



ISSN: 2957-3874 (Print)

Journal of Al-Farabi for Humanity Sciences (JFHS)

<https://iasj.rdd.edu.iq/journals/journal/view/95>

مجلة الفارابي للعلوم الإنسانية تصدرها جامعة الفارابي



تصميم وتطوير واختبار النماذج الخرائطية للتنبؤ بالمخاطر الجيومورفولوجية في ناحية

سيدكان

أ.م.د. سلام سعود حسين داود

جامعة تكريت، كلية التربية للبنات، قسم الجغرافية

**Design, Development, and Testing of Cartographic Models for Predicting
Geomorphological Hazards in Sidkan Subdistrict**

Asst. Prof. Dr. Salam Saud Hussein Dawood

**University of Tikrit, College of Education for Women, Department of
Geography**

Salam.s@tu.edu.iq □

ملخص:

يهدف البحث إلى التنبؤ بالمخاطر الجيومورفولوجية في ناحية سيدكان من خلال بناء نماذج خرائطية تعتمد على دمج العوامل الطبيعية ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية وتقنيات الاستشعار عن بعد. وقد شملت الدراسة تحليل عوامل الانحدار والارتفاع والبنية الجيولوجية ونوع التربة وشبكة التصريف المائي والغطاء النباتي، وتحويلها إلى طبقات مكانية جرى دمجها لإنتاج نموذج تنبؤي صُنفت نتائجه إلى خمس فئات للمخاطر. ركزت الدراسة على مقارنة كفاءة عدة أساليب خرائطية في تمثيل المخاطر الجيومورفولوجية، شملت خرائط الكوربيلث، والشبكات المنتظمة (المربعات والسداسيات)، والتمثيل المثلي، والخرائط ثلاثية الأبعاد. وتم تقييم دقة هذه النماذج باستخدام معايير إحصائية متعددة مثل الدقة الكلية، ومعامل كابا، وRMSE، ومعامل الارتباط، وAUC. توصلت الدراسة إلى أن أداء النماذج الخرائطية يتحسن بوضوح مع زيادة كفاءتها المكانية، إذ سجلت خرائط الكوربيلث أدنى دقة كلية (84.5%) ومعامل كابا (0.71) وأعلى خطأ (RMSE = 0.128)، مقابل تحسن تدريجي في الخرائط السداسية والمثلثية والمربعة، في حين حققت الخرائط ثلاثية الأبعاد أفضل النتائج الإحصائية متمثلة بأعلى دقة كلية (91.4%) وأعلى معامل كابا (0.82) وأعلى قدرة تمييز (AUC = 0.91) وأدنى قيمة للخطأ (RMSE = 0.089)، مما يؤكد تفوقها كأكثر النماذج موثوقية في التنبؤ والتحليل المكاني. توصي الدراسة باعتماد الخرائط ثلاثية الأبعاد كنموذج رئيسي في التحليل والتنبؤ المكاني نظراً لتفوقها الإحصائي وقدرتها العالية على تمثيل التعقيد المكاني بدقة، مع استخدام الخرائط المربعة والمثلثية كبدايات فعالة في الدراسات التطبيقية، والحد من الاعتماد على خرائط الكوربيلث في النمذجة التنبؤية الدقيقة واقتصارها على الأغراض الوصفية، بما يسهم في رفع موثوقية وكفاءة نتائج النماذج الخرائطية. الكلمات المفتاحية: المخاطر الجيومورفولوجية، النماذج الخرائطية، نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، التحليل المكاني، ناحية سيدكان.

Abstract:

This study aims to predict geomorphological hazards in Sidkan Subdistrict by constructing cartographic models that integrate natural factors within a Geographic Information System (GIS) environment and remote sensing techniques. The study analyzed factors including slope, elevation, geological structure, soil type, drainage network, and vegetation cover, converting them into spatial layers that were integrated to produce a predictive model. The results were classified into five hazard categories. The study focused on comparing the efficiency of several mapping approaches in representing geomorphological hazards, including choropleth maps, regular grids (square and hexagonal), triangular representation, and three-dimensional maps. The accuracy of these models was evaluated using multiple statistical measures such as overall accuracy, Kappa coefficient, RMSE, correlation coefficient, and AUC. The results indicated that the performance of cartographic models clearly improves with increasing spatial efficiency. Choropleth maps recorded the lowest overall accuracy (84.5%), Kappa coefficient

(0.71), and the highest error (RMSE = 0.128), while square, hexagonal, and triangular maps showed gradual improvement. Three-dimensional maps achieved the best statistical results, including the highest overall accuracy (91.4%), highest Kappa coefficient (0.82), highest discrimination ability (AUC = 0.91), and the lowest error (RMSE = 0.089), confirming their superiority as the most reliable models for spatial prediction and analysis. The study recommends adopting three-dimensional maps as the primary model for spatial analysis and prediction due to their statistical superiority and high capability in accurately representing spatial complexity, while using square and triangular maps as effective alternatives in applied studies. Reliance on choropleth maps for precise predictive modeling should be limited to descriptive purposes, thereby enhancing the reliability and efficiency of cartographic model outputs. **Keywords:** Geomorphological hazards, cartographic models, Geographic Information Systems (GIS), spatial analysis, Sidkan Subdistrict.

المقدمة:

توفر هذه الخرائط من قدرة بصرية عالية على تمثيل الظواهر الجغرافية بشكل دقيق ومبسط في آنٍ واحد. فالخرائط الجيومورفولوجية لا تقتصر على عرض التضاريس والظواهر السطحية، بل تتجاوز ذلك إلى نقل معلومات مركبة ومعقدة بطريقة تسهل على القارئ فهمها بسرعة، مما يجعلها أداة فعالة في التحليل والتفسير. ومن الناحية الخرائطية، فإن تصميم هذه النماذج يعتمد على مبادئ علمية دقيقة تأخذ بعين الاعتبار عناصر التمثيل المكاني، كالألوان، والرموز، والتدرجات، وأنظمة الإحداثيات، وهو ما يمنح الخريطة طابعاً وظيفياً يساعد على قراءة البيانات الجيومورفولوجية وتحليلها دون الحاجة إلى خبرة ميدانية مباشرة. كما تظهر هذه الخرائط العلاقات المكانية بين الظواهر، مثل ارتباط الانحدارات الشديدة بمواقع الانزلاقات الأرضية، أو تكرار الفيضانات في المناطق المنخفضة، وهو ما يوفر أساساً مرئياً لفهم ديناميكية الأرض في منطقة معينة. وتكمن قوة النماذج الخرائطية الجيومورفولوجية في قدرتها على تسريع عملية الإدراك لدى المستخدم؛ فهي توفر بيئة تحليل بصري فوري، حيث يمكن للمخطط أو الباحث أو حتى متخذ القرار أن يستوعب التوزيع الجغرافي للمخاطر خلال لحظات، بدلاً من الغوص في جداول وبيانات رقمية مطولة. هذه الميزة تعزز من دور الخريطة كأداة تواصل بصري فعالة، تجمع بين الدقة العلمية وسهولة الفهم، وتسهم في اتخاذ قرارات أكثر وعياً واستناداً إلى قراءة مكانية واضحة. وباستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وأساليب التصميم المتقدمة، أصبح بالإمكان تطوير خرائط جيومورفولوجية تفاعلية ومتعددة الأبعاد، تتيح تحليل الطبقات الجغرافية المختلفة بشكل متزامن، مما يضيف بعداً إضافياً للفهم المكاني ويجعل من هذه الخرائط أدوات تحليلية واستشرافية في آنٍ واحد.

مشكلة الدراسة

تعد خريطة المخاطر الجيومورفولوجية أداة أساسية في تفسير الظواهر المكانية ودعم اتخاذ القرار، إلا أن كفاءتها لا تتوقف على دقة النموذج التنبؤي فحسب، بل تتأثر بشكل مباشر بأسلوب التمثيل الخرائطي المستخدم في عرض البيانات. وفي منطقة ناحية سيدكان، ورغم إنتاج خرائط تنبؤية للمخاطر الجيومورفولوجية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، ما يزال هناك غموض في مدى قدرة الأساليب الخرائطية المختلفة على تمثيل مستويات المخاطر بدقة، وإبراز التباين المكاني الحقيقي بينها، وتقليل التشويه البصري وسوء الفهم الكارثوغرافي. ومن هنا تتمثل مشكلة الدراسة في عدم وضوح الأسلوب الخرائطي الأمثل لتمثيل خرائط المخاطر الجيومورفولوجية التنبؤية، ولا سيما عند استخدام تصنيفات متعددة للمخاطر، الأمر الذي يطرح تساؤلاً رئيساً مفاده (أي الأساليب الخرائطية أكثر كفاءة ودقة في تمثيل المخاطر الجيومورفولوجية وإيصال معناها المكاني للمستخدم؟).

فرضية الدراسة:

تطلق الدراسة من فرضية مفادها أن كفاءة تمثيل خرائط المخاطر الجيومورفولوجية تختلف باختلاف الأسلوب الخرائطي المستخدم، وأن الأساليب الخرائطية المعتمدة على الوحدات المكانية المنتظمة والتمثيل ثلاثي الأبعاد تظهر التباين المكاني للمخاطر بدرجة أوضح وأكثر دقة مقارنة بالأساليب التقليدية مثل خرائط الكوروبلث. كما تقترض الدراسة أن اختيار الأسلوب الخرائطي الملائم يسهم في تحسين القيم الإحصائية لدقة التمثيل الخرائطي وتقليل الخطأ المكاني، مما يعزز من موثوقية الخريطة وقدرتها على دعم التحليل المكاني واتخاذ القرار.

أهداف الدراسة

- ١- تقييم كفاءة الأساليب الخرائطية المختلفة في تمثيل خرائط المخاطر الجيومورفولوجية التنبؤية في ناحية سيدكان.
- ٢- مقارنة طرق التمثيل الخرائطي المستخدمة، والمتمثلة بطريقة الكوروبلث، والشبكات المنتظمة (شبكة المربعات والخلايا السداسية)، وتمثيل المثلاث، والتمثيل ثلاثي الأبعاد، من حيث وضوحها البصري وقدرتها على إبراز التباين المكاني للمخاطر.

٣- تحديد الأسلوب الخرائطي الأكثر ملاءمة ودقة في تمثيل مستويات المخاطر الجيومورفولوجية متعددة الفئات.

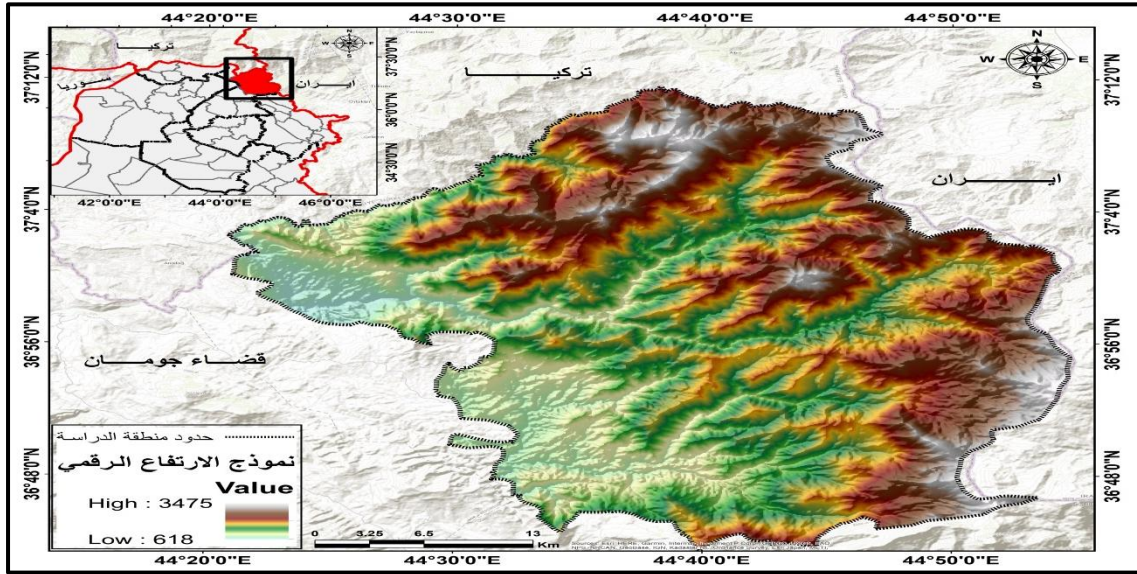
٤- تحليل أثر اختيار أسلوب التمثيل الخرائطي على دقة الخرائط المنتجة وموثوقيتها الكارثوغرافية.

٥- تقييم دقة النماذج الخرائطية بالاعتماد على المؤشرات الإحصائية المعتمدة، مثل معامل كبا، والدقة الكلية، ومعامل الارتباط، و RMSE، و AUC.

٦- تعزيز الدور التطبيقي لخرائط المخاطر الجيومورفولوجية في دعم التحليل المكاني واتخاذ القرار والتخطيط المكاني في منطقة الدراسة. **مناهج الدراسة** اعتمدت هذه الدراسة على مجموعة من المناهج الجغرافية التحليلية والتطبيقية لتحقيق أهدافها، حيث تم استخدام **المنهج الوصفي التحليلي** لدراسة العوامل الطبيعية المؤثرة في نشأة المخاطر الجيومورفولوجية وفهم العلاقة بينها وبين التباين المكاني لهذه المخاطر. كما تم الاستفادة من **المنهج الرقمي** من خلال تطبيق تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بعد لتحليل البيانات المكانية وإنتاج خرائط المخاطر. وقد تم دمج **المنهج المقارن** لتقييم كفاءة طرق التمثيل الخرائطي المختلفة، من خلال مقارنة طرق الكوربلث، الشبكات المنتظمة، المثلثات، والتمثيل ثلاثي الأبعاد، لتحديد الطريقة الأكثر ملاءمة ودقة. بالإضافة إلى ذلك، استخدمت الدراسة **المناهج الإحصائية** لتقييم دقة النماذج الخرائطية المستخرجة، وذلك عبر تطبيق مؤشرات مثل Kappa Coefficient، Overall Accuracy، و Correlation Coefficient، و RMSE، و AUC، بهدف ضمان موثوقية النتائج وقدرتها على دعم اتخاذ القرارات في إدارة المخاطر الجيومورفولوجية.

موقع منطقة الدراسة: تقع ناحية سيدكان في أقصى شمال شرق محافظة أربيل وهي إحدى نواحي قضاء سوران. تمتد منطقة الدراسة بين دائرتي عرض (٤٠° ٣٦' - ٤٠° ١٦') شمالاً، وخطي طول (٤٤° ٢٠' - ٤٤° ٥٦') شرقاً. تحيط بمنطقة الدراسة مجموعة من الحدود الإدارية والدولية، حيث تحدها تركيا من الشمال، وجمهورية إيران الإسلامية من الشرق، بينما يحدها من الجنوب ناحية خليفان التابعة لقضاء سوران، وتمتد حدودها الغربية لتلتقي بناحية حاج عمران وقضاء جومان خريطة (١). أما مساحة القضاء فقد بلغت نحو (١٥٤٣.٢٣) كم².

خريطة (١) موقع منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على نموذج الارتفاع الرقمي بدقة تمييزية ١٢.٥ متر، ومخرجات برنامج ArcGis.

مواد وطرق العمل:

١- **بناء نموذج تنبؤي بمخاطر الجيومورفولوجية في منطقة الدراسة:** يتم بناء النموذج بالاعتماد على الطبقات المكانية والخرائط الطبيعية للمنطقة، والتي تشمل: الارتفاع، الانحدار، نوع الصخور، كثافة الشبكة المائية، الغطاء الأرضي، التربة، وقسام السطح. بعد ذلك، يتم تحديد الأوزان النسبية لكل طبقة باستخدام برنامج JAHF، الذي يتيح تