفضة في المياه العذبة مقارنة بالكالسيوم والمغنيسيوم، إلا إنه يتزايد في المياه الجوفية المتأثرة بتداخل مياه البحر.

أما بالنسبة لتركيز K^{+} فلقد كانت أقل تركيز له 2 (ملليجرام/لتر) في البئر (39) وأعلى تركيز 14.0 (ملليجرام/لتر) في البئر (32)، ومتوسط حسابي 6.12 (ملليجرام/لتر) وانحراف معياري 2.58 (ميكروسيمنز/سم) ومعامل اختلاف 42.19%. ومن خلال التوزيع المكاني الموضح بالشكل (6-هـ) فإن مستويات تركيزه تزداد في الشمال الغربي مقارنة ببقية المناطق.

وفيما يتعلق بالكالسيوم Ca^{++} فقد كان أقل تركيز له 94 (ملليجرام/لتر) في البئر (39) وأعلى تركيز 606 (ملليجرام/لتر) في البئر رقم (10) وكانت قيم الانحراف المعياري ومعامل الاختلاف، ومتوسط تركيزه في مياه منطقة الدراسة 146.62 (ملليجرام/لتر) و 97.25%، و 150.67 (ملليجرام/لتر)، على التوالي. يلاحظ من خلال الشكل (6-و) ارتفاع تركيز الكالسيوم وهذا يتعاطم تركيزه في الشمال والشمال الغربي من منطقة الدراسة

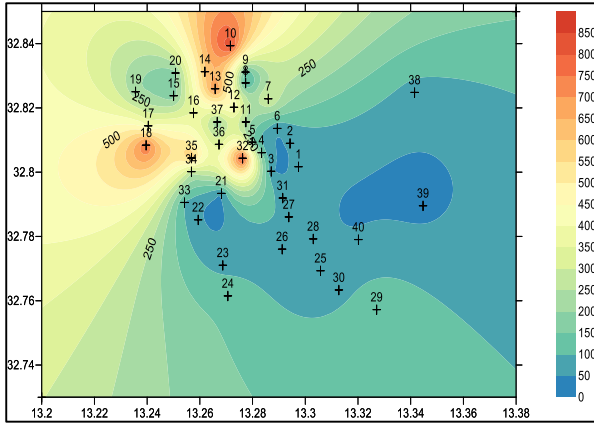
أيضاً يلاحظ من خلال الجدول رقم (2) أن أقل تركيز للمغنيسيوم Mg^{+2} بلغ 18.57 (ملليجرام/لتر) في البئر (39) وأقصى تركيزه 132.30 (ملليجرام/لتر) في البئر (32) وكانت قيم الانحراف المعياري ومعامل الاختلاف 35.25 (ملليجرام/لتر)، و 58.30% ومتوسط تركيز 60.47 (ملليجرام/لتر) على التوالي ويلاحظ من خلال الشكل (6-ز) ارتفاع أيون المغنيسيوم في الجهة الغربية من منطقة الدراسة.

أما بالنسبة لتركيز أيون Cl^{-} فكان أقل تركيز له 60.35 في البئر (39) وأقصى تركيز 2243 (ملليجرام/لتر)، في البئر (10) وكان الانحراف المعياري ومعامل اختلاف 600.21 (ملليجرام/لتر). 103.82%، ومتوسط تركيز أيون الكلوريد 578.15 (ملليجرام/لتر). من خلال الشكل (6-ح) الذي يبين أن تركيز أيون الكلوريد في مياه آبار منطقة الدراسة كان مرتفعاً في الجهة الشمالية والشمالية الغربية. حيث إن الكلوريد من الأيونات التي لها القدرة على الانتقال، ويعزى ذلك لذوبانيته العالية في المياه خاصة عندما يرتبط مع الصوديوم والكالسيوم والمغنيسيوم. كما يشكل ارتفاع تركيز الكلوريد المصاحب لارتفاع الأملاح الكلية الذائبة يعطي دلالة على حدوث تلوث المياه الجوفية بمياه البحر (Fidelibus et al., 2025).

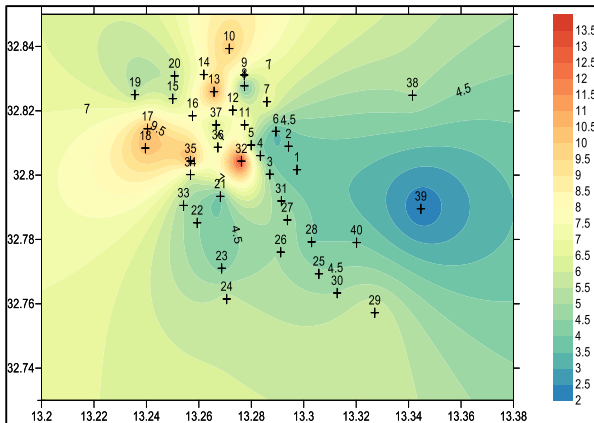
وفيما يتعلق بالبيكربونات HCO_3^{-} فإن أقل تركيز له كان 121.10 (ملليجرام/لتر) في البئر (1)، وأقصى تركيز لها 289 (ملليجرام/لتر)، في البئر رقم (10) وبانحراف معياري ومعامل اختلاف 43.97 (ميكروسيمنز/سم). 22.33% ومتوسط تركيز 196.87 (ملليجرام/لتر). ومن خلال الشكل (6-ط) يلاحظ ارتفاع تركيز أيون البيكربونات في الآبار الواقعة في الشمال والشمال الغربي لمنطقة الدراسة. من ناحية أخرى كان أقل قيم تركيز لأيون SO_4 هو 9 (ملليجرام/لتر) في البئر (39) وأقصى تركيز له 190 (ملليجرام/لتر) في البئر (32) وانحراف معياري ومعامل اختلاف 41.33 (ملليجرام/لتر) و 68.05%، على التوالي. في حين كان متوسط تركيزها 60.73 (ملليجرام/لتر). يوضح الشكل (6-ي) أن تركيز الكبريتات في آبار مياه منطقة الدراسة كان مرتفعاً في الجهة الشمالية والشمالية الغربية. إن القيم المرتفعة من الكبريتات والكلوريد في المياه الجوفية قد يدل على حدوث إذابة للجبس في المكون الصخري للخزانات الجوفية وتلوث المياه الجوفية بمياه البحر (Pulido-Lebeuf, 2004).

من خلال النتائج المتحصل عليها يتضح ارتفاع قيم معامل الاختلاف لكل من الكلوريد والصوديوم والكالسيوم والأملاح الكلية الذائبة مقارنة ببقية الأيونات مما يعطي دلالة على تباين مياه آبار المنطقة في محتواها الكيميائي من تلك الأيونات. كما إن انخفاض معامل الاختلاف لكل من البيكربونات ودرجة التفاعل يعكس التباين المنخفض لهاتين الخاصيتين والتي قد تدل على الاستقرار النسبي لهما في المياه الجوفية. أظهرت النتائج أن ترتيب السيادة النوعية للكاتيونات

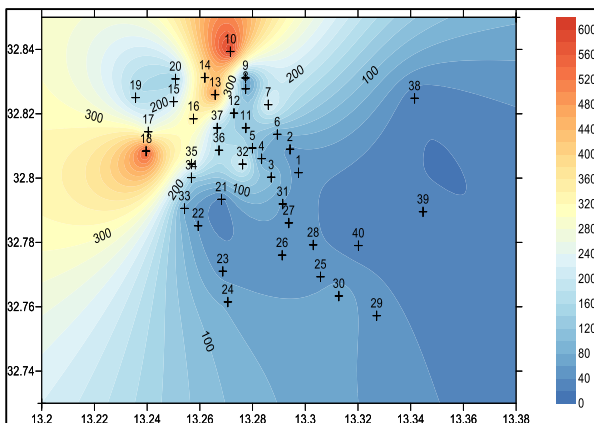
كانت للمصوديوم يليه الكالسيوم ثم الماغنسيوم فالبوتاسيوم، أما على صعيد الكاتيونات فلقد كانت السيادة النوعية للكلوريد ثم البيكربونات يليها الكبريتات. إن مثل هذا التسلسل في الترتيب لوحظ في عينات المياه الجوفية المتأثرة بمياه البحر على النحو الذي أوضحه (Diouf *et al.*, 2022).



