

مجلة التربية للعلوم الانسانية

مجلة علمية فصلية محكّمة، تصدر عن كلية التربية للعلوم الإنسانية / جامعة الموصل

تحليل حساسية المياه الجوفية للتلوث باستخدام انموذج SINTICS / دراسة حالة

سرى فاهم عباس الطائي [1] صهيب حسن خضر [2]

جامعة الموصل / كلية التربية للعلوم الانسانية / قسم الجغرافيا / الموصل – العراق [1، 2]

معلومات الارشفة

تاريخ القبول : 2026/4/8

تاريخ النشر : 2026/10/20

الكلمات المفتاحية :

النترات، حساسية المياه الجوفية للتلوث، أنموذجSINTACS،GIS ، الملوثات الزراعية

معلومات الاتصال

سرى فاهم عباس الطائي

الملخص

تستهدف هذه الدراسة تقييم وتحديد حساسية الخزانات الجوفية لتلوث النترات في منطقة الدراسة بمحافظة نينوى باستخدام نموذج SINTACS الحساس والمتخصص المدمج مع تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) المتقدمة. تم تحليل سبع معاملات هيدروجيولوجية حاسمة تتحكم في انتقال وتحرك النترات من مصادرها الزراعية السطحية نحو الطبقات الجوفية العميقة. اعتمدت الدراسة على بيانات ميدانية محققة من (50) بئراً جوفياً موزعة جغرافياً، مع تطبيق سيناريو النترات الذي يعكس الواقع الهيدروجيولوجي والنشاط الزراعي المكثف للمنطقة. أظهرت النتائج توزيعاً مكانياً متباينً بشكل حاد في درجات حساسية المياه الجوفية لتلوث النترات، حيث تم تصنيف منطقة الدراسة إلى خمس فئات متدرجة من (منخفضة جداً) إلى (عالية جداً)، مع تركيز واضح للمناطق عالية الحساسية (بنسبة 5.3%) في الأجزاء الشمالية الغربية القريبة من مصادر التلوث السطحية (بحيرة سد الموصل، نهر دجلة)، بينما سيطرت المناطق منخفضة الحساسية (بنسبة 69.75%) في المناطق ذات الأعماق الجوفية الكبيرة والتكوينات الصخرية الكتيمة.كشف تحليل الحساسية المتقدم (SPSA وMRSA) أن معامل عمق المياه الجوفية (S) يمثل العامل الأكثر حساسية وتأثيراً (23.38%) في تحديد مدى استجابة الخزان لتلوث النترات، تليه الطوبوغرافية والانحدار السطحي (S%) بنسبة (18.40%)، مما يؤكد الدور الحاسم للمستويات المائية الضحلة والتضاريس المنبسطة في تسهيل تسرب النترات. في المقابل، أظهرت التربة الطينية الثقيلة دوراً وقائياً حاسماً (تأثير سلبي 13.43−)، وتعمل كـ حاجز طبيعي موثوق يعيق نفاذية الملوثات.تؤكد

الدراسة أن نموذج SINTACS عند تطبيقه بـ سيناريو النترات المتخصص يوفر خرائط دقيقة وموثوقة لتحديد مناطق الضعف والخطر، مما يدعم بشكل مباشر إجراءات الحماية الاستباقية، والتخطيط البيئي الاستراتيجي، وإدارة الأنشطة الزراعية المستدامة لضمان الأمن المائي والحفاظ على جودة الموارد المائية الجوفية في المنطقة.

DOI: **********,, ©Authors, 2025, College of Education for Humanities University of Mosul.
This is an open access article under the CC BY 4.0 license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Journal of Education for Humanities

A peer-reviewed quarterly scientific journal issued by College of Education for Humanities / University of Mosul

Groundwater Vulnerability Assessment to Contamination Using the SINTACS Model: A Case Study

Suraa Fahim Abbas Al-Taie [1] **Suhaib Hassan Khudhur** [2]

University of Mosul / College of Education for Humanities / Department of Geography / Mosul - Iraq [1,2]

Article information

Accepted : 8/4/2026
Published 20/10/2026

Keywords:

Nitrates, Groundwater Vulnerability Assessment, SINTACS Model, GIS, Agricultural Contaminants

Correspondence:
Suraa Fahim Abbas

Abstract

This study aims to assess and delineate groundwater vulnerability to nitrate contamination in Nineveh Governorate using a specialized SINTACS parametric model integrated with advanced Geographic Information Systems (GIS) technologies. Seven critical hydrogeological parameters controlling nitrate mobilization and transport from intensive agricultural surface sources toward deep aquifer layers were systematically analyzed. The research is grounded in validated field data from 50 strategically distributed groundwater wells, applying the Nitrate Scenario that accurately reflects the region's complex hydrogeological characteristics and intensive agricultural practices .Results reveal a pronounced spatial heterogeneity in nitrate contamination vulnerability classes, with the study area stratified into five distinct categories ranging from very low to very high susceptibility. High vulnerability zones (5.3%) are concentrated in the northwestern portions proximal to contamination sources (Mosul Dam Lake and Tigris River), while low vulnerability areas (69.75%) dominate zones with greater aquifer depths and impermeable geological formations. Advanced sensitivity analysis (SPSA and MRSA) demonstrates that groundwater depth (parameter S) constitutes the most critical factor (23.38% impact) in

determining aquifer responsiveness to nitrate infiltration, followed by topography and surface slope (S%) (18.40%), underscoring the determinant role of shallow water tables and gentle terrain in accelerating nitrate leaching. Conversely, heavy clay soils provide a robust natural protective barrier (−13.43% effect), effectively attenuating pollutant transport. The study substantiates that SINTACS model—when applied with scenario-specific nitrate parameters—generates reliable, high-resolution vulnerability maps enabling direct support for proactive protection measures, strategic environmental planning, and sustainable agricultural management, thereby safeguarding water security and preserving groundwater quality in the region.

DOI: **********, ©Authors, 2025, College of Education for Humanities University of Mosul.
This is an open access article under the CC BY 4.0 license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. المقدمة

تعد المياه الجوفية مورداً أستراتيجياً حيوياً للمياه العذبة على سطح الأرض، وتلعب دوراً لا غنى عنه في استدامة الحياة والتطور الاقتصادي والاجتماعي في المناطق الجافة وشبه الجافة، إذ يعتمد السكان والأنشطة الزراعية والصناعية بشكل كبير على هذا المورد الثمين لذا فان حماية المياه الجوفية من مخاطر التلوث تمثل أولوية قصوى لضمان الامن المائي (Chakraborty et al., n.d.). وفي الآونة الأخيرة فقد تزايدت معدلات التلوث بشكل ملحوظ في مصادر المياه السطحية والجوفية معاً مما انعكس سلباً على سلامة المجتمعات الريفية واستقرار الأنشطة الزراعية والمعيشية المحيطة بها(Al-Addous et al., 2023). لذا يعد تقييم ضعف المياه الجوفية ركيزة أساسية لتطبيق إجراءات الحماية الأولية للموارد المائية الحرجة وعادة تمثل هذه الخطوة الأولى لتقدير مخاطر التلوث وضمان استدامة جودة المياه (Fikri et al., 2024). تُعتبر النترات (NO_3^-) من أخطر الملوثات الكيميائية التي تهدد الخزانات الجوفية في العالم الحديث، وتحتل المرتبة الأولى بين ملوثات المياه الجوفية من حيث الانتشار الجغرافي والتأثير البيئي والصحي (Chakraborty et al., 2022). تنبع خطورة النترات من خصائصها الفيزيوكيميائية الفريدة: قابليتها العالية جداً للذوبان في الماء، وعدم قابليتها للتحلل البيولوجي السريع، وصعوبة إزالتها من المياه بالتقنيات التقليدية، مما يجعلها تبقى في الخزانات الجوفية لفترات زمنية طويلة جداً وتنتقل بسهولة من السطح إلى

الأعماق(Pisciotta et al., 2015). تُعزى مشكلة تلوث المياه الجوفية بالنترات بشكل أساسي ومباشر إلى الأنشطة الزراعية المكثفة والاستخدام المفرط للأسمدة النيتروجينية الكيماوية، خاصة في المناطق ذات التربة الخصبة والمناخ شبه الجاف حيث تسود الزراعة كقطاع اقتصادي رئيسي (Al-Addous et al., 2023). وتتفاقم هذه المشكلة الحرجة بفعل عوامل ثانوية متعددة منها: فضلات الثروة الحيوانية والدواجن، تسريب شبكات الصرف الصحي القديمة والمتهالكة، ومياه الصرف الصحي غير المعالجة بشكل كامل.

2. أهمية الدراسة

تكمن أهمية الدراسة فيما يأتي:

أ. تحديد المناطق الحساسة والمعرضة لتلوث النترات في المياه الجوفية باستخدام نموذج SINTACS و GIS، مما يدعم التخطيط البيئي والقرارات الإدارية المتعلقة بحماية الموارد المائية في منطقة الدراسة.

ب. توضيح العلاقة بين الخصائص الهيدروجيولوجية والطبيعية وحساسية الخزانات الجوفية لتلوث النترات الناتج عن الأنشطة الزراعية المكثفة، مما يعزز فهم العوامل المؤثرة في حماية المياه الجوفية من المصادر السطحية.

3. مشكلة الدراسة

تتلخص مشكلة الدراسة بالتساؤلات الآتية:

أ. ما مدى كفاءة نموذج SINTACS عند تطبيقه بسيناريو النترات المتخصص ودمجه مع تقنيات نظم المعلومات الجغرافية في تقييم حساسية المياه الجوفية لتلوث النترات وإنتاج خرائط مكانية دقيقة وموثوقة تعكس الواقع الهيدروجيولوجي لمنطقة الدراسة؟

ب. ما طبيعة التوزيع المكاني والتباين الجغرافي لدرجات حساسية المياه الجوفية لتلوث النترات في منطقة الدراسة، وتحديداً أي المناطق الأكثر عرضة وأشد حساسية لخطر تلوث النترات الناتج عن الأنشطة الزراعية المكثفة؟

ت. إلى أي مدى يمكن الاستفادة العملية من نتائج نموذج SINTACS بسيناريو النترات في دعم صنع القرارات البيئية، وحماية الخزانات الجوفية من تلوث النترات، وتنظيم الأنشطة الزراعية، وتحقيق الإدارة المستدامة للموارد المائية في منطقة الدراسة؟

4. فرضية الدراسة

أ. تختلف درجات حساسية المياه الجوفية لتلوث النترات بشكل واضح من منطقة إلى أخرى داخل منطقة الدراسة نتيجة لاختلاف العوامل الهيدروجيولوجية المؤثرة في نموذج SINTACS

(عمق المياه، النفاذية، التكوينات الصخرية، الانحدار)، مما يؤدي إلى تباين مكاني حاد في مستويات الحساسية.

ب. يتمتع نموذج SINTACS بسيناريو النترات عند دمجه مع تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) بكفاءة عالية جداً في تقييم حساسية المياه الجوفية لتلوث النترات وإنتاج خرائط مكانية دقيقة وموثوقة تحدد المناطق الأكثر عرضة للتلوث.

ت. يمكن الاستفادة الفعلية والعملية من نتائج نموذج SINTACS بسيناريو النترات في دعم التخطيط البيئي الاستراتيجي، وحماية الخزانات الجوفية من تلوث النترات، وتنظيم الأنشطة الزراعية بطريقة مسؤولة، وتحقيق الإدارة المستدامة للموارد المائية في منطقة الدراسة.

5. أهداف الدراسة

1. تطبيق نموذج SINTACS بسيناريو النترات المتخصص لتقييم الحساسية وتحديد المستويات.
2. توظيف GIS لإنتاج خرائط حساسية تلوث النترات وتحديد التباين المكاني وأكثر المناطق عرضة.
3. تحليل أثر الخصائص الهيدروجيولوجية و دعم صنع القرار وحماية الخزانات وتنظيم الأنشطة الزراعية.

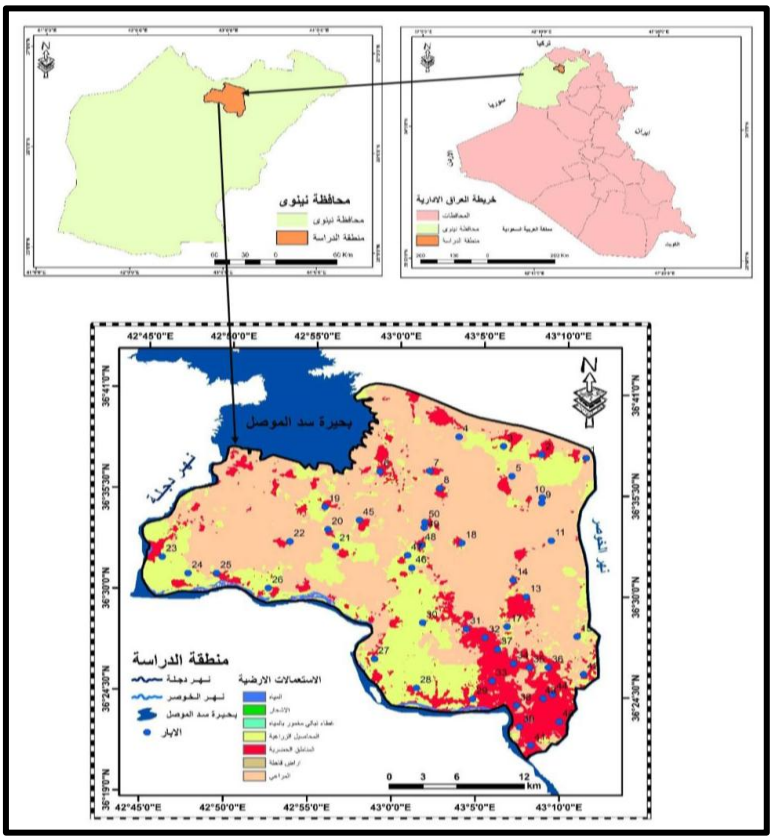
6. المنهجية ومراحل الدراسة

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي والتحليلي لدراسة الخصائص الطبيعية والهيدروجيولوجية والهيدروكيميائية لمنطقة الدراسة، إلى جانب المنهج الكمي في معالجة البيانات وتحليلها، والمنهج الاستقرائي في تفسير النتائج. واستُخدمت تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) باستخدام برنامج ArcGIS 10.8 في إعداد قاعدة البيانات المكانية، ومعالجة وتحليل البيانات، وإنتاج الخرائط الموضوعية للعوامل السبعة المعتمدة في نموذج SINTACS، ثم دمجها وفق سيناريو النترات المعتمد لإنتاج خرائط حساسية المياه الجوفية لتلوث النترات. ونُفذت الدراسة عبر مرحلتين رئيسيتين شملت المرحلة الأولى جمع البيانات المكتبية والميدانية وإعداد قاعدة البيانات، في حين تضمنت المرحلة الثانية معالجة البيانات، وتطبيق نموذج SINTACS بسيناريو النترات، وإنتاج خرائط حساسية المياه الجوفية لتلوث النترات، وتحليل نتائجها وتفسيرها. وللتحقق من موثوقية نتائج النموذج، أُجري تحليل الحساسية باستخدام طريقتي التحليل أحادي المعامل (SPSA) وتحليل إزالة الخرائط (MRSA)، لتقييم تأثير العوامل السبعة في مخرجات النموذج وقياس مدى استقرارها وموثوقيتها.

7. موقع ومساحة منطقة الدراسة

تقع منطقة الدراسة في الجزء الشمالي من محافظة نينوى، شمال جمهورية العراق، وتتميز بموقعها بين عدد من المعالم الطبيعية الرئيسة؛ إذ يحدها من الشمال الغربي بحيرة سد الموصل، ومن الغرب والجنوب الغربي نهر دجلة، ومن الشرق نهر الخوصر، في حين يحدها من الشمال الشرقي الامتداد البنيوي لطية القند. وتقع فلكيًا بين قوسي طول ("0 '45 °42) – ("0 '10 °43) شرقًا، ودائرتي عرض ("0 '19 °36) – ("0 '41 °36) شمالًا، وتبلغ مساحتها نحو 858.69 كم². كما في الخريطة (1).

خريطة (1) موقع منطقة الدراسة



المصدر: اعتماداً على جمهورية العراق، وزارة التخطيط الجهاز المركزي للإحصاء، شعبة GIS، خريطة العراق الادارية لسنة 2012، مقياس 1/1000000.

8. اختيار نموذج SINTACS

تم أختيار نموذج SINTACS كأداة منهجية رئيسية في هذه الدراسة لتحقيق اعلى مستويات الدقة. طور هذا النموذج في الأصل بواسطة Civita(1990,1993,1994) ، ثم تم تطويره لاحقاً بالتعاون معCivita and De Maio (Soyaslan, 2025) في السنوات (2004,1997) ليناسب الخصائص الهيدروجيولوجية لدول حوض البحر الأبيض المتوسط(Civita & De Maio, 1997). يعتبر نموذج SINTACSنموذجاً مشتقاً ومطوراً من منهجية DRASTIC (Civita & De Maio, 2004) والتي طورها Aller وزملاؤه (Aller et al., 1987) . يتميز هذا النموذج بقدرته الفائقة على استيعاب المتغيرات الهيدروجيولوجية والمناخية السائدة في المنطقة وذلك بفضل مرونته في التصنيف والترجيح (Pisciotta et al., 2015). تكمن السمة الجوهرية والمميزة للنموذج في توفيره ستة سيناريوهات متباينة لتقييم الضعف وهي: سيناريو التأثير الطبيعي، سيناريو التأثير الشديد، سيناريو التصريف من شبكة السطحية، سيناريو الخزانات الجوفية الكارستية، سيناريو الخزانات الجوفية المتشققة، سيناريو النترات والانشطة الزراعية.

هذا التنوع في السيناريوهات يجعل نموذج SINTACS قادراً على مُحاكاة التعقيدات الهيدروجيولوجية بدقة عالية(Civita & De Maio, 2004). كما في الجدول (1). جاء اختيار هذا النموذج في الدراسة الحالية بناءً على فهم عميق للخصائص الفريدة لمنطقة الدراسة التي تتميز بتعقيد هيدروجيولوجي يجمع بين عدة عوامل متداخلة مثل تكوينات جيرية كارستية متعددة الطبقات، رواسب حتاتية (رملية وغرينية) متنوعة، وقرب المنطقة من مصادر مائية سطحية (بحيرة سدة الموصل، نهر دجلة رافد الخوصر)، وممارسات زراعية وحضرية مكثفة ترفع احتمالية التلوث خاصة بالنترات.

لذا استوجب الامر استخدام منهجية ذات حساسية عالية ودقة تفصيلية تلائم هذا النوع المعقد من المتغيرات الهيدروجيولوجية.

9. الأساس النظري للنموذج

تعتمد منهجية نموذج SINTACS على دمج سبع معاملات هيدروجيولوجية اساسية، يشار الى مجموعها SINTACS باختصار (وهي اختصار لأول حرف من كل معامل) وهي: عمق منسوب المياه الجوفية، معدل صافي التغذية (الترشيح)، خصائص الطبقة غير المشبعة، وسط التربة، طبيعة ونوع الخزان الجوفي، الناقلية الهيدروليكية، الانحدار السطحي او الطوبوغرافية بالنسبة المئوية(Civita & De Maio, 2004).

صممت هذه المعاملات السبعة بعناية لكي تعكس الحساسية الكامنة للمياه الجوفية إزاء مخاطر التلوث من المصادر السطحية ويتم تقييم كل معامل بناءً على خصائصه الفيزيائية والهيدروجيولوجية ومساهمته المباشرة في زيادة احتمالية التعرض للتلوث. ولحساب مؤشر الضعف الكلي تطبق المعادلة التالية:

$$\text{SINTACS} = \sum_{i=1}^{7} P_i \text{ x } W_i \dots \dots \dots \dots \quad (1)$$

حيث:

P_i: درجة تصنيف المعامل (i) (Rating) تتراوح من (1) تمثل الضعف الأدنى و(10) تمثل الضعف الأعلى

W_i: الوزن النسبي(Weight) للمعامل (i) يتراوح من (1) التي تمثل الأقل أهمية الى (5) للعامل الأكثر أهمية

$\sum$ علامة المجموع الكلي لجميع المعاملات السبعة

تحدد هذه الاوزان النسبية بناءً على السيناريو الهيدروجيولوجي المختار (أحد السيناريوهات الست) مما يسمح بتكييف النموذج مع الظروف المحلية المختلفة (Kirlas et al., 2022). بعد حساب المؤشر الكلي للضعف SINTACS يتم تصنيف النتائج النهائية الى ست فئات توضح درجة الخطورة من منخفض جداً الى مرتفع جداً (Sahu et al., 2022). كما في الجدول (2). والشكل (1) التي تمثل مخطط نموذج SINTACS

جدول (1) أوزان المعاملات المخصصة لكل سيناريو في نموذج SINTACS (ست حالات هيدروجيولوجية).

Parameter	S	I	N	T	A	C	S%
سيناريو التأثير الطبيعي**Normal impact scenario**	5	4	5	3	3	3	3
سيناريو التأثير الشديد**Relevant impact scenario**	5	5	4	5	3	2	2
Drainage from surficial network سيناريو التصريف من الشبكة السطحية**scenario**	4	4	4	2	5	5	2
سيناريو التأثير الكارستي**Karst impact scenario**	2	5	1	3	5	5	5

سيناريو التصدعات (الشقوق)**Fissuring scenario**	3	3	3	4	4	5	4
سيناريو النترات (الأنشطة الزراعية)**Nitrates**	5	5	4	5	2	2	3

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على:

Civita, Massimo, and Marina De Maio. "Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: the Italian combined approach." Geofísica internacional 43.4 (2004): 513-532.

جدول (2): فئات ضعف المياه الجوفية ونطاقات مؤشر SINTACS

تصنيف درجة الضعف	SINTACS نطاق مؤشر	درجة الخطورة
Very lowمنخفض جداً	84 - 128	آمن نسبياً
Lowمنخفض	128 - 152	محدود الخطر
Mediumمتوسط	152 - 171	معتدل
Highعالي	171 - 184	خطر عالي
Very highعالي جداً	184 - 215	خطر عالي جداً
Extremely highعالي جداً جداً	215 >	خطر شديد جداً

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على:

Civita, Massimo, Marina De Maio, and Franco Barberi. Sintacs: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: metodologia e automatizzazione. Pitagora, 1997.

10. المعاملات السبعة لنموذج SINTACS

وفيما يلي توضح كل من المعايير المعتمدة في نموذج SINTACS بالشكل التالي:

1.10 عمق المياه الجوفية (Depth to water) – S

يعرف عمق المياه الجوفية بأنه المسافة العمودية المقاسة بين سطح الأرض وسطح الماء الجوفي (Jarray et al., 2017). يعتبر هذا المعيار من الركائز الأساسية والمهمة في تحليل ضعف المياه الجوفية للتلوث إذ توجد علاقة عكسية بين العمق ومخاطر التلوث فكلما ازدادت المسافة العمودية الممتدة بين سطح الأرض ومنسوب المياه الجوفية، تطلب ذلك وقتاً أطول لوصول الملوثات من

السطح الى الخزان مما يمنح الطبقة غير المشبعة فرصة أكبر بكثير لتعزيز وتقليل تسرب الملوثات بشكل فعال الى المياه الجوفية عمليات التوهين الطبيعي (Natural Attenuation) (Hamdan et al., 2020). وعليه فإن المياه الجوفية الضحلة تظهر حساسية أعلى للتلوث مقارنة بتلك الموجودة على أعماق أكبر.

تم إعداد خريطة عمق المياه الجوفية بالاعتماد على بيانات الابار المنتشرة في منطقة الدراسة، كما موضح في الخريطة (2)، وقد اعيد تصنيف قيم العمق وفقاً لنظام التقييم الخاص بنموذج SINTACS.كما في الجدول (3) و(4) الذي يستعرض قيم التقييم (Rating) والاوزان (Weighting) والسيناريوهات المخصصة لعمق المياه الجوفية استنادا الى منهجية Civita and De Maio , 1997,2004. وقد تراوحت قيم تقييم بين (4) التي تمثل ضعفاً منخفضاً و(10) التي تمثل ضعفاً مرتفعاً.

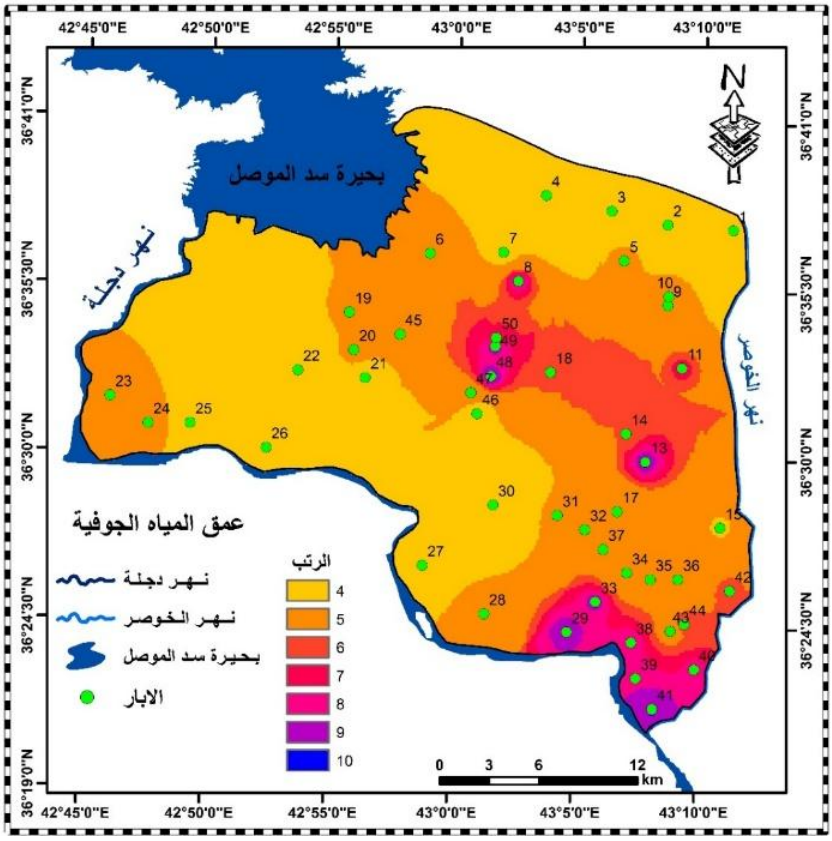
جدول (3): التقييم العددي لمعامل عمق منسوب المياه الجوفية (S)

نطاق العمق (متر)	الرتبة (Sr)	عمق المياه الجوفية في منطقة الدراسة (م)	رتب المياه الجوفية في منطقة الدراسة	التفسير
1-0	10	1-0	10	عمق ضحل جداً (خطر عالي)
4-1	9	4-1	9	عمق ضحل
6-4	8	6-4	8	عمق متوسط ضحل
8-6	7	8-6	7	عمق متوسط
10-8	6	10-8	6	عمق متوسط عميق
20-10	5	20-10	5	عمق عميق نسبياً
>20	4	>20	4	عمق عميق جداً (خطر منخفض)

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على:

Civita, Massimo, Marina De Maio, and Franco Barberi. Sintacs: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: metodologia e automatizzazione. Pitagora, 1997.

خريطة (2): عمق المياه الجوفية في منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على جدول (3) وبرنامج Arc GIS 10.8 وبمقياس رسم (1:100000)

يكشـــف التحليل المكاني للخريطة الى ان التوزيع الجغرافي لرتب عمق المياه الجوفية في منطقة الدراســة واعتماداً على جدول (3) هيمنة واضــحة للرتبتين (4) و(5) اللذان تمثلان الأعماق الكبيرة للمياه الجوفية حيث تغطي الرتبة (4) التي تعكس اعماقاً تزيد عن (20) متراً بمســاحة (389.87) كم^2 بنســبة (45.40%) من مســاحة منطقة الدراســة وتتركز في الأجزاء الجنوبية والجنوبية الغربية والشـمالية مما يمنح هذه المناطق حماية طبيعية ضـد التلوث السـطحي. بينما تغطي الرتبة (5) التي تتراوح اعماقها بين (10) و(20) متراً مســاحة (324.80) كم^2 بنســبة (37.82%) وتتمركز في الأجزاء الوسـطى والغربية والجنوبية في المقابل تشـغل الرتب الضـحلة (10،9،8) التي تمثل اعماقاً اقل من (6) أمتار مساحات محدودة لا تتجاوز (39.65) كم^2 بنسبة (4.62%) وتتركز في الأجزاء الوســطى والجنوبية حيث تكون المياه الجوفية في تلك المناطق أكثر عرضــة للتلوث نظراً لقصــر المسـافة العمودية التي تسـمح بوصـول سـريع للملوثات الى الخزان الجوفي. اما الرتبتين (6) و(7)

فتمثلان مناطق انتقالية بنسب (9.48%) و(2.68%) على التوالي وبذلك يظهر ان أكثر من (83%) من منطقة الدراسة تتمتع بأعماق جوفية كبيرة مما يحد من مخاطر التلوث. كما في الجدول (4) التي تبين المساحة والنسبة المئوية لمعامل الرتب.

جدول (4): تصنيف الرتب والمساحات والنسب المئوية لفئات عمق المياه الجوفية في منطقة الدراسة

معامل الرتب	المساحة كم^2	النسبة المئوية %
4	389.87	45.40
5	324.80	37.82
6	81.39	9.48
7	22.99	2.68
8	27.43	3.19
9	11.90	1.39
10	0.32	0.04
	858.69	100

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على خريطة رقم (2).

2.10 التغذية السنوية الفعالة (Infiltration) –I

يقصد بمعدل التغذية السنوية بأنها إجمالي كمية المياه المترشحة سنوياً (ملم) التي تصل الخزان الجوفي، وليس الكمية التي تتسرب سطحياً او تتبخر. يعتبر هذا العامل ذو أهمية قصوى في تقييم هشاشة المياه الجوفية للتلوث. تؤدي زيادة معدلات التغذية الفعالة الى رفع قدرة الملوثات على الانتقال والانتشار بسرعة أكبر عبر منطقة التهوية (Vadose zone) نحو الخزان الجوفي مما يرفع بشكل مباشر من مستوى احتمالية التلوث (الكاكئي، 2024). كما تساهم التغذية في توفير كميات أكبر من المياه اللازمة لعمليات تشتيت الملوثات وتخفيف تركيزها داخل النطاقات المشبعة وغير المشبعة ومن الناحية الهيدروجيولوجية فان زيادة معدلات التغذية السنوية تعزز من احتمالية انتقال الملوثات وبالتالي يرفع من تصنيف درجات حساسية المياه الجوفية للتلوث في منطقة الدراسة (Piscopo et al., 2001).

تم الاعتماد على منهجية بيسكوبو Piscopo (2001) في منطقة الدراسة نظراً لعدم توفر بيانات مباشرة عن التغذية الصافية (Net recharge) المشهورة والمثبتة فعاليتها في العديد من الدراسات الهيدروجيولوجية السابقة. تعتمد هذه المنهجية على دمج ثلاث متغيرات أساسية وهي:(الانحدار السطحي بالنسبة المئوية (%)، كمية الامطار السنوية(ملم/سنة)، ونفاذية التربة. وفق المعادلة التالية:

التغذية الصافية= الانحدار% + كمية الامطار السنوية (ملم/سنة) + نفاذية التربة ..... (2)

وتم عرض هذه التصنيفات لاستخراج التغذية الصافية في الجدول (5).

تطلبت المنهجية المتبعة على استخدام أدوات التحليل المكاني (Spatial analysis) في بيئة نظم المعلومات الجغرافية (Arc GIS) لإعداد الخرائط الموضوعية حيث تم اعداد خريطة الانحدار %(التضاريس) من خلال نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) وإعادة تصنيفها (Reclassification) وفق الاوزان المعتمدة في الجدول السابق.

جدول (5): تصنيف معامل التغذية السنوية

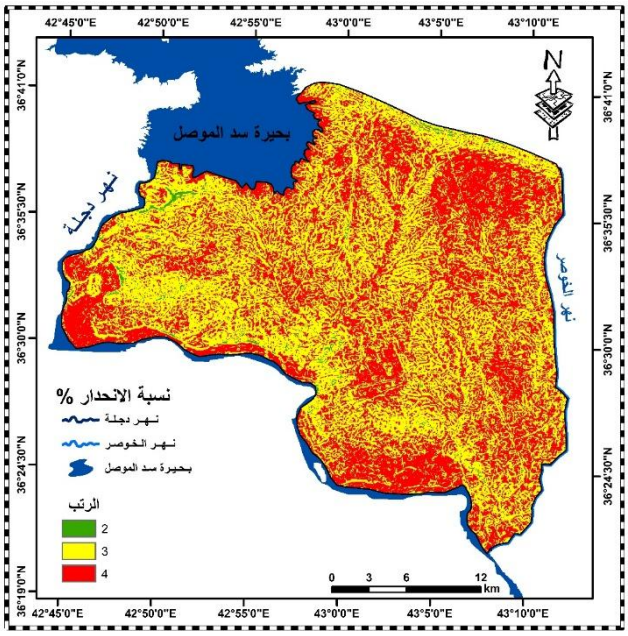
الانحدار %		التساقط السنوي (ملم/سنة)		نفاذية التربة		التغذية السنوية	
الميل بالدرجات	المعامل	الامطار (ملم/سنة)	المعامل	درجة التلوث	المعامل	**الرتبة**	**المعامل**
2<	4	500<	1	منخفض جداً	1	11 to 13	**10**
2 to 10	3	500 to 700	2	منخفض	2	11 to 7	**8**
10 to 30	2	700 to 850	3	متوسط	3	7 to 6	**5**
33>	1	850 >	4	عالي	4	6 to 5	**3**
–	–	–	–	عالي جداً	5	5 to 3	**1**

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على

Piscopo, Gennaro, et al. Murrumbidgee Catchment Groundwater Vulnerability Map: Explanatory Notes. Dept. of Land & Water Conservation and Australian Geological Survey Organization, 2001, p8.

وأظهرت النتائج ان المناطق ذات الانحدار المنخفض تمثل رتبة (2) وتشغل (0.80%) من مساحة منطقة الدراسة، والذي يقلل من ترشح المياه السطحية والمرور عبر التربة والطبقة غير المشبعة والوصول الى الخزان الجوفي، وعلى العكس تشغل مناطق ذات الانحدار العالي الرتبتان (3) و(4) ما نسبته (53.46%) و (45.74%). مما يسهل من عملية الجريان السطحي وبالتالي يزيد من التغذية. كما في الخريطة (3) والجدول (6).

خريطة (3): تصنيف رتب الانحدار السطحي % في منطقة الدراسة حسب طريقة Piscopo



المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على (DEM) وجدول (5) وبرنامج Arc GIS 10.8 وبمقياس رسم (1:100000)

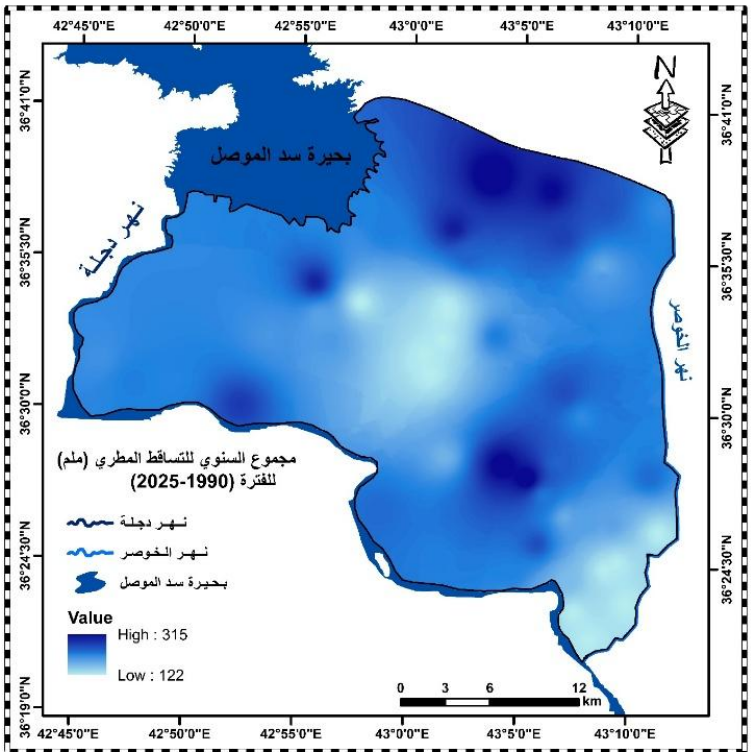
جدول (6): تصنيف الرتب والمساحات والنسب المئوية لمعامل الانحدار في منطقة الدراسة

رتب معامل الانحدار %	المساحة كم^2	النسبة المئوية %
4	392.76	45.74
3	459.02	53.46
2	6.91	0.80
	858.69	**100**

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على خريطة رقم (3).

وفيما يتعلق بخريطة الامطار السنوية (Annual Rainfall)، تم الاعتماد على بيانات المحطات المناخية للفترة (1990–2025) لمحطة الموصل باستخدام تقنية الاستيفاء (IDW) لتمثيل التباين المكاني نظراً لدقتها العالية. حيث بلغت المعدل السنوي للتساقط المطري (315.40) مم، ليتم تصنيفها بمعامل (1) لكونه يقع ضمن فئة أقل من 500 مم كما موضح في الخريطة (4).

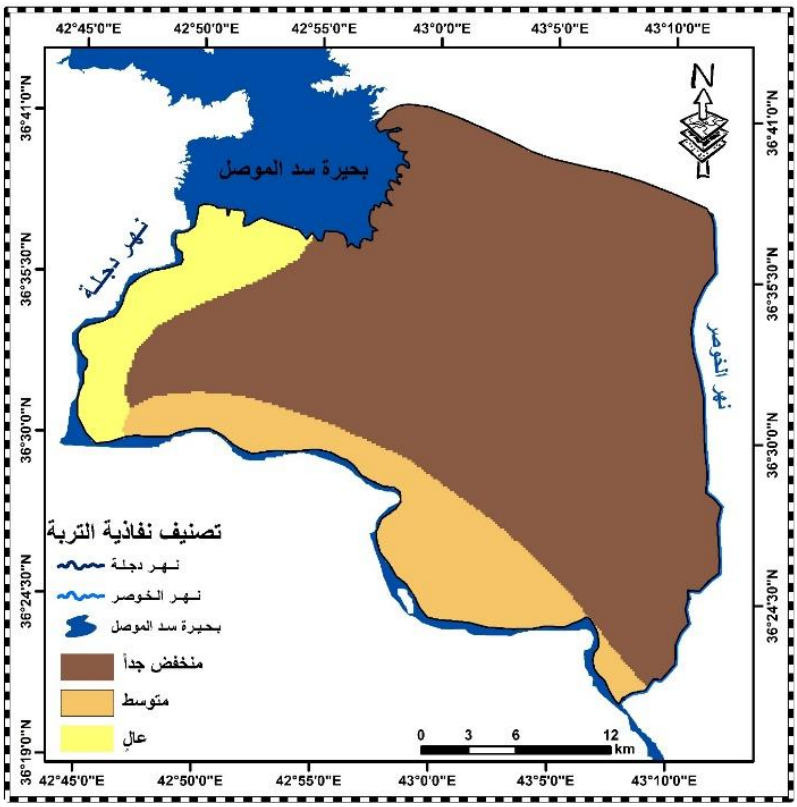
خريطة (4): معدل التساقط المطري السنوي في منطقة الدراسة للفترة 1990–2025



المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على جدول (5) وبرنامج Arc GIS 10.8 وبمقياس رسم (1:100000)

أما بالنسبة لنفاذية التربة فقد اعدت الخريطة وفقاً لتصنيف منظمة الأغذية والزراعة– الفاو (FAO) واظهرت النتائج وجود تباين في خصائص النفاذية حيث سادت النفاذية العالية في الأجزاء الغربية بنسبة (77.44%) من مساحة منطقة الدراسة. بينما توزعت النفاذية المتوسطة (14.49%) في الأجزاء الجنوبية والجنوبية الغربية، اما النفاذية المنخفضة فسجلت أدنى نسبة بلغت (8.06%) مما يشير الى تفاوت قدرة التربة على السماح بمرور المياه نحو الخزان الجوفية. كما في الخريطة (5) والجدول (7).

خريطة (5): تصنيف نفاذية التربة في منطقة الدراسة حسب تصنيف فاو FAO



المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على تصنيف بيورينك وجدول (5) وبرنامج Arc GIS 10.8 وبمقياس رسم (1:100000)

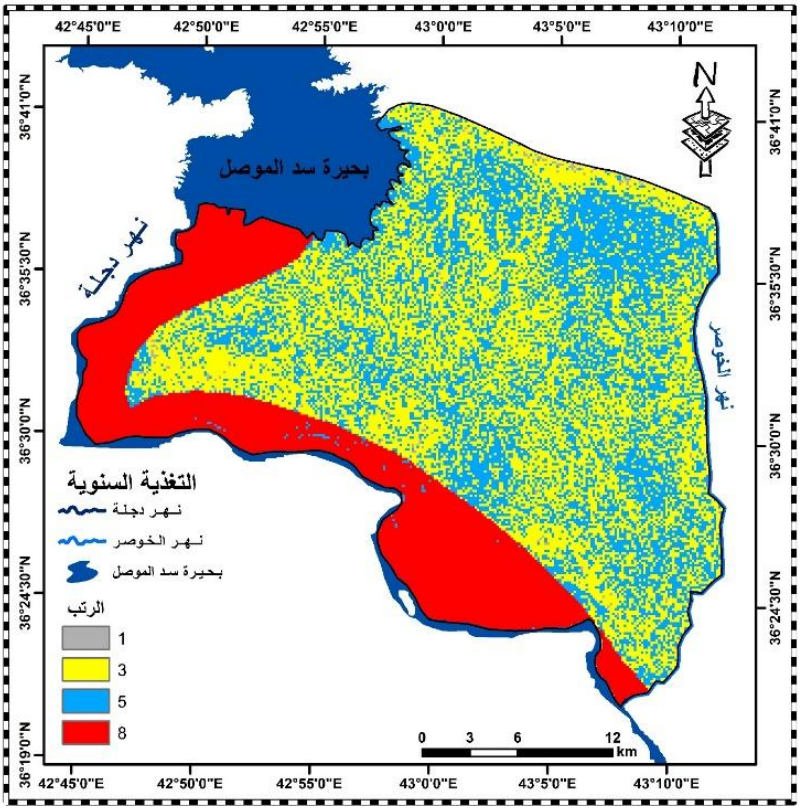
جدول (7): تصنيف الرتب والمساحات والنسب المئوية لمعامل نفاذية التربة في منطقة الدراسة

تصنيف معامل النفاذية	المساحة كم^2	النسبة المئوية %
نفاذية منخفض جداً	69.23	8.06
نفاذية متوسط	124.46	14.49
نفاذية عالية	665	77.44
	858.69 كم^2	**100**

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على خريطة رقم (5).

بعد دمج المتغيرات المكانية معاً ومنح كل منها وزناً نسبياً يعكس تأثيرها الهيدروجيولوجي تم استخراج خريطة التغذية السنوية لمنطقة الدراسة مصنفة الى أربع رتب (1،3،5،8) والتي تعكس مدى التباين في قابلية التغذية المياه. اظهرت النتائج وجود تباين مكاني بشكل واضح في قدرة المنطقة على تغذية الخزان الجوفي، حيث سيطرت الرتبتين (3) و(5) بنسبة اجمالي تفوق (77%) من مساحة منطقة الدراسة، في حين ظهرت الرتبة (8) كأكثر فاعلية وتأثيراً في التغذية بنسبة بلغت (22%) كونه تمركزت في النطاقات بخصائص طوبوغرافية وذات النفاذية العالية التي تزيد من عمليات الترشيح، بينما سجلت الرتبة (1) كأقل فئة انتشاراً نسبة (0.42%) مما يعكس محدودية قدرة هذا النطاق على تمرير المياه الى الخزان الجوفي. كما موضح في الخريطة (6) وجدول (8).

خريطة (6): التوزيع المكاني لمؤشر التغذية السنوية في منطقة الدراسة حسب نموذج SINTACS



المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على (DEM) وبيانات المحطات المناخية وتصنيف بيورينك وبرنامج Arc GIS 10.8 وبمقياس رسم (1:100000)

جدول (8): تصنيف الرتب والمساحات والنسب المئوية وفق المعيار المعتمدة في منهجية Piscopo

درجة الرتبة	المساحة كم^2	النسبة المئوية %
1	3.65	0.42
3	362.11	42.17
5	301.01	35.05
8	191.94	22.35
	858.69 كم^2	**100**

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على خريطة رقم (6).

3.10 الطبقة غير المشبعة (Unsaturated Zone) –N

يعرف النطاق غير المشبع (منطقة التهوية–Vadose Zone) بانه المنطقة الممتدة من سطح التربة الى منسوب الخزان الجوفي ويتميز هذا النطاق بحالة من التشبع المتقطع او المتذبذب. يمنح هذا الوضع النطاق دوراً اساسياً في التحكم في حركة الملوثات ونفاذيتها، فضلاً عن دوره في تخفيف تركيز الملوثات بشكل طبيعي قبل وصولها الى المياه الجوفية (Eftekhari & Akbari, 2020). ويصنف هذا النطاق ضمن الخصائص الهيدروجيولوجية الأساسية للأوساط ذات المسامية الحبيبية إذ تؤثر خصائصه الفيزيائية والكيميائية بشكل مباشر على ديناميكية حركة المياه في التكوينات الصخرية قبل وصولها الى النطاق المشبع (Hartono et al., 2022). يمثل النطاق غير المشبع المسار الرئيسي لعمليات تغذية الخزان الجوفي وفي الوقت نفسه يكتسب أهمية قصوى في حماية النظام الهيدروجيولوجي حيث يعمل كمرشح طبيعي فعال يعيق بشدة انتقال الملوثات من الوصول الى طبقات الجوفية (Wibowo et al., 2024). نظراً لعدم توفر بيانات الليثولوجية (Lithology) لآبار المراقبة داخل منطقة الدراسة. فقد تم الاعتماد على الخريطة الجيولوجية (Geological Map) كمرجع أساسي لكي نوصف فيه الخصائص الليثولوجية للنطاق غير المشبع. حيث يعد هذا المنهج أداة معتمدة في الدراسات الهيدروجيولوجية، إذ تستخدم الوحدات الجيولوجية في الخرائط كبدائل لتقدير الخصائص الهيدروليكية. كما في دراسة (Elzain et al., 2021) ، و (Gómez–Escalonilla & Martínez–Santos, 2024). كما في الجدول (9) والخريطة (7).

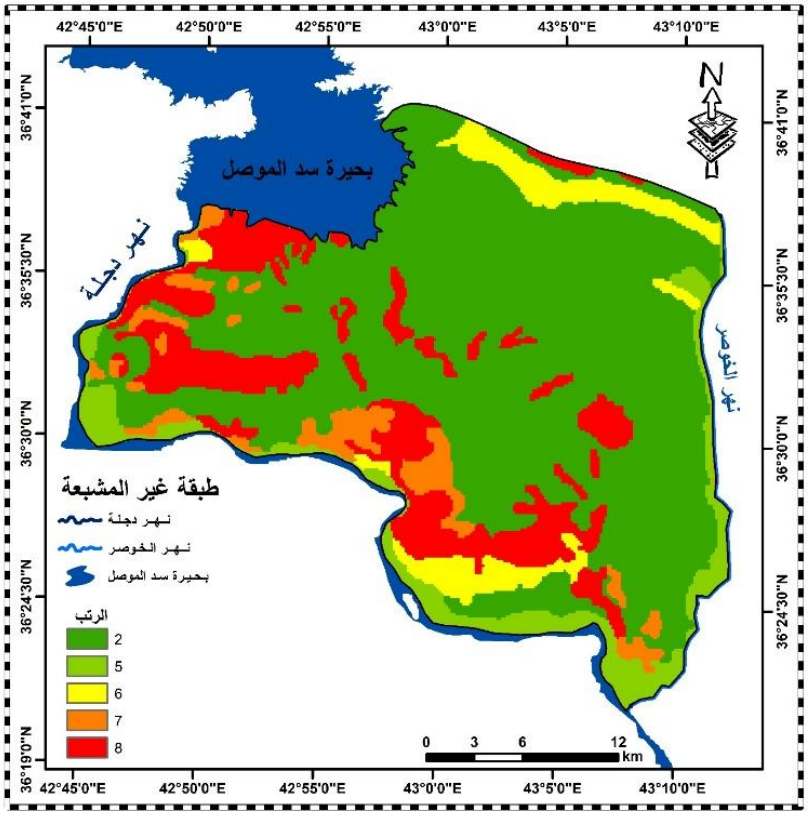
جدول (9): تصنيف الطبقة غير المشبعة في منطقة الدراسة حسب التصنيف الصخري – والتكوين الجيولوجي

نطاق غير المشبع (ليثولوجي) Lithology	الرتبة	التكوين الجيولوجي لمنطقة الدراسة	الرتبة الهيدرولوجية (1–10)
الرواسب الغرينية الخشنة **Coarse alluvial deposits**	6 – 9	**رواسب المنحدرات / السفوح**	7
حجر جيري كارستي**Karstified limestone**	8 – 10	**تكوين الفتحة**	8
حجر جيري مشقق**Fractured limestone**	4 – 8	–	–
الدولومايت المتصدع**Fissured dolomite**	2 – 5	–	–
الرواسب النهرية ذات الحبيبات المتوسطة إلى الدقيقة **Medium– fine alluvial deposits**	3 – 6	**رواسب السهل الفيضي**	5

تكوين رملي متداخل **Sand complex**	4 – 7	**تكوين باي حسن**	5
الحجر الرملي، **Sandstone, conglomerate** والكونجلوميرات (أو صخور الرصيص)	5 – 8	**تكوين المقدادية**	6
تتابعات صخرية من **Turbiditic sequences** النوع التوربيدي	2 – 5	–	–
الصخور البركانية **Fissured volcanic rocks** المُتصدعة	5 – 10	–	–
المارل ، والحجر الطيني **Marl, clay stone**	1 – 3	**تكوين انجانا**	2
صلصال ، غرين ، خُث **Clay, silt, peat**	1 – 2	**تربة متبقية**	2
الصخور الفتاتية البركانية **Pyro-clastic rock**	2 – 5	-	
الصخور **Fissured metamorphic rocks** المتحولة المُتصدعة	2 – 6	–	–

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على Civita, Massimo, Marina De Maio, and Franco Barberi. Sintacs: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: metodologia e automatizzazione. Pitagora, 1997.

خريطة (7): التوزيع المكاني للطبقة غير المشبع في منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على الخريطة الجيولوجية وجدول (9) وبرنامج Arc GIS 10.8 وبمقياس رسم (1:100000)

تظهر خريطة النطاق غير المشبع ((Unsaturated zone تبايناً هيدروجيولوجياً ملحوظاً في منطقة الدراسة حيث يعكس تنوع التكوينات الصخرية (Lithology) وتوزيعها الجغرافي. وقد تم تصنيف التكوينات الجيولوجية بناءً على خصائصها الفيزيائية بالاعتماد على اوزان رقمية تراوحت (1–10) لكل تكوين تعكس مدى نفاذيتها وقدرتها على نقل الملوثات الى الخزان الجوفي. تشير النتائج الى ان المنطقة تسيطر عليها بشكل كبير الرتبة (2) والتي تغطي مساحة تبلغ (549.83) كم²، بما يعادل 64.03% من إجمالي مساحة المنطقة. وتأتي هذه النسبة العالية بارتباط الرتبة بتكوينات صخرية ذات نفاذية منخفضة كالمارل والحجر الطيني (تكوين انجانا) والتربة المتبقية (الصلصال والغرين)، وتلعب هذه الوحدات دوراً اساسياً بوصفها مصدراً هيدروليكياً طبيعياً يعيق حركة المياه والملوثات نحو الطبقات الجوفية العميقة مما يحد من فرص التغذية المائية في الأجزاء الجنوبية والوسطى من

المنطقة. في المقابل تظهر التكوينات ذات النفاذية العالية والمتمثلة بالرتبتين (7)و(8) مثل الحجر الجيري الكارستي والمشقق (تكوين الفتحة) ورواسب المنحدرات والرواسب الغرينية الخشنة في مساحات مكانية محدودة إذ تبلغ مساحتها مجتمعة حوالي (190.65) كم²، وتتركز في الأجزاء الشمالية والشمالية الشرقية من منطقة الدراسة. وبالرغم من صغر مساحتها الا انها تمثل مناطق ذات حساسية هيدرولوجية عالية بسبب وجود فراغات بين الحبيبات وقنوات كارستية وشقوق صخرية تسمح بنفاذية المياه السطحية وما تحمله من ملوثات بسرعة فائقة الى باطن الأرض مما يجعلها نقاط ضعف بيئية تستدعي عناية خاصة في الدراسات الهيدرولوجية. كما تحتل الرتبة (6) مساحة قدرها (51.36) كم² بنسبة (5.98%) وترتبط بتكوين المقدادية المتمثلة بالحجر الرملي والكونجلوميرات، بينما تمثل الرتبة (5) مساحة (66.84) كم² بنسبة (7.78%) وتتعلق بتكوين باي حسن (تكوين رملي متداخل) والرواسب الفيضية متوسطة الى دقيقة الحبيبات وتعمل هاتان الرتبتان كمناطق انتقالية بين النطاقين شديدة الانخفاض وشديدة الارتفاع في النفاذية، كما تساهمان في التغذية الجوفية بدرجة متوسطة. كما في الجدول (10).

جدول (10): تصنيف الرتب والمساحات والنسب المئوية لتوزيع النفاذية حسب التكوينات الصخرية

درجة الرتبة	المساحة كم²	النسبة المئوية %
2	549.83	64.03
5	66.84	7.78
6	51.36	5.98
7	45.28	5.27
8	145.37	16.93
	858.69 كم²	**100**

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على الخريطة (7)

4.10 وسط ونسجة التربة السطحية T-Soil media

يقصد بـ وسط التربة الطبقة السطحية من النطاق غير المشبع (Unsaturated Zone) التي تلامس الغلاف الجوي مباشرة وتتميز بنشاط بيولوجي حيوي نتيجة وجود الكائنات الحية الدقيقة والمواد العضوية والجذور النباتية، مما يمنحها خصائص فريدة تجعلها الحاجز البيئي الأول الذي تواجهه الملوثات عند بدء رحلة الطويلة نحو الطبقات تحت السطحية (Fannakh et al., 2025). تكتسب

طبقة التربة أهمية خاصة اذ لا تقتصر وظيفتها على كونها مجرد نطاق التهوية (Aerated Zone) فحسب بل تعمل كمنظم طبيعي للتحكم الفعال في معدلات تسرب المياه وتوجيه حركة الملوثات عمودياً. وتلعب خصائصها الفيزيائية (كالتركيب الحبيبي والمسامية) إضافة الى خصائصها الكيميائية (كدرجة الحموضة والمحتوى العضوي) دوراً حاسماً في تثبيت الملوثات وإزالتها قبل وصولها الى الأعماق مما يقلل بشكل كبير من مخاطر تلوث المياه الجوفية (Motlagh et al., 2023). لتحديد نسجة التربة (Soil Texture) في منطقة الدراسة، تم الاستعانة بخرائط تصنيف الترب الصادرة عن منظمة اغذية والزراعة (FAO) والمبنية على نظام بيورينك (Buring,1960) لتصنيف الترب عالمياً. ومن خلاله تم تصنيف الترب السائدة في منطقة الدراسة الى ثلاثة أصناف رئيسية بالاعتماد على جدول (11) والذي يربط كل نوع من نسيج التربة برتبة (Rating) تتناسب مع درجة نفاذيتها وقدرتها على نقل الملوثات. كما في الخريطة (8).

تظهر خريطة التحليل المكاني لتوزيع نسجة التربة في منطقة الدراسة عن هيمنة الواسعة للتربة الطينية (**Clay**) التي تندرج تحت رتبة (1)، إذ تعد الأكثر انتشاراً وتغطي مساحة شاسعة تبلغ (665) كم²، بما يعادل (77.44%) من اجمالي مساحة المنطقة، ومن الناحية الهيدروجيولوجية تتميز هذه النوعية من الترب بانخفاض شديد في نفاذيتها وقدرة عالية على الامتزاز والاحتفاظ بالرطوبة مما يكسبّها دوراً فعالاً بوصفِها حاجزاً طبيعياً يمنع تسرب الملوثات السطحية نحو الخزان الجوفي. اما النسبة المتبقية من المساحة فتوزع بين التربة الطميية الطينية والغرينية (Clay loam and Silt) الرتبة (3) بنسبة (14.49%) والتربة الطينية الرملية (Sandy clay) الرتبة (7) بنسبة (8.06%).

خريطة (8): تصنيف نسيج التربة السطحية في منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على تصنيف بيورينك وجدول (11) وبرنامج Arc GIS 10.8 وبمقياس رسم (1:100000)

جدول (11): تصنيف نسيج التربة في منطقة الدراسة وفق تصنيف بيورينك

نوع نسجة التربة	الرتبة	الرتبة المطبقة في منطقة الدراسة
طين **Clay**	1 – 1.5	1
طين غريني **Silty – clay**	1.5 – 2	–
الطمي الطيني **Clay loam**	2 – 3	-
الطمي الطيني وغريني **Clay loam and Silt**	3 – 4	3
طمي غريني **Silt loam**	3.5 – 4	–
طمية **Loam**	4 – 5	-
طمية رملية طينية **Sandy clay loam**	4.5 – 5	–
طمية رملية **Sandy loam**	5.5 – 6	–
طين رملي **Sandy clay**	6.3 – 7	7
خث **Peat**	7.5 – 8	–
رملي **Sandy**	8 – 8.5	–
رمل نظيف **Clean sand**	9 – 9.5	-
حصى نظيف **Clean gravel**	9.5 – 10	–
تربة رقيقة أو غائبة **Thin or absent**	10	–

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على

Civita, Massimo, Marina De Maio, and Franco Barberi. Sintacs: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: metodologia e automatizzazione. Pitagora, 1997.

وتبرز هذه المناطق باعتبارها أكثر حساسية بيئياً نظراً لنفاذيتها الأعلى نسبياً مقارنة بالتربة الطينية مما يستوجب مراعاتها الخاصة عند تقييم مسارات انتقال الملوثات عمودياً في النطاق غير المشبع. كما في الجدول (12).

جدول (12): تصنيف الرتب والمساحات والنسب المئوية لنسجة التربة السائدة لمنطقة الدراسة

درجة الرتبة	المساحة كم^2	النسبة المئوية %
1	665	77.44
3	124.46	14.49
7	69.23	8.06
	858.69 كم^2	**100**

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على الخريطة (8)

5.10 وسط الخزان الجوفي (Aquifer Media) –A

يقصد بوسط الخزان الجوفي (**A**) التكوينات الجيولوجية الواقعة ضمن النطاق المشبع (Saturated Zone) والتي تُحدد خصائصها الفيزيائية والهيدروليكية مسارات حركة المياه والملوثات داخل الخزان. تعتبر هذه التكوينات المسؤول الأول عن عمليات تثبيت الملوثات والحد من انتشارها من خلال عمليات الامتزاز والترسيب والتي تعتمد بشكل أساسي على خصائص الصخر كالمسامية والتشققات والمحتوى المعدني، ولذا يعتبر هذا الوسط عاملاً حاسماً في تقييم قابلية الخزان الجوي للتلوث (Fannakh et al., 2025) . كما تعتمد سرعة انتقال الملوثات بشكل كبير على طبيعة وسط الخزان الجوفي فكلما زادت نسبة الفراغات (المسامية) فيه ارتفعت نفاذيته مما يجعله أكثر عرضة لخطر التلوث واقل كفاءة في عمليات التنقية الذاتية (Shahid et al., 2023).

تم تصنيف وسط الخزان الجوفي (Aquifer Media) بالاعتماد على الخريطة الجيولوجية لمنطقة الدراسة والتي تمثل المرجع الأساسي لتحديد التوزيع المكاني للتكوينات الصخرية المكشوفة وخصائصها الليثولوجية (Lithological) والتركيبية (Structural). وتعد الخريطة الجيولوجية الأداة الأكثر موثوقية لتحديد النطاقات الصخرية (كالرواسب الغرينية والحجر الجيري او الصخور الطينية والصخور البركانية والمتحولة) التي تشكل الوسط الخازن للمياه الجوفية. وعلى هذا الاساس، تم إسقاط الوحدات الجيولوجية المحددة في منطقة الدراسة على التصنيف القياسي المعتمد في جدول (13) حيث منحت كل وحدة جيولوجية رتبة (Rating) تتناسب مع خصائصها الهيدروليكية كالنفاذية والمسامية، والتشققات والكارستية وقدرتها على تخزين ونقل المياه الجوفية. كما في الخريطة (9).

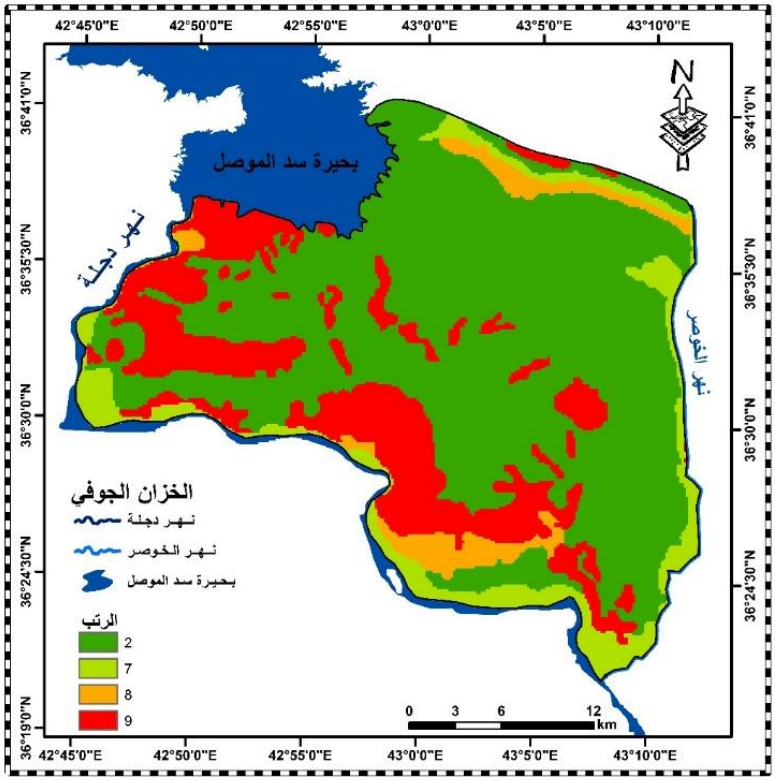
جدول (13): تصنيف وسط الخزان الجوفي حسب الخصائص الليثولوجية والهيدروجيولوجية

نطاق غير المشبع (ليثولوجي) Lithology	الرتبة (1-10)	التكوين الجيولوجي لمنطقة الدراسة	الرتبة (1-10)
Coarse alluvial deposits الرواسب الغرينية الخشنة	8– 9	**رواسب المنحدرات**	8
		رواسب السفوح	9
Karstified limestone حجر جيري كارستي	9 – 10	**تكوين الفتحة**	9
Fractured limestone حجر جيري مشقق	6 – 9	–	–
Fissured dolomite الدولومايت المتصدع	4 – 7	–	–
Medium– fine alluvial deposits الرواسب النهرية ذات الحبيبات المتوسطة إلى الدقيقة	6 – 8	**رواسب السهل الفيضي**	7
Sand complex تكوين رملي متداخل	7– 9	**تكوين باي حسن**	7
Sandstone, conglomerate الحجر الرملي، والكونجلوميرات (أو صخور الرصيص)	9-4	**تكوين المقدادية**	7
Turbiditic sequences تتابعات صخرية من النوع التوربيدي	5– 8	–	–
Fissured volcanic rocks الصخور البركانية المُتصدعة	8 – 10	–	–
Marl, clay stone المارل ، والحجر الطيني	1 – 3	**تكوين انجانا**	2
Clay, silt, peat صلصال ، غرين ، تربة عضوية	1 – 3	**تربة متبقية**	2
Pyro-clastic rock الصخور الفتاتية البركانية	4– 8	–	–
Fissured metamorphic rocks الصخور المتحولة المُتصدعة	2 – 5	–	–

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على

Civita, Massimo, Marina De Maio, and Franco Barberi. Sintacs: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: metodologia e automatizzazione. Pitagora, 1997.

خريطة (9): التوزيع المكاني لوسط الخزان الجوفي في منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على الخريطة الجيولوجية وجدول (13) وبرنامج Arc GIS 10.8 وبمقياس رسم (1:100000)

تم تصـنيف وسـط الخزان الجوفي في منطقة الدراسـة بناءً على الخريطة الجيولوجية، حيث تسـيطر التكوينات ذات الرتبة (2) التي تضم تكوين انجانا (مارل والحجر الطيني) والتربة المتبقية (الصلصال والغرين) على مسـاحة واسـعة تبلغ (549.83) كم²، بنسـبة (64.03%) موزعة بشـكل كبير في الأجزاء الشـمالية ووسـط منطقة الدراسـة وتشـير هذه النسـبة العالية الى وجود مناطق ذات نفاذية منخفضة نسبياً مما يساهم في تقليل حركة الملوثات وتعزيز عمليات الامتزاز والتثبيت الطبيعي بالتالي الحد من خطر انتقال الملوثات نحو الخزان الجوفي. في المقابل كشـف التحليل عن وجود نطاقات ذات رتب مرتفعة (9،8،7) والتي تشـغل مجتمعة (35.97%) من اجمالي مسـاحة منطقة الدراسـة. وترتبط هذه الرتب العالية بالرواسـب الغرينية الخشـنة وتكوينات الحجر الرملي والكونجلوميرات والصـخور الكارستية التي تتسم مسامية عالية ونفاذية كبيرة. تحتل الرتبة (7) مساحة (80.21) كم² بنسبة (9.34%) وترتبط برواسب السهل الفيضـي (الرواسب النهرية المتوسطة الى دقيقة الحبيبات)

وتكوين باي حســـن (الرمل المتداخل مع الطين) وتكوين المقدادية (الحجر الرملي والكونجلوميرات) وتتميز بنفاذية متوسـطة مما يجعلها مناطق انتقالية بين الخزانات (منخفضــة النفاذية برتبة 2 وعالية النفاذية برتبة 9). كما تغطي الرتبة (8) مسـاحة (37.99) كم² بنسـبة (4.42%) وترتبط برواسـب المنحدرات والحجر الجيري المشـقق والتي تتميز بنفاذية عالية نسـبياً مما يزيد من حسـاسـيتها البيئية مقارنة بالرتبة السـابقة (2). وتمثل الرتبة (9) وحدها ما نسبته (22.20%). وهي الأكثر خطورة من الناحية البيئية، إذ تؤدي مساميتها العالية جداً وقنواتها الكارستية والشقوق الى تسريع حركة الملوثات داخل النطاق المشبع (Saturated Zone) في حال تعرضها لأي مصدر من مصادر تلوث سطحي مما يجعلها مناطق ذات حساسية شديدة. كما في الجدول (14). وهذا التباين الليثولوجي في التوزيع تمثل المحرك الأسـاسـي لاختلاف درجات الضـعف التلوثي(Groundwater Vulnerability) في منطقة الدراسة كما يعد أداة رئيسية لتحديد أولويات الحماية.

جدول (14): تصنيف الرتب والمساحات والنسب المئوية للخزان الجوفي السائدة لمنطقة الدراسة

درجة الرتبة	المساحة كم²	النسبة المئوية %
2	549.83	64.03
7	80.21	9.34
8	37.99	4.42
9	190.65	22.20
	858.69 كم²	**100**

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على الخريطة (9)

6.10 التوصيلية الهيدروليكية (Hydraulic conductivity)-C

تعتبر التوصيلية الهيدروليكية المعيار الأساسي لتقييم قدرة الخزان الجوفي على تمرير المياه والملوثات وتقاس بوحدة (متر/يوم). تعتمد قيمتها على مدى اتصال الفراغات والمسامات داخل التكوين الصخري سواء كانت هذه الفراغات ناتجة عن المسامية بين الحبيبات (Intergranular Porosity) او الشقوق والفواصل (Fractures and Joints) او أسطح التطبق (Bedding Planes) والقنوات الكارستية، وتكتسب التوصيلية الهيدروليكية أهمية كبيرة في الدراسات الهيدروجيولوجية (Sankarapandian et al., 2023). إذ ان ارتفاع قيمتها يؤدي الى زيادة سرعة انتقال المياه والملوثات داخل الخزان مما يزيد قابلية الخزانات الجوفية للتلوث تجاه مصـادر التلوث السـطحية وبذلك تتكامل التوصـيلية الهيدروليكية

مع خصـــائص الهيدروديناميكي الأخرى للخزان في تحديد مدى اســـتجابته لعمليات التغذية ورســـم مسـارات التفضـيلية (Preferential Pathways) لانتقال الملوثات وهو ما ينعكس بشـكل مباشـر على تقدير درجات الضـعف التلوثي للمنطقة(Sankarapandian et al., 2023). لقد تم تحديد القيم المحددة للتوصـــيلية الهيدروليكية في الجدول (15) كما تم تصـــنيفها في منطقة الدراســـة الى رتب (Rating) التي تعكس تبايناً في ســـرعة تدفق المياه بوحدة (متر/يوم)، وكما موضـــح في الخريطة (10) حيث تم تقســـيم المنطقة الى نطاقات تتدرج من الرتبة (5) الى (10) مما يعكس هذا التباين المكاني تنوعاً في طبيعة الأوسـاط المسـامية، إذ تشـير الرتب المرتفعة الى مناطق ذات نفاذية عالية تعزز من سرعة انتقال الملوثات افقيا وعمودياً وتزيد من قابلية هذه المناطق للتلوث.

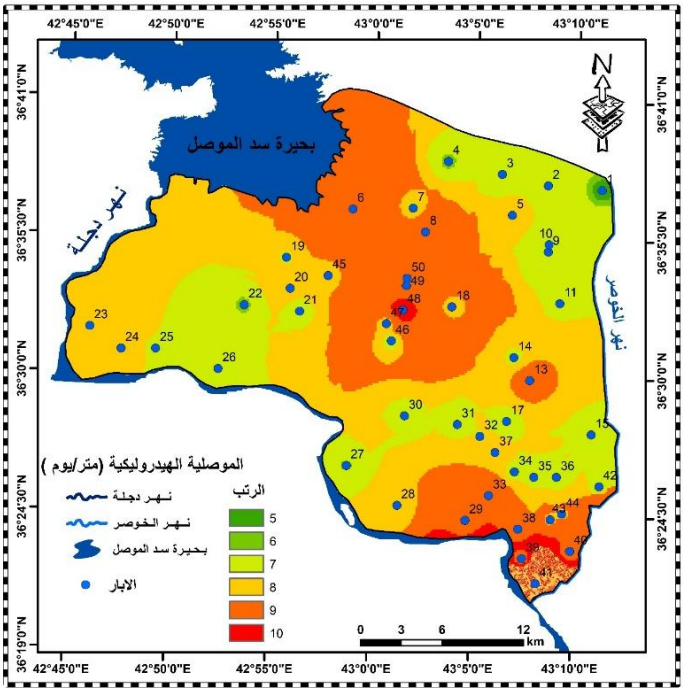
جدول (15): نطاقات التوصيلية الهيدروليكية والرتب التقييمية

الموصلية الهيدروليكية (متر/يوم)	الرتبة	رتب الموصلية الهيدروليكية في منطقة الدراسة
864-432	10	10
432-86.4	9	9
86.4-43.2	8	8
43.2-8.64	7	7
8.64-4.32	6	6
4.32-0.864	5	5
0.864-0.432	4	4

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على

Civita, Massimo, Marina De Maio, and Franco Barberi. Sintacs: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: metodologia e automatizzazione. Pitagora, 1997.

خريطة (9): التوزيع المكاني للتوصيلية الهيدروليكية في منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على بيانات جدول (15) وبرنامج Arc GIS 10.8 وبمقياس رسم (1:100000)

أظهرت نتائج التوزيع المكاني للتوصـــيلية الهيدروليكية في منطقة الدراســـة تبايناً واضـــحاً في قيم النفاذية حيث تم تصـنيف المنطقة الى سـت رتب رئيسـية وتشـير النتائج الى هيمنة الرتبة (8) على مساحة شاسعة تبلغ (343.77) كم² وبنسبة (40.03%) وتتركز في الأجزاء الوسطى والشمالية من منطقة الدراسة إذ ترتبط برواسب المنحدرات والرواسب الغرينية الخشنة والحجر الرملي والكونجلوميرات مما يعكس نفاذية عالية وتأتي في المرتبة الثانية الرتبة (9) بمســـاحة (269.31) كم² وبنســـبة (31.36%) والتي تغطي المناطق الوسطى والشمالية وبعض أجزاء الجنوبية وترتبط بالحجر الجيري الكارســـتي (تكوين الفتحة) وتكوين انجانا والترب المتبقية وتتميز بنفاذيتها العالية جداً مما يجعلها شـديدة الحسـاسـية للتلوث اما الرتبة (7)فتغطي مسـاحة قدرها (229.69) كم² وبنسـبة (26.75%) وترتبط بتكوين باي حســن (الرمل المتداخل) والرواســب النهرية متوســطة الحبيبات والترب المتبقية وتتمركز في الأجزاء الوسطى والغربية وتعمل كمنطقة انتقالية بين الخزانات المنخفضة في حين تشغل الرتب المنخفضة (6،5) مساحات قليلة لا تتجاوز (6.05) كم² بنسبة (0.71%) وتظهر على شكل بقع محدودة في الأجزاء الشرقية والغربية حيث تسود فيها الترب المتبقية (الصلصال والغرين) وتكوين

انجانا(المارل والحجر الطيني) وتعمل كمصـــدرات طبيعية تحد من حركة الملوثات كما تظهر الرتبة (10) بمســاحة محددة بلغت (9.86) كم² وبنســبة (1.15%) وتتركز على شــكل بقع ضــيقة في اقصـــى الشــمال حيث ترتبط بالرواســب الغرينية الخشــنة وتتميز بنفاذية عالية مما يجعلها المناطق الأكثر عرضة لخطر التلوث للخزان الجوفي. كما في الجدول (16).

جدول (16): تصنيف الرتب والمساحات والنسب المئوية للتوصيلية الهيدروليكية السائدة لمنطقة الدراسة

درجة الرتبة	المساحة كم²	النسبة المئوية %
5	1.93	0.23
6	4.12	0.48
7	229.69	26.75
8	343.77	40.03
9	269.31	31.36
10	9.86	1.15
	858.69 كم²	**100**

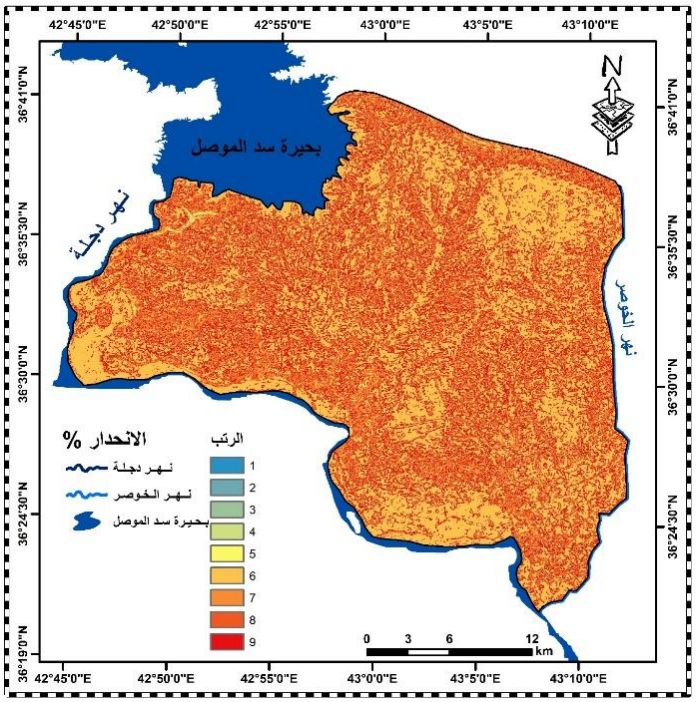
المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على الخريطة (10)

7.10 الانحدار السطحي (الطوبوغرافي)% (Slope Topography) -%S

تمثل الطوبوغرافية(**Topography**) او الانحدار الســطحي أحد العوامل الأســاســية التي تتحكم في آلية الترشـــيح (Leaching) للمياه والملوثات عبر طبقة التربة حيث يتحكم الانحدار الســـطحي في معدلات الجريان السطحي والذي يعكس بدوره تأثيراً مباشراً على احتمالية انتقال الملوثات او احتجازها على سطح الأرض وبالتالي على مدى قدرتها على النفاذ نحو باطن الأرض (Rama et al., 2022) . زيادة الانحدار تؤدي الى تســارع الجريان الســطحي مما يقلل من حجم المياه المترشــحة الى باطن الأرض ويقلل من مدة تماس بين الملوثات والطبقة الســطحية للتربة. وفي المقابل تعمل المناطق ذات الانحدار المنخفض على ابطاء سرعة الجريان السطحي مما يطيل زمن التماس بين المياه والملوثات وسطح الأرض ويتيح فرصة أكبر لعمليات الترشيح الرأسي نحو الطبقات الجوفية. نتيجة لذلك تصنف المناطق المنبســطة ضــمن النطاقات الأكثر عرضــة للتلوث في تقييم حســاســية المياه الجوفية وذلك لدورها الكبير في تسهيل انتقال الملوثات نحو الخزان الجوفي (الكاكئي، 2024). تم تصنيف معامل الانحدار (**Slope**) في منطقة الدراســة الى عشــر رتب تتراوح بين (1–10) حيث تمثل الرتبة (10) اقل قيم للانحدار (0–2%) والتي تتطابق مع المناطق الســهلية والمنبســطة في حين تمثل الرتبة (1)

اعلى قيم للانحدار (**>26%**) والتي ترتبط بالمناطق الجبلية والوعرة. ففي المناطق ذات الانحدار المنخفض (الرتب 10،9،8) تقل حركة الجريان السطحي وتزداد فرص الترشيح العمودي للمياه والملوثات نحو باطن الأرض مما يجعل هذه المناطق أكثر عرضة للتلوث الجوفي اما في المناطق ذات الانحدار المرتفع (الرتب 3،2،1) فتساهم في تسريع الجريان السطحي مما يقلل من حجم المياه المتسربة ويحد من فرص تسرب المياه والملوثات الى الخزان الجوفي ولكنها قد تسهل نقل الملوثات عبر الجريان السطحي الى مناطق أخرى. وقد تم تصنيف الرتب وفقاً لقيم معامل الانحدار ليعكس مدى تأثير الانحدار في حركة المياه والملوثات منطقة الدراسة كما هو موضح في الجدول (17). والخريطة (11).

خريطة (11): التوزيع المكاني للانحدار السطحي (%) في منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على (DEM) وجدول (17) وبرنامج Arc GIS 10.8 وبمقياس رسم (1:100000)

جدول (17): تصنيف الانحدار السطحي ودرجات التقييم في منطقة الدراسة

معامل الانحدار%	الرتب R	معامل الانحدار في منطقة الدراسة	الرتب R
2 – 0	10	2 – 0	10
3 – 4	9	3 – 4	9
5 – 6	8	5 – 6	8
7 – 9	7	7 – 9	7
0 – 121	6	0 – 121	6
3 – 151	5	3 – 151	5
6 – 181	4	6 – 181	4
19 – 21	3	19 – 21	3
2 – 252	2	2 – 252	2
26<	1	–	–

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على

Civita, Massimo, Marina De Maio, and Franco Barberi. Sintacs: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: metodologia e automatizzazione. Pitagora, 1997.

بناءً على توزيع رتب الانحدار في منطقة الدراسة، كشفت التحليل الاحصائي في الجدول (18) عن هيمنة واضحة للنطاقات ذات الانحدار المنخفض الى المتوسط، إذ تتركز النسبة الأكبر من مساحة المنطقة في الرتبة (5) بواقع (397.47) كم² أي ما يعادل (46.29%) من اجمالي المساحة، تليها الرتبة (2) بمساحة (270.92) كم² وبنسبة (31.55%) ويدل هذا التوزيع الى ان مساحة واسعة من منطقة الدراسة يتميز بخصائص طوبوغرافية تسمح بتجميع المياه وتزيد من فرص الترشيح العمودي (Infiltration) نحو الخزان الجوفي. بينما سجلت الرتب (10،9،8) أكثر المناطق انخفاضاً في الانحدار (اقل من 6%) مما يشير الى ان الحساسية للتلوث ناتجة عن العامل الطوبوغرافي تتوزع بشكل متفاوت وتكمن الخطورة الأعلى في المناطق فيها قلة الانحدار مع نفاذية عالية للتربة مما يرفع من درجة الضعف التلوثي وفقاً لمعايير نموذج SINTACS

جدول (18): تصنيف الرتب والمساحات والنسب المئوية لمعامل الانحدار السطحي

درجة الرتبة	المساحة كم^2	النسبة المئوية %
10	0.001	0.0001
9	0.039	0.0045
8	0.120	0.0139
7	0.459	0.0535
6	1.579	0.1839
5	397.473	46.2882
4	172.744	20.1171
3	15.358	1.7885
2	270.919	31.5502
	858.69 كم^2	**100**

المصدر: من قبل الباحثة اعتماداً على الخريطة (11)

11.خريطة مؤشر الضعف المياه الجوفية (سيناريو النترات)

تم اعداد خريطة ضعف المياه الجوفية استناداً الى نموذج SINTACS من خلال اجراء عملية الجمع المرجح لجميع الطبقات الموزونة والمصنفة باستخدام أداة (Raster Calculator) او (Weighting Sum) داخل برنامج .Arc GIS وفق المعادلة الأساسية للنموذج. وتم تطبيق خريطة مكانية تعكس توزيع درجات الضعف الجوفي في منطقة الدراسة وهي: سيناريو النترات (Nitrate Scenario).

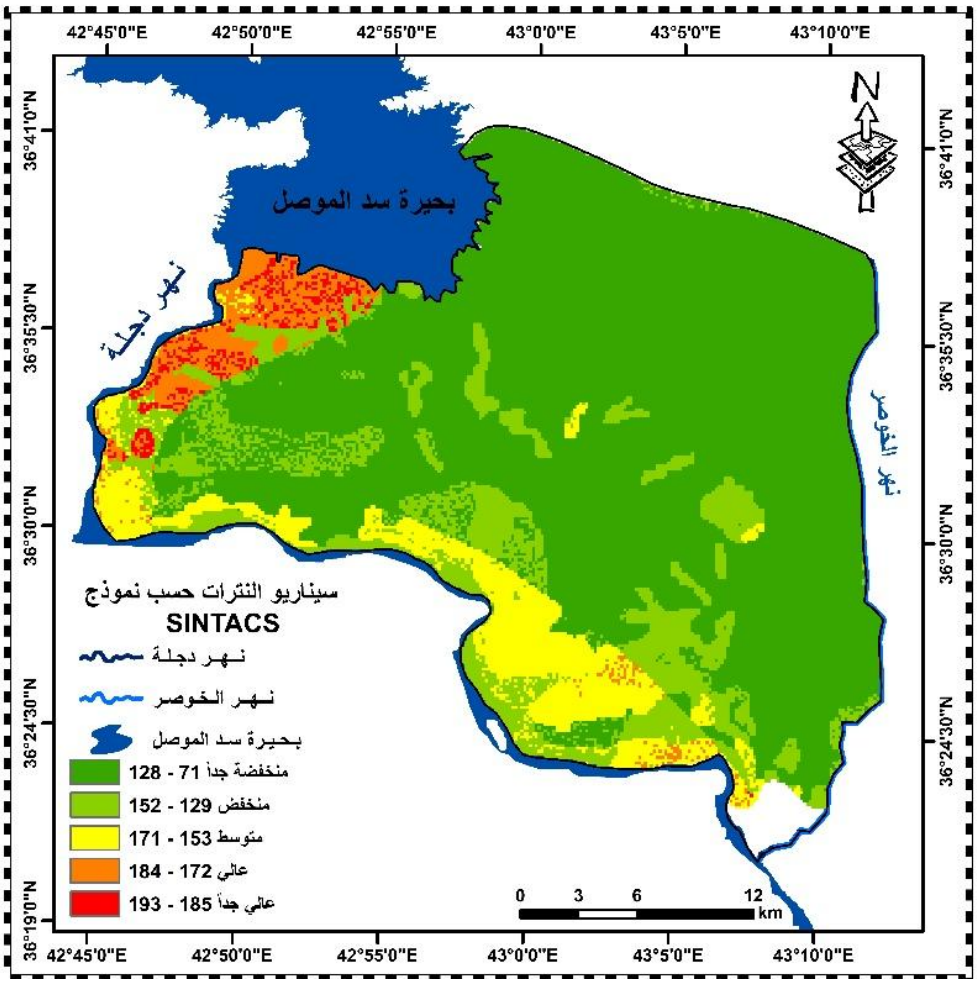
1.11 اختيار السيناريو والمبررات العلمية لاختيارها

بعد تصنيف جميع المعاملات الهيدروجيولوجية السبعة وتطبيق الاوزان المخصصة لكل سيناريو من السيناريوهات الستة ضمن نموذجSINTACS ، تم اختيار سيناريو النترات (Nitrate Scenario) دون غيره من السيناريوهات الخمسة الأخرى، كونه يعكس بدقة الخصائص الجيولوجية والهيدروجيولوجية السائدة في منطقة الدراسة، والمرتبطة تحديداً بالنشاط الزراعي المكثف ومصادر التلوث النيتروجيني.

وقد استند اختيار سيناريو النترات إلى مبررات منهجية وميدانية واضحة إذ يعكس هذا السيناريو تحديداً تأثير الأنشطة الزراعية المكثفة السائدة في منطقة الدراسة، حيث تُسهم الممارسات الزراعية

الواسعة، والاستخدام المفرط للأسمدة الكيماوية والمبيدات، والقرب من مصادر مائية سطحية (بحيرة سد الموصل ونهر دجلة)، في رفع احتمالية تغلغل النترات نحو الخزان الجوفي. وهذا التداخل بين العوامل الطبيعية (كعمق المياه والانحدار السطحي) والعوامل البشرية (الأنشطة الزراعية) هو ما جعل سيناريو النترات الأكثر ملاءمة ودقة في تمثيل وتحليل حساسية المياه الجوفية لمنطقة الدراسة، مقارنة بسيناريوهات أخرى كسيناريو الكارست أو التصريف السطحي، واللذين يعكسان أنماط تلوث لا تعبّر عن طبيعة الضغط البشري الفعلي السائد في المنطقة. كما هو موضح في الخريطة (12).

خريطة (12): مؤشر الضعف الجوفي في منطقة الدراسة – سيناريو النترات



المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على بيانات نموذج SINTACS وبرنامج Arc GIS 10.8 وبمقياس رسم (1:100000)

جدول(19): الاحصائيات الوصفية لمؤشر SINTACS في سيناريوهات الثلاثة

السيناريو	ادنى	اعلى	متوسط	المتوسط الحسابي	التصنيف حسب نموذج SINTACS
النترات	71	193	117.83	26.61	منخفض – متوسط

المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على خريطة (12)

جدول(22): توزيع فئات الضعف الجوفي في سيناريو النترات

فئة الضعف	نطاق المؤشر	المساحة (كم²)	النسبة المئوية (%)
منخفض جداً (Very Low)	71 – 128	598.95	69.75
منخفض (Low)	129 – 152	133.36	15.53
متوسط (Medium)	153 – 171	80.84	9.41
عالي (High)	172 – 184	33.50	3.90
عالي جداً (Very High)	185 – 193	12.06	1.40
عالي جداً جداً (Extremely High)	> 215	–	–
المجموع	–	**858.69**	**100**

المصدر: من عمل الباحثة اعتماداً على خريطة (12).

12.تحليل الحساسية (Sensitivity Analysis)

يعد تحليل الحساسية (Sensitivity Analysis) أداة استقصائية تتيح قياس أثر كل معامل على حدة ضمن النموذج المدروس ومدى استجابة النموذج لتغيرات مدخلاته (Rani et al., 2021). وتكتسب هذه المنهجية أهمية استثنائية وذلك لقدرتها على معالجة حالة عدم اليقين الناتجة عن البيانات المتعددة مما يقلل من هامش الخطأ او التباين بين المتغيرات ويعزز الدقة ومصداقية في النتائج (Evans & Myers, 1990). ولذلك يعمل تحليل الحساسية كآلية دقيقة للتحقق من اتساق المخرجات التحليلية لخرائط ضعف المياه الجوفية وتقييمها. كما يوفر هذا التحليل رؤية استشرافية دقيقة لتحديد العوامل الهيدروجيولوجية الأكثر تأثيراً في حساسية الخزان الجوفي مما يمنح متخذي القرارات حلولاً علمية للتعامل مع مخاطر التلوث ووضع خطط استباقية لإدارة الازمات في الخزانات الجوفية (Napolitano & Fabbri, 1996). يرى بعض الخبراء ان المعاملات السبعة لنموذج SINTACS

ليســت جميعها ضــرورية لتحديد مدى تلوث المياه الجوفية إذ يمكن الوصــول على النتيجة ذاتها من خلال تقليل عدد هذه المعاملات. وفي الدراسـة الحالية تم اجراء تحليل الحسـاسـية لتحديد مدى أهمية كل معامل في نموذج.SINTACS حيث تم استخدام المنهجية التالية:

1.12 تحليل الحساسية بطريقة احادي المعامل Single-Parameter Sensitivity Analysis (SPSA)

قدم الباحثان نابوليتانو وفابري (1996) ,.Napolitano & Fabbri منهجية تحليل الحســاســية أحادي المعامل والتي تعتمد على مقارنة الوزن النظري المخصص لكل معامل بوزنه الفعلي (الحقيقي) داخل النموذج حيث يحدد الوزن الفعلي مدى تأثير كل معامل على مخرجات النموذج. وتكمن أهمية هذا التحليل في قدرته على تحديد مســاهمة كل معامل على حدة في درجة الضــعف التلوثي للخزان الجوفي، مما يتيح فهماً عميقاً للدور النســبي لكل معامل في النموذج (Akbar et al., 2025). ويتم حساب الوزن الفعلي من خلال المعادلة التالية:

$$Si\% = \frac{r_i * w_i}{V} * 100$$

حيث يمثل Si% الوزن الفعلي للمعامل i، و r_i يمثل متوسط تصنيف المعامل i (Rating)،وw_i يمثل الوزن (Weight) المخصص للمعامل i وفقاً للسيناريو المطبق، اما V فهي متوسط مؤشر الضعف الكلي

قبل ان نبدأ لحساب المعاملات السبعة يحسب الوزن النظري والفعلي كما في المعادلات التالية:

الخطوة الأولى: الوزن النظري $W_{th}\%$

$$W_{th} = \frac{w_i}{\sum w_i} * 100$$

w_i يمثل وزن المعامل، و$\sum w_i$ هو مجموع الاوزان الكلي في السيناريوهات (يساوي 26 في نموذج SINTACS)

الخطوة الثانية: الوزن الفعلي Si%

$$Si\% = \frac{r_i * w_i}{V} * 100$$

حيث r_i يمثل متوسط التصنيف، w_i يمثل الوزن، وV متوسط مؤشر الضعف

الخطوة الثالثة: حساب الفارق

الفارق= الوزن الفعلي – الوزن النظري

$$\text{الفارق} = Si\% - W_{th}\%$$

وعليه تم تطبيق تحليل الحساسية أحادي المعامل (SPSA) على السيناريو النترات. ولإجراء هذا التحليل تم حساب الوزن الفعلي (Si%) لكل معامل من المعاملات الهيدروجيولوجية السبعة (S,I,N,T,A,C,S%) بناءً على متوسط قيم التصنيف (Rating) في 47 بئراً ومقارنتها بمتوسط مؤشر SINTACS الكلي (V)على السيناريو. كما تم مقارنة هذه الاوزان الفعلية بالأوزان النظرية (W_{th}%) المحددة مسبقاً في سيناريو النترات لتقييم مدى مطابقة المساهمة الفعلية لكل معامل لما هو متوقع نظرياً. ولتسهيل قراءة النتائج وفهمها تم الاعتماد على تصنيف علمي لنسب الحساسية (Si%) المستخرجة من تحليل الحساسية احادي المعامل وفق المعايير المعتمدة في الدراسات السابقة (Lodwick et al., 1990؛ Napolitano & Fabbri, 1996) كما مبين في الجدول (23) حيث تم تقسيم مستويات الحساسية الى اربع فئات رئيسية وتشكل هذه الفئات أداة منهجية لتحديد أولويات المعاملات الأكثر تأثيراً في النموذج وبالتالي تساهم في توجيه الباحثين وارشادهم لتحديد المعاملات الأكثر حرجاً مع إمكانية قبول مستويات دقة اقل للمعاملات ذات الحساسية المنخفضة.

جدول (23): معايير تصنيف نسب الحساسية (Si%) في تحليل الحساسية احادي المعامل

فئة الحساسية	نطاق (Si%)	الدلالة الهيدروجيولوجية
عالية جداً	>5%	تأثير حاسم ومسيطر على النموذج، أي خطأ في تقديره يحدث تغيراً كبيراً في النتائج
عالية	2% –5%	معاملات حرجة، وتؤثر بشكل ملحوظ على النتائج النهائية
متوسطة	1% –2%	مساهمة معتدلة وضرورية لا يمكن تجاهلها لكن تأثيرها اقل
منخفضة	<1%	مساهمة محدودة ويمكن قبول دقة اقل في قياسيها ميدانياً

1.1.12 سيناريو النترات

تظهر تحليل الاحصائي لمعامل الحساسية احادي المعامل(SPSA) لهذه السيناريو عن تباين واضح في دور المعاملات الهيدروجيولوجية السبعة إذ يتصدر معامل عمق المياه الجوفية (S) بقية المعاملات بوزن فعلي بلغت نسبته (23.38%) متجاوزاً وزنه النظري(19.2%) وبفارق إيجابي (4.18+%) وتأتي هذا التأثير الإيجابي الى ان معظم الابار في المنطقة تتركز ضمن نطاق

تصنيف ضحل الى متوسط (4–5) مما يقصر المسافة العمودية اللازمة لتغلغل النترات نحو الخزان الجوفي وبدورها يزيد من مخاطر التلوث وجاء معامل التغذية الصافية (I) في المرتبة الثانية بوزن فعلي (19.11%) وهو ما يتطابق مع وزنه النظري (19.2%) بانحراف ضئيل والذي يؤكد الى التوافق بين فرضية النموذج والمناخ شبه الجاف للمنطقة الذي يتسم بانخفاض النسبي لمعدلات التغذية. اما في المرتبة الثالثة فقد كان من نصيب معاملا الانحدار السطحي(S%) بوزن فعلي (18.40%) ومتجاوزاً وزنه النظري (11.5%) وبفارق كبير (6.90+%) وهذا الفارق له دور إيجابي كونه يزيد من تراكم المياه السطحية وكذلك زيادة في وقت ترشيح النترات الى الخزان الجوفي ومما يدل ان النترات مصدره قادمة من الأنشطة الزراعية في المنطقة. بينما احتلت معامل الطبقة غير المشبعة(N) في المرتبة الرابعة بوزن فعلي (12.95%) وهو اقل من وزنه النظري (15.4%) بفارق (2.45–%) ويعود هذا الانخفاض الى ان الطبقة غير المشبعة تتكون غالباً من رسوبيات خشنة ذات النفاذية العالية والتي بدورها يقلل من قدرتها على تصفية النترات بالتالي لا تؤدي دورها بصورة كاملة كحاجز طبيعي. بينما احتلت المرتبة الخامسة معامل الموصلية الهيدروليكية (C) بوزن فعلي (12.77%) مقابل وزن نظري (7.7%) بفارق (5.07+%). فيما جاء في معامل وسط الخزان الجوفي (A) في المرتبة السادسة بوزن فعلي (7.21%) واقل من وزنه النظري (7.7%) بفارق (0.49–%) مما يشير الى توافق مع تصميم النموذج وهذا التوافق تدل الى ان خصائص الخزان الجوفي متجانس وبدورها يقلل من تباين تأثيرها على النموذج. وجاء معامل وسط التربة (T) في المرتبة الأخيرة في هذه السيناريو بوزن فعلي (5.77%) وهو اقل بكثير من وزنه النظري (19.2%) بفارق (13.43–%) وهو الفارق الأكبر بين كل المعاملات ويعود هذا نتيجة ان 39 بئراً من أصل 47 سجلت تصنيف (1) أدنى قيمة ممكنة مما يعني ان التربة في معظم منطقة الدراسة من النوع الطيني الثقيل والذي يشكل حاجزا طبيعياً يمنع تسرب النترات. كما في الجدول (25).

جدول (25): النتائج الإحصائية لتحليل الحساسية بطريقة احادي المعامل –سيناريو النترات

المعامل	w_i)الوزن(	Wth% الوزن النظري	متوسط التصنيف r_i	متوسط الوزن الفعليSi	الوزن الأدنى Si%	الوزن الأقصى Si%	الفارق	الترتيب
S	5	19.2%	5.57	23.38%	12.42%	36.89%	%+4.18	1
I	5	19.2%	4.53	19.11%	9.38%	33.61%	%−0.09	2
S%	3	11.5%	7.13	18.40%	10.47%	29.35%	%+6.90	3

4	%−2.45	26.02%	5.48%	12.95%	4.11	15.4%	4	N
5	%+5.07	18.75%	7.45%	12.77%	7.49	7.7%	2	C
6	%−0.49	14.63%	2.74%	7.21%	4.62	7.7%	2	A
7	−13.43 %	23.97%	3.12%	5.77%	1.43	19.2%	5	T

2.12 تحليل الحساسية بطريقة إزالة الخرائط Map removal sensitivity (MRSA) analysis

تم تطوير هذه المنهجية من قبل لودويك واخرون Lodwick et al. (1990) تضـمنت هذه الطريقة الى اختبار مدى أهمية جميع المعاملات السـبعة لنموذج SINTACS للتحقق مما إذا كانت جميعها ضرورية لتحقيق دقة النتائج ام ان بعضها يمكن استبعاده دون التأثير على جودة المخرجات النهائية. وتعتمد هذه المنهجية على استبعاد خريطة معامل واحد في كل خطوة ثم إعادة حساب مؤشر الضعف التلوثي بناءً على المعاملات الستة المتبقية لتقييم حجم الانحراف الناتج عن القيمة الاصلية للمؤشر. ويعتبر المعامل الذي يحدث حذفه انحرافاً أكبر مما هو الاكثر تأثيراً وحساسية ضمن بنية النموذج. ويتم تحديد مقدار هذا الانحراف والمعبر عنه بـ نسبة الحساسية (S) (Lodwick et al., 1990)، وفق المعادلة التالية:

$$S = 100 * (\left|\frac{V}{N} - \frac{Vx_i}{n}\right|)/(V)$$

حيث يرمز S الى نسبة الحساسية (تعكس مدى تأثير المعامل عند حذفه)

V: مؤشر الضعف الأصلي (SINTACS) المحسوب باستخدام جميع المعاملات السبعة

N: العدد الكلي للمعاملات (يساوي 7)

Vx_i: فهو مؤشر SINTACS المعاد حسابه بعد حذف المعامل **(i)**

n: عدد المعاملات المتبقية بعد الحذف (يساوي 6)

وتم تطبيق هذا التحليل على سيناريو النترات بهدف تحديد أي المعاملات الأكثر حساسية فيها ومن ثم مقارنة تأثير كل معامل حسب الاوزان المعتمدة في هذه السيناريو.

1.2.12 سيناريو النترات (Nitrate Scenario)

كشفت تحليل الحساسية الخاص بهذا السيناريو ان معامل الانحدار السطحي (S%) هو الأكثر حساسية وتأثيراً مقارنة عن باقي المعاملات بنسبة حساسية بلغت (10.41%) متفوقاً على بقية المعاملات، وجاء في المرتبة الثانية معامل وسط الخزان الجوفي (A) بنسبة (1.18%) ومعامل وسط التربة (T) بنسبة (1.13) في المرتبة الثالثة. بينما سجلت معاملات عمق المياه الجوفية (S) والتغذية الصافية بنسبة متقاربة (1.01%) لكليهما. وفي المقابل أظهرت معاملات الطبقة غير المشبعة (N) والتوصيلية الهيدروليكية (C) أقل تأثيراً على دقة النموذج بنسب لم تتجاوز (0.27%) و(0.17%) على التوالي. وتكمن هذا التأثير المهيمن لمعامل الانحدار في سيناريو النترات كونه تعمل في ضبط معدلات الجريان السطحي والترشيح العمودي ففي المناطق ذات الانحدار المنخفض يزداد زمن مكوث المياه المحملة بالنترات على سطح الأرض مما يزيد من ترشيحها ووصولها الى الخزان الجوفي بينما المناطق ذات الانحدار الشديد يؤدي الجريان السطحي السريع في تقليل فرص التغذية وتقلص فرص تسرب الملوثات الى باطن الأرض بالتالي يحد من خطر انتقال النترات الى المياه الجوفية. كما في الجدول (28).

جدول (28): النتائج الإحصائية لتحليل الحساسية بطريقة إزالة الخرائط –سيناريو النترات

المعامل	المتوسط(Vxi)	الحد الادنى	الحد الاقصى	STDالانحراف المعياري	CV%معامل التباين	Vxi/n	S% (corrected)نسبة الحساسية	Rankالترتيب
S%	27.38	17	45	7.38	26.96	4.56	10.41%	1
A	109.35	67	175	21.90	20.03	18.23	1.18%	2
T	108.98	66	171	20.67	18.97	18.16	1.13%	3
S	93.83	51	170	26.86	28.63	15.64	1.01%	4
I	93.84	65	153	20.94	22.32	15.64	1.01%	5
N	102.93	63	161	19.76	19.19	17.16	0.27%	6
C	102.17	57	177	26.78	26.21	17.03	0.17%	7

ولتقييم كفاءة طريقتي تحليل الحساسية المعتمدتين والتحقق من مدى تطابقهما في تحديد المعامل الأكثر تأثيراً لكل سيناريو.

13. الخلاصة النهائية لتحليل الحساسية

تم استخلاص نتائج تحليل الحساسية لنموذج SINTACS من خلال المنهجيتين المطبقتين هما: (SPSA) و(MRSA) وقد تبين ان النموذج يتأثر بشكل متفاوت للمعاملات الهيدروجيولوجية السبعة وذلك تبعاً لطبيعة السيناريو المعتمد، فقد ظهرت في سيناريو النترات سيطرة واضحة لمعامل عمق المياه الجوفية بوزن فعلي وصلت (23.38%) والذي يؤكد الى الدور الكبير لمستويات المياه الجوفية الضحلة (القريبة على سطح الأرض) في زيادة في سرعة وصول النترات الناتجة عن الزراعة الكثيفة واستخدام الاسمدة والمبيدات الى الخزان الجوفي. وكما برزت أهمية كبيرة لمعامل الانحدار السطحي في اختبار إزالة الخرائط لسيناريو النترات وذلك من خلال تحكمه المباشر بكمية الترشيح العمودي للمياه المحملة بالنترات فالمناطق المنبسطة بدورها يسمح بتجميع المياه وزيادة فترة مكوث الملوثات المحملة بالنترات بالتالي يعزز فرص ترشيحها الى الطبقات الجوفية، بينما المناطق ذات الانحدار الشديد تقلل من فرص الترشيح وتعزز الجريان السطحي.

14. النتائج

تشير النتائج الى ان المنطقة تمتاز يتنوع في خصائصها الهيدروجيولوجية والتي جعلها بيئة مثالية لتطبيق نموذج SINTACS حيث تسيطر عليها التكوينات الكارستية المتمثلة بتكوين الفتحة الى جانب الرواسب الحتاتية الرملية والغرينية والتابعة لرواسب العصر الرباعي والذي بدورها يساهم في تسهيل ترشيح المياه والملوثات ونفاذها نحو الطبقات تحت السطحية بفعل التباين في طبيعة التربة المتنوعة والتي تتراوح بين الطينية الثقيلة والرملية الخشنة وكما أظهرت النتائج ان الأجزاء الشمالية والشمالية الشرقية تضم خزانات جوفية والتي تتميز بنفاذية عالية وبدورها انعكس بصورة إيجابية على وفرة المياه وجودتها النوعية بينما شهدت المناطق الوسطى والجنوبية تبايناً في الخصائص الهيدروكيميائية للمياه نتيجة العوامل البشرية والمتمثلة بالمناطق السكنية والأنشطة الزراعية. إضافة الى ذلك زيادة في توزيع الملوثات لا سيما النترات وخرائط الضعف المياه الجوفية حيث سجلت النتائج ارتفاع في تراكيز النترات في معظم أجزاء منطقة الدراسة خاصة تلك المناطق ذات الأنشطة الزراعية المكثفة.

تم تطبيق نموذج SINTACS في هذه الدراسة من خلال استخدام سيناريو واحد من اصل ست سيناريوهات كون المنطقة تتميز بخصائص هيدروجيولوجية متعددة لذا فقد تم اختيار سيناريو النترات كونها تمثل الأقرب في منطقة الدراسة، واظهرت خرائط الضعف الجوفي تبايناً مكانياً في مستويات الحساسية والتي توزعت رتب التلوث الى خمسة فئات وهي (منخفضة جداً، والمنخفضة، والمتوسطة،

والعالية، والعالية جداً) وبينت مخرجات الخرائط الى تمركز درجات الضـــعف (عالية الى عالية جداً) بشكل كبير في الأجزاء الشمالية الغربية القريبة من بحيرة سد الموصل ونهر دجلة في سيناريو النترات وذلك نتيجة لانتشار التكوينات الكارستية والرواسب الحصوية ذات النفاذية العالية والتي بدورها يزيد من سرعة انتقال الملوثات بصورة عمودية لتصل الخزان الجوفي.

للتأكد من صـحة النتائج ومدى موثوقية النموذج تم التحقق عن طريق تحليل الحسـاسـية بطريقتين: التحليل أحادي المعامل (SPSA) واختبار إزالة الخرائط (MRSA) وكشـفت النتائج عن سـيطرت معامل عمق المياه الجوفية مخرجات (SPSA) بنسـبة (23.38%) مما يشـير الى ان المسـتويات الضـحلة للمياه تزيد من خطر وصـول النترات الى الخزان الجوفي، اما في (MRSA) فقد أظهرت سـيطرة الانحدار السـطحي (الطوبوغرافية) في التحكم بكمية الترشـيح العمودي للمياه بنسـبة بلغت (10.41%). ومن ناحية أخرى اسـتقرت معامل وسـط التربة كأقل المعاملات مسـاهمة عبر جميع السيناريوهات مما يعكس هيمنة التربة الطينية الثقيلة والتي تشكل حاجزاً طبيعياً يمنع نفاذية الملوثات في معظم أجزاء منطقة الدراسة بينما اتسم معامل التغذية الصافية بالتوازن التام ولاسيما في سيناريو النترات وبفارق قليل لم يتجاوز (0.09−%) مما يعكس من اتسـاق النموذج مع المناخ شـبه الجاف للمنطقة. كما تؤكد هذه النتائج ان نموذج SINTACS يعد أداة فعالة لتحديد مناطق الضـعف التلوثي وتحسين إدارة الموارد المائية وحماية الخزانات الجوفية من مخاطر التلوث.

15.الاستنتاجات

1. أظهرت نتائج تحليل متغير عمق المياه الجوفية أن الأعماق التي تزيد على 10 أمتار تهيمن على 83.22% من مساحة منطقة الدراسة، وهو ما يعزز الحماية الطبيعية للخزان الجوفي من الملوثات السطحية، في حين انحصرت الأعماق الضحلة (أقل من 6 أمتار) في 4.62% من مساحة المنطقة، وتركزت في الأجزاء الوسطى والجنوبية، مما يزيد من قابليتها للتلوث.
2. أظهرت نتائج تحليل متغير قوام التربة سيادة التربة الطينية (الرتبة الأولى)، إذ غطت 77.44% من مساحة منطقة الدراسة، مما أسهم في توفير حماية طبيعية للخزان الجوفي من خلال الحد من تسرب الملوثات السطحية بسبب انخفاض نفاذيتها. في المقابل، تركزت الترب الطمية الطينية والترب الطينية الرملية، التي تمتاز بنفاذية أعلى، بنسبة 14.49% و8.06% على التوالي، الأمر الذي يزيد من قابلية الخزان الجوفي للتلوث في مناطق انتشارها.
3. أظهرت نتائج تحليل متغير وسط الخزان الجوفي سيادة التكوينات منخفضة النفاذية المصنفة ضمن الرتبة الثانية، والمتمثلة بتكوين إنجانة والترب المتبقية، إذ غطت 64.03% من مساحة منطقة الدراسة، مما وفر حماية طبيعية للخزان الجوفي من خلال الحد من حركة وانتقال

الملوثات. في المقابل، شكلت التكوينات الكارستية المصنفة ضمن الرتبة التاسعة أعلى درجات الحساسية للتلوث، إذ بلغت مساحتها 190.65 كم² وبنسبة 22.20%، مما يزيد من قابلية الملوثات للتغلغل إلى الخزان الجوفي في مناطق انتشارها.

4. أظهرت نتائج تطبيق نموذج SINTACS بسيناريو النترات أن درجات قابلية الخزان الجوفي للتلوث تراوحت عموماً بين المستوى المنخفض والمتوسط، إذ سيطرت فئتا القابلية المنخفضة والمنخفضة جداً معاً على 85.28% من مساحة منطقة الدراسة، مما يدل على تمتع معظم الخزان الجوفي بحماية طبيعية جيدة، في حين انحصرت المناطق ذات القابلية المرتفعة للتلوث في نطاقات محدودة تركزت في الأجزاء الشمالية الغربية من منطقة الدراسة القريبة من بحيرة سد الموصل ونهر دجلة.
5. أظهرت نتائج تحليل الحساسية أحادي المعامل (SPSA) أن متغير عمق المياه الجوفية (S) يمثل أكثر العوامل تأثيراً في مخرجات نموذج SINTACS ضمن سيناريو النترات، بوزن فعلي بلغ 23.38%، تلاه معامل الانحدار السطحي (S%) بوزن فعلي 18.40%، في حين سجل متغير قوام التربة (T) أقل تأثير بين جميع المعاملات، بوزن فعلي لم يتجاوز 5.77%.
6. أظهرت نتائج تحليل الحساسية بطريقة إزالة الخرائط (MRSA) أن متغير الانحدار السطحي (S%) كان الأكثر تأثيراً في سيناريو النترات، بنسبة حساسية بلغت 10.41%، متفوقاً بفارق كبير على بقية المعاملات، مما يؤكد الدور الحاسم للانحدار في ضبط معدلات الترشيح العمودي للملوثات النيتروجينية نحو الخزان الجوفي.
7. أثبتت نتائج الدراسة كفاءة نموذج SINTACS بسيناريو النترات في تحديد المناطق الأكثر عرضة لتلوث المياه الجوفية بالنترات، مما يؤكد مرونة النموذج وإمكانية تطبيقه في بيئات جغرافية وهيدروجيولوجية مختلفة بعد تكييف متغيراته وأوزانه بما يتلاءم مع خصائص كل منطقة دراسة.

16. المقترحات

1. الإدارة والرقابة: اعتماد إدارة متكاملة للمياه الجوفية عبر مراقبة الأنشطة الزراعية والبشرية في مناطق القابلية المرتفعة لتلوث النترات، وتنظيم حفر الآبار ومنع العشوائي منها.
2. الرصد وقواعد البيانات: إنشاء برنامج دوري لرصد جودة المياه الجوفية، وقاعدة بيانات متكاملة للآبار (المقاطع الليثولوجية، المناسيب، الخصائص الهيدروكيميائية) تُحدَّث باستمرار.
3. ترشيد الاستخدام: الحد من الاستنزاف الجائر عبر تقنيات الري الحديثة (الري بالتنقيط) ونشر الوعي المجتمعي بأهمية حماية المياه الجوفية.

4. توظيف نتائج الدراسة: الاستفادة من خرائط قابلية التلوث الناتجة عن نموذج SINTACS في التخطيط لاستعمالات الأرض وتقييم الأثر البيئي للمشروعات قبل تنفيذها.
5. التعميم والتطوير المستقبلي: التوسع في تطبيق النموذج بمناطق أخرى من العراق مع دراسات مقارنة بنماذج تقييم أخرى لتعزيز موثوقيته.

قائمة المصادر والمراجع :

- كمال إبراهيم رشيد سفر الكاكئي، نمذجة مؤشرات جودة المياه الجوفية (WQI) في مدينة أربيل، رسالة ماجستير (غير منشور)، جامعة الموصل، 2024.
- Chakraborty, B., Roy, S., Bera, B., Adhikary, P. P., Bhattacharjee, S., Sengupta, D., & Shit, P. K. (2022). Evaluation of groundwater quality and its impact on human health: A case study from Chotanagpur plateau fringe region in India. Applied Water Science, 12, 25.
- Al-Addous, M., et al. (2023). Water resources in Jordan: A review of current challenges and future opportunities. Water, 15(21), 3729.
- Pisciotta, A., Cusimano, G., & Favara, R. (2015). Groundwater nitrate risk assessment using intrinsic vulnerability methods: A comparative study of environmental impact by intensive farming in the Mediterranean region of Sicily, Italy. Journal of Geochemical Exploration, 156, 89–100. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.05.007
- Al-Addous, M., et al. (2023). Water resources in Jordan: A review of current challenges and future opportunities. Water, 15(21), 3729. https://doi.org/10.3390/w15213729
- Soyaslan, İ. İ. (2025). Assessment of groundwater vulnerability using SINTACS and modified-SINTACS methods in Burdur Çine Basin (Turkiye). Earth Sciences Research Journal, 29(2).
- Civita, M., & De Maio, M. (1997). SINTACS: Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia delle vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia and Automatizzazione. Pitagora Editrice, 60, 191.
- Civita, M., & De Maio, M. (2004). Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian combined approach. Geofísica Internacional, 43(4), 513–532.
- Aller, L., et al. (1987). DRASTIC: A standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. Journal of the Geological Society of India, 29(1), 23–37.

- Kirlas, M. C., Karpouzos, D. K., Georgiou, P. E., & Katsifarakis, K. L. (2022). A comparative study of groundwater vulnerability methods in a porous aquifer in Greece. Applied Water Science, 12(6), 123.
- Sahu, I., Prasad, A. D., & Ahmad, I. (2022). Groundwater vulnerability assessment using SINTACS model and GIS: A case study in Raipur city. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 982(1). IOP Publishing.
- Jarray, H., et al. (2017). Groundwater vulnerability based on GIS approach: Case study of Zeuss-Koutine aquifer, South-Eastern Tunisia. Geofísica Internacional, 56(2), 157–172.
- Hamdan, I., Al-Rawabdeh, A., & Al Hseinat, M. (2020). Groundwater vulnerability assessment for the Corridor Wellfield using DRASTIC and modified DRASTIC models: A case study of Eastern Jordan. Open Journal of Geology, 10(10), 991–1008.
- Piscopo, G., et al. (2001). Murrumbidgee catchment groundwater vulnerability map: Explanatory notes. Department of Land & Water Conservation and Australian Geological Survey Organization, p. 8.
- Wibowo, A., Farhan, M., & Masitoh, F. (2024). Assessment of groundwater vulnerability to pollution in the Metro Hilir Watershed using the SINTACS method. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1406(1). IOP Publishing.
- Gómez-Escalonilla, V., & Martínez-Santos, P. (2024). A machine learning approach to map the vulnerability of groundwater resources to agricultural contamination. Hydrology, 11(9), 153.
- Fannakh, A., et al. (2025). Evaluation of index-overlay methods for assessing shallow groundwater vulnerability in southeast Hungary: A. Fannakh et al. Applied Water Science, 15(6), 118.
- Motlagh, Z. K., Derakhshani, R., & Sayadi, M. H. (2023). Groundwater vulnerability assessment in central Iran: Integration of GIS-based DRASTIC model and a machine learning approach. Groundwater for Sustainable Development, 23, 101037.
- Shahid, D. D. S. U., Iqbal, J., & Khalil, M. (2023). GIS based groundwater vulnerability assessment of Lahore a metropolitan using modified DRASTIC model. NUST Journal of Engineering Sciences, 16(2), 96–107.

- Sankarapandian, P., Govind, V., & Mahalingam, M. T. (2023). Modified DRASTIC and GOD models for groundwater vulnerability assessment using a GIS technique: A case study on Thoothukudi District.
- Rani, N. N. V. S., Satyanarayana, A. N. V., Bhaskaran, P. K., Rice, L., & Kantamaneni, K. (2021). Assessment of groundwater vulnerability using integrated remote sensing and GIS techniques for the West Bengal coast, India. Journal of Contaminant Hydrology, 238, 103760.
- Evans, B. M., & Myers, W. L. (1990). A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC. Journal of Soil and Water Conservation, 45(2), 242–245.
- Napolitano, P., & Fabbri, A. G. (1996). Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. IAHS Publications—Series of Proceedings and Reports—International Association of Hydrological Sciences, 235(235), 559–566.
- Akbar, M. U., et al. (2025). A dynamic DRASTIC-based approach for multi-hazard groundwater vulnerability mapping. Geoscience Frontiers, 102117.
- Lodwick, W. A., Monson, W., & Svoboda, L. (1990). Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical informations systems: Suitability analysis. International Journal of Geographical Information System, 4(4), 413–428.
- Fikri, I., et al. (2024). Delineation of groundwater potential zones using multicriteria decision analysis for Guercif (Morocco). Polish Journal of Environmental Studies, 33(3), 2049–2064.

Bibliography of Arabic References (Translated toEnglish)

- Kamal Ibrahim Rashid Safar Al-Kaka’i, Modeling Groundwater Quality Indices (WQI) in Erbil City, Master’s Thesis (Unpublished), University of Mosul, 2024.
- Chakraborty, B., Roy, S., Bera, B., Adhikary, P. P., Bhattacharjee, S., Sengupta, D., & Shit, P. K. (2022). Evaluation of groundwater quality and its impact on human health: A case study from Chotanagpur plateau fringe region in India. Applied Water Science, 12, 25.
- Al-Addous, M., et al. (2023). Water resources in Jordan: A review of current challenges and future opportunities. Water, 15(21), 3729.

- Pisciotta, A., Cusimano, G., & Favara, R. (2015). Groundwater nitrate risk assessment using intrinsic vulnerability methods: A comparative study of environmental impact by intensive farming in the Mediterranean region of Sicily, Italy. Journal of Geochemical Exploration, 156, 89–100. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.05.007
- Al-Addous, M., et al. (2023). Water resources in Jordan: A review of current challenges and future opportunities. Water, 15(21), 3729. https://doi.org/10.3390/w15213729
- Soyaslan, İ. İ. (2025). Assessment of groundwater vulnerability using SINTACS and modified-SINTACS methods in Burdur Çine Basin (Turkiye). Earth Sciences Research Journal, 29(2).
- Civita, M., & De Maio, M. (1997). SINTACS: Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia delle vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia and Automatizzazione. Pitagora Editrice, 60, 191.
- Civita, M., & De Maio, M. (2004). Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian combined approach. Geofísica Internacional, 43(4), 513–532.
- Aller, L., et al. (1987). DRASTIC: A standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. Journal of the Geological Society of India, 29(1), 23–37.
- Kirlas, M. C., Karpouzos, D. K., Georgiou, P. E., & Katsifarakis, K. L. (2022). A comparative study of groundwater vulnerability methods in a porous aquifer in Greece. Applied Water Science, 12(6), 123.
- Sahu, I., Prasad, A. D., & Ahmad, I. (2022). Groundwater vulnerability assessment using SINTACS model and GIS: A case study in Raipur city. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 982(1). IOP Publishing.
- Jarray, H., et al. (2017). Groundwater vulnerability based on GIS approach: Case study of Zeuss-Koutine aquifer, South-Eastern Tunisia. Geofísica Internacional, 56(2), 157–172.
- Hamdan, I., Al-Rawabdeh, A., & Al Hseinat, M. (2020). Groundwater vulnerability assessment for the Corridor Wellfield using DRASTIC and modified DRASTIC models: A case study of Eastern Jordan. Open Journal of Geology, 10(10), 991–1008.

- Piscopo, G., et al. (2001). Murrumbidgee catchment groundwater vulnerability map: Explanatory notes. Department of Land & Water Conservation and Australian Geological Survey Organization, p. 8.
- Wibowo, A., Farhan, M., & Masitoh, F. (2024). Assessment of groundwater vulnerability to pollution in the Metro Hilir Watershed using the SINTACS method. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1406(1). IOP Publishing.
- Gómez-Escalonilla, V., & Martínez-Santos, P. (2024). A machine learning approach to map the vulnerability of groundwater resources to agricultural contamination. Hydrology, 11(9), 153.
- Fannakh, A., et al. (2025). Evaluation of index-overlay methods for assessing shallow groundwater vulnerability in southeast Hungary: A. Fannakh et al. Applied Water Science, 15(6), 118.
- Motlagh, Z. K., Derakhshani, R., & Sayadi, M. H. (2023). Groundwater vulnerability assessment in central Iran: Integration of GIS-based DRASTIC model and a machine learning approach. Groundwater for Sustainable Development, 23, 101037.
- Shahid, D. D. S. U., Iqbal, J., & Khalil, M. (2023). GIS based groundwater vulnerability assessment of Lahore a metropolitan using modified DRASTIC model. NUST Journal of Engineering Sciences, 16(2), 96–107.
- Sankarapandian, P., Govind, V., & Mahalingam, M. T. (2023). Modified DRASTIC and GOD models for groundwater vulnerability assessment using a GIS technique: A case study on Thoothukudi District.
- Rani, N. N. V. S., Satyanarayana, A. N. V., Bhaskaran, P. K., Rice, L., & Kantamaneni, K. (2021). Assessment of groundwater vulnerability using integrated remote sensing and GIS techniques for the West Bengal coast, India. Journal of Contaminant Hydrology, 238, 103760.
- Evans, B. M., & Myers, W. L. (1990). A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC. Journal of Soil and Water Conservation, 45(2), 242–245.
- Napolitano, P., & Fabbri, A. G. (1996). Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. IAHS Publications—Series of Proceedings and Reports—International Association of Hydrological Sciences, 235(235), 559–566.

- Akbar, M. U., et al. (2025). A dynamic DRASTIC-based approach for multi-hazard groundwater vulnerability mapping. Geoscience Frontiers, 102117.
- Lodwick, W. A., Monson, W., & Svoboda, L. (1990). Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical informations systems: Suitability analysis. International Journal of Geographical Information System, 4(4), 413–428.
- Fikri, I., et al. (2024). Delineation of groundwater potential zones using multicriteria decision analysis for Guercif (Morocco). Polish Journal of Environmental Studies, 33(3), 2049–2064.