



## التحليل المكاني للتفاوت في مظاهر السطح والأمطار وانعكاسه على بعض خصائص آبار المياه الجوفية في مدينة البيضاء

د. انتصار حاتم علي إفكيرين

أستاذ مساعد بقسم الدراسات الليبية/ كلية التاريخ والحضارة  
جامعة السيد محمد بن علي السنوسي الإسلامية، البيضاء - ليبيا.  
intesar.aboufkeereen@ius.edu.ly

أ. توفيق صالح محمد باكير

محاضر، قسم الهندسة المدنية/ شعبة المساحة  
المعهد العالي للعلوم والتقنية، البيضاء - ليبيا.  
tawfig@histsj.edu.ly

د. مختار عشري عبد السلام

أستاذ مشارك بقسم الجغرافيا/ كلية التربية  
جامعة عمر المختار، البيضاء - ليبيا.  
Mactar.mohamed@omu.edu.ly

### الكلمات المفتاحية:

### الملخص:

مظاهر السطح، الخشونة الطبوغرافية،  
تجمع المياه، النمذجة المكانية  
الإحصائية، مدينة البيضاء.

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل التباين المكاني لعمق وإنتاجية آبار المياه الجوفية وعلاقتها بمظاهر السطح والأمطار بمدينة البيضاء، واعتمدت الدراسة على دمج البيانات الميدانية لآبار المياه مع نموذج الارتفاع الرقمي من القمر (ASTER) وبيانات الأمطار بتوظيف تقنيات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد في النمذجة المكانية الإحصائية باستخدام نموذج الانحدار الجغرافي الموزون ومؤشرات الخشونة الطبوغرافية (TRI) ومؤشر تجمع المياه بناءً على فروقات الارتفاع (TWI). وأظهرت الدراسة أنّ توزيع الآبار يتسم بالنمط العشوائي مع تمركز نسبي داخل النطاق الحضري للمدينة، في حين كشفت الخصائص الطبوغرافية عن تباين واضح في الارتفاع والانحدار ومؤشري الخشونة الطبوغرافية وتجمع المياه، وأثبت نموذج الانحدار الجغرافي الموزون قدرة تفسيرية مرتفعة في تفسير التفاوت المكاني لكل من أعماق وإنتاجية الآبار، حيث بلغ معامل التفسير نحو 0.81 للأعماق و0.86 للإنتاجية، كما بينت النتائج أنّ الارتفاع وكميات الأمطار ومؤشر تجمع المياه تؤثر إيجابياً في إنتاجية الآبار، في حين يسهم تزايد الخشونة الطبوغرافية وعمق البئر في خفض الإنتاجية. وتؤكد الدراسة أهمية التفاعل بين العوامل الطبوغرافية والمناخية في التحكم بسلوك المياه الجوفية، وتبرز الدور المحوري للتحليل المكاني في دعم الإدارة المستدامة لموارد المياه الجوفية في المناطق الجبلية.

### معلومات النشر:

تاريخ الاستلام: 2025/12/22  
تاريخ القبول: 2026/01/26  
تاريخ النشر: 2026/03/01

## Spatial Analysis of Surface Features Variations and Rainfall and their Impact on Some Characteristics of Groundwater Wells in the City of Al-Bayda

MacTar A. A. Mohamed<sup>1</sup>

Tawfig S. M. Bakir<sup>2</sup>

Intisar H. A. Afkireen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Faculty of Education, Omar Al-Mukhtar University, Al-Bayda - Libya. Mactar.mohamed@omu.edu.ly

<sup>2</sup>Lecturer, Department of Civil Engineering, Surveying Division Higher Institute of Science and Technology, Al-Bayda - Libya. tawfig@histsj.edu.ly

<sup>3</sup>Assistant Professor, Faculty of History and Civilization, Department of Libyan Studies, University of Sidi Mohamed Bin Ali Al-Senussi Islamic, Al-Bayda - Libya. intesar.aboufkeereen@ius.edu.ly

### Abstract:

This study aims to analyze the spatial variability of topography and rainfall and their impacts on selected groundwater well characteristics, particularly depth and productivity, in Al-Bayda City, northeastern Libya. The research integrates field data from 71 groundwater wells with Digital Elevation Model (ASTER) data and rainfall records, employing Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) techniques. Advanced spatial and statistical tools were applied, including Nearest Neighbor Analysis, Standard Distance, Directional Distribution, and Geographically Weighted Regression (GWR). The results reveal a largely random spatial distribution of wells, with noticeable concentration within the urban core. Topographic characteristics show significant spatial variation in elevation, slope, topographic roughness, and wetness indices. The GWR model demonstrated high explanatory power, accounting for approximately 81% of the spatial variability in well depth and 86% in well productivity. Elevation, rainfall, and the Topographic Wetness Index exhibited positive influences on well productivity, whereas increased topographic roughness and well depth negatively affected productivity. These findings highlight the complex interaction between topographic and climatic factors in controlling groundwater dynamics and emphasize the effectiveness of spatial modeling techniques in supporting sustainable groundwater management in mountainous environments.

### Keywords:

Topographic features, Topographic roughness, Water accumulation, Spatial statistical modeling, Al-Bayda City.

### Information:

Received: 22/12/2025  
Accepted: 26/01/2026  
Published: 01/03/2026

**المقدمة:**

المياه الجوفية هي المصدر الرئيس لمياه الشرب لنصف سكان العالم، حيث تمثل حوالي 97% من موارد المياه العذبة المتاحة في العالم (José, et al, 2022)، وتلعب دورًا حيويًا في تأمين احتياجات البشر، ويعتمد عليها في المناطق محدودة المصادر المائية التي لا توجد بها مصادر أخرى للمياه (Pointet, 2022)، ومع تزايد استنزاف هذا مورد المائي أصبح فهم سلوك المياه الجوفية أمرًا محوريًا لضمان الاستدامة والحفاظ على هذا المورد الثمين (Chung, 2023). وتعدّ تغذية المياه الجوفية عملية معقدة بسبب تأثيرها بعدة عوامل طبيعية وبشرية (Karunakalage, et al, 2023)، فتلعب كمية الأمطار ونوعية التربة وطبوغرافية المنطقة دورًا رئيسيًا في تحديد كمية المياه التي تتسرب إلى باطن الأرض، ومن جهة أخرى فإنّ دور العوامل البشرية كالأنشطة الزراعية والصناعية والتحضر تؤثر سلبيًا على عملية التغذية بزيادة استهلاك المياه أو تدهورها (Ghritesh et al, 2024)، وبالتالي فإنّ فهم هذه المؤثرات يساعد في فاعلية إدارة المياه الجوفية بشكل مستدام. وتؤثر الطبوغرافية وهطول الأمطار بشكل مباشر على تغذية المياه الجوفية (Ghritesh et al, 2024)، حيث تسهم المناطق قليلة الانحدار بسهولة تسرب مياه الأمطار إلى باطن الأرض، مما يمكن من تغذية الخزانات الجوفية، في حين أنّ المناطق شديدة التضرس يزيد فيها الجريان سطحي، مما يقلل من فرص تسربها إلى باطن الأرض (Condon & Maxwell, 2015)، إلى جانب ذلك تلعب كمية وتوزيع الأمطار دورًا مهمًا؛ فكلما زادت كمية الأمطار وزادت فترات هطولها، زادت إمكانية تغذية المياه الجوفية. (Jan, et al., 2007) وتعدّ التقنيات المكانية ممثلة في نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بُعد من الأدوات المجدية في دراسة سلوك وخصائص المياه الجوفية (Dandge, & Patil, 2022; Saha, et al, 2021)، وذلك بدمج البيانات متعددة المصادر بغيت نمذجتها مكانيًا لفهم الاختلافات المحلية لخصائص المياه والعوامل المؤثرة في هذا التباين (Ajit, et al, 2023)، وأكدت العديد من الدراسات على أهمية استخدام هذه التقنيات في الدراسات الهيدرولوجية لمساهمتها في تحديد المناطق المناسبة لإعادة تغذية المياه الجوفية، والتنبؤ بجودة المياه الجوفية، ورسم خرائط للمناطق المحتملة للمياه الجوفية بدقة عالية. (Farooq, et al., 2019, 2024; Adedoyin, et al., 2022; Kalantar, et al

في ظل عدم وجود آبار بيزومترية لمراقبة مستويات المياه الجوفية وفهم سلوكها، مما يجعلها عائقًا أمام إجراء دراسات دقيقة، بالإضافة إلى ذلك، فإنّ قلة الدراسات والأبحاث العلمية المخصصة لهذا المجال في المنطقة يحول دون فهم العمليات الطبيعية التي تؤثر على تغذية الخزانات الجوفية، مما يؤثر بدوره على جهود إدارة الموارد المائية بشكل مستدام. وتهدف هذه الدراسة إلى تقديم تحليل مستفيض لتأثير مظاهر السطح وبعض خصائص المناخ على ديناميكيات المياه الجوفية من حيث الأعماق والإنتاجية بمدينة البيضاء شمال شرق ليبيا بتعزيز فهمنا للتفاعل بينها وبين خصائص آبار المياه الجوفية بغية الكشف عن دور العوامل الطبيعية في الاختلافات المحلية لخصائص آبار المياه الجوفية.

**مشكلة الدراسة:** تُعدّ دراسة تأثير تفاوت الطبوغرافي على خصائص آبار المياه الجوفية موضوعًا معقدًا يتطلب طرح العديد من الأسئلة البحثية لفهمه بشكل أفضل، ولكن يمكن أن نجعلها في التساؤل الرئيسي الآتي: ما هو دور التفاوت في الطبوغرافيا والأمطار على عمق وإنتاجية آبار المياه الجوفية، وما هو النمط المكاني لتركز آبار المياه الجوفية بمنطقة الدراسة حسبها؟

**أهداف الدراسة:**

1. الكشف عن تأثير خصائص الطبوغرافيا والأمطار على ديناميكيات آبار المياه الجوفية من حيث الأعماق والإنتاجية بمدينة البيضاء.
2. التعرف على النمط السائد لتوزيع آبار المياه الجوفية في المنطقة الدراسة وعلاقته بالخصائص الطبوغرافية.
3. بناء قاعدة بيانات مكانية لبعض خصائص آبار المياه الجوفية بمنطقة الدراسة.

**أهمية الدراسة:**

تُعدّ مدينة البيضاء من أكبر المراكز الحضرية بإقليم الجبل الأخضر، وتعتمد هذه المدينة على مياه الآبار الجوفية في الشرب وكافة الأنشطة الاقتصادية الأخرى، ولكنها منطقة كثيرة التضرس فإنّ سلوك المياه الجوفية يتسم بالتعقيد نظرًا لتضاريف عوامل مظاهر السطح ونوع التربة وكمية الأمطار في تحديد خصائصها؛ حيث ستسهم هذه الدراسة في زيادة الفهم العلمي للعلاقات المكانية المعقدة بين التفاوت الطبوغرافي والتباين المطري من جهة، وخصائص آبار المياه الجوفية من حيث العمق والإنتاجية من جهة أخرى بتوظيف نماذج التحليل المكاني الإحصائي المتقدم، وتبرز الأهمية التطبيقية والمنهجية للدراسة في دمج

2. **بيانات الاستشعار عن بعد:** تم التعامل مع بيانات نموذج الارتفاع الرقمي من القمر Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)، لاشتقاق الخصائص التضاريسية للمنطقة وبدقة مكانية تصل إلى 30 متر، علاوة على بيانات الامطار من "Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)" والتي أظهرت توافقاً واضحاً مع بيانات أمطار محطات المنطقة. وتُعدّ بيانات TRMM مصدرًا موثوقًا لبيانات هطول الأمطار على الصعيد العالمي، في حال إدراك محدوديتها واستخدامها بحذر.

### ثالثًا: معالجة البيانات:

1. **مؤشر الخشونة الطبوغرافية:** حيث يقاس هذه المؤشر مدى انحراف سطح الأرض عن سطح مستوٍ، وتشمل أنواع خشونة التضاريس التلال والوديان والمنحدرات والمنخفضات وغيرها من التضاريس غير المستوية وتتراوح قيم هذا المؤشر من الصفر والتي تعني أنّ السطح مستو تمامًا، وكلما زادت القيمة دلت على خشونة أو تباين أكبر في التضاريس، (Stambaugh, & Guyette, 2008)، وبحسب بالمعادلة الآتية:

$$TRI = (\text{Mean Smooth Area} - \text{Min R}) / (\text{Max R} - \text{Min R})$$

حيث Smooth area تمثل متوسط الارتفاع.

Max R تمثل أعلى قيمة للارتفاع.

Min R تمثل أقل قيمة للارتفاع.

2. **مؤشر تجمع المياه بناءً على فروقات الارتفاع:** مؤشر هيدرولوجي يقيم احتمالية تراكم المياه في موقع ما من درجة انحداره ويساعد في تحديد المناطق الأكثر عرضة للرطوبة أو الجفاف اعتمادًا على الخصائص الطبوغرافية، تتراوح قيم مؤشر تجمع المياه بين القيم السلبية التي تشير إلى ظروف أكثر جفافاً أو أقل رطوبة والقيم الموجبة التي تشير إلى ظروف أكثر رطوبة، (Altunel, 2023; Widyasamratri, et al, 2008)، وبحسب بالمعادلة الآتية:

$$\text{Slope} = \text{Slope} * 1.570796/90$$

حيث Slope تمثل الانحدار وباقي الأرقام ثوابت لحساب زاوية الانحدار بالوديان.

$$\text{Tan Slope} = \text{Con} (\text{Slope} > 0, \text{Tan} (\text{Slope}), 0.001$$

حيث Tan Slope تمثل ظل زاوية الانحدار، و Con جيب التمام أو جتا.

$$\text{Fa\_Scaled} = (\text{Fa} + 1) * \text{Cell Size}$$

حيث Fa تمثل مناطق تجمع المياه. Flow Accumulation.

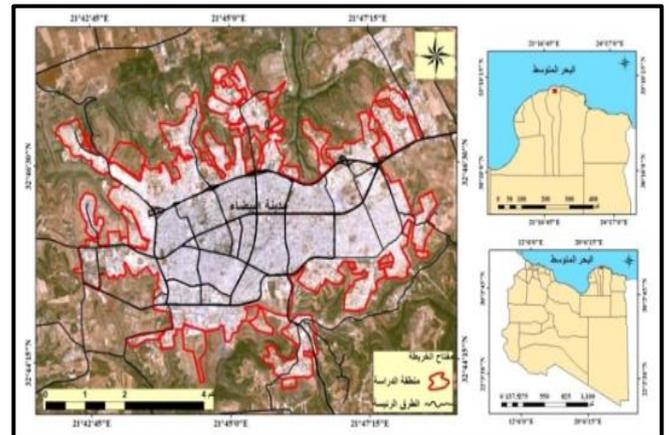
مؤشرات طبوغرافية كمية مثل مؤشر الخشونة الطبوغرافية (TRI) ومؤشر تجمع المياه (TWI) مع بيانات الآبار، بما يتيح تفسير التباين المحلي للمياه الجوفية تفسيراً أكثر موثوقية، ويعالج قصور الأساليب الإحصائية التقليدية التي تفترض تجانس العلاقات المكانية.

### منهجية الدراسة:

#### أولاً: موقع منطقة الدراسة:

تمثل منطقة الدراسة في مدينة البيضاء شمال شرق ليبيا، حيث تقع في المصطبة الثانية من إقليم الجبل الأخضر على ارتفاع يتراوح ما بين 510-660 متر، وتبعد عن مدينة بنغازي بمسافة 200 كم غرباً، وعن مدينة درنة حوالي 100 كم شرقاً، وبمساحة تصل إلى نحو 30.15 كم<sup>2</sup>، ولفكياً تقع مدينة البيضاء بين دائرتي عرض 16° و 48' 32° و 44' 32° شمالاً، وخطي طول 25° و 48' 21° و 42' 21° شرقاً، شكل (1). مناخياً يتراوح المدى الحراري السنوي في مدينة البيضاء حوالي 10.5°م، حيث تنخفض درجات الحرارة شتاءً إلى أقل من 10°م (بمتوسط 7.4°م)، وترتفع صيفاً إلى متوسط يقارب 23.6°م، بينما تسجل الخريف حوالي 18.9°م. يبلغ متوسط الأمطار السنوي نحو 563 ملم، يتركز منها حوالي 58% شتاءً (يناير 21%)، يليها الخريف بنسبة 29% (نوفمبر 96 ملم)، ثم الربيع بنسبة تقارب 13% (مارس 50 ملم). (Saleh, et al, 2022).

#### الشكل (1) حدود منطقة الدراسة.



المصدر: من إعداد الباحثين، من Google earth pro، وباستخدام برنامج ArcMap10.5.

#### ثانياً: مصادر البيانات:

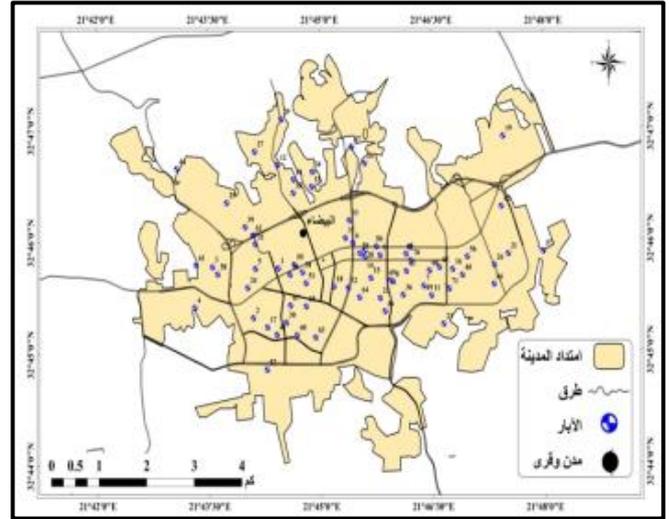
1. **الدراسة الميدانية:** تم من خلالها التواصل مع المؤسسات المسؤولة عن إدارة المياه داخل المدينة للحصول على البيانات الخاصة بالآبار الموجودة داخل المدينة.

$$TWI = \ln (Fa\_Scaled / \tan (\text{slope}))$$

TWI تمثل مؤشر تجمع المياه.

3. إنشاء قاعدة البيانات المكانية للآبار: تمّ من خلالها تحويل البيانات الوصفية للآبار إلى سمات مكانية داخل بيئة نظم المعلومات الجغرافية، حيث بلغ عدد الآبار بمنطقة الدراسة 71 بئر، وتمّ إنشاء جداول وصفية لها تحوي العمق، والعمق الساكن والمتحرك، والإنتاجية، حتى تتمكن من إنشاء خرائط مستمرة لها عن طريق أدوات التحليل المكاني الشكل (2).

الشكل (2) توزيع الآبار بمنطقة الدراسة.



المصدر: من إعداد الباحثين، من البيانات الوصفية للآبار، وباستخدام برنامج ArcMap10.5.

4. الاشتقاق المكاني: وزن المسافات المعكوسة: تعتمد فكرة هذه الطريقة في الحصول على معلومات وبيانات عن نقاط غير معلومة في منطقة محددة وذلك بمعلومية واستناداً على بيانات ومعلومات نقاط معلومة أو مدروسة في المنطقة، بحيث تتناسب الأوزان عكسيًا مع مسافتها عن الموقع، حيث تؤثر بيانات كل نقطة من النقاط المعلومة تأثيراً كبيراً كلما كانت قريبة من النقطة التي لا تتوفر فيها قياسات ويقل تأثيرها كلما ابتعدت عنها أي كل نقطة لها وزن معين يدخل في الحساب والمعادلة العامة والمستخدم في طريقة Kane, et al, (1982) IDW):

حيث إن: هي قيمة البارامتر المدروس في الموقع غير المقاس

قيمة البارامتر المدروس في الموقع المقاس

الوزن الخاص بكل موقع في المنطقة المدروسة.

5. الجار الأقرب: يهدف هذا التحليل لمعرفة شكل انتشار ظاهرة ما مكانيًا عن طريق مقارنة التوزيع الحقيقي الملاحظ للظاهرة مع توزيع نظري معين (Allen, 2016).

6. المسافة المعيارية: تعبر المسافة المعيارية عن الانحراف المعياري لتباعد أو تركز مفردات الظاهرة مكانيًا عن المركز المتوسط لإحداثيات الظاهرة المدروسة؛ لتشمل حوالي 68% من المفردات، وكلما زاد حجم الدائرة كلما بين ذلك على تشتت الظاهرة المكاني (Allen, 2016).

7. الاتجاه التوزيعي: يوضح تحليل الاتجاه التوزيعي اتجاه توزيع الظواهر مكانيًا بتمثيل شكل بيضاوي على المركز المتوسط للظواهر، ومن تمّ قياس قيمة الاتجاه الذي تأخذه معظم هذه الظواهر (Allen, 2016).

رابعًا: تحليل البيانات: استخدام نموذج الانحدار الجغرافي الموزون GWR لإيجاد الاختلافات المكانية للأعماق والإنتاجية للآبار المنطقة بتحليل العلاقة بينها وبين مؤشر التضرس، ومؤشر تجمع المياه، والارتفاع، والانحدار، والأمطار (العمق والإنتاجية متغيرين تابعين ومؤشر التضرس، ومؤشر تجمع المياه، والارتفاع، والانحدار، والأمطار متغيرات مستقلة) ويعمل هذا النموذج أداة قوية لتحليل ونمذجة العلاقات المكانية بين المتغيرات، علاوة على حساب دور المتغيرات المستقلة مجتمعة في تفسير التغيرات الحادثة على المتغير التابع مكانيًا، ويمكن صياغة النموذج من المعادلة الآتية: (Brunsdon, et al, 1996)

حيث إن:  $(V_i, U_i)$  موقع النقاط أو المتغيرات (بالنسبة لخطوط الطول ودوائر العرض)

$B =$  مساهمة المتغيرات المستقلة في توقع قيمة المتغير التابع.

$Y =$  المتغير التابع.

$X =$  المتغيرات المستقلة.

$\epsilon =$  قيمة الخطأ.

تمّ تحليل البيانات باستخدام أنظمة المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بُعد (RS) وتطبيق أدوات إحصائية ورياضية لإنشاء خرائط توضح توزيع خشونة التضاريس وخصائص المياه الجوفية، لفهم العلاقة بين تفاوت التضاريس وخصائص المياه الجوفية.

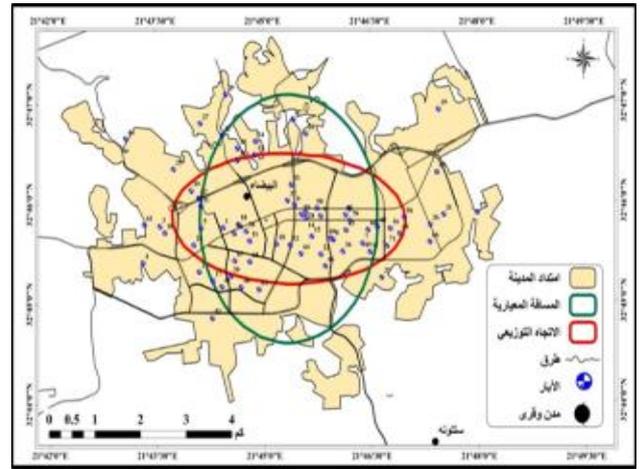
مناقشة النتائج:

أولاً: التحليل المكاني للآبار بمنطقة الدراسة:

1. قرينة الجار الأقرب: من الشكل (3) يتضح أنّ توزيع الآبار قريب من العشوائية حيث إنّ قيمة  $Z (-0.77)$ ، ضمن النطاق غير الدال إحصائيًا مما يشير إلى أنّ توزيع الآبار في منطقة الدراسة يُعدّ توزيعًا عشوائيًا؛ أي أنّ التوزيع لا يعتمد نمط معين ولا يتأثر

بمعامل مكانية محددة، بل يكون توزيعه متماسكاً مع التجمعات السكانية بالمدينة (خاصةً في المخطط الرئيس).

### الشكل (3) قرينة الجار الأقرب.

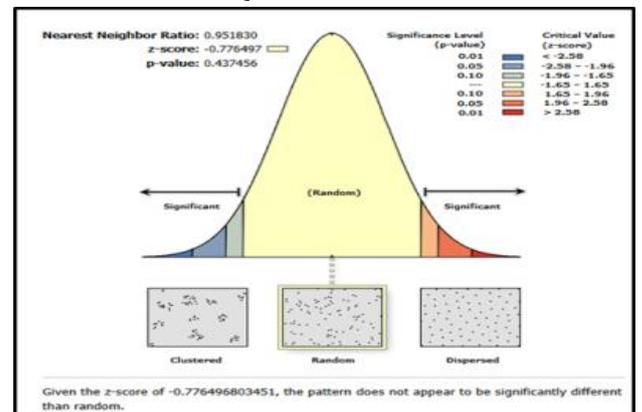


المصدر: من إعداد الباحثين، من البيانات الوصفية للآبار، وباستخدام برنامج ArcMap10.5.

2. المسافة المعيارية: أظهرت النتائج المستمدة من الشكل (4) أنّ أكثر من نصف آبار المدينة (45 من أصل 71) وقعت ضمن الدائرة المعيارية ذات نصف القطر (2.11 كم) حول مركز المدينة، إذ بلغت مساحة هذه الدائرة (13.89 كم<sup>2</sup>) بنسبة (45.92%) من مساحة المدينة البالغة (30.25 كم<sup>2</sup>)، وعلى الرغم من الانتشار العشوائي للآبار بالمدينة إلا أن عدد كبير منها يقع في مساحة تغطي أقل من نصف مساحة المدينة.

3. الاتجاه التوزيعي: بيّن تحليل اتجاه توزيع الآبار اتخذ شكلاً طويلاً شرقي غربي بمعدّل دوران (91.09°) وهو يتوافق بشكل كبير مع امتداد مخطط المدينة الرئيسي، وبالتالي فإنّ الأحياء العشوائية تفتقر لخدمة مياه الشرب كونها مخططات خارجة عن سيطرة الدولة.

### الشكل (4) المسافة المعيارية واتجاه التوزيع لآبار منطقة الدراسة.

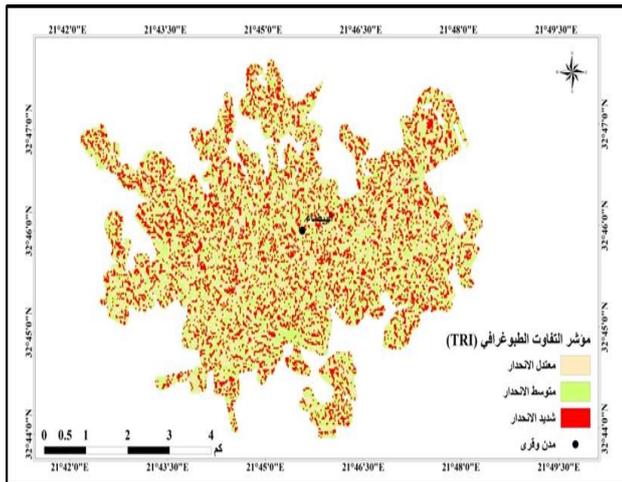


المصدر: من إعداد الباحثين، من البيانات الوصفية للآبار، وباستخدام برنامج ArcMap10.5.

ثانياً: الخصائص التضاريسية: من الشكل (5) يتبيّن أنّ المناطق الأكثر ارتفاعاً تتوزع في الأجزاء الجنوبية الشرقية للمدينة، حيث تتراوح الارتفاعات بين 630 إلى 660 متراً، من ناحية أخرى تقل الارتفاعات في الأجزاء الشمالية والجنوبية الغربية من المدينة لتتراوح بين 510 إلى 540 متراً، أما وسط المدينة فيتراوح الارتفاع ما بين 580-610 متراً، مع وجود بعض التلال المرتفعة في بعض الأجزاء، وتشمل هذه المنطقة أغلب المباني السكنية بالمدينة.

أما بالنسبة لدرجة الانحدار، فيتضح أنّ المناطق ذات الانحدار الشديد تقع في الأطراف الجنوبية والشرقية للمدينة نتيجة لوجود الأودية، حيث تصل معدلات الانحدار إلى ما بين 46 و65 درجة، مما يوضح الدور الطبوغرافي الذي يؤثر على سلوك المياه الجارية، وعلى العكس من ذلك، توجد مناطق بانحدار منخفض يتراوح بين 0 و10 درجات في الأجزاء الوسطى والشمالية من المدينة، مما يتيح استقراراً أفضل للتوسّع العمراني.

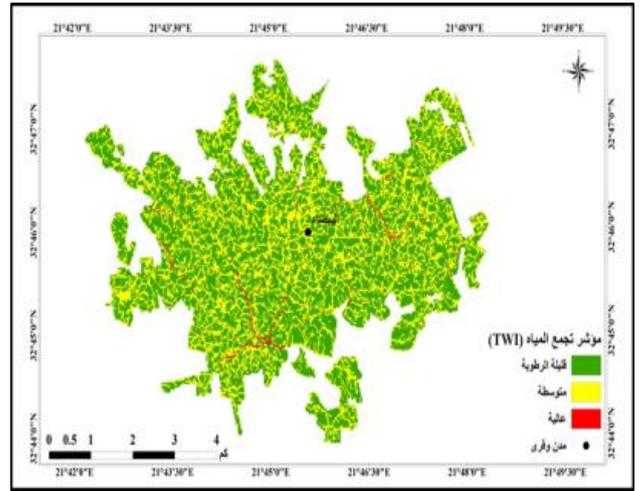
### الشكل (5) الخصائص التضاريسية بمنطقة الدراسة.



المصدر: من إعداد الباحثين، بالاعتماد على DEM، وباستخدام برنامج ArcMap10.5

يظهر مؤشر التفاوت الطبوغرافي في مدينة البيضاء ثلاث فئات رئيسية، الشكل (6)، حيث تنتشر معدلات التضرس المعتدل في مختلف أنحاء المدينة، خاصة في الوسط وتمتد نحو الأطراف، بينما تتوزع مناطق التضرس المتوسط على مساحات واسعة على كامل مساحة المدينة، أما المناطق ذات التضرس الشديد، فتتركز في وسط المدينة والأطراف وباتجاهات مختلفة، مما يبرز التفاوت الطبوغرافي داخل حدود المدينة.

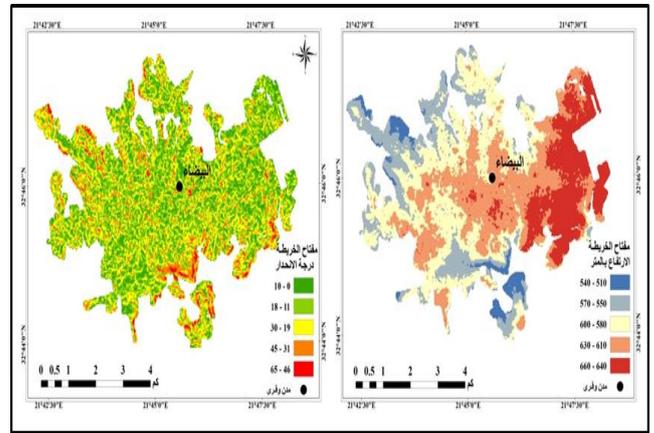
## الشكل (6) مؤشر التفاوت الطبوغرافي بمنطقة الدراسة.



المصدر: من إعداد الباحثين، بالاعتماد على DEM، وباستخدام برنامج ArcMap10.5

أما مؤشر تجمع المياه، الشكل (7)، فيمكن ملاحظة ارتباطه الوثيق بشبكة المجاري المائية (الأودية) بالمدينة، حيث تظهر الرطوبة العالية التي تعبر عن زيادة تجمع المياه في الأجزاء الجنوبية الغربية والتي تتماشى مع أحد روافد وادي الكوف، كما تظهر مواقع تجمع للمياه في بعض الأجزاء الأخرى في شمال غرب وشمال شرق المدينة، والتي تُعد أكثر مناطق معرضة للفيضانات نتيجة انحدارها وتجمع المياه بها، بينما تتمتع باقي أجزاء المدينة بمعدلات تجمع ما بين القليلة والمتوسط.

## الشكل (7) مؤشر تجمع المياه بمنطقة الدراسة.

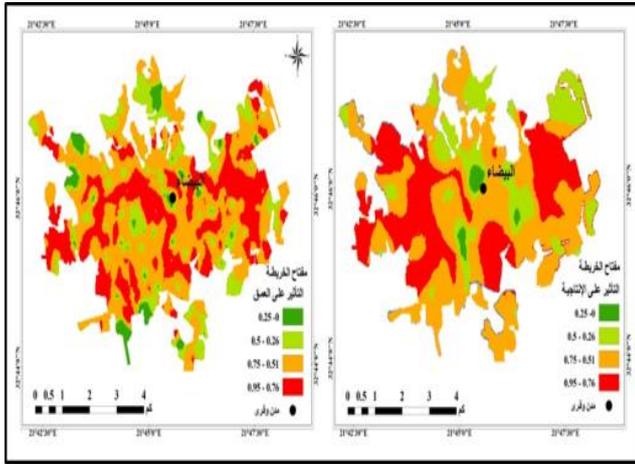


المصدر: من إعداد الباحثين، بالاعتماد على DEM، وباستخدام برنامج ArcMap10.5.

ثالثًا: خصائص آبار المياه الجوفية: يوضح الشكل (8) توزيع أعماق وإنتاجية آبار المياه الجوفية في مدينة البيضاء، حيث تُظهر المناطق ذات الإنتاجية العالية (4.3-6 لتر/ثانية) تركيزًا في الشمال الشرقي والشمال الغربي للمدينة، ما يبين دور الظروف الجيولوجية والتضاريسية التي تساهم في زيادة التغذية للمياه الجوفية، وبالتالي رفع الإنتاجية في هذه المناطق، بالمقابل، تتوزع المناطق ذات الإنتاجية المنخفضة (1-2.7 لتر/ثانية) في وسط المدينة. أما بالنسبة لأعماق الآبار فإنّ

المناطق ذات العمق الكبير (بين 384.3 و410 متر) تتركز في الأجزاء الجنوبية والشمالية الشرقية، ويرتبط ذلك غالبًا بالتضاريس الوعرة التي تحد من تجمع المياه وبالتالي تواجهها على أعماق أكبر، في حين تتواجد الآبار الأقل عمقًا (300.8-354.3 متر) في المناطق الشمالية والغربية، حيث تكون التضاريس أقل تعقيدًا مما يسمح بتجمع المياه على أعماق أقرب إلى السطح. ويوضح توزيع أعماق وإنتاجية المياه الجوفية تأثير الخصائص الطبوغرافية للمدينة، حيث ترتبط المناطق الأكثر إنتاجية مع الأجزاء الأكثر ارتفاعًا بالمدينة كما هو الحال في شمال شرق المدينة.

## الشكل (8) بعض خصائص المياه الجوفية بمنطقة الدراسة.



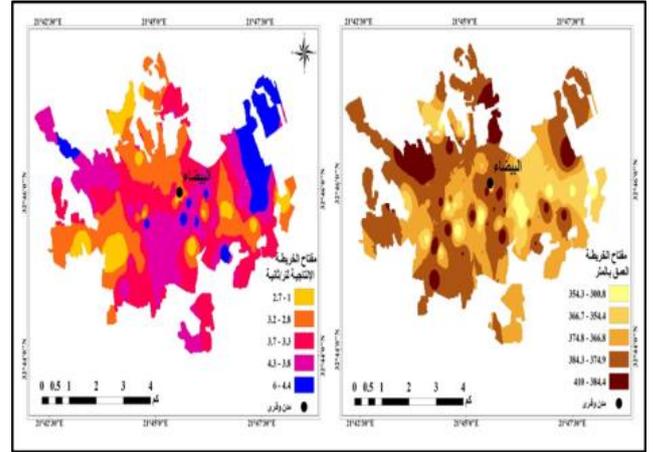
المصدر: من إعداد الباحثين، بالاعتماد على DEM، وباستخدام برنامج ArcMap10.5

رابعًا: النمذجة المكانية: أظهرت نتائج نموذج الانحدار الجغرافي الموزون الدور المهم لمجموعة من المتغيرات الطبوغرافية والمناخية (مؤشر تجمع المياه، مؤشر خشونة الطبوغرافية، العمق، الانحدار، الارتفاع، وكمية الامطار) في تفسير الاختلافات المكانية في إنتاجية وأعماق الآبار بمنطقة الدراسة، وهو ما يتفق مع عدد من الدراسات التي شملت هذه المتغيرات مؤثرات على سلوك المياه الجوفية ( Zhang, et al., 2022; Frisbee, et al., 2017; Condon & Maxwell, 2015; Rinderer, et al., 2014; Jan, et al., 2007; Sörensen. et al., 2006).

وتؤكد القيمة المرتفعة لنموذج الانحدار الجغرافي الموزون التي بلغت نحو (0.86) على العلاقة القوية بين المتغيرات المدروسة وإنتاجية الآبار وبالتالي وملاءمتها لشرح التباين في إنتاجية الآبار بمنطقة الدراسة، أما النسبة المتبقية فقد تتمثل في عوامل أخرى كسلوك الجريان تحت السطحي للمياه فضلاً عن التكوين الجيولوجي. ومن ناحية أخرى فإنّ تأثير هذه المتغيرات مجتمعة على التفاوت في

أعماق الآبار كانت عالية أيضًا حيث وصلت إلى حوالي (0.81)، ويمكن القول إنّ هذه المتغيرات لها دور رئيس في فهم الاختلافات المكانية لأعماق المياه الجوفية بمنطقة الدراسة. ومن دراسة التوزيع المكاني للعوامل المؤثرة على إنتاجية وعمق الآبار في مدينة البيضاء، الشكل (9)، تبين أنّ تأثير المتغيرات المدروسة يعلل التفاوت المكاني الواضح لخصائص آبار المياه الجوفية.

#### الشكل (9) التوزيع المكاني لتأثير المتغيرات على خصائص المياه الجوفية بمنطقة الدراسة.



المصدر: من إعداد الباحثين، بالاعتماد على DEM، وباستخدام برنامج ArcMap10.5

بالنسبة للتفاوت المكاني الخاص بالإنتاجية تُظهر الأجزاء ذات التأثير المنخفض، والتي تتراوح قيمها بين (0.00 و 0.25)، في وسط المدينة، بينما الأجزاء الأكثر تأثراً التي تتراوح تأثيراتها بين (0.51 و 0.76)، فتظهر في شمال شرق وشمال غرب المدينة بالإضافة لبعض الأجزاء الجنوبية، والتي ترتبط ارتباطاً مباشراً بالخصائص التضاريسية للمنطقة مما يزيد من معدلات التغذية الجوفية وبالتالي إنتاجية أعلى.

ففيما يتعلق بتأثير العوامل على عمق الآبار بناءً على تحليل الانحدار الجغرافي الموزون يتضح أنّ تأثير العوامل على العمق يكون أقل في المناطق التي تتراوح قيمها بين (0.00 و 0.25)، والتي تظهر في بعض الأجزاء شمال وجنوب المدينة، مما يعني أنّ العوامل المدروسة لا تساهم بشكل فعال في تفاوت الأعماق بهذه الأجزاء، بالمقابل تظهر الأجزاء الأكثر تأثراً التي تتراوح قيمها بين (0.76 و 0.95)، في أجزاء متفرقة من وسط المدينة والتي تتأثر بعوامل الخشونة الطبوغرافية، مما يجد من تجميع المياه وبالتالي تذبذب مستوى الأعماق.

وبشكل عام يظهر تحليل التوزيع المكاني لتأثير العوامل المدروسة على إنتاجية وعمق الآبار في مدينة البيضاء تبايناً واضحاً، حيث ترتبط الإنتاجية العالية للآبار في الشمال الشرقي والشمال الغربي وبعض الأجزاء الجنوبية من المدينة بالخصائص التضاريسية التي تساهم في

تعزيز التغذية الجوفية وتوزيع المياه. ومن ناحية أخرى يُظهر تأثير العوامل على العمق أنّ المناطق ذات التضاريس الوعرة في وسط المدينة تتطلب أعماقاً أكبر للوصول إلى المياه الجوفية، مما يشير إلى أهمية التضاريس في تحديد خصائص آبار المياه الجوفية وتباينها في مختلف أنحاء المدينة.

وبالنسبة لتأثير كل عامل على حدة يتضح تفاوت التأثير على كلٍ من إنتاجية وأعماق الآبار بمنطقة الدراسة، الجدول (1).

وبالنسبة لتأثير مؤشر تجميع المياه (TWI) يتضح أنّ له تأثيراً إيجابياً على إنتاجية الآبار، حيث بلغت قيمة التأثير (0.13)، أي أنّ المواقع ذات مستويات أعلى من تجمع المياه تساهم، وإن كان بشكل طفيف، في زيادة إنتاجية المياه في الآبار؛ يُعزى ذلك إلى أنّ تراكم المياه السطحية يعزز من فرص تغذية الطبقات الجوفية القريبة، ما يؤدي إلى ارتفاع الإنتاجية للبئر، ويدعم توفر المياه الجوفية بشكل أفضل في المواقع التي تتجمع فيها مياه الأمطار. (Lu et al, 2025)

أما تأثير مؤشر الخشونة الطبوغرافية (TRI) فأظهر تأثيراً سلبياً على إنتاجية الآبار، بقيمة تأثير (-0.04)، مما يعكس أنّ التضاريس الأكثر خشونة تؤدي إلى توزيع غير متوازن للمياه السطحية، الأمر الذي يُعيق تغذية المياه الجوفية، ويؤثر سلباً على كفاءة إنتاجية البئر. ويكون سبب ذلك أنّ التضاريس الوعرة تشكّل عوائق لجران المياه السطحية، مما يقلل من كفاءة تغذية الخزانات الجوفية بالمياه المتاحة. (Sreeja et al, 2025)

ومن ناحية أخرى فإنّ تأثير عمق البئر كان هذا العامل الأكثر تأثيراً على إنتاجية الآبار، حيث بلغت قيمة التأثير (-2.24)، ويدل ذلك على أنّ زيادة عمق البئر تتسبب في تقليل الإنتاجية بشكل ملحوظ، هذه العلاقة المعقدة بين العمق والإنتاجية يمكن تفسيرها بأنّ الآبار الأعمق تتعرض لانخفاض جودة المياه الجوفية وتقل مستويات المياه المتاحة مع زيادة العمق، مما يؤثر سلباً على كمية المياه التي يتم استخراجها. وجاء تأثير الانحدار موجباً ولكن ضعيفاً، بقيمة (0.06)، مما يبرز دوراً طفيفاً للانحدار في تعزيز إنتاجية الآبار، ويمكن تفسير هذا الأثر المحدود بأنّ الانحدار يساهم في تسهيل حركة المياه السطحية باتجاه مواقع الآبار، وبالتالي يُسرّع تغذية الخزانات الجوفية، وإن كان التأثير العام محدوداً وفقاً لما جاء في الدراسات. (Mehdi & Abbasi, 2025; Mohamud et al, 2025) وفيما يخص تأثير الارتفاع نجد أنّه أظهر تأثيراً إيجابياً معتدلاً على

المنحدرة للوصول إلى المياه الجوفية. كذلك فقد كان للارتفاع تأثيراً إيجابياً معتدلاً على عمق الآبار بقيمة (0.17)، ويشير ذلك إلى أنّ المناطق ذات الارتفاعات الأعلى تتطلب حفراً أعمق للوصول إلى المياه الجوفية، حيث يمكن أن تؤدي الارتفاعات إلى تقليل تواجد المياه الجوفية في المناطق القريبة من السطح. (Ghosh et al., 2022)، أما الأمطار فكان تأثيرها سلبياً على عمق الآبار بقيمة (-0.06)، مما يشير إلى أنّ المناطق ذات الأمطار الأكثر غزارة تتطلب عمقاً أقل للوصول إلى المياه الجوفية؛ ويعود ذلك إلى دور الأمطار في تغذية الخزانات الجوفية بشكل متواصل، مما يتيح للمياه الجوفية التجمع في أعماق أقل، ويزيد من فرص الوصول إليها بسهولة أكبر.

الجدول (1) تأثير المتغيرات على خصائص المياه الجوفية

المتغيرات	التأثير على الإنتاجية	التأثير على العمق
مؤشر تجمع المياه	0.13	0.07
مؤشر الخشونة الطبوغرافية	-0.04	-0.01
إنتاجية البئر	0	-0.22
عمق البئر	-2.24	0
الانحدار	0.06	0.02
الارتفاع	0.35	0.17
الامطار	0.25	-0.06

#### الخلاصة:

اعتمدت هذه الدراسة على توظيف تقنيات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد، إلى جانب نماذج التحليل المكاني الإحصائي المتقدم، مثل نموذج الانحدار الجغرافي الموزون (GWR)، بهدف تحليل التباين المكاني للعوامل الطبوغرافية والمناخية وتحديد انعكاساتها على خصائص آبار المياه الجوفية من حيث العمق والإنتاجية في مدينة البيضاء. وسعت الدراسة من هذا الإطار المنهجي إلى الكشف عن طبيعة العلاقات المكانية المحلية بين هذه العوامل، والتغلب على محدودية الأساليب الإحصائية التقليدية التي تفترض التجانس المكاني. وخلصت الدراسة إلى أنّ التباين المكاني في خصائص آبار المياه الجوفية بمدينة البيضاء يرتبط ارتباطاً وثيقاً بالعوامل الطبوغرافية والمناخية، ولا يمكن تفسيره بمعزل عن التفاعل المعقد بينها. أظهرت النتائج أنّ الارتفاع، والانحدار، ومؤشر الخشونة الطبوغرافية وتجمع المياه، إلى جانب كميات الأمطار تشكل مجتمعة منظومة متداخلة تتحكم في عمق المياه الجوفية وإنتاجية الآبار. كما أثبتت أنّ نموذج الانحدار الجغرافي الموزون تفوقه الواضح في الكشف عن

إنتاجية الآبار، حيث بلغت قيمة التأثير (0.35)، يُعزى هذا إلى أنّ المناطق ذات الارتفاعات الأعلى توفر بيئة ملائمة لاستقرار المياه الجوفية عند أعماق أقل نسبياً، مما يزيد من إنتاجية البئر، وتساهم الظروف المناخية المرتبطة بالارتفاعات العالية مثل درجات الحرارة المنخفضة في تعزيز استقرار المياه الجوفية، مما ينعكس إيجاباً على الإنتاجية وهو ما يتفق مع دراسات. (Zhang et al., 2022; ) (Mostafa et al., 2025) كما أظهرت كمية الأمطار تأثيراً إيجابياً متوسطاً على إنتاجية الآبار، بقيمة تأثير بلغت (0.25). يشير ذلك إلى أنّ زيادة معدلات الأمطار ترتبط بزيادة تغذية الخزان الجوفي، وبالتالي تعزيز إنتاجية الآبار. (Priestley et al., 2025)

وبالنسبة لتأثير المؤشرات والعوامل المدروسة على عمق الآبار أظهرت نتائج تحليل الانحدار الجغرافي الموزون أهمية بعضها في تحديد عمق الآبار بمنطقة الدراسة، حيث يتضح أنّ هذه العوامل تؤثر بطرق مختلفة على عمق الآبار، مما يعكس الدور المعقد لكل من هذه المتغيرات في تباين عمق المياه الجوفية:

فقد أظهر مؤشر تجمع المياه (TWI) تأثيراً إيجابياً ضعيفاً على عمق الآبار بقيمة (0.07)، مما يشير إلى أنّ زيادة تجمع المياه في بعض المناطق يرتبط بزيادة طفيفة في العمق المطلوب للوصول إلى المياه الجوفية، ويكون هذا التأثير نتيجة لتجمع المياه في بعض المناطق السطحية، مما يعزز من احتمالية تسربها إلى طبقات أعمق في بعض الحالات. أما مؤشر الخشونة الطبوغرافية (TRI) فأظهر تأثيراً سلبياً طفيفاً على عمق الآبار بقيمة (-0.01)، مما يعني أنّ التضاريس الوعرة تساهم بشكل طفيف في تقليل العمق للوصول إلى المياه الجوفية، ويمكن تفسير ذلك بأنّ التضاريس الخشنة تساهم في توفير مسارات سطحية لتجمع المياه، مما يقلل من حاجة الحفر لأعماق كبيرة (Barman et al., 2024) وفيما يخص إنتاجية البئر فكانت العلاقة ذات تأثير سلبي كبير بقيمة (-0.22)، مما يعكس أنّ زيادة العمق ترتبط بانخفاض الإنتاجية، وهذا التأثير الكبير يعزز فكرة أنّ الآبار الأعمق تتعرض لصعوبات أكبر في استخراج كميات وفيرة من المياه، مما يجعل الأعماق السطحية أكثر ملاءمة لتحقيق إنتاجية أعلى. ومن ناحية أخرى أنتج الانحدار تأثيراً إيجابياً ضعيفاً بقيمة (0.02)، مما يشير إلى تأثير طفيف للانحدار في زيادة عمق الآبار، ويعود ذلك إلى أنّ الانحدار يساهم في تسريع حركة المياه باتجاه المناطق المنخفضة، مما يؤدي إلى زيادة احتياج الحفر في المناطق

<https://doi.org/10.1007/s13201-024-01712-2>

الاختلافات المكانية الدقيقة، مما يؤكد أهمية اعتماد النماذج المحلية في الدراسات الهيدرولوجية، خاصة في البيئات كثيرة التضرس. وتشدد نتائج الدراسة من الحاجة الملحة إلى توظيف التقنيات المكانية في تخطيط واستغلال الموارد المائية، ولا سيما في المدن التي تعاني من محدودية الموارد السطحية وغياب شبكات الرصد الهيدرولوجي المنتظمة. كما توصي الدراسة بإنشاء قواعد بيانات مكانية محدثة لآبار المياه الجوفية وإنشاء آبار بيزومترية للتعرف على سلوكيات المياه، وربطها ببرامج الرصد المناخي والطبوغرافي، بما يساهم في دعم اتخاذ القرار، وتحقيق إدارة مستدامة للمياه الجوفية في مدينة البيضاء، وتوفير إطار علمي يمكن تطبيقه في مناطق أخرى ذات خصائص بيئية مماثلة.

#### المصادر والمراجع:

- Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., & Charlton, M. E. (1996). Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical Analysis*, 28(4), 281-298. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1996.tb00956.x>

- Chung, S. Y., Kim, G. B., & Senapathi, V. (2023). Drought and groundwater development. *Water*, 15(10), 1908. <https://doi.org/10.3390/w15101908>

- Condon, L. E., & Maxwell, R. M. (2015). Evaluating the relationship between topography and groundwater using outputs from a continental scale integrated hydrology model. *Water Resources Research*, 51(8), 6602-6621. <https://doi.org/10.1002/2014WR016610>

- Dandge, K. P., & Patil, S. S. (2022). Spatial distribution of groundwater quality index using remote sensing and GIS techniques. *Applied Water Science*, 12(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01510-0>

- Farooq, F., Waqar, M., Javed, M. A., Nasar-u-Minallah, M., Rizwan, S., Mohyidin, S. G., & Saad, M. (2024). Potential site selection for groundwater recharge using advanced geospatial techniques. *Pakistan Journal of Science*, 76(1), 125-133. <https://doi.org/10.36478/pjsci.2024.125-133>

- Frisbee, M. D., Tolley, D. G., & Wilson, J. L. (2017). Field estimates of groundwater circulation depths in two mountainous watersheds in the western US and the effect of deep circulation on solute concentrations in streamflow. *Water Resources Research*, 53(4), 2693-2715. <https://doi.org/10.1002/2016WR019010>

- Ghosh, A., Adhikary, P. P., Bera, B., Bhunia, G. S., & Shit, P. K. (2022). Assessment of groundwater potential zone using MCDA and AHP techniques: Case study from a tropical river basin of India. *Applied Water Science*, 12(3), 37. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01534-5>

- Ghritesh, A., Vekariya, P. B., Patel, A., Bariya, S., & Waghaye, A. M. (2024). Demarcation of potential groundwater recharge zones through remote sensing, GIS, and MCDA: A case study of the Aji River Basin in Saurashtra, Gujarat, India. *International Journal of Environment and Climate*

- Adedoyin, E. D., Falana, A. R., Oforu, C. S., Essien, N. E., & Aigbokhan, O. J. (2022). Analytical hierarchical process (AHP) techniques and geospatial technologies for groundwater potential zone mapping. *Journal of Scientific Research and Reports*, 28(11), 30-49. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2022/v28i111559>

- Ajit, K., Himanshu, S., & Satish, K. (2023). Geospatial techniques aided spatial groundwater quality assessment for drinking purpose in Charkhi Dadri district, Haryana. *International Journal on Environmental Sciences*, 12(4), 121-135. <https://doi.org/10.53390/ijes.2023.14109>

- Al Saleh, S. S., Abd El Galil, M., Hegazy, T., Abou Samra, R. M., & Mohamed, M. T. (2022). Quantitative analysis of urban sprawl in Al-Baydah city-Libya, using GIS and remote sensing techniques. *Scientific Journal for Damietta Faculty of Science*, 12(1), 56-62. <https://doi.org/10.37956/sjds.2022.12.1.56>

- Allen, D. W. (2016). GIS tutorial 2: Spatial analysis workbook. Esri Press

- Altunel, A. O. (2023). The effect of DEM resolution on topographic wetness index calculation and visualization: An insight to the hidden danger unraveled in Bozkurt in August, 2021. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(2), 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.ijeg.2023.01.006>

- Barman, J., Vlh Zuali, F., Bindajam, A. A., Mallick, J., & Abdo, H. G. (2024). Detection of groundwater conditioning factors in a hilly environment. *Applied Water Science*, 14(4), 88.

- Mohamud, A., Karakaş, A., Yeken, T., & Çakır, Ş. (2025). Integration of remote sensing, GIS, and AHP for groundwater potential evaluation in İzmit, Türkiye. *Journal of Engineering and Basic Sciences*, 4, 9–18.  
<https://doi.org/10.5152/jebs.2024.1206>

- Mostafa, A. E. S., Ali, M. A., Ali, F. A., Rabeiy, R., Saleem, H. A., Ali, M. A. H., & Shebl, A. (2025). Groundwater potential mapping in semi-arid areas using integrated remote sensing, GIS, and geostatistics techniques. *Water*, 17(13), 1909.  
<https://doi.org/10.3390/w17131909>

- Pointet, T. (2022). The United Nations world water development report 2022 on groundwater, a synthesis. *LHB*, 108(1), 2090867.  
<https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2090867>

- Priestley, S. C., Baker, A., Shanafield, M., Timms, W., Andersen, M. S., & de Lourdes Melo Zurita, M. (2025). Groundwater recharge of fractured rock aquifers in SE Australia is episodic and controlled by season and rainfall amount. *Geophysical Research Letters*, 52(5), e2024GL113503.  
<https://doi.org/10.1029/2024GL113503>

- Rinderer, M., Van Meerveld, H. J., & Seibert, J. (2014). Topographic controls on shallow groundwater levels in a steep, prealpine catchment: When are the TWI assumptions valid? *Water Resources Research*, 50(7), 6067–6080.  
<https://doi.org/10.1002/2013WR015009>

- Sörensen, R., Zinko, U., & Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: Evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 101–112.  
<https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>

- Sreeja, I. S., Aju, C. D., Achu, A. L., Reghunath, R., Prakash, P., & Raicy, M. C. (2025). Geospatial modelling of groundwater potential zones validated with well discharge and electrical resistivity in a tropical catchment. *Evolving Earth*, 4, 100094.  
<https://doi.org/10.1016/j.eveart.2024.100094>

- Stambaugh, M. C., & Guyette, R. P. (2008). Predicting spatio-temporal variability in fire return intervals using a topographic roughness index. *Forest Ecology and Management*, 254(3), 463–473.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.08.029>

Change, 14 (7), 16-33.  
<https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i7587>

- Jan, C. D., Chen, T. H., & Lo, W. C. (2007). Effect of rainfall intensity and distribution on groundwater level fluctuations. *Journal of Hydrology*, 332(3-4), 348-360.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.08.021>

- José, M., Marques, P., & Carreira, P. (2022). The use of environmental isotopes in groundwater studies with hydrogeoethics: Essential or dispensable? *Sustainable Water Resources Management*, 10(4), 123-134.  
<https://doi.org/10.1007/s40899-022-00659-4>

- Kalantar, B., Al-Najjar, H. A., Pradhan, B., Saeidi, V., Halin, A. A., Ueda, N., & Naghibi, S. A. (2019). Optimized conditioning factors using machine learning techniques for groundwater potential mapping. *Water*, 11(9), 1909.  
<https://doi.org/10.3390/w11091898>

- Kane, V. E., Begovich, C. L., Butz, T. R., & Myers, D. E. (1982). Interpretation of regional geochemistry using optimal interpolation parameters. *Computers & Geosciences*, 8(2), 117-135.  
[https://doi.org/10.1016/0098-3004\(82\)90039-5](https://doi.org/10.1016/0098-3004(82)90039-5)

Karunakalage, A., Sharma, R., Daqiq, M. T., &

- Kannaujiya, S. (2023). Assessment of climatic and vegetation influence on spatial distribution of groundwater recharge in humid subtropical central Gangetic Plain. *Authorea Preprints*.  
<https://doi.org/10.22541/au.167357573.39264248>

- Lu, Z., Shen, C., Zhan, C., Tang, H., Luo, C., Meng, S., ... & Kou, X. (2025). Quantifying multifactorial drivers of groundwater-climate interactions in an arid basin based on remote sensing data. *Remote Sensing*, 17(14), 2472.  
<https://doi.org/10.3390/rs17142472>

- Malczewski, J., & Grubestic, T. H. (2006). Hierarchical spatial modeling of geographic areas using geographically weighted regression. *Journal of Geographical Systems*, 8(4), 385-403.  
<https://doi.org/10.1007/s10109-006-0044-z>

- Mehdi, S. S., & Abbasi, M. (2025). Geo-spatial assessment of groundwater potential in Chaj Doab, Pakistan by using remote sensing data. *Pakistan Journal of Science*, 76(1), 1-10.  
<https://doi.org/10.36478/pjsc.2025.1-10>

- Widyasamratri, H., Poedjiastoeti, H., & Noor, N. H. M. (2024). Investigating potential surface fresh water in karst Rembang using Topographic Wetness Index (TWI). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1321(1), 012002.

<https://doi.org/10.1088/1755-315/1321/1/012002>

- Zhang, X., Jiao, J. J., & Guo, W. (2022). How does topography control topography driven groundwater flow? Geophysical Research Letters, 49(20), e2022GL101005.

<https://doi.org/10.1029/2022GL101005>