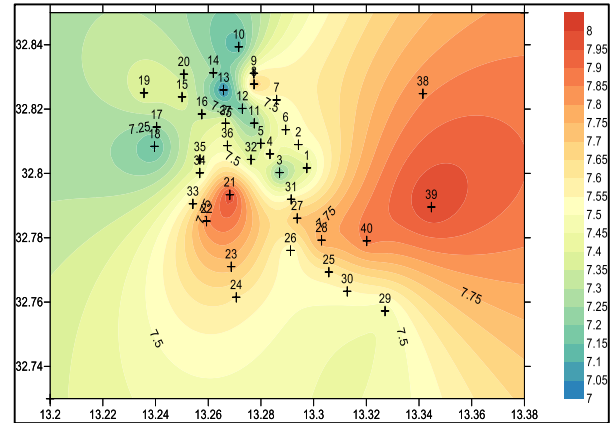
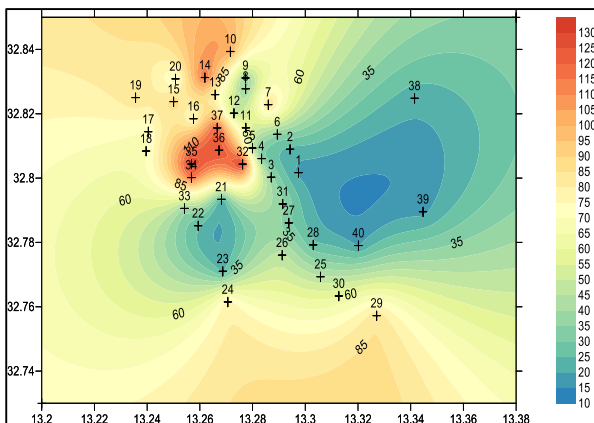
الشكل (د-6) التوزيع المكاني للصوديوم (Na+)



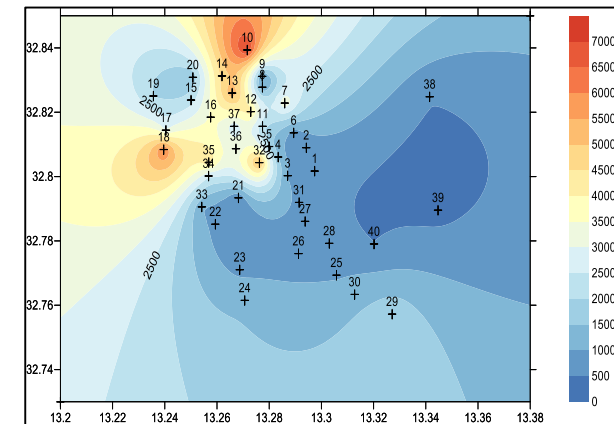
الشكل (هـ-6) التوزيع المكاني للبوتاسيوم (K+)



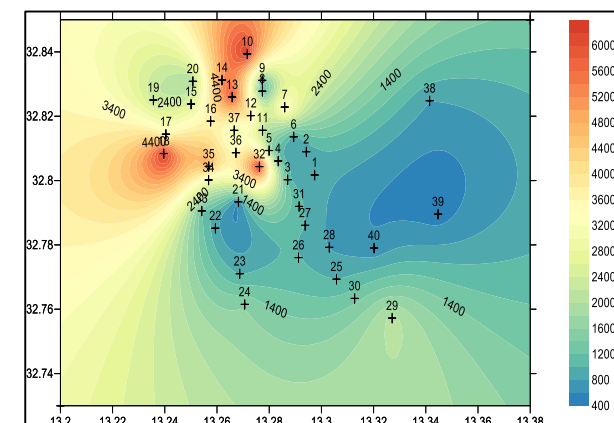
الشكل (و-6) التوزيع المكاني للكالسيوم (Ca+)



الشكل (أ-6) التوزيع المكاني لدرجة التفاعل (pH)

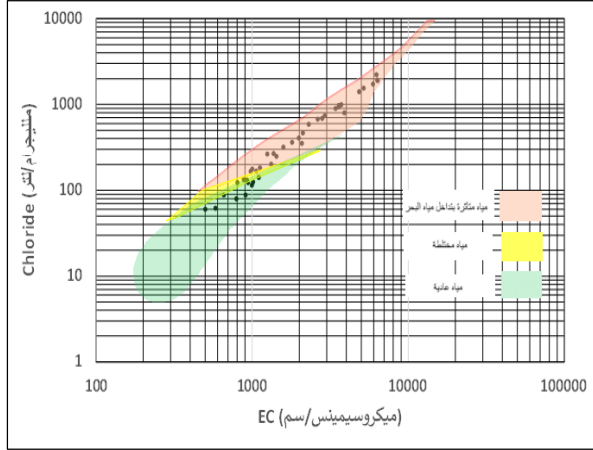


الشكل (ب-6) التوزيع المكاني للأملاح الكلية الذائبة (TDS)



الشكل (ج-6) التوزيع المكاني لدرجة التوصيل الكهربائي (EC)

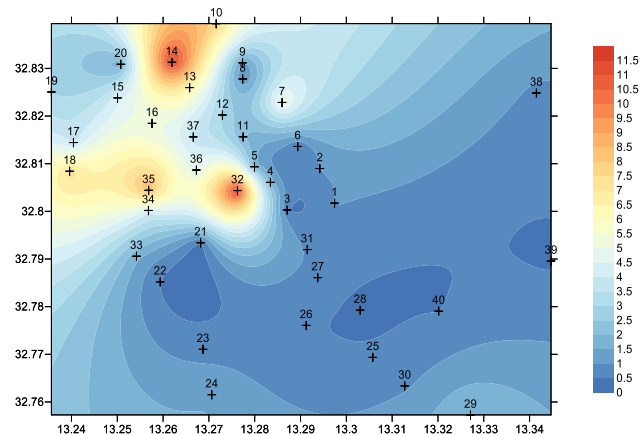
(مليجرام/لتر) وبقيمة درجة توصيل كهربائي 6240، 6360 (ميكروسيمنس/سم)، على التوالي. تصنف 27.5% من عينات المياه الجوفية بأنها مياه مختلطة، وبقية عينات المياه الجوفية تصنف بأنها عادية بنسبة (12.5%). وبشكل عام، تتوافق نتائج الرسم البياني لـ Cl مقابل EC مع الدراسات السابقة لكل من (Lekshmi and Kani., 2017)؛ (Alfarrah and Walraevens., 2018)



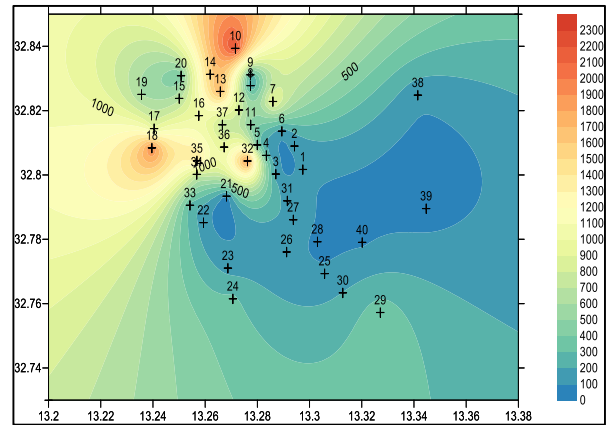
الشكل (7) تصنيف المياه الجوفية وفقاً للعلاقة بين (EC) وتركيز (Cl⁻).

نسبة سيمبسون (SR) Sampson Ration

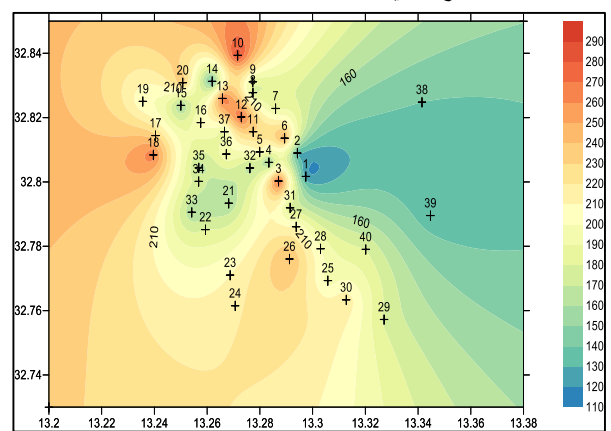
أظهرت نتائج حساب قيم نسبة سيمبسون أن أقل قيمة لها كانت 0.388 وذلك عند البئر 21 وهو ما يشير إلى عدم وجود تلوث ناشئ عن تداخل مياه البحر، في حين كانت أقصى قيمة لها 11.61 وذلك في البئر 32 الأمر الذي يبنى عن تلوث المياه الجوفية بمياه البحر وتصنيف شديدة التأثير. كانت نسب تأثر الآبار وفقاً لتصنيف نسبة سيمبسون على النحو التالي: 12.5، 20، 25، 30، 12.5 %، لا تلوث، تلوث طفيف، تلوث معتدل، تلوث مرتفع، تلوث شديد، على التوالي. إن هذه النسب تدل على ارتفاع احتمالية التلوث آبار منطقة الدراسة بتداخل مياه البحر. يوضح الشكل (8) التوزيع المكاني لنسبة سيمبسون والذي يظهر أن القيم المرتفعة لهذه النسبة تقع في الشمال الغربي لمنطقة الدراسة الأمر الذي يعزى إلى القرب الجغرافي النسبي لمواقع الآبار من ساحل البحر. وعلى نحو مخالف فإن نسبة سيمبسون تتناقص في الاتجاه الجنوب الشرقي لمنطقة الدراسة. إن ارتفاع قيم نسبة سيمبسون تعزى بدرجة كبيرة إلى ارتفاع تركيز الكلوريد الذائب في المياه الجوفية والناشئ عن تداخل مياه البحر (Klassen *et al.*, 2014 Sudaryanto 2018). حيث يتعاظم تركيزه في مياه البحر ويتناقص في المياه الجوفية غير المتأثرة بمياه البحر. كما إن ارتفاع معدلات الضخ يساهم بدرجة رئيسية في حدوث هذه الظاهرة (Cheng *et al.*, 2000, Lu and Werner., 2013, Shi *et al.*, 2020). حيث كانت الآبار ذات القيم المرتفعة لنسبة سيمبسون هي الأقدم إنشأً مقارنة ببقية الآبار.



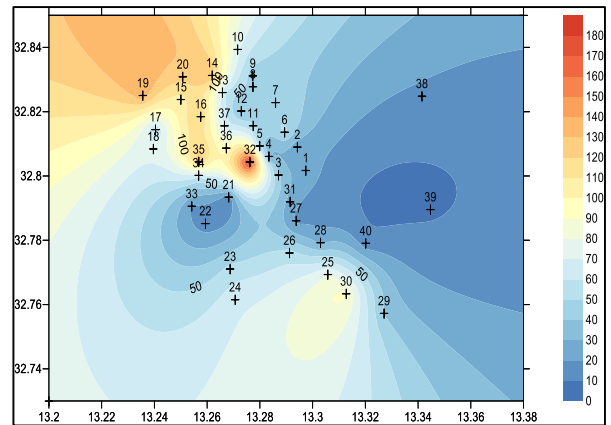
الشكل (6-ج) التوزيع المكاني للمغنسيوم (Mg²⁺)



الشكل (6-ح) التوزيع المكاني لدرجة التفاعل (Cl⁻)



الشكل (6-ط) التوزيع المكاني للبيكربونات (HCO₃³⁻)



الشكل (6-ي) التوزيع المكاني للكبريتات (SO₄²⁻)

الشكل (6) التوزيع المكاني للخصائص الفيزيوكيميائية للمياه الجوفية

مؤشرات تداخل مياه البحر

العلاقة بين درجة التوصيل الكهربائي (EC) وتركيز الكلوريد (Cl⁻) في المياه الجوفية يوضح الشكل (7) تصنيف المياه الجوفية وفقاً للعلاقة بين درجة التوصيل الكهربائي (EC) وتركيز الكلوريد (Cl⁻) ويظهر الشكل وجود ثلاث مناطق (عادية، ومختلطة، ومتأثرة بتداخل مياه البحر)، وأن معظم عينات المياه الجوفية نسبتها (60%) التي تحتوي على تركيز كلوريد يزيد عن 200 (مليجرام/لتر) و EC تزيد عن 1000 (ميكروسيمنس/سم) متأثرة بتداخل مياه البحر، حيث كانت الآبار (32، 10) الأكثر تأثراً بتداخل مياه البحر بقيمة كلوريد 2210، 1917

الشكل (8) التوزيع المكاني لنسبة سيميوسون (SR)

جدول (3) تصنيف مخطط تطور السحنات الهيدروكيميائية (HEF) والسحنات لكل فئة من عينات منطقة الدراسة

نوعية المياه	المنطقة	%نسبة العينات	عدد العينات	أثر التبادل الكاتيوني	النسبة الأيونية	السحنة الأيونية	الفئة الفرعية
Ca-CHO ₃	13	0	0	مياه عذبة	HCO ₃ >50 Ca>66.6	-HCO ₃	FW
Mix Ca-HCO ₃	1	10	40, 39, 28, 21	طور التخفيف تبادل كاتيوني مباشر	HCO ₃ >50	-HCO ₃	F4
Mix Na-Mix HCO ₃	6	2.5	26		50>HCO ₃ 33<HCO ₃	-Mix HCO ₃	F3
Na-Mix Cl	3	0	0		33.3<Cl Cl≤50	-Mix Cl	F2
Na-Cl	4	0	0		50<Cl 66.6>Cl	-Cl	F1
Mix Ca-Mix HCO ₃	10	7.5	22, 6, 3	طور التداخل تبادل كاتيوني عكسي	50>HCO ₃ 33<HCO ₃	-Mix HCO ₃	I1
Mix Ca-Mix Cl	11	2.5	25		33.3<Cl Cl≤50	-Mix Cl	I2
Mix Ca-Cl	12	7.5	30, 24, 2		50<Cl 66.6>Cl	-Cl	I3
Mix Na-Cl	8	20	20, 9, 8, 1, 38, 31, 27, 23		66.6<Cl	-Cl	I4
	8	30	10, 7, 5, 4, 18, 17, 14, 11, 36, 34, 33, 19				
Mix Ca-Cl	12	10	37, 29, 16, 15				
Na-Cl	4	10	35, 32, 13, 12	مياه بحر	66.6<Cl 50<Na	-Cl	SW

مخطط تطور السحنات الهيدروكيميائية (HEF) Hydrochemical Evolution Facies

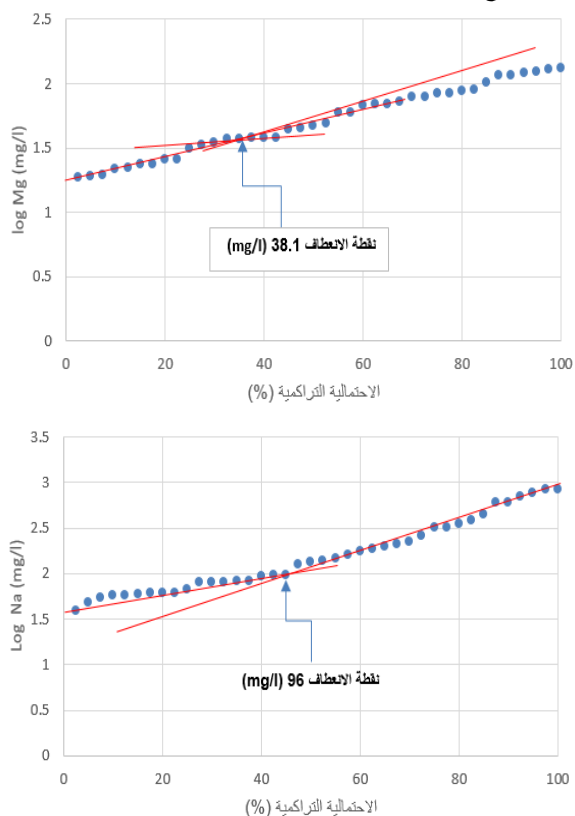
إن الاعتماد الوحيد على مخططات باير قد لا يكون كافياً لتحديد تطور السحنات الهيدروكيميائية للمياه الجوفية خلال مرحلتي التخفيف والملوحة الناشئة عن تداخل مياه البحر (Ghiglieri *et al.* 2012). وقد تم التغلب على ذلك القصور استناداً على مخطط تطور السحنات الهيدروكيميائية (HEF) المقترح من قبل (Gimenez Forcada., 2010). وعلى الرغم من أن هذا المخطط مفيد في توضيح تطور السحنات الهيدروكيميائية للمياه الجوفية خلال فترات زمنية مختلفة، غير أن استخدامه في وصف السحنات الهيدروكيميائية للمياه الجوفية لعدة آبار يمكن من تصنيف تلك المياه اعتماداً على مدى تأثرها بتداخل مياه البحر وإمكانية متابعة حالتها مستقبلاً. يوضح الشكل (9) مخطط تطور السحنات الهيدروكيميائية (HEF) لآبار منطقة الدراسة. وفقاً للنتائج التي تم الحصول عليها من الجدول (3) يتبين أن مياه الآبار تتميز وفقاً لأثر التبادل الكاتيوني بوجود ثلاث أطوار وهي طور التخفيف (تبادل كاتيوني مباشر) وطور التداخل (تبادل كاتيوني عكسي) وطور مياه البحر. في حين لم يتواجد طور للمياه العذبة ضمن نطاق عينات مياه الآبار موضع الدراسة. إن ما تنصف به المياه عند طور التخفيف بأنها ذات سحنة من البيكربونات وذلك عند الفئة الفرعية (F4) ومن ثم تتحول إلى سحنة من مزيج من البيكربونات (F3) إلى مزيج من الكلوريد (F2) وأخيراً إلى سحنة كلوريدية عند الفئة الفرعية (F1). بلغت نسبة الآبار الواقعة ضمن طور التخفيف المتأثرة بالتبادل الكاتيوني المباشر 12.5%، وقد صنفت إلى مجموعتين الأولى ونسبتها 10% واشتملت على الآبار (21، 28، 39، 40)، وتتميز نوعية المياه فيها بالسيادة العالية للبيكربونات مع مزيج من الكالسيوم (Mix Ca-HCO₃)، أما المجموعة الثانية ونسبتها 2.5% والمثلة بالبر 26 فإن نوعية المياه فيها مكونة من مزيج من البيكربونات ومزيج من الصوديوم (Mix Na-Mix HCO₃).

إن النسبة الأكبر من الآبار (77.5%) صنفت على أنها واقعة ضمن نطاق طور التداخل المتصف بأثر التبادل الكاتيوني العكسي. وقد اتصف هذا النطاق بوجود الفئات الفرعية الأربعة وهي: (I1) بسحنة من مزيج من البيكربونات (Mix HCO₃-)، و(I2) بسحنة من مزيج من الكلوريد (Mix Cl-)، و(I3)، و(I4) وتنصف بسحنة من الكلوريد لكليهما (Cl⁻). توزعت نسب الآبار المتأثرة بتداخل مياه البحر على النحو التالي: 7.5% وذلك للآبار 3، 6، 12 وتميزت بأنها ضمن الفئة الفرعية (I1) بنوعية مياه مكونة من مزيج من الكالسيوم ومزيج من البيكربونات (Mix Ca-Mix HCO₃)، ونسبة 2.5% للبر 25 الواقع ضمن الفئة الفرعية (I2) بنوعية مياه من مزيج من الكالسيوم ومزيج من الكلوريد (Mix Ca-Cl)، ونسبة 7.5% ضمن الفئة الفرعية (I3) تشمل الآبار 2، 24، 30 ونسبتها (7.5%) بنوعية مياه مزيج من الكالسيوم والكلوريد (Mix Ca-Cl)، 20% تشمل الآبار (1، 8، 9، 20، 23، 27، 31، 38) ونوعية مياهها مزيج من الصوديوم والكلوريد (Mix Na-Cl). وقعت النسبة الأكبر من عدد الآبار (40%) ضمن نطاق الفئة (I4) وبلغت فيها نسبة الكلوريد أعلى من 66% وصنفت إلى مجموعتين وفقاً لنوعية المياه: الأولى مزيج من الصوديوم والكلوريد (Mix Na-Cl) وكانت للآبار (4، 5، 7، 10، 11، 14، 17، 18، 19، 33، 34، 36) بنسبة (30%)، أما الثانية فكانت بنوعية مياه مزيج من الكالسيوم والكلوريد (Mix Ca-Cl) ونسبة (10%) للآبار (15، 16، 29، 37). تميزت مجموعة الآبار (12، 13، 32، 35) البالغ نسبتها 10% من مجموع الآبار الكلية

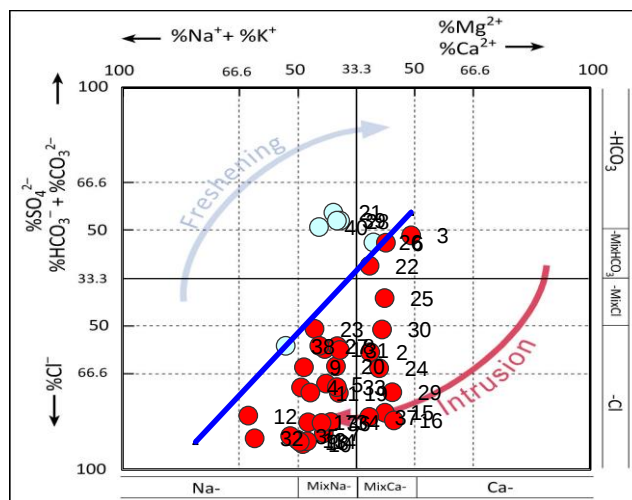
الشكل (10) التوزيع المكاني لتأثير جودة المياه الجوفية بتداخل مياه البحر (GQI_{SWI})

مؤشر الخلط بمياه البحر (SMI) Seawater Mixing Index

يوضح الشكل (11) منحنيات نسب الاحتمالية التراكمية (%) للمتغيرات الهيدروكيميائية المستخدمة في تقدير مؤشر الخلط بمياه البحر (SMI). وتظهر قيمة التقاطعات في تلك المنحنيات القيم الحرجة (Park and Aral., 2008). لقد تم استخدام القيمة الصغرى المتحصل عليها لكل أيون حيث لوحظ وجود أكثر من قيمة حرجة وذلك على النحو الذي استخدمه (Prusty *et al.*, 2020). ووفقاً لذلك كانت تلك القيم 96، 59.38.1، 88.74، 31 (مليجرام/لتر)، وذلك لكل من الصوديوم، والمغنيسيوم، والكلوريد، والكبريتات على التوالي. تم استخدام هذه القيم في تقدير مؤشر الخلط بمياه البحر على النحو المشار إليه في المعادلة (6). أظهرت النتائج أن قيم (SMI) تراوحت بين 0.54 لعينة مياه البئر (3) و 16.74 لعينة مياه البئر (10). كما كانت قيمة متوسط (SMI) لكامل العينات 4.5. إن نسبة الآبار التي تنخفض فيها قيم (SMI) عن 1 وهو المؤشر على عدم وجود خلط للمياه الجوفية مع مياه البحر بلغ 10%، وكانت 0.54، 0.59، 0.76، 0.77 للآبار: (39، 2، 28، 40)، على التوالي. في حين كانت 90% من عينات مياه بقية الآبار مختلطة بمياه البحر وبقيم متفاوتة. يظهر الشكل (12) التوزيع المكاني لقيم (SMI) في آبار منطقة الدراسة. إن القيم المرتفعة لهذا المؤشر تتركز في الشمال الغربي في حين تنخفض تلك القيم في الاتجاه الشرقي، وذلك على النحو الذي يتفق وتوزيع قيم مؤشرات Simpson، GQI_{SWI} ، وكما تم الإشارة مسبقاً، فقد تعاضمت قيم تلك المؤشرات في الآبار القديمة نسبياً حيث ترتفع معدلات الضخ منها مقارنة ببقية الآبار.



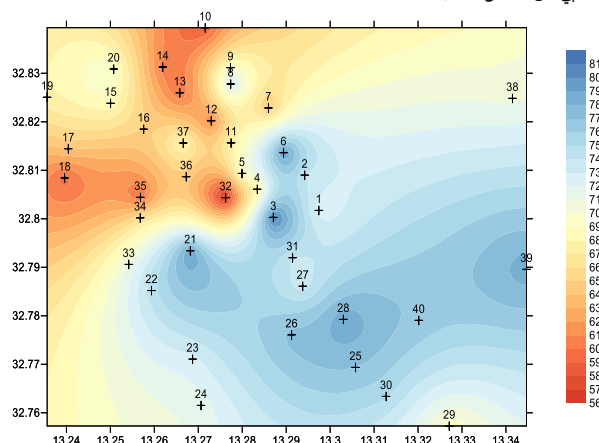
والواقعة ضمن طور التبادل الكاتيوني المتأثر بمياه البحر بأنها تتصف بسحنة تفوق فيها نسبة الكلوريد 66.6% ونسبة الصوديوم أعلى من 50% وبنوعية مياه مكونة من كلوريد الصوديوم. مما سبق يتضح أنه وباستثناء الآبار (21، 26، 28، 39، 40)، فإن بقية الآبار تشهد تفاعلات التبادل الأيوني العكسي والتي تشير إلى أن المياه متأثرة بتداخل مياه البحر وارتفاع ملوحتها.



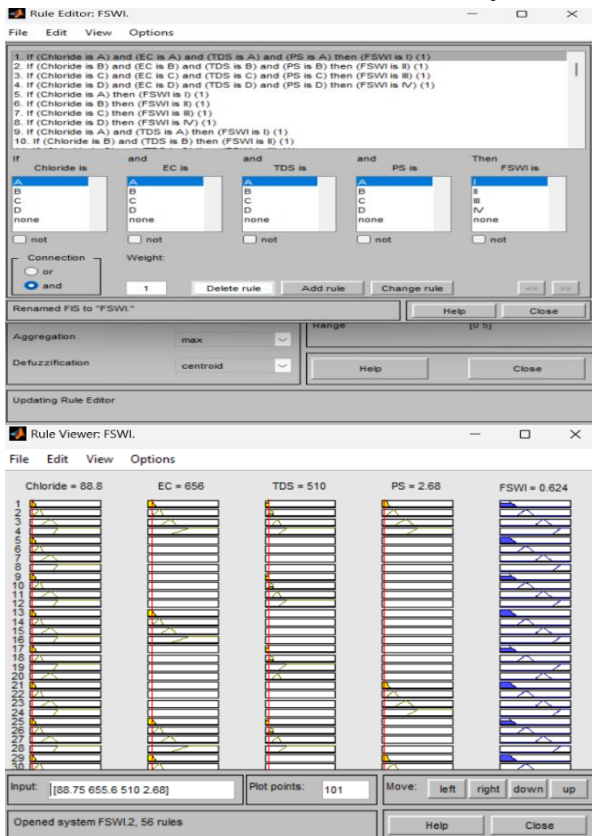
الشكل (9) مخطط تطور السحنات الهيدروكيميائية (HEF) لعينات المياه الجوفية

مؤشر تأثير جودة المياه الجوفية بتداخل مياه البحر (GQI_{SWI}) Groundwater Quality Influence

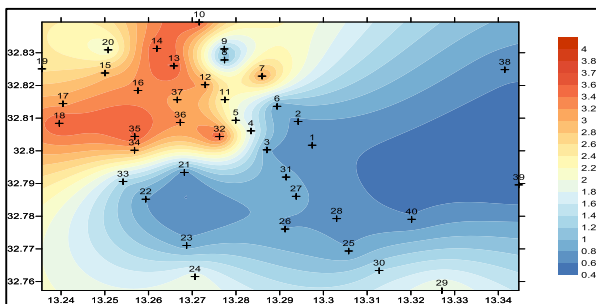
أظهرت النتائج المتحصل عليها لقيم (GQI_{SWI}) أنها تتراوح بين 55.69 للبئر (32) و 81.02 للبئر (3). من الممكن وصف مياه الآبار بمنطقة الدراسة أنها تتميز بوجود مجموعتين من المياه الأولى مياه عذبة ونسبة 20% والتي تضمنت الآبار (3، 6، 25، 26، 28، 30، 39، 40)، أما المجموعة الثانية فتضمنت بقية الآبار ونسبة 80% وتصنف على أنها مياه مختلطة بمياه البحر. يظهر الشكل (10) التوزيع المكاني مؤشر تأثير جودة المياه الجوفية بتداخل مياه البحر (GQI_{SWI}). إن قيم (GQI_{SWI}) الأكثر انخفاضاً تسود في الاتجاه الشمال الغربي منطقة الدراسة وهو ما يعكس تأثير المياه الجوفية في تلك المنطقة بمياه البحر. من ناحية أخرى فإن نوعية المياه العذبة ذات القيم المرتفعة من (GQI_{SWI}) تسود في الآبار عند وسط منطقة الدراسة وحتى الاتجاه الشرقي منها. إن هذا التباين في اختلاف قيم (GQI_{SWI}) وتباين انتشارها يعطي دلالة على أن مياه منطقة الدراسة خاضعة لتغيرات جيوكيميائية خاصة مع تزايد معدلات الضخ من المياه الجوفية لسد الاحتياجات المائية المتزايدة للسكان في المنطقة ولقرعها النسبي من ساحل البحر.



تلك المنطقة بتداخل مياه البحر والذي قد يعزى بدوره إلى ارتفاع معدلات السحب من هذه الأبار تفوق معدلات التغذية كنتيجة لارتفاع الكثافة السكانية في تلك المنطقة. يوضح الشكل (14) التوزيع المكاني لقيم مؤشر FSWI والذي يتفق مع بقية المؤشرات الأخرى الموضحة في الاشكال (8، 10، 12). لقد أظهرت قيم معامل الارتباط بين كل من FSWI، ونسبة سيمبسون، و GQI_{FSWI} و SMI أنها ذات ارتباط قوي بقيم 0.981، 0.867، 0.918، على التوالي. يجدر الإشارة إنه على النقيض من بقية المؤشرات فإن إمكانية تعاطم تداخل مياه البحر تزايد مع الانخفاض في قيم SMI، وهو ما يفسر العلاقة العكسية (السالبة) بين FSWI و SMI.



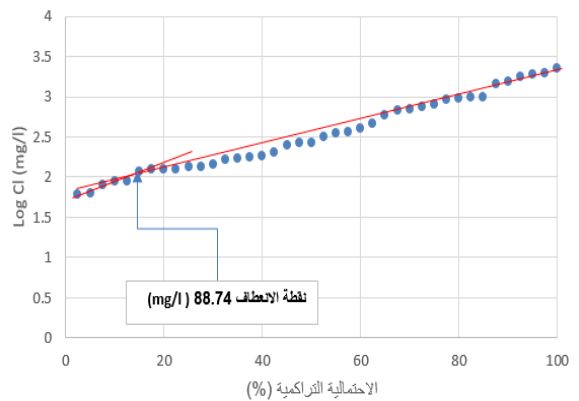
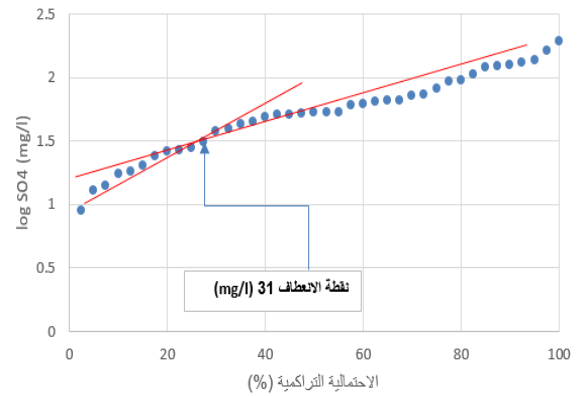
الشكل (13) بعض قواعد الاستدلال المستخدمة لتقدير قيم المؤشر (FSWI)



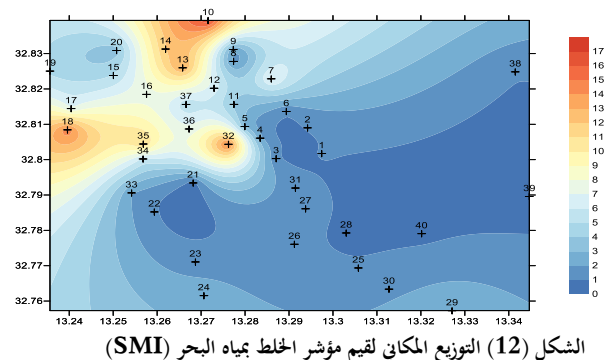
الشكل (14) التوزيع المكاني لقيم مؤشر (FSWI) في آبار منطقة الدراسة

الخلاصة:

يعد تلوث المياه الجوفية بمياه البحر من القضايا البيئية الهامة في المناطق المحاذية لساحل البحر التي تستدعي الدراسة بسبب تأثيراتها العميقة على البيئة والمجتمعات البشرية. كما يمكن أن تساهم المقاربات المبنية على تقديرات قيم مؤشرات تداخل مياه البحر باستخدام العلاقة بين الخصائص الهيدروكيميائية للمياه الجوفية وتداخل مياه البحر في تبني تدابير التخفيف المناسبة. في هذه الدراسة



الشكل (11) تحديد نقطة الانعطاف المستخدمة في تقدير (SMI)



الشكل (12) التوزيع المكاني لقيم مؤشر الخلط مياه البحر (SMI)

النطق الضبابي (Fuzzy Logic)

تم تطوير مؤشر FSWI لتقدير قيم تداخل مياه البحر باستخدام المنطق الضبابي. يوضح الشكل (13) بعضاً من قواعد الاستدلال المستخدمة لتقدير قيم المؤشر FSWI وكذلك تظهر مثالاً عددياً لقيمة المؤشر المتحصل عليها من البئر رقم 40. تبين من خلال استخدام مؤشر FSWI أنها تتراوح بين 0.406 و 3.62، وبمتوسط 1.94. بالإمكان تصنيف آبار المياه وفقاً لخطورة تداخل مياهها بمياه البحر على النحو التالي: مياه منعدمة التداخل أو بتداخل طفيف وتشكل نسبتها 37.5% وكانت للآبار (1، 2، 3، 6، 21، 22، 23، 25، 26، 27، 28، 31، 38، 39، 40)، مياه ذات تداخل طفيف وتشكل نسبتها 17.5% وكانت للآبار (4، 8، 9، 20، 24، 30، 33)، مياه ذات تداخل متوسط وتشكل نسبتها 12.5% وكانت للآبار (5، 11، 15، 19، 29)، مياه ذات تداخل خطير وتشكل نسبتها 32.5% وكانت للآبار (7، 10، 12، 13، 14، 16، 17، 18، 32، 34، 35، 36، 37). وبالتالي فإن 62.5% من آبار منطقة الدراسة تعتبر متأثرة بتداخل مياه البحر. يوضح الشكل (14) التوزيع المكاني لقيم مؤشر FSWI في آبار منطقة الدراسة. إن القيم المرتفعة لهذا المؤشر في الجهة الشمالية والشمالية الغربية لمنطقة الدراسة يعطي دلالة على تأثير مياه

- Al farrah, N, Martens. K and Walraevens. K. 2011, Hydrochemistry of the Upper Miocene-Pliocene-Quaternary Aquifer Complex of Jifarah Plain, Nw-Libya. GEOLOGICA BELGICA (2011) 14/3-4:159 [2].
- Antara. S, Udeshi. N, Varadan. V. 2014. Use of Fuzzy Logic in Determining Quality of Water. In: International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 9: 252-259.
- APHA (1992) Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 18th Edition, American Public Health Association, Washington DC.
- Appelo, C.A.J. and Postma, D. 2005. Geochemistry, Groundwater and Pollution, second ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Bourjila A, Dimane F, Ghalit M, et al. 2023 An integrated seawater intrusion assessment in the Moroccan Ghiss-Nekor coastal aquifer using hydrogeochemical and geospatial techniques. Research Square; 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2118023/v4.
- Cao. T, Han. D, Song. X. 2021. Past, present, and future of global seawater intrusion research: A bibliometric analysis. Journal of Hydrology Volume 603, Part A.
- Cheng, A.D., Halhal, D., Naji, A. and Ouazar, D., 2000. Pumping optimization in saltwater-intruded coastal aquifers. *Water Resources Research*, 36(8), pp.2155-2165.
- Dieu, L.P.; Cong-Thi, D.; Segers, T.; Ho, H.H.; Nguyen, F.; Hermans, T. 2022 Groundwater Salinization and Freshening Processes in the Luy River Coastal Aquifer, Vietnam. *Water* 2022, 14, 2358. <https://doi.org/10.3390/w.14.2358>.
- Diouf, O. C., Weihermüller, L., Diedhiou, M., Beltoungou, E. Y. T. B., Dieng, N. M., Faye, S. C., Vereecken, H., & Faye, S. (2022). Groundwater Geochemistry and Saltwater Intrusion in the Dakar Coastal Area, Senegal. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10, 45-64.
- Drabbe, J., Ghyben, W.B., 1889. Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam (Notes on the probable results of the proposed well drilling near Amsterdam). *Tijdschrift van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs*. 8–22.
- Edet, A., 2016. Hydrogeology and groundwater evaluation of a shallow coastal aquifer, southern Akwa Ibom State (Nigeria). *Applied Water Science*, 7, 2397-2412.
- Ekhmaj, I.A.; Y. Ezlit; and M. Elaalem (2014). The situation of seawater intrusion in Tripoli, Libya. 1-6. International Conference on Biological, Chemical and Environmental Sciences (BCES-2014) June 14-15, 2014 Penang (Malaysia).
- Ezzeldin, H.A. 2022. Delineation of Salinization and Recharge Sources Affecting Groundwater Quality Using Chemical and Isotopic Indices in the
- تم تقييم تداخل مياه البحر في منطقة عين زارة بطرابلس، باستخدام العلاقة بين درجة التوصيل الكهربائي (EC) وتركيز الكلوريد (Cl^-) في المياه الجوفية ونسبة سيمبسون (SR)، ومؤشر تأثير جودة المياه الجوفية بتداخل مياه البحر (GQI_{SWI})، ومؤشر الخلط بمياه البحر (SMI)، ومخطط تطور السحنات الهيدروكيميائية (HEF). بالإضافة إلى تطوير نموذج (FSWI) يعتمد على المنطق الضبابي يمكن من تصنيف درجة تلوث الخزانات الجوفية بمياه البحر. وقد أظهرت نتائج التحليل الكيميائي لعينات المياه الجوفية أن ترتيب السيادة النوعية للكاتيونات الذائبة كانت للصوديوم يليه الكالسيوم ثم الماغنيسيوم فالناتسيوم، أما على صعيد الأنيونات الذائبة فلقد كانت السيادة النوعية للكلوريد ثم البيكربونات يليها الكبريتات. إن مثل هذا التسلسل في الترتيب يعطي دلالة على حدوث تلوث للمياه الجوفية بمياه البحر الناشئ عن ظاهرة تداخل مياه البحر. وقد بينت نتائج تطبيق استخدام العلاقة بين درجة التوصيل الكهربائي (EC) وتركيز الكلوريد (Cl^-) (في المياه الجوفية أن 60% من عينات مياه الآبار ملوثة بمياه البحر وأن 27.5% منها مياه مختلطة. كما دلت نسبة سيمبسون (SR) على أن 12.5% من عينات مياه الآبار غير ملوثة بمياه البحر، في حين صنفت النسب المتبقية بأنها ذات تلوث طفيف (30%)، تلوث معتدل (20%)، تلوث مرتفع (25%)، تلوث شديد (12.5%). وبتطبيق مخطط تطور السحنات الهيدروكيميائية (HEF) أوضحت النتائج أنه باستثناء الآبار 21، 26، 28، 39، 40، فإن بقية الآبار (نسبتها 87.5%) تشهد تفاعلات التبادل الأيوني العكسي والذي يشير إلى أن المياه متأثرة بتداخل مياه البحر وارتفاع ملوحتها. أظهرت النتائج المتحصل عليها لقيم GQI_{SWI} أن منطقة الدراسة تتميز بوجود مجموعتين من المياه الأولى مياه عذبة بنسبة 20%، أما المجموعة الثانية فنسبتها 80% صنفت بأنها مياه مختلطة بمياه البحر. إن نسبة الآبار التي تنخفض فيها قيم SMI عن 1 (وهو مؤشر على عدم وجود خلط للمياه الجوفية مع مياه البحر) بلغ 10%، في حين كانت 90% من عينات مياه بقية الآبار مختلطة بمياه البحر وبقيم متفاوتة. لقد أمكن استخدام عملية النمذجة الضبابية بنجاح في وضع التصنيفات التي حددها نموذج النمذجة الضبابية (FSWI) والتي تنبئ نتائج تطبيقه أنها مشابهة كثيراً للمؤشرات السابقة. وفقاً للنموذج المقترح (FSWI) أمكن تصنيف آبار المياه بناءً على خطورة تداخل مياهها بمياه البحر على النحو التالي: مياه معتمدة التداخل وتشكل نسبتها 37.5%، مياه ذات تداخل طفيف وتشكل نسبتها 17.5%، مياه ذات تداخل متوسط وتشكل نسبتها 12.5%، مياه ذات تداخل خطير وتشكل نسبتها 32.5%. وبالتالي فإن 62.5% من آبار منطقة الدراسة تعتبر متأثرة بتداخل مياه البحر. أظهرت النتائج الحاجة العاجلة إلى وضع استراتيجيات وتخطيط وإدارة مستدامة لاستخدام المياه الجوفية بحيث يتم تقليص استغلال الخزانات الجوفية، ويخفض بدوره من حدة تلوث المياه الجوفية بمياه البحر.
- المراجع:**
- خماج، أحمد إبراهيم و الرباني، عبدالرحمن أحمد. 2021 المقارنة بين طريقتي كريكنج الاعتيادية (OK) ومقلوب المسافة الوزنية (IDW) لتقدير تلوث مياه الخزانات الجوفية الضحلة بمياه البحر في مدينة طرابلس، ليبيا. المجلة السورية للبحوث الزراعية 7(5): 299-317.
- شيوخو طاهر ومحمود حاج عيسى وهادي ديوب. 2019. دراسة بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لمياه نهر السن في حوض الساحل السوري. المجلة السورية للعلوم الزراعية. 3(36): 333-350.
- وزارة الموارد المائية، 2021. بطاقة حصر مصادر المياه فرع المنطقة الغربية محطة ضخ عين زارة. صفحة: 3-9.
- Al farrah. N and Walraevens. K. 2018, Groundwater Overexploitation and Seawater Intrusion in Coastal Areas of Arid and Semi-Arid Regions, *Water* 2018, 10, 143; doi:10.3390/w10020143.

- Schneider, G. 2010. 'Fuzziness' in pharmacophore-based virtual screening and de novo design', *Drug Discov. Today Technol.*, 7 : 237–244.
- Lakov, D. 1996. The first international discourse on fuzzy logic and the management of complexity, *FLAMOC'96. Fuzzy Sets and Systems*, volume 84, issue 1, pages 115.
- Lekshmi, S.; Kani, M.K. Assessment of Seawater Intrusion Using Chemical Indicators. *Int. J. Eng. Adv. Technol.* 2017, 7, 100–108.
- Lu, Chunhui and Werner, A. D. 2013. Timescales of seawater intrusion and retreat. *Advances in Water Resources*. Volume 59, Pages 39-51.
- Luís, R, Cremasco, C. P, Luiz, R, Romanini, P. A, Gabriel, J. E, Leonardo, R. A. 2009. Determination of membership functions of the indices of water quality and of toxic and organoleptic substances. *Presidente Prudente*. 1 (1): 46-55.
- Melloul, A.J. and Collin, M. 1998. A Proposed Index for Aquifer Water-Quality Assessment. *Journal of Environmental Management*, 54, 131-142.
- Minitab, LLC. 2021. *Minitab*. Retrieved from <https://www.minitab.com>.
- Moorthy, P.; Sundaramoorthy, S.; Roy, P.D.; Usha, T.; Dash, S.K.; Gowrappan, M.; Chokklingam, L. 2024. Evaluation of spatial and temporal dynamics of seawater intrusion in coastal aquifers of southeast India: Insights from hydrochemical facies analysis. *Environ. Monit Assess.* 196, 179.
- Oladipo, J.O.; Akinwumiju, A.S.; Aboyeji, O.; Adelodun, A.A. 2021. Comparison between fuzzy logic and water quality index methods: A case of water quality assessment in Ikare community, Southwestern Nigeria. *Environ. Chall.* 2021, 3, 100038.
- Panteleit, B., Hamer, K., Kringel, R., Kessels, W., Schulz, H., 2011. Geochemical processes in the saltwater-freshwater transition zone: comparing results of a sand tank experiment with field data. *Environ. Earth Sci.* 62 (1), 77-91.
- Park, C.H. and Aral, M.M. Saltwater intrusion hydrodynamics in a tidal aquifer. *J. Hydrol. Eng.* 2008, 13, 863–872.
- Prusty, P., Farooq, S.H., Swain, D., Chandrasekharam, D., 2020. Association of geomorphic features with groundwater quality and freshwater availability in coastal regions. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02706-z>.
- Pulido-Leboeuf, P. (2004). Seawater intrusion and associated processes in a small coastal complex aquifer (Castell de Ferro, Spain). *Applied geochemistry*, 19(10), 1517-1527.
- Raman Bai, V., Reinier, B. and Mohan, S. 2009. Fuzzy Logic Water Quality Index and Importance of Water Quality Parameters. *Air, Soil and Water Research*. 2: 51–59.
- Northwest Coast, Egypt. *Sustainability*, 14, 16923. <https://doi.org/10.3390/su142416923>.
- Ferguson, G. and Gleeson, T. 2012. Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nat. Clim. Change* 2 (5): 342–345.
- Fidelibus, M.D., Balacco, G, M.R. Alfio, M.R, et al., 2025. A chloride threshold to identify the onset of seawater/saltwater intrusion and a novel categorization of groundwater in coastal aquifers. *Journal of Hydrology* 653(1–4):132775.
- Gayathri M N and Pieus, M T. 2022. Assessment of Ground Water Quality Using Fuzzy Based Water Quality Index. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*. 7(3): 812-817.
- Ghandour EIM, Khalil JB, Atta SA (1985) Distribution of carbonates, bicarbonates and pH values in groundwater of the Nile delta region, Egypt. *Groundwater* 23:35–41.
- Ghiglieri, G., Carletti, A., Pittalis, D., 2012. Analysis of salinization processes in the coastal 26 carbonate aquifer of Porto Torres (NW Sardinia, Italy). *J. Hydrol.* 432-433. 27 Doi:10.1016/02.016.
- Giménez-Forcada, E. (2010). Dynamic of Seawater Interface using Hydrochemical Facies Evolution Diagram (HFE-D). *Ground Water*. 48(2): 212-16.
- Golden Software, LLC. 2011. Golden, CO 80402-0281 USA.
- Gugulothu, S., Subbarao, N., Das, R. et al. Geochemical evaluation of groundwater and suitability of groundwater quality for irrigation purpose in an agricultural region of South India. *Appl Water Sci* 12, 142 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01583-w>.
- Herzberg, A. 1901. Die wasserversorgung einiger Nordseebäder. *Gasbeleucht Wasserversorg* 44, 842–844.
- Jang, J.SR, Sun, C.T, Mizutani, E. 2004. *Neuro-Fuzzy and soft computing*. Taipei: Pearson Education, Chapter. 4.
- Jeen S.W, Kang, J, Jung, H and Lee, J. 2021. Review of Seawater Intrusion in Western Coastal Regions of South Korea. *Water* 2021;13(6) 761. <https://doi.org/10.3390/w13060761>.
- Jones, B., Vengosh, A., Rosenthal, E., Yechieli, Y., 1999. *Geochemical investigations. Seawater Intrusion in Coastal Aquifers* Concepts, Methods and Practices (pp. 51-71). Springer.
- Klassen, J., Allen, D. M. and Kirste, D. (2014). *Chemical Indicators of Saltwater Intrusion for the Gulf Islands*, British Columbia, Final Report. Simon Fraser University.
- Klir, G. J., and T. A. Folger. 1988 *Fuzzy sets, uncertainty, and information*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Klenner, A., Hartenfeller, M., Schneider, P., and

- Hoboken, NJ, USA.
- Tomaszkiewicz, M, Abou Najm. M. and El-Fadel. M. 2014. Development of a groundwater quality index for seawater intrusion in coastal aquifers. *Environmental Modelling & Software* 57: 13-26.
- Trabelsi, N., Triki, I., Hentati, I. et al. 2016. Aquifer vulnerability and seawater intrusion risk using GALDIT, GQISWI and GIS: case of a coastal aquifer in Tunisia. *Environ Earth Sci* 75, 669.
- Verruijt, A. 1968. A note on the Ghyben-Herzberg formula. *Hydrol. Sci. J.* 13 (4): 43-46.
- Washington State Department of Ecology (2005). Water Resource Inventory Area 06 Islands. Seawater Intrusion Topic Paper.
- Zhang, B, Song, X, Han, D, Guo, Z, Xiao, G and Yang, J. 2013. Seawater Intrusion Degree Evaluation Based on Mathematical Statistics and Fuzzy Mathematics in Qinhuangdao Yangdai River Plain. (33) No. 3: 342-348.
- Shi, L., Lu, C., Ye, Y., Xie, Y. and Wu, J. (2020). Evaluation of the performance of multiple-well hydraulic barriers on enhancing groundwater extraction in a coastal aquifer. *Advances in Water Resources*, 144, 103704.
- Simpson, T.R. 1946. Salinas basin investigation bull. calif. div. water resource. Sacramento. 52. 230.
- Sudaryanto, N. (2018) Ratio of major ions in groundwater to determine saltwater intrusion in coastal areas. *Earth Environ Sci* 118:5.
- Suganthi, L., and Samuel, A. 2012..Energy models for demand forecasting—A review.. *Renewable and sustainable energy reviews* 16.2 (2012): 1223-1240.
- Supriyadi, Khumaedi and Andya, P. P. 2017. Geophysical and hydrochemical approach for seawater intrusion in north Semarang, Central Java, Indonesia.. *International Journal of GEOMATE*, March, 2017, Vol. 12, Issue 31, pp. 134-140.
- Taylor, R., Scanlon, B., Döll, P. et al. 2013. Ground water and climate change. *Nature Clim Change* 3, 322-329.
- Timothy J. Ross. 2010. Fuzzy Logic with Engineering Applications. McGraw-Hill.
- Todd, D.K. 1980 Groundwater Hydrology; Wiley: