

نمذجة توزيع منسوب المياه الجوفية وتحديد اتجاه جريانها في مدينة حلب باستخدام تقنيات الاستيفاء المكاني في بيئة GIS

محمد حسام تتان * أميرة محمد الأحمد ** علي فاتحة ***

(الإيداع: 23 كانون الأول 2025، القبول: 10 آذار 2026)

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى رسم خرائط التوزيع المكاني لمنسوب المياه الجوفية وتحديد اتجاه جريانها في منطقة حضرية مختارة داخل مدينة حلب، بالاعتماد على تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وأسلوب الاستيفاء الجيواحصائي المعروف بـ Empirical Bayesian Kriging (EBK). استُخدمت بيانات الرصد الشهري لـ 46 بئراً مراقباً تابعة للمؤسسة العامة لمياه الشرب في محافظة حلب، وجمعت البيانات خلال شهري تشرين الأول وتشرين الثاني من عام 2022 (فترة الجفاف) لتعكس أدنى منسوب سنوي. تنتمي جميع الآبار إلى طبقات مياه جوفية غير محصورة (Unconfined) وفق التصنيف الهيدروجيولوجي. أظهرت النتائج وجود تدرج مكاني واضح في مناسيب المياه الجوفية، يتجه من الجنوب الغربي (مناسيب أعلى) نحو الشمال الشرقي (مناسيب أدنى)، مما يحدد الاتجاه العام لجريان المياه الجوفية باتجاه الشمال الشرقي. تم تحديد اتجاه الجريان بطريقة كمية دقيقة باستخدام أدوات تحليل الاتجاه في GIS (Flow Direction) المستمدة من سطح الاستيفاء (Kriging)، بدلاً من التحديد اليدوي التقريبي. تُعد هذه الدراسة الأولى من نوعها التي تقدم نموذجاً مفصلاً لتوزيع منسوب المياه الجوفية في المنطقة الحضرية بحلب باستخدام تقنية EBK الجيواحصائية، مما يوفر أداة عملية داعمة لاتخاذ القرار في إدارة الموارد المائية والتخطيط العمراني والزراعي المستدام. تم تقييم دقة النموذج باستخدام اختبار الاسترجاع المتقاطع (Cross-Validation) وحساب مؤشرات الدقة مثل جذر متوسط مربعات الخطأ ($RMSE = 8.577 \text{ m}$) ومعامل التحديد ($R^2 = 0.63$). كما أُنتجت خريطة لخطأ التنبؤ (Prediction Standard Error) لتحديد مناطق عدم اليقين في النموذج.

الكلمات المفتاحية: نظم المعلومات الجغرافية، المياه الجوفية، مناسيب المياه الجوفية، الاستيفاء المكاني، Empirical Bayesian Kriging.

* طالب دراسات عليا (ماجستير)، قسم تقانات الهندسة البيئية، كلية الهندسة التقنية، جامعة حلب.

** أستاذ مساعد، قسم تقانات الهندسة البيئية، كلية الهندسة التقنية، جامعة حلب.

*** مدرس، قسم الهندسة الطبوغرافية، كلية الهندسة المدنية، جامعة حلب.

Modeling Groundwater Level Distribution and Determining Its Flow Direction in Aleppo City Using Spatial Interpolation Techniques in a GIS Environment

Mohammed Hossam Tattan *, Amira Mohammed Alahmad **, Ali Fatiha ***

(Received: 23 December 2025. Accepted: 10 March 2026)

Abstract:

This study aims to map the spatial distribution of groundwater levels and determine their flow direction within a selected urban area in Aleppo city, using Geographic Information Systems (GIS) and the Empirical Bayesian Kriging (EBK) geostatistical interpolation method. The study relies on monitoring data from 46 wells belonging to the General Establishment for Drinking Water in Aleppo Governorate. Data were collected during October and November 2022 (the dry season) to represent the lowest annual water level. All wells are classified as unconfined aquifers according to hydrogeological classification. The results revealed a clear gradient in groundwater levels, increasing in the southwest and decreasing in the northeast of the study area, thus defining the general flow direction towards the northeast. Flow direction was accurately determined using quantitative GIS tools (Flow Direction) derived from the kriging surface, rather than approximate manual delineation. The study provides the first detailed model of groundwater level distribution in the urban area of Aleppo using the geostatistical Empirical Bayesian Kriging technique, offering a practical decision-support tool for water resource management and sustainable urban and agricultural planning in the region. Model accuracy was evaluated using Cross-Validation and accuracy indices such as Root Mean Square Error (RMSE = 8.577 m) and coefficient of determination ($R^2 = 0.63$). A Prediction Standard Error map was also produced to identify areas of uncertainty in the model.

Keywords: Geographic Information Systems, Groundwater, Groundwater Levels, Spatial Interpolation, Empirical Bayesian Kriging.

* Postgraduate student (MSc), Department of Environmental Engineering Technologies, Faculty of Technical Engineering, University of Aleppo.

** Assistant Prof, Department of Environmental Engineering Technologies, Faculty of Technical Engineering, University of Aleppo.

*** Teacher, Department of Topographic Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Aleppo.

1- المقدمة:

تُعد المياه الجوفية مورداً حيوياً بالغ الأهمية في المناطق ذات المناخ الجاف وشبه الجاف، مثل سورية، حيث تشكل المصدر الرئيسي لتلبية احتياجات الشرب والزراعة والصناعة [1]. تواجه مدينة حلب، ثاني أكبر المدن السورية، تحديات متزايدة في إدارة مواردها المائية الجوفية نتيجة النمو السكاني المتسارع، والتوسع العمراني، والتغيرات المناخية، إضافة إلى الضغوط الناجمة عن النزاع في السنوات الأخيرة [2]. إن الفهم الدقيق لتوزيع المياه الجوفية وحركتها يُشكل أساساً ضرورياً لأي تخطيط يهدف إلى تحقيق الاستدامة ومواجهة مخاطر الاستنزاف والتلوث.

يُعد رسم خرائط مناسيب المياه الجوفية الخطوة الأولى والأساسية نحو فهم سلوك النظام المائي الجوفي [3]، إذ لا تقتصر أهمية هذه الخرائط على إظهار التغير المكاني للمنسوب فحسب، بل تمتد إلى استخلاص اتجاهات حركة المياه، وتحديد مناطق التغذية والتصريف، وتقييم كميات المخزون الجوفي [4]. تقليدياً، كانت هذه المهمة شاقة وتعتمد على التمثيل اليدوي، إلا أن التطور المتسارع في تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) أتاح إمكانية تنفيذها بدقة وكفاءة عاليتين [5].

تسمح تقنيات الاستيفاء المكاني المتقدمة في بيئات GIS، مثل Kriging و Inverse Distance Weighting (IDW) و Spline، بتحويل بيانات النقاط المنفصلة (الآبار) إلى أسطح رقمية مستمرة تمثل توزيع الظاهرة في الحيز المكاني بأكمله [6]. وهذا لا يُسهل التحليل فحسب، بل يُضيف بُعداً تنبؤياً قيماً يُستفاد منه في التخطيط المستقبلي [7]. وعليه، تهدف هذه الدراسة إلى تطبيق تقنيات الاستيفاء المكاني في منطقة حضرية محددة داخل مدينة حلب، بالاعتماد على بيانات حقلية حقيقية قيسَت في فترة زمنية محددة (تشرين الأول/تشرين الثاني 2022) لتعكس ظروف المنسوب في موسم الجفاف، حيث تكون التأثيرات الموسمية في أدنى مستوياتها. كما تسعى الدراسة إلى تقييم أداء طريقة Empirical Bayesian Kriging ومقارنتها بالطرائق الأخرى في هذه البيئة الجغرافية، والخروج بتوصيات عملية تدعم سياسات إدارة المياه في المنطقة.

2- الإطار النظري والدراسات المرجعية:

2-1- الأساس النظري لطريقة Empirical Bayesian Kriging (EBK):

تعد طريقة Empirical Bayesian Kriging (EBK) إحدى تقنيات الاستيفاء الجيوإحصائي المتقدمة التي تختلف عن طرق Kriging التقليدية في كيفية تقدير معالم شبه التباين (Semivariogram). فبدلاً من تقدير شبه تباين واحد يُفترض أنه يمثل العملية المكانية بأكملها، تقوم EBK بتقدير العديد من أشباه التباين بشكل تجريبي من خلال عملية محاكاة تأخذ في الاعتبار عدم اليقين المرتبط بتقدير هذه المعالم [8]. تعتمد الطريقة على افتراض أن العملية المكانية يمكن وصفها بالنموذج الرياضي الآتي:

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) \quad (1)$$

حيث:

$Z(s)$: قيمة المتغير العشوائي في الموقع s (منسوب المياه الجوفية).

$\mu(s)$: الاتجاه العام (الوسط المحلي).

$\varepsilon(s)$: خطأ عشوائي موزع طبيعياً بتوقع رياضي صفر وتباين محدود.

تقوم EBK بتقدير المعالم عبر الخطوات التالية [9]:

1. تقدير شبه تباين تجريبي من البيانات الأصلية باستخدام إحدى الدوال الرياضية (كروية، أسية، غاوسية).
 2. توليد محاكاة شرطية جديدة بناءً على شبه التباين المقدّر، وذلك باستخدام محاكاة عشوائية متعددة.
 3. إعادة تقدير شبه التباين لكل عملية محاكاة، مما ينتج عنه توزيع احتمالي لمعاملات شبه التباين.
 4. دمج النتائج باستخدام معادلة بايز للحصول على التوزيع الاحتمالي النهائي للتنبؤ في المواقع غير المقاسة.
- يمكن التعبير عن شبه التباين (Semivariogram) رياضياً بالعلاقة:

$$\gamma(h) = 1/2E[(Z(s) - Z(s + h))^2] \quad (2)$$

حيث:

$\gamma(h)$: شبه التباين على المسافة h .

$Z(s)$: قيمة المتغير في الموقع s .

$Z(s + h)$: قيمته في موقع آخر على بعد مسافة h .

تقوم EBK بمحاكاة هذه العلاقة آلاف المرات لفهم عدم اليقين المرتبط بتقدير معلمات شبه التباين، مما تمنحها ميزة أساسية في التعامل مع البيانات غير المستقرة إحصائياً أو محدودة العدد [10]. ويتميز أسلوب EBK بقدرته على تقديم تقديرات دقيقة لخطأ التنبؤ، مما تنتج خرائط لعدم اليقين المكاني تعد أداة قوية في دعم القرار.

2-2- الدراسات السابقة:

شهدت السنوات الأخيرة توجهاً متزايداً نحو استخدام التقنيات الجيومكانية في الدراسات الهيدروجيولوجية. فعلى الصعيد الدولي، طور حجي وآخرون (2024) تقنية متقدمة لرسم خرائط المياه الجوفية في البيئات الصحراوية العربية بالاعتماد على تقنيات الاستشعار عن بعد [5]. كما ركزت دراسة Wisenor و Butler (2020) على الأسس النظرية لخواص المواد الأرضية وتأثيرها في تدفق المياه الجوفية، موثقة بشكل منهجي قانون دارسي والمبادئ الفيزيائية الحاكمة لحركة المياه في الأوساط المسامية [12].

على الصعيد الإقليمي، أظهر تحسين (2022) فعالية نمذجة الخرائط ثلاثية الأبعاد لمناسيب المياه في حوض كركوك بالعراق باستخدام ArcGIS [3]. وتوصل محمد صالح (2023) إلى اتجاه جريان المياه الجوفية من الشمال الشرقي نحو الجنوب الغربي في مدينة كركوك باستخدام تقنيات GIS والاستشعار عن بعد [4].

وفي إطار إقليمي أوسع، أجرى Tirol Kırçiçek وآخرون (2024) دراسة شاملة لتقييم التغيرات المكانية لمناسيب المياه الجوفية في تركيا بالاعتماد على بيانات 355 بئراً مراقبة تمتد من عام 1970 حتى 2019. طبقت الدراسة ثلاث تقنيات استيفاء مكاني هي: كريغينغ البسيط (Simple Kriging)، وكريغينغ البيزي التجريبي (EBK)، والعكس الموزون للمسافة (IDW). أظهرت نتائج التحقق المتقاطع أن طريقتي EBK و IDW قدما نتائج أكثر دقة وواقعية عند توفر كثافة بيانات مناسبة [14]. تكتسب هذه الدراسة أهمية بالغة للبحث الحالي، إذ تقدم منهجية متكاملة في مقارنة طرق الاستيفاء المكاني وتقييم دقتها في أحواض رسوبية شبه جافة ذات ظروف هيدروجيولوجية مماثلة لحوض حلب.

على الصعيد المحلي السوري، يُعد عمل عبد الرحمن وآخرون (2013) بعنوان "التنبؤ بخريطة تساوي مناسيب المياه الجوفية الحرة باستخدام طرائق الإحصاء المكاني في سهل جبلة-اللاذقية" من الدراسات الرائدة [2]. اعتمدت الدراسة على قياسات مناسيب المياه في 42 بئراً، وطبقت منهجية مقارنة بين طريقتي Kriging و IDW، حيث أظهرت النتائج تفوق أسلوب IDW بعد المعايرة المناسبة للمعلومات. كما أن دراسة أبو ومركل (2014) في حوض الزراع غربي حلب قدمت تقديراً دقيقاً للتغذية الجوفية باستخدام عدة طرق هيدروجيولوجية [16].

رغم هذا الزخم المعرفي والمنهجي، تبقى الدراسات التي تركز تحديداً على مدينة حلب باستخدام التقنيات الجيومكانية الحديثة وتحديد تلك المعنية بنمذجة مناسيب المياه الجوفية وتحديد اتجاهات جريانها باستخدام EBK محدودة للغاية. تشكل هذه الفجوة البحثية إشكالية معرفية وتطبيقية، إذ تحول دون وضع تصورات دقيقة لإدارة الموارد المائية الجوفية في المنطقة.

لذا، تسعى هذه الدراسة إلى سد هذه الفجوة من خلال تقديم تحليل مكاني مفصل لمناسيب المياه الجوفية في مدينة حلب، معتمدة على منهجية EBK المدعومة بتقنيات نظم المعلومات الجغرافية، ومستفيدة من التطورات المنهجية التي أفرزتها الدراسات الإقليمية.

3- مشكلة البحث:

تعاني منطقة الدراسة في مدينة حلب من عدم توفر خرائط حديثة ودقيقة توضح التوزيع المكاني لمنسوب المياه الجوفية واتجاه حركتها، رغم الأهمية البالغة لهذه المعلومات للتخطيط الأمثل لعمليات الاستخراج والحماية من الاستنزاف والتلوث. تعتمد الإدارة الحالية للمياه الجوفية غالباً على بيانات جزئية أو طرق تقليدية، مما يحد من فعالية التخطيط المستدام لهذا المورد الحيوي في ظل الظروف المناخية المتغيرة والضغط السكانية والتنمية التي تشهدها المنطقة [17].

4- أهداف البحث:

يهدف هذا البحث إلى:

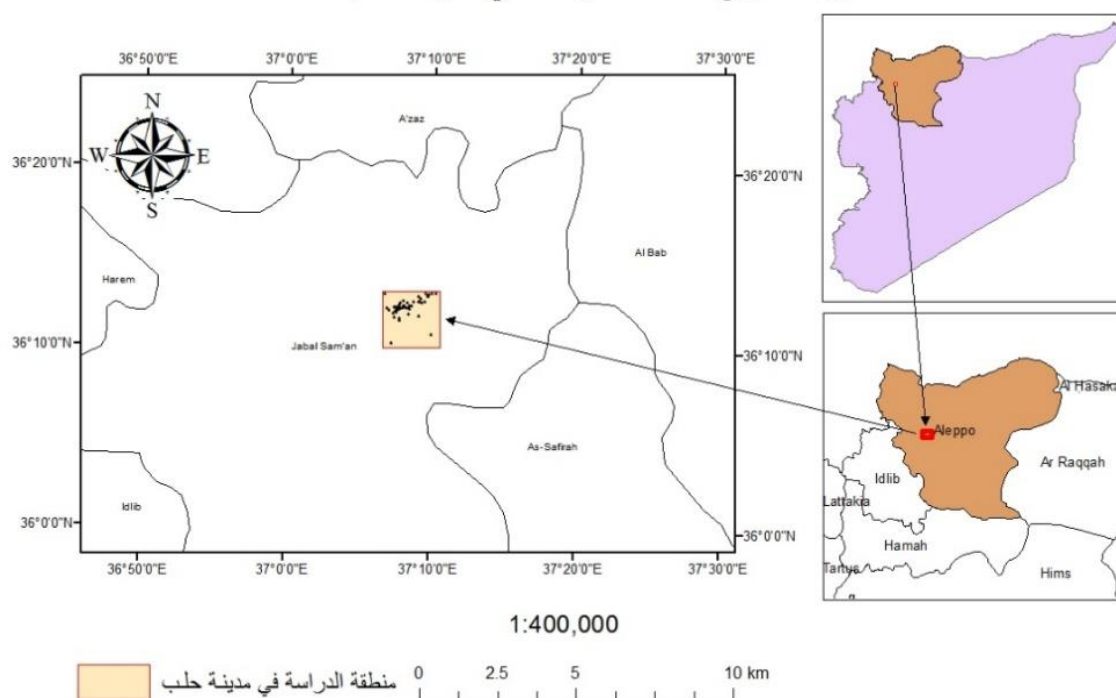
1. إنشاء قاعدة بيانات مكانية لمواقع الآبار ومناسيب المياه الجوفية في منطقة دراسة مختارة داخل مدينة حلب.
2. تطبيق تقنية الاستيفاء المكاني الجيوإحصائي (Empirical Bayesian Kriging) ضمن بيئة ArcGIS لنمذجة وتصور توزيع منسوب المياه الجوفية.
3. استخراج خطوط تساوي المنسوب (Equipotential Lines) وتحديد الاتجاه العام لحركة المياه الجوفية بناءً على المبادئ الهيدروجيولوجية وباستخدام أدوات تحليل الاتجاه الرقمية في GIS.
4. تقييم أداء طريقة الاستيفاء EBK ومدى ملاءمتها للبيانات والمنطقة قيد الدراسة باستخدام تقنيات التحقق الإحصائي.
5. تقديم خرائط وتوصيات عملية يمكن أن تستخدمها الجهات المعنية كأداة داعمة لاتخاذ القرار في إدارة الموارد المائية.

5- مواد و طرائق البحث:

5-1- منطقة الدراسة:

تقع منطقة الدراسة داخل مدينة حلب، ثاني أكبر المدن السورية (الشكل رقم 1). واستناداً إلى تحليل إحداثيات الآبار الـ 46 المستخدمة، فإن المنطقة تغطي مساحة تقدر بنحو 110 كم² تقريباً، وتقع ضمن النطاق العمراني الرئيسي للمدينة وما حولها. تتميز المنطقة بطبوغرافيا عامة متدرجة، تميل نحو الانخفاض في الاتجاه الشمالي الشرقي، وهو ما ينعكس على اتجاه حركة المياه الجوفية كما سيتضح لاحقاً [18].

خريطة موقع منطقة الدراسة في مدينة حلب



الشكل رقم (1): خريطة موقع منطقة الدراسة في مدينة حلب (مصدر: إعداد الباحث بناءً على بيانات GADM [19]).

5-2- مصادر البيانات:

اعتمدت الدراسة بشكل أساسي على:

- **بيانات الآبار:** بيانات من 46 بئراً رصدياً تابعة للشركة العامة لمياه الشرب والصرف الصحي في حلب. تم جمع القياسات في شهري تشرين الأول وتشرين الثاني من عام 2022، وهي فترة تمثل موسم الجفاف حيث تكون مناسيب المياه الجوفية في أدنى مستوياتها السنوية، مما يعطي صورة مستقرة نسبياً للخران الجوفي. شملت قاعدة البيانات اسم كل بئر، وإحداثياته المكانية (النظام السوري EPSG:22700)، وقراءة منسوب المياه الجوفية (متر) (الجدول رقم 1). تنتمي جميع الآبار إلى طبقات غير محصورة (Unconfined) وفقاً للتصنيف الهيدروجيولوجي المقدم من المؤسسة العامة لمياه الشرب.
- **البيانات الأساسية:** تم استخدام بيانات شكلية من نوع (Shapefile) للحدود الإدارية لسوريا ومحافظة حلب، تم تحميلها من قاعدة البيانات العالمية GADM [19].

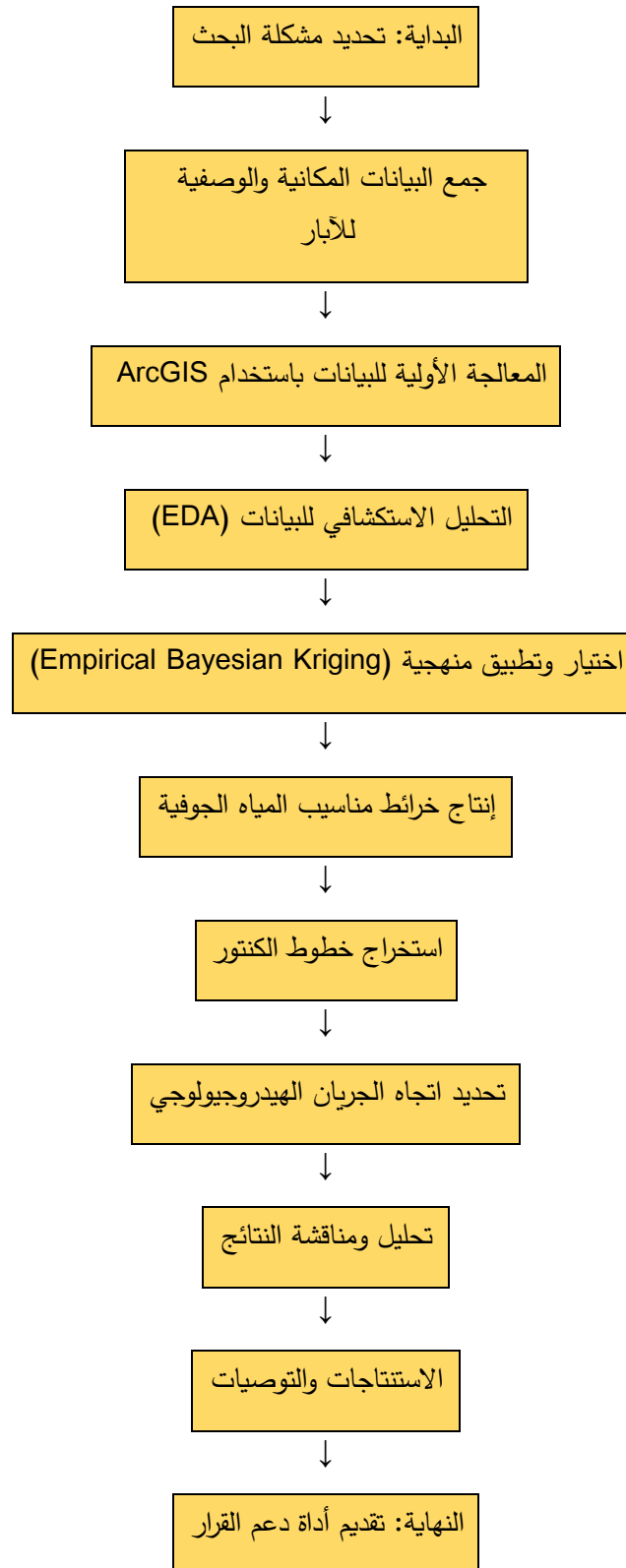
5-3- الأدوات المستخدمة:

أُجريت جميع عمليات المعالجة والتحليل المكاني والإحصائي باستخدام برنامج ArcMap 10.8 (من إنتاج شركة ESRI)، الذي يوفر مجموعة شاملة من أدوات التحليل الجيوإحصائي والرسم الخرائطي [20].

5-4- المنهجية:

5-4-1 مخطط الدراسة:

اتبع هذا البحث منهجية واضحة ومتسلسلة كما هو موضح في الشكل رقم (2).



الشكل رقم (2): مخطط منهجية الدراسة الإحصائية والمكانية.

5-4-2 الخطوات العملية:

اتبع البحث الخطوات العملية التالية:

1. إعداد البيانات المكانية: تحميل الخرائط الأساسية وتحويل أنظمة إحداثياتها إلى النظام السوري (EPSG:22700)، وإنشاء طبقة مضلعة تمثل منطقة الدراسة بدقة، واستخدامها كقناع (Mask) لقص النتائج المكانية لاحقاً.
2. معالجة بيانات الآبار: إدخال بيانات الآبار (الإحداثيات، المنسوب) إلى ArcMap وإنشاء طبقة نقاط دائمة (Shapefile).
3. التحليل الاستكشافي للبيانات (Exploratory Data Analysis (EDA): باستخدام أدوات Geostatistical Analyst في ArcGIS، تم إجراء:
 - المدرج التكراري (Histogram) لفهم توزيع البيانات.
 - مخطط QQ الطبيعي (Normal QQPlot) لتقييم انحراف التوزيع عن الطبيعي.
 - تحليل الاتجاه (Trend Analysis) للكشف عن الأنماط الاتجاهية المكانية العامة.
 - خريطة فوريوني (Voronoi Map) لاستكشاف التباين المكاني المحلي.
 - الارتباط الذاتي المكاني (Semivariogram/Covariance Cloud) لفحص الاعتماد المكاني للبيانات، وهو أساس تطبيق EBK [21].
4. الاستيفاء المكاني ونمذجة المنسوب: تطبيق طريقة Empirical Bayesian Kriging عبر Geostatistical Wizard. تم اختيار EBK لقدرتها على معالجة البنية المكانية وتقدير دقة التنبؤ الإحصائي، وذلك للأسباب النظرية الموضحة في القسم (2-1). ثم تحويل المخرجات إلى طبقات مصفوفية (Raster) وترميزها، مع تطبيق قناع منطقة الدراسة لقص الخريطة وفق الحدود الإدارية.
5. استخراج خطوط التساوي وتحديد اتجاه الجريان: توليد خطوط الكنتور من خريطة EBK الناتجة. تم تحديد اتجاه الجريان بطريقة كمية دقيقة باستخدام أدوات GIS: أولاً، تم اشتقاق سطح اتجاه الجريان (Flow Direction) من سطح المنسوب (Raster) المحول باستخدام أداة Flow Direction في ArcGIS (التي تعتمد على خوارزمية D8) [13]. ثم تم توليد متجهات اتجاه الجريان لكل خلية وتمثيلها بأسهم مركبة تبين الاتجاه العام.
6. تقييم الدقة: استخدام تقنية اختبار الاسترجاع المتقاطع (Cross-Validation) [22] لتقييم دقة نموذج EBK، وحساب مؤشرات الدقة مثل جذر متوسط مربعات الخطأ (RMSE) ومتوسط الخطأ (ME) ومعامل التحديد $[R^2]$ [23].

الجدول رقم (1): بيانات الآبار الرصدية المستخدمة في الدراسة: الإحداثيات والمنسوب الستاتيكي للمياه الجوفية (فترة الجفاف، 2022).

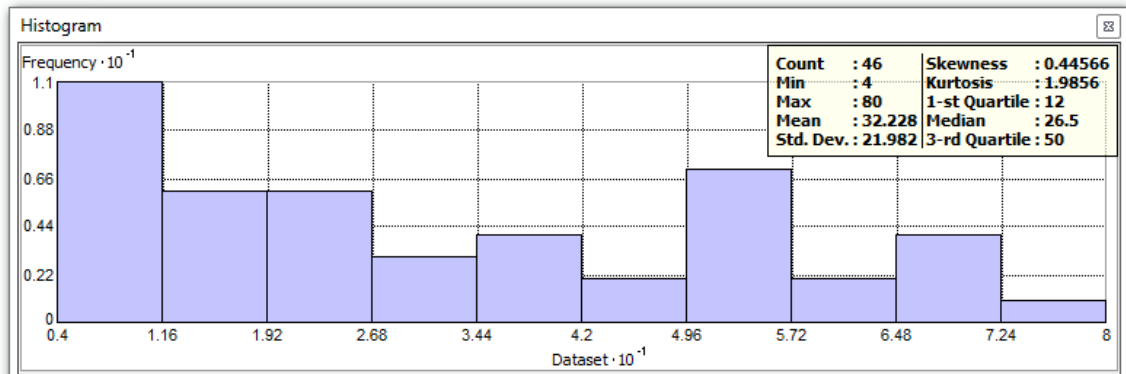
رمز البئر	X	Y	(m) المنسوب الستاتيكي
M11	-181674	224679	65
M31	-180863	224862	14
M32	-182208	224405	70
M33	-181992	223932	45
M35	-182264	223374	60
M37	-181707	223304	53
M42	-181133	224406	25
MM1	-182131	223964	50
MM2	-181984	224284	50
MM3	-181621	224385	35
MM8	-182731	224069	60
MM10	-178633	225667	10
MM13	-179723	225518	5
MM16	-181303	224532	45
MM17	-181763	224443	30
MM22	-180699	224194	27
MM23	-182329	223854	52
MM27	-181399	224380	28
MM29	-179581	224919	6
MM30	-180745	223698	15
CH1	-181625	224828	55
CH5	-181658	223038	70
CH7	-180483	224517	12
CH9	-182052	224395	57
CH12	-179740	224985	10
CH16	-181331	225097	37
NP3	-182950	224355	71.5
NP6	-181677	224272	25
NP8	-180752	224304	25
NP12	-183186	225774	50
NP16	-179471	225235	5
NP18	-180613	224596	5
NP19	-178986	225799	7
NP20	-178340	225810	20
NP26	-179343	224842	17
NP27	-180256	224973	4
NP30	-178386	221553	16
NP35	-181130	224504	35
NP36	-179721	223486	11
NP46	-178742	225624	9
NP48	-178779	225545	26
NP55	-180981	224368	25
NP56	-182527	220701	80
NP71	-179109	224956	8
NP75	-177879	225792	17
NP78	-181935	224070	40

6- النتائج والمناقشة:

6-1- التحليل الاستكشافي للبيانات (EDA):

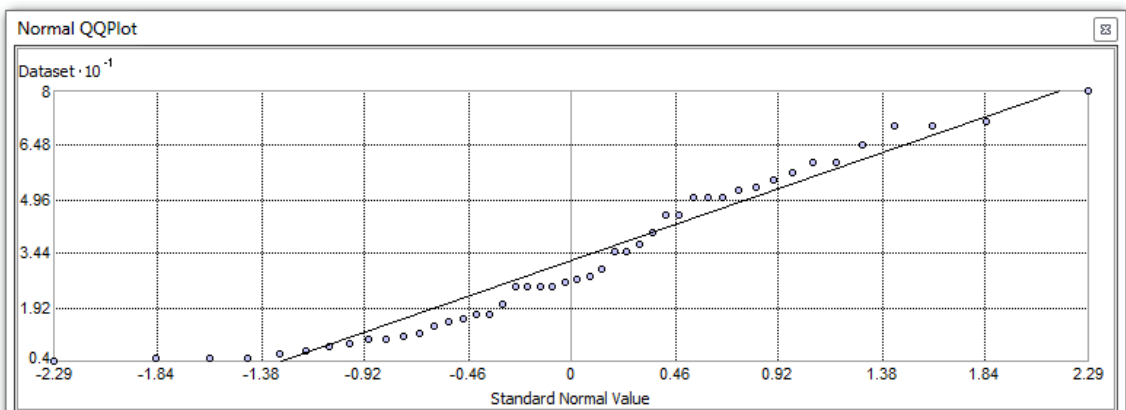
أظهر التحليل الاستكشافي لبيانات منسوب المياه في الآبار الـ 46 الخصائص التالية:

- **المدرج التكراري (Histogram) (الشكل رقم 3):** أشار إلى تباين كبير في قيم المنسوب (انحراف معياري = 21.98 م)، مع معامل التواء موجب طفيف (0.45) يدل على وجود ذيل يميني (أي وجود بعض الآبار ذات مناسيب مرتفعة نسبياً)، وقيمة معامل تفلطح (1.99) تشير إلى توزيع مقارب للتوزيع الطبيعي، مما يدعم استخدام طرق Kriging التي تفترض الاقتراب من التوزيع الطبيعي [24].



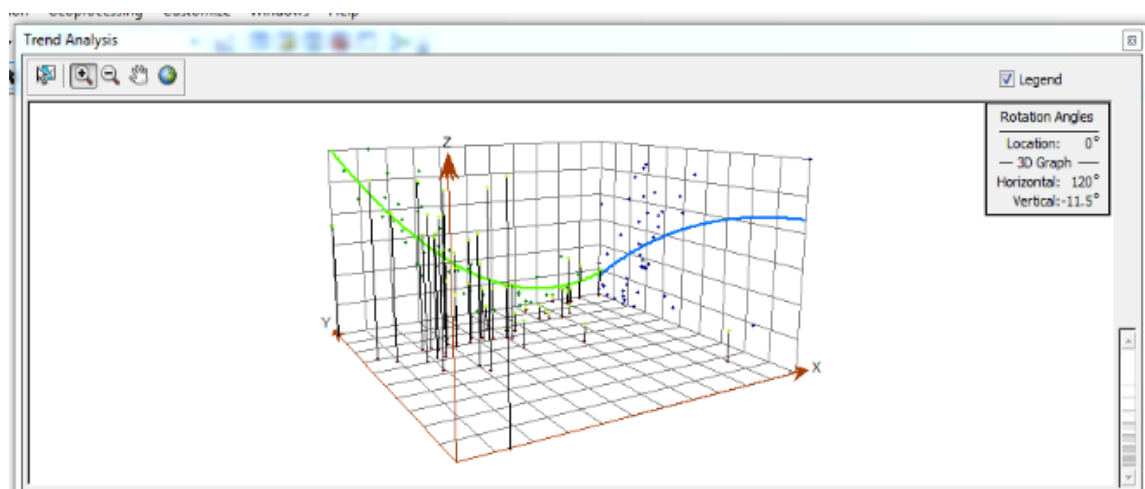
الشكل رقم (3): التوزيع التكراري والإحصائيات الأساسية لمنسوب المياه الجوفية.

- **مخطط QQ الطبيعي (Normal QQPlot) (الشكل رقم 4):** أكد اقتراب بيانات المنسوب من التوزيع الطبيعي، حيث تتركز معظم النقاط حول الخط المستقيم المرجعي، وهو افتراض مهم لتطبيق Kriging بشكل أمثل [24].



الشكل رقم (4): مخطط Normal QQPlot يظهر اقتراب توزيع البيانات من الطبيعي.

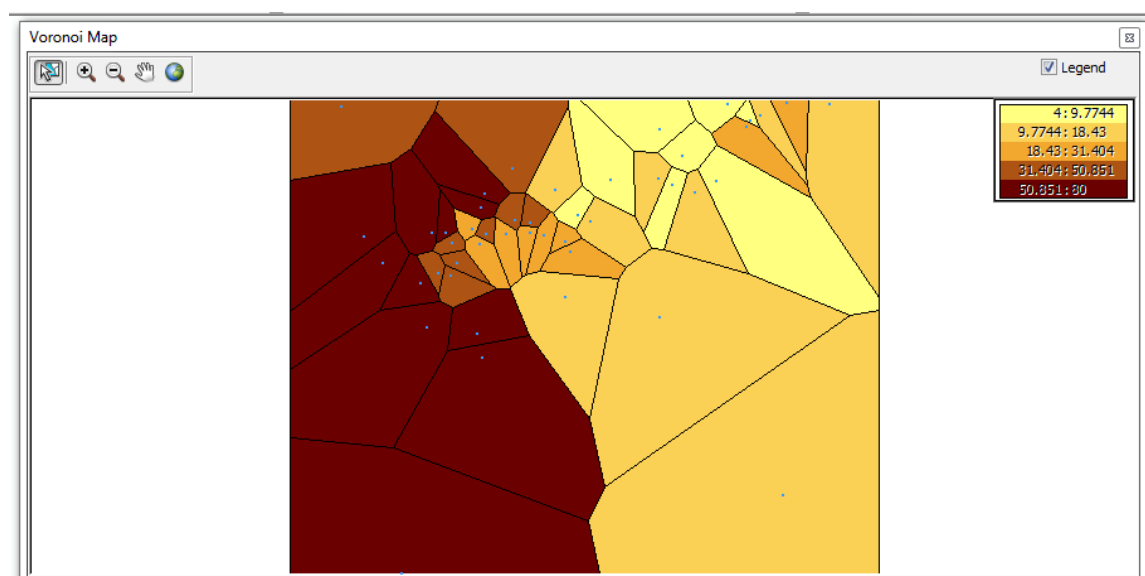
- **تحليل الاتجاه (Trend Analysis) (الشكل رقم 5):** كشف عن وجود نمط اتجاهي منهجي واضح. يُظهر المنحنى الشرقي-غربي ارتفاعاً في القيم في الغرب وانخفاضاً نحو الشرق، بينما يُظهر المنحنى الشمالي-الجنوبي ارتفاعاً في الجنوب وانخفاضاً نحو الشمال. يشير هذا النمط إلى اتجاه عام للجريان من الجنوب الغربي (مرتفع) نحو الشمال الشرقي (منخفض). يتوافق هذا الاتجاه مع الانحدار الطبوغرافي العام للمنطقة الذي يميل نحو الشمال الشرقي، حيث تتحدر سفوح جبل سمعان باتجاه نهر قويق.



الشكل رقم (5): تحليل الاتجاه المكاني يظهر وجود اتجاه عام من الجنوب الغربي نحو الشمال الشرقي.

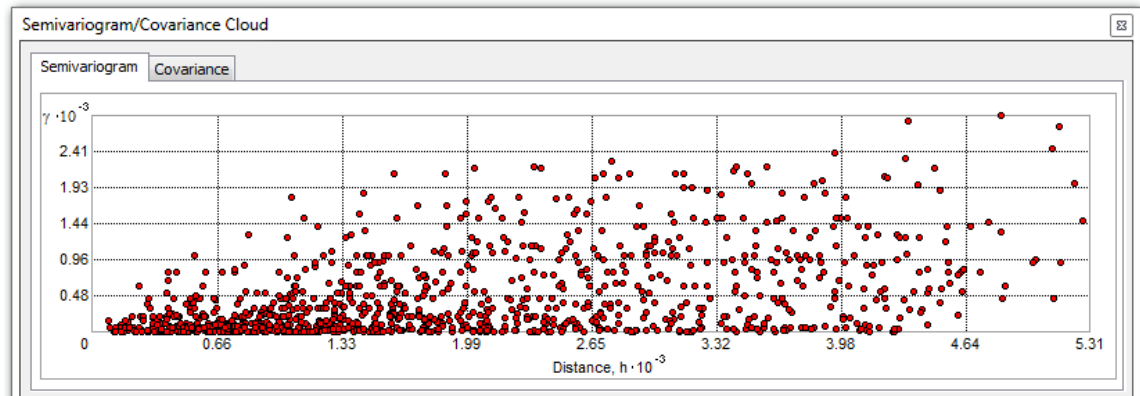
يُعدُّ الكشف عن هذا الاتجاه العام في البيانات مؤشراً مهماً على وجود لاثباتية مكانية (Non-stationarity)، وهو ما قد يشكل تحدياً لطرائق Kriging التقليدية التي تفترض ضمناً ثبات الوسط المحلي [7]. من هنا، كان اختيار طريقة Empirical Bayesian Kriging (EBK) خياراً منهجياً مدعوماً بنتائج التحليل الاستكشافي؛ إذ تتميز EBK بقدرتها على التعامل مع الاتجاهات المكانية ضمناً دون الحاجة إلى إزالتها صراحةً كما هو الحال في Universal Kriging [9]. كما أن طبيعتها البايزية تسمح بتقدير عدم اليقين المرتبط بمعلمات شبه التباين، وتُقلِّل من التحيز الذي قد تسببه الطرائق التقليدية عند وجود أنماط اتجاهية أو بيانات غير مستقرة إحصائياً [11]. وهذا ما يجعلها الأنسب لتمثيل التدرج المكاني الواضح الذي أظهرته بيانات مناسيب المياه في منطقة الدراسة.

- خريطة فوريونوي (Voronoi Map) (الشكل رقم 6): أظهرت تجمعاً للمضلعات ذات القيم العالية (الداكنة) في الجزء الجنوبي الغربي، متوافقاً مع نتائج تحليل الاتجاه، مما يؤكد وجود نمط مكاني واضح.



الشكل رقم (6): خريطة Voronoi Map تُظهر التباين المكاني المحلي للمنسوب.

- الارتباط الذاتي المكاني (Semivariogram/Covariance Cloud) (الشكل رقم 7): أظهرت كثافة عالية للنقاط ذات قيم شبه التباين المنخفضة عند المسافات القصيرة، مما يؤكد وجود ارتباط مكاني قوي بين الآبار القريبة من بعضها، وهو شرط أساسي لدعم إمكانية تطبيق تقنيات Kriging بنجاح [25].



الشكل رقم (7): مخطط Semivariogram يظهر وجود ارتباط مكاني قوي على المسافات القصيرة.

6-2- تقييم دقة النموذج باستخدام اختبار الاسترجاع المتقاطع (Cross-Validation):

أظهرت نتائج الاسترجاع المتقاطع (Cross-Validation) لنموذج EBK دقة تنبؤ معقولة. بلغت قيمة جذر متوسط مربعات الخطأ (RMSE) 8.577 m، وهي قيمة تمثل حوالي 11.3% من المدى الكلي للبيانات (76 م)، مما يشير إلى أن متوسط خطأ التنبؤ يقع ضمن الحدود المقبولة في الدراسات الهيدروجيولوجية لمناطق ذات تباين طبوغرافي وهيدرولوجي معقد [22]. يُعزى هذا الخطأ، بشكل رئيسي، إلى عاملين مترابطين: تباعد الآبار والتعقيد الجيولوجي المحلي. فبالنظر إلى خريطة خطأ التنبؤ (الشكل رقم 12)، نلاحظ أن أعلى قيم للخطأ تتمركز في الأطراف الشمالية الشرقية (منطقة حدرات) والجنوبية الشرقية (منطقة جبرين)، حيث تقل كثافة الآبار بشكل ملحوظ، مما يؤدي إلى زيادة عدم اليقين في تقديرات النموذج في تلك المناطق (أي خطأ ناتج عن ضعف التغطية المكانية). أما العامل الثاني، فيتمثل في البنية الجيولوجية المعقدة لمنطقة الدراسة؛ إذ تتضمن ترسبات الميوسين والرسوبيات الحديثة التي قد يحدث فيها تغيرات مفاجئة في النفاذية أو سمك الطبقة الحاملة، إضافة إلى احتمالية وجود صدوع محلية صغيرة لا يمكن للنموذج الإحصائي التقاطها بدقة بالاعتماد على المتغير الوحيد (المنسوب). هذه العوامل مجتمعة تفسر الجزء المتبقي من التباين غير المفسر (37%) وتساهم في قيمة RMSE الملاحظة، وهي قيمة منطقية في ظل هذين التحديين. أما معامل التحديد (R^2) فقد بلغ 0.63، مما يعني أن النموذج يفسر حوالي 63% من التباين الكلي في بيانات المنسوب. هذه القيمة مقبولة في ضوء العوامل المؤثرة الأخرى غير المضمنة في النموذج (مثل التغذية المحلية، التباين في النفاذية، تأثير الضخ الموضعي) [15]. تجدر الإشارة إلى أن دراسة حديثة في أريزونا باستخدام EBK أسفرت عن قيم R^2 مماثلة (0.63) خلال مرحلة التحقق، مما يؤكد أن هذه القيم تمثل أداءً معقولاً للنماذج الجيواحصائية في الظروف الهيدروجيولوجية المعقدة [26].

يشير الجزء المتبقي من التباين (37%) إلى وجود عوامل جيولوجية وهيدرولوجية محلية لم يتم أخذها في الاعتبار، مثل تغير سمك الطبقة الحاملة أو وجود صدوع محلية تؤثر على التدفق. كما أشار متوسط الخطأ (ME) القريب من الصفر (0.503) إلى انحياز ضئيل جداً في التقديرات.

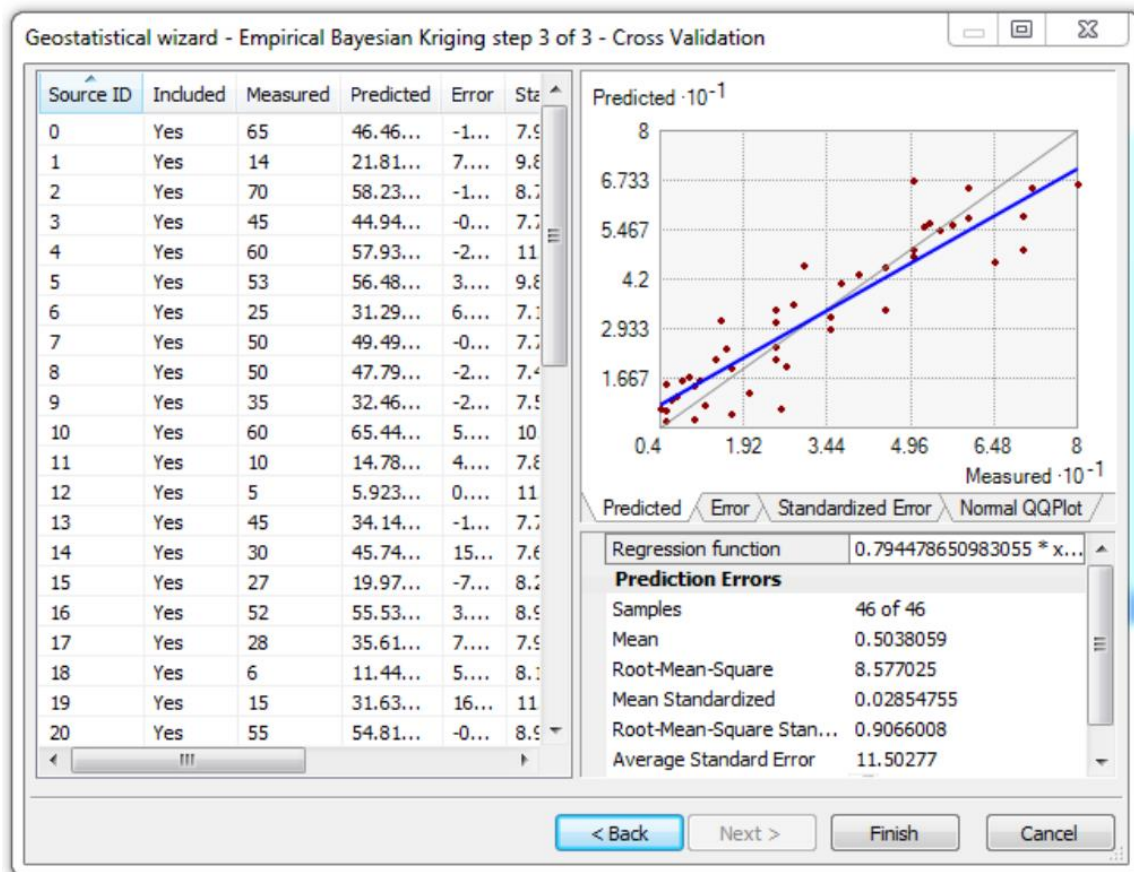
علاوة على ذلك، فإن قيمة جذر متوسط مربعات الخطأ المعياري (Root-Mean-Square Standardized) البالغة 0.906، والقريبة من قيمتها المثالية (1)، تدل على أن النموذج قدّر مستويات عدم اليقين (Standard Error) المرتبطة بتنبؤاته بدقة وموثوقية عاليتين. تدعم هذه المؤشرات الإحصائية مجتمعة مدى ملاءمة نموذج EBK المطبق وتمكنه من تقديم تنبؤات رصينة تدعم عمليات اتخاذ القرار في مجال إدارة الموارد المائية [23].

الجدول رقم (2): مقارنة أداء طرق الاستيفاء المكاني المختلفة بناءً على قيمة جذر متوسط مربعات الخطأ (RMSE) المستخرجة من التحقق المتقاطع.

الطريقة	Root-Mean-Square Error (RMSE) (m)
Empirical Bayesian Kriging (EBK)	8.577
Radial Basis Functions (Spline with Tension)	9.076
Radial Basis Functions (Completely Regularized Spline)	9.304
Inverse Distance Weighting (IDW)	9.994
Ordinary Kriging (Gaussian) / Universal Kriging (Gaussian)	10.648
Ordinary Kriging (Spherical) / Universal Kriging (Spherical)	10.649
Ordinary Kriging (Exponential) / Universal Kriging (Exponential)	10.706
Local Polynomial Interpolation (Exponential)	11.523
Simple Kriging (Exponential)	11.956
Simple Kriging (Spherical)	12.332
Simple Kriging (Gaussian)	12.611
Global Polynomial Interpolation	13.648

لتحديد الطريقة الأكثر دقة واعتمادها للبحث، تم تجربة عدة نماذج ومقارنة قيم RMSE لكل الطرق المجربة. يوضح الجدول رقم (2) قيم RMSE لخمس عشرة طريقة استيفاء مختلفة، مرتبة تصاعدياً حسب الدقة (كلما قل RMSE زادت دقة الطريقة). تبين أن طريقة EBK هي الأكثر دقة (RMSE = 8.577)، متبوعة بطريقة Radial Basis Functions (Spline with Tension) (RMSE = 9.076)، ثم Radial Basis Functions (Completely Regularized Spline) (RMSE = 9.304)، ثم IDW (RMSE = 9.994). يتوافق هذا مع دراسة Tirol Kırçiçek وآخرون (2024) [14] التي أظهرت تفوق EBK في بيانات ذات كثافة متوسطة، خاصة في الأحواض الرسوبية.

كما تبين من المقارنة أن Ordinary Kriging (Gaussian) (RMSE = 10.648) أعطى دقة أفضل من Ordinary Kriging (Spherical) (RMSE = 10.649) بفارق بسيط جداً، وهو اكتشاف جديد مقارنة بدراسة عبد الرحمن وآخرون (2013) [2] التي وجدت تفوقاً للنموذج الكروي في سهل جبلة-اللاذقية. هذا يشير إلى خصوصية البنية المكانية لبيانات منطقة حلب، حيث قد يعكس النموذج الغاوسي طبيعة أكثر نعومة واستمرارية في توزيع المنسوب. كما لوحظ تطابق في قيم RMSE بين Ordinary Kriging و Universal Kriging عند استخدام نفس نموذج الفاريوغرام، مما يشير إلى أن إضافة اتجاه شامل (Universal) لم يحسن الدقة بشكل ملحوظ نظراً لضعف الاتجاه العام أو محدودية البيانات. جاءت طرق Simple Kriging والاستيفاء متعدد الحدود (Global Polynomial) في ذيل القائمة من حيث الدقة، مما يؤكد عدم ملاءمتها لهذا النوع من البيانات.



الشكل رقم (8): مخطط التشتت بين القيم المرصودة والمتوقعة من نموذج Empirical Bayesian Kriging.

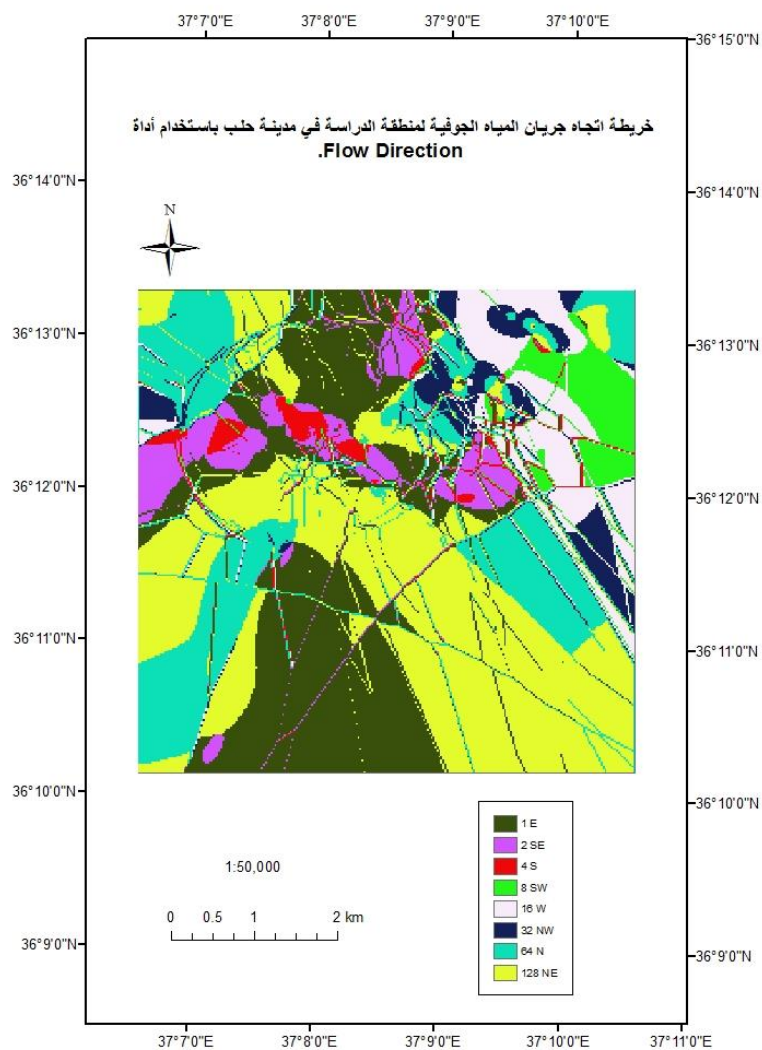
3-6- اتجاه الجريان في السياق الجيولوجي المحلي:

يتجه الجريان العام للمياه الجوفية من الجنوب الغربي إلى الشمال الشرقي، بشكل عمودي تقريباً على خطوط الكنتور. هذا الاتجاه يتوافق مع الانحدار الطبوغرافي العام للمنطقة (من سفوح جبل سمعان باتجاه وادي نهر قويق)، ويعكس التكوين الجيولوجي السائد الذي يتمثل في ترسبات الميوسين والرسوبيات الحديثة التي تتحدر باتجاه الشمال الشرقي.

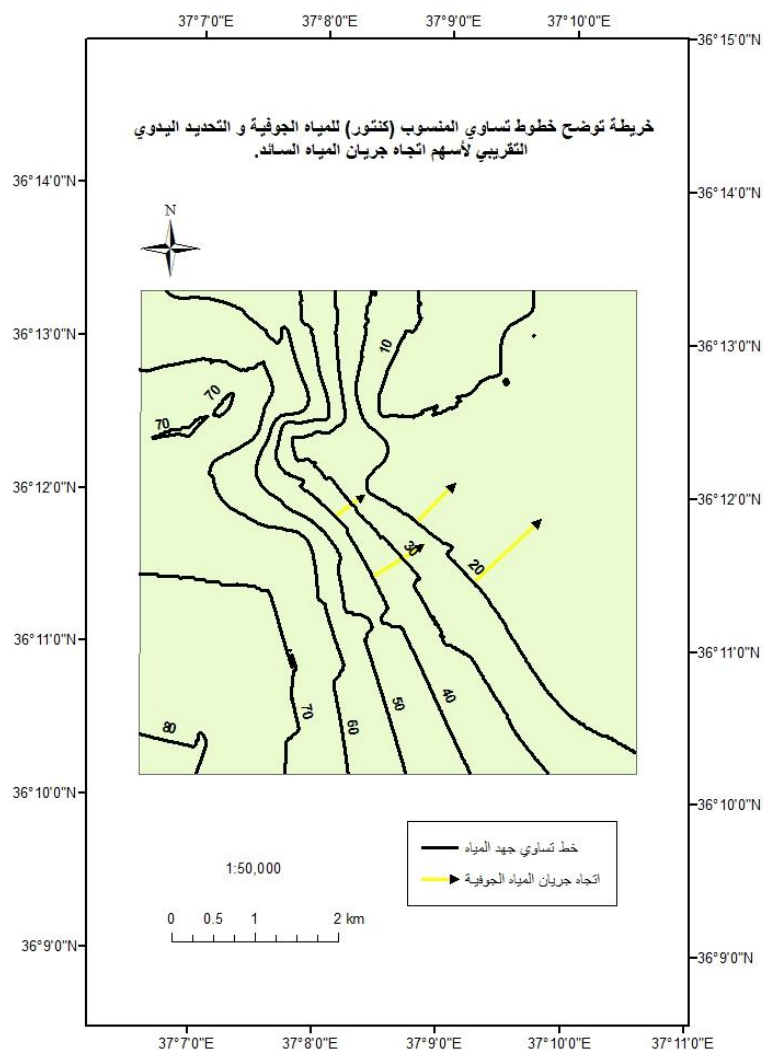
من الناحية الجيولوجية، تقع منطقة الدراسة ضمن حوض حلب الرسوبي، حيث تتكون الطبقات الحاملة للمياه بشكل رئيس من تكوينات الكريتاسي والنيوجين [27]. إن وجود نهر قويق في الجزء الشرقي من المدينة قد يعمل كم منطقة تصريف طبيعي، مما يعزز اتجاه الجريان نحو الشمال الشرقي. تشير الدراسات الهيدروجيولوجية السابقة إلى أن التغذية الرئيسية للخزانات الجوفية في حلب تأتي من المرتفعات الجنوبية الغربية (منطقة جبل سمعان)، حيث تتكشف التكوينات الكلسية ذات النفاذية العالية [18].

بالمقارنة مع دراسة أجريت على الآبار العميقة في منطقة جبل الحص (جنوب غرب حلب)، أظهرت النتائج وجود نمط مشابه لاتجاه الجريان، حيث تزداد الملوحة باتجاه الشمال الشرقي، مما يؤكد وجود جريان منتظم من الجنوب الغربي باتجاه الشمال الشرقي [28]. هذا التوافق مع الدراسات السابقة يعزز مصداقية النموذج الحالي ويؤكد أن اتجاه الجريان المستنتج يعكس السلوك الهيدروديناميكي الفعلي للنظام المائي الجوفي في المنطقة.

إن استخدام أداة Flow Direction المستندة إلى خوارزمية D8 [13] وفر تمثيلاً كمياً دقيقاً لاتجاهات الجريان على مستوى الخلية (الشكل رقم 9)، متغلباً على القيود المرتبطة بالتحديد اليدوي التقريبي للأسهم (الشكل رقم 10).



الشكل رقم (9): خريطة اتجاه جريان المياه الجوفية لمنطقة الدراسة في مدينة حلب باستخدام أداة .Flow Direction



الشكل رقم (10): خريطة توضح خطوط تساوي المنسوب (كنتور) للمياه الجوفية والتحديد اليدوي التقريبي لأسهم اتجاه الجريان السائد.

6-4- التحليل المناخي وتقدير التغذية الجوفية:

للظروف المناخية دور حاسم في موارد المياه بمنطقة حلب. يوضح الجدول رقم (3) البيانات المناخية المتوفرة لمدينة حلب للفترة 1970-2024 الصادرة عن المديرية العامة للأرصاد الجوية [6]. تشير البيانات إلى تباين كبير في الهطول المطري السنوي وارتفاع قيم التبخر، مع اتجاه عام نحو انخفاض الهطول وارتفاع درجات الحرارة في العقود الأخيرة.

يمكن تقدير التغذية الجوفية التقريبية (R) باستخدام معادلة بسيطة تأخذ في الاعتبار الهطول (P) والتبخر (ET):

$$R = P - ET \quad (3)$$

تشير المعادلة المبسطة رقم (3) إلى وجود عجز مائي أو ضالة في التغذية الجوفية المباشرة في معظم السنوات. إلا أن هذه المعادلة تعد تبسيطاً مفرطاً يتجاهل عدة عوامل هيدرولوجية مهمة، أبرزها الجريان السطحي (Runoff) ومعامل الترشيح

(Infiltration coefficient) الذي يعتمد على نوع التربة والغطاء النباتي والبنية الجيولوجية [29]. في المناطق الجافة وشبه الجافة، تشكل نسبة كبيرة من الهطول جرياناً سطحياً أو تتبخر قبل أن تتاح لها فرصة الترشيح.

الجدول رقم (3): البيانات المناخية السنوية المتوفرة من محطة حلب خلال الفترة 1970-2024 [6].

متوسط الحرارة (°C)	متوسط الرطوبة (%)	التبخر (mm)	الهطول المطري (mm)	السنة
18.03	60.92	2067	182.1	1970
17.23	63.42	1896	392.6	1971
16.32	59.42	1635	294.5	1972
17.17	54.83	1944	277.8	1973
17.33	59.33	1743	407.8	1974
17.28	57.17	1848	306.6	1975
16.86	61.92	1536	436.1	1976
17.48	59.33	1641	354.2	1977
17.78	57.42	1842	300.5	1978
18.20	60.58	1638	322.9	1979
17.20	60.91	1539	334.2	1980
17.91	60.77	1500	399.1	1981
16.73	60.13	1464	319.2	1982
16.80	62.48	1422	285.6	1983
17.35	59.15	1500	240.6	1984
17.61	57.77	1620	317.7	1985
17.95	60.05	1503	317.2	1986
17.39	59.63	1410	400.8	1987
17.14	64.06	1278	499.3	1988
18.00	56.20	1536	144.1	1989
17.81	58.29	1650	305.5	1990
18.25	57.57	1505	330.7	1995
17.73	56.69	1757	290.3	2000
18.02	56.84	1629	315.1	2005
17.46	55.24	1553	280.9	2010
18.93	57.83	1589	300.6	2015
18.39	56.89	1604	275.5	2020
18.84	57.67	1621	310.2	2024

تشير الدراسات الحديثة في المناطق الجافة إلى أن نسبة التغذية الجوفية الفعلية لا تتجاوز 4-1% من إجمالي الهطول المطري [30]. ففي دراسة أجريت في جنوب غرب السعودية، قدرت التغذية الجوفية بحوالي 3.57% من الهطول باستخدام طريقة توازن الكلوريد [31]. هذا يعني أن التغذية السنوية في منطقة حلب لا تتجاوز 12-6 ملم/سنة، وهي قيمة متوافقة مع النتائج المستخلصة من دراسة العلاقة بين المياه السطحية والجوفية في حوض القويق [16] والتي قدرت التغذية الجوفية في حوض الزراع بحوالي 35-20 ملم/سنة (15-10% من الهطول) في المناطق ذات النفاذية العالية.

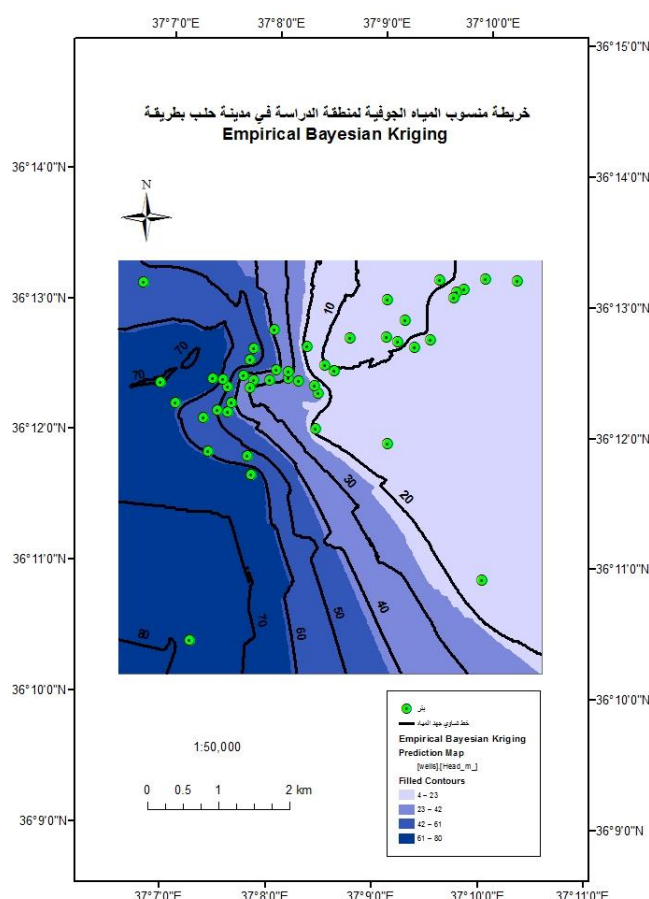
النتيجة السلبية للتغذية (عجز مائي) التي توحى بها المعادلة المبسطة لا تعني بالضرورة جفاف الخزان الجوفي، بل تؤكد أن الخزان يعتمد بشكل أساسي على التغذية الجانبية القادمة من المناطق المرتفعة (الجنوب الغربي) أو على مياه جوفية قديمة

(أحفورية) تم تخزينها خلال فترات مناخية أكثر رطوبة [29]. هذا يتوافق تماماً مع نتائج النموذج التي تظهر جرياناً منظماً من الجنوب الغربي، مما يدعم فرضية أن التغذية الجانبية هي الآلية الرئيسية للحفاظ على المخزون، وليس التغذية المباشرة من الأمطار المحلية. هذا الربط بين تحليل المنسوب (الذي يظهر جرياناً أفقياً) وتحليل التغذية (الذي يظهر عجزاً في التغذية العمودية) يقوي الفهم الشامل لديناميكية النظام المائي الجوفي في المنطقة.

6-5- خريطة منسوب المياه الجوفية:

أظهرت الخريطة الناتجة عن طريقة EBK (الشكل رقم 11) اتساقاً عاماً في تصوير النمط الأساسي لتوزيع مناسيب المياه الجوفية. تُظهر الخريطة تدرجاً مكانياً واضحاً يتجه من الجنوب الغربي (قيم منسوب أعلى، ممثلة بألوان داكنة) نحو الشمال الشرقي (قيم منسوب أدنى، ممثلة بألوان فاتحة). تم قص الخريطة باستخدام قناع (Mask) يطابق الحدود الإدارية لمنطقة الدراسة لتجنب الاستيفاء خارج نطاق البيانات الموثوقة، مما يحسن من دقة التمثيل المكاني.

يتوافق هذا النمط تماماً مع نتائج تحليل الاتجاه الإحصائي الاستكشافي ويحدد الاتجاه العام للجريان من مناطق أعلى طاقة هيدروليكية (جنوب غرب) نحو مناطق أقل طاقة (شمال شرق). يعزى هذا النمط بشكل رئيسي إلى طبوغرافيا المنطقة والتكوينات الجيولوجية الحاملة للمياه، حيث تتبع حركة المياه الجوفية التدرج الهيدروليكي العام [12].



الشكل رقم (11): خريطة منسوب المياه الجوفية لمنطقة الدراسة في مدينة حلب بطريقة Empirical Bayesian Kriging.

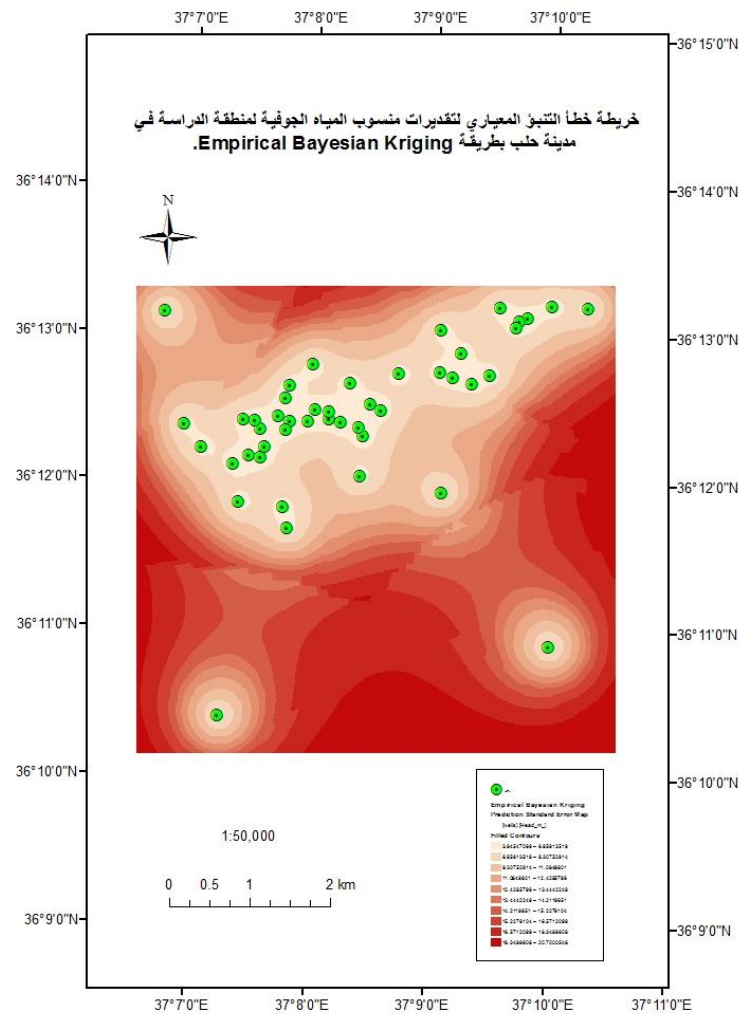
6-6- خريطة خطأ التنبؤ (Prediction Standard Error):

تُعتبر خريطة خطأ التنبؤ (الشكل رقم 12) من أهم مخرجات طرق الاستيفاء الجيوإحصائي، حيث توضح توزيع عدم اليقين في النموذج مكانياً [23]. بينما تُعطينا خريطة التنبؤ (Prediction Map) الصورة المتوقعة للظاهرة، فإن خريطة خطأ التنبؤ (Prediction Standard Error Map) تعطينا مقياس الثقة في هذه الصورة.

- **المناطق القريبة من نقاط العينات:** يكون خطأ التنبؤ منخفضاً (لون فاتح)، لأن النموذج يستند إلى بيانات حقيقية وقريبة. في هذه الدراسة، تتمركز أقل قيم لخطأ التنبؤ حول مواقع الآبار المرصودة، خاصة في المناطق ذات الكثافة العالية للآبار في النصف الشمالي من الخريطة (وسط، غرب، شمال شرق، وشمال منطقة الدراسة).
- **المناطق البعيدة عن نقاط العينات:** يزداد خطأ التنبؤ (لون داكن)، لأن النموذج يقوم بعملية استقراء (Extrapolation) في فراغ من البيانات. في هذه الدراسة، تزداد قيم الخطأ في الأطراف الشرقية والجنوبية الشرقية والجنوبية والغربية حيث تقل كثافة الآبار.

الاستخدامات العملية لهذه الخريطة:

1. **تحديد موثوقية النموذج:** يمكن لصانع القرار أن ينظر إلى الخريطة فيعرف أي الأجزاء من الخريطة الأساسية يمكن الوثوق بها وأنها يجب التعامل معه بحذر.
2. **تحسين شبكة العينات (Sampling Network):** إذا تم التخطيط لجولة ميدانية جديدة لأخذ عينات إضافية، فإن خريطة خطأ التنبؤ هي الدليل. يجب التوجه إلى المناطق ذات الخطأ المرتفع (الأطراف الشرقية والجنوبية الشرقية والجنوبية والغربية) لأخذ عينات جديدة، لأن إضافة بيانات هناك سيحسن النموذج بشكل كبير ويقلل من عدم اليقين الكلي.
3. **الامتثال التنظيمي:** في مجالات مثل العلوم البيئية، قد تحتاج الجهات المعنية إلى تقديم خريطة توضح ليس فقط توقع التوزيع ولكن أيضاً مدى التأكد من هذه التوقعات. طرق الاستيفاء التقليدية مثل IDW تعطي خريطة واحدة فقط (القيم المنتبأ بها)، لكنها لا تستطيع حساب أو إظهار مدى خطأ هذا التنبؤ. هذه هي الميزة الجوهرية للطرق الإحصائية الجغرافية: تقدير عدم اليقين. وجود خريطة التنبؤ بدون خريطة الخطأ يعطي صورة غير مكتملة. الالتئان معاً تشكّلان أداة تحليلية متكاملة لفهم الظاهرة المكانية بشكل صحيح.



الشكل رقم (12): خريطة خطأ التنبؤ لمنطقة الدراسة في مدينة حلب بطريقة Empirical Bayesian Kriging.

7- الاستنتاجات:

أسفرت الدراسة عن مجموعة من الاستنتاجات الرئيسية التي تُلقِي الضوء على سلوك النظام المائي الجوفي في منطقة الدراسة بمدينة حلب. أولاً، تمكّن النموذج المكاني من تحديد اتجاه الجريان العام للمياه الجوفية بدقة، والذي يتجه من الجنوب الغربي (حيث تتراوح المناسيب بين 70-80 m) نحو الشمال الشرقي (حيث تتخفض المناسيب إلى 4-10 m). هذا الاتجاه يتوافق مع الانحدار الطبوغرافي العام للمنطقة (من سفوح جبل سمعان نحو وادي قويق) ومع التكوين الجيولوجي السائد، وقد تم استخلاصه كمياً باستخدام أدوات تحليل الاتجاه الرقمية في GIS بدلاً من التحديد اليدوي التقريبي.

ثانياً، أظهرت طريقة (Empirical Bayesian Kriging (EBK أداءً مقبولاً في نمذجة السطح الجوفي، حيث بلغ جذر متوسط مربعات الخطأ (RMSE) 8.577 m (أي ما يعادل 11.3% من المدى الكلي للمناسيب)، وبلغ معامل التحديد (R^2) 0.63، مما يعني أن النموذج يفسر 63% من التباين المكاني للمناسيب. هذه القيم تتسجم مع نتائج دراسات مشابهة في مناطق جافة وشبه جافة [26]، ويُعزى الجزء غير المفسر من التباين (37%) إلى عوامل محلية كالتهجير في النفاذية،

وتباعد الآبار في بعض المناطق، والتعقيدات الجيولوجية التي لم يستطع النموذج التقاطها بالاعتماد على متغير المنسوب فقط.

ثالثاً، بينت المقارنة بين طرق الاستيفاء (الجدول رقم 2) تفوق طريقة EBK من حيث الدقة ($RMSE=8.577\text{ m}$)، تلتها طرق (Completely Regularized Spline ($RMSE=9.076\text{ m}$) Spline with Tension ثم ($RMSE=9.304$) IDW ($RMSE=9.994\text{ m}$) m) كما لوحظ أن نموذج Ordinary Kriging الغاوسي أعطى دقة أفضل من نظيره الكروي بفارق طفيف، مما يعكس خصوصية البنية المكانية للبيانات في هذه المنطقة.

رابعاً، كشفت خريطة خطأ التنبؤ (الشكل رقم 12) أن أعلى حالات عدم اليقين تتركز في الأجزاء الشمالية الشرقية (منطقة حندرات) والجنوبية الشرقية (منطقة جبرين) حيث تقل كثافة الآبار، مما يحدد بدقة الأولويات المستقبلية لتوسيع شبكة المراقبة.

خامساً، أكدت التحليلات المناخية الأولية أن التغذية الجوفية المباشرة من الأمطار المحلية ضئيلة للغاية (تقدر بنحو 3-4% من الهطول السنوي فقط)، مما يعزز الفرضية القائلة بأن الخزان الجوفي يعتمد بشكل رئيسي على التغذية الجانبية القادمة من المرتفعات الجنوبية الغربية، وهو ما يتوافق تماماً مع اتجاه الجريان المستنتج من النموذج ويدعمه.

سادساً، تمثل الخرائط والنتائج المنتجة (خريطة المنسوب، خريطة خطأ التنبؤ، خريطة اتجاه الجريان) أداة علمية تطبيقية يمكن للجهات المعنية (مؤسسة مياه حلب، مديرية الموارد المائية) الاعتماد عليها في وضع خطط إدارة مستدامة للموارد المائية الجوفية، وتحديد مناطق أولوية للحماية، وتوجيه جهود المراقبة المستقبلية.

8- التوصيات:

بناءً على النتائج والقيود التي كشفت عنها الدراسة، يُوصى باتخاذ مجموعة من الإجراءات العملية لتحسين إدارة المياه الجوفية في المنطقة:

أولاً، توسيع شبكة المراقبة استناداً إلى خريطة خطأ التنبؤ، وذلك بحفر آبار مراقبة جديدة أو إضافة نقاط قياس دورية في المناطق الأكثر حاجة، وتحديداً في الجزء الشمالي الشرقي (محيط حندرات) والجزء الجنوبي الشرقي (منطقة جبرين)، حيث ترتفع قيم عدم اليقين.

ثانياً، تطوير النماذج المستقبلية عبر إدماج متغيرات مساعدة (مثل سمك الطبقة الحاملة، النفاذية الهيدروليكية، نموذج الارتفاع الرقمي) باستخدام تقنية Co-Kriging لرفع القدرة التفسيرية وتحسين دقة التنبؤ. كما يُقترح تطبيق نموذج عددي جوفي (MODFLOW) للاستفادة من النتائج الحالية كشرط حدي أولي.

ثالثاً، حماية الموارد المائية من التلوث عبر استخدام خريطة اتجاه الجريان (الشكل رقم 9) لتحديد مناطق الحماية المباشرة وغير المباشرة للآبار، ومنع إقامة الأنشطة عالية الخطورة (كمكبات النفايات ومحطات الصرف الصحي) في مناطق التغذية الرئيسية (الجنوب الغربي) وعلى طول مسارات الجريان المؤدية إلى آبار الشرب.

رابعاً، إنشاء نظام مراقبة زمني يعتمد على قياسات دورية (ربع سنوية على الأقل) للآبار نفسها، لمتابعة التغيرات الموسمية والسنوية في المناسيب وتقييم تأثير التغير المناخي وعمليات الضخ. يُفضل تركيز المراقبة على الآبار ذات المنسوب المنخفض في الشمال الشرقي لرصد أي تدهور إضافي.

خامساً، بناء القدرات وتعزيز الاستمرارية عبر تنظيم دورات تدريبية متخصصة للعاملين في القطاع المائي على استخدام تقنيات GIS والاستيفاء الجيوإحصائي، وتطوير برامج نصية (Python scripts) لأتمتة عمليات التحليل وتحديث النماذج

بشكل دوري. كما نوصي بتعميم نفس المنهجية على مناطق أخرى في المحافظة (كمنطقة السفيرة والباب وعفرين) مع تخصيص جزء من البيانات (20%) للتحقق المستقل في الدراسات المستقبلية.

9- القيود والتحديات:

تواجه هذه الدراسة بعض القيود التي يجب أخذها في الاعتبار عند تفسير النتائج والتوصيات. أولها محدودية عدد ونطاق توزيع الآبار؛ فرغم أن 46 بئراً كانت كافية لتحديد النمط العام، إلا أن التغطية المكانية غير متجانسة، خاصة على الأطراف الشمالية الشرقية والجنوبية الشرقية، مما أدى إلى ارتفاع خطأ التنبؤ في تلك المناطق كما هو موضح في خريطة خطأ التنبؤ. ثانياً، الاعتماد على متغير واحد (المنسوب) دون وجود بيانات جيولوجية وهيدروجيولوجية مساعدة (كالنفذية والسمك) حال دون استخدام تقنيات استيفاء أكثر تقدماً (Co-Kriging) التي قد تحسن الدقة. ثالثاً، تم استخدام التحقق المتقاطع فقط (Cross-Validation) لتقييم النموذج، وهو أسلوب داخلي قد يعطي تقاولاً مفرطاً مقارنة باستخدام مجموعة تحقق مستقلة (Validation set)؛ حيث لم يتسنَّ تخصيص جزء من البيانات لهذا الغرض نظراً لقلتها، ويُفضل في الدراسات المستقبلية تخصيص 20% من البيانات للتحقق المستقل لتعزيز مصداقية النماذج [22]. وأخيراً، الطبيعة الزمنية الثابتة للبيانات (فترة الجفاف 2022 فقط) لا تسمح بدراسة التغيرات الموسمية أو السنوية في مناسيب المياه، وهي جوانب ضرورية لفهم ديناميكية النظام المائي بشكل أشمل.

10- المراجع:

1. البنك الدولي. (2021). تقرير عن المياه في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. واشنطن العاصمة: البنك الدولي.
2. عبد الرحمن، ع.، عمار، غ.، خضور، ر. (2013). التنبؤ بخريطة تساوي مناسيب المياه الجوفية الحرة باستخدام طرائق الإحصاء المكاني في سهل جبلة-اللاذقية. مجلة جامعة تشرين للعلوم الهندسية، 35(7).
3. تحسين، جميل م. (2022). نمذجة خرائط البعد الثالث لمناسيب المياه الجوفية في قضاء كركوك (رسالة ماجستير غير منشورة). جامعة تكريت.
4. محمد صالح، أ. (2023). تقييم عرضة المياه الجوفية للتلوث في مدينة كركوك باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد. مجلة الهندسة والتنمية المستدامة، 27(2)، 45-60.
5. حجي، ع. (2024). تقنية جديدة لرسم خرائط المياه الجوفية في المنطقة العربية. نيتشر ميدل إيست.
6. المديرية العامة للأرصاد الجوية – محطة حلب. (2024). البيانات المناخية.
7. Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press.
8. Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2001). *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. Esri Press.
9. Krivoruchko, K. (2012). *Empirical Bayesian Kriging: Implemented in ArcGIS Geostatistical Analyst*. Esri Press.
10. Pilz, J., & Spöck, G. (2008). Why do we need and how should we implement Bayesian kriging methods. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22(5), 621–632.
11. Gribov, A., & Krivoruchko, K. (2020). Empirical Bayesian kriging implementation and usage. *Science of the Total Environment*, 722, 137290.

12. Wisenor, W. D., & Butler, E. P. (2020). *Hydrogeologic properties of earth materials and principles of groundwater flow*. Groundwater Project.
13. Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2024). *How Flow Direction works*. ArcGIS Pro Documentation.
14. Tirol Kırççek, N., Baba, A., Koçbay, A., & Toklu, M. M. (2024). Evaluation of GIS-based spatial interpolation methods for groundwater level: A case study of Türkiye. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 33(5), 576-591.
15. Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91-109.
16. Abo, R. K., & Merkel, B. J. (2014). Comparative estimation of the potential groundwater recharge in Al Zerba catchment of Aleppo basin, Syria. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(12), 5229-5244.
17. Jha, M. K., Chowdhury, A., Chowdary, V. M., & Peiffer, S. (2007). Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: Prospects and constraints. *Water Resources Management*, 21(2), 427-467.
18. Stadler, S., Geyh, M.A., Ploethner, D. & Koeniger, P. (2012). The deep Cretaceous aquifer in the Aleppo and Steppe basins of Syria: assessment of the meteoric origin and geographic source of the groundwater. *Hydrogeology Journal*, 20(5), 1007-1026.
19. GADM. (2022). *GADM database of Global Administrative Areas*, version 4.1.
20. Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2020). *ArcGIS Desktop: ArcMap*.
21. Oliver, M. A., & Webster, R. (2015). *Basic steps in geostatistics: The variogram and kriging*. Springer.
22. Lal, A., Sharan, A., Sharma, K., Ram, A., Roy, D. K., & Datta, B. (2024). Scrutinizing different predictive modeling validation methodologies and data-partitioning strategies: new insights using groundwater modeling case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(7), 623.
23. Li, J., & Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53, 173-189.
24. Ghasemi, A., & Zahediasl, S. (2012). Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10(2), 486-489.
25. Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists* (2nd ed.). Wiley.
26. Zowam, F. J., & Milewski, A. M. (2024). Groundwater Level Prediction Using Machine Learning and Geostatistical Interpolation Models. *Water*, 16(19), 2771.
27. Ponikarov, V. P. (1967). *The geological map of Syria, scale 1:200,000, sheets I-36-XVIII and I-37-XIII*. Ministry of Industry, Damascus.
28. Atomic Energy Commission of Syria. (2003). Chemical and environmental isotopic characteristics of deep aquifers systems in Jabal Al-Hass (Aleppo area). *AECS-G/FRSR--297*.

29. Soliman, K. M. A., Amin, D., Bekhit, H. M., & Hafiz, M. G. E. (2024). Estimating natural groundwater recharge taking into consideration temporal and spatial variability for arid unconfined aquifer. *Water Science*, 38(1), 359-377.
30. Scanlon, B. R., Keese, K. E., Flint, A. L., Flint, L. E., Gaye, C. B., Edmunds, W. M., & Simmers, I. (2006). Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, 20(15), 3335-3370.
31. Masoud, M., El Osta, M., Basahi, J., Niyazi, B., Al-Amari, N., Halawani, R., Alqaraawi, A., & Schneider, M. (2025). Groundwater Recharge Estimation Based on Environmental Isotopes, Chloride Mass Balance and SWAT Model in Arid Lands, Southwestern Saudi Arabia. *Water*, 12(11), 306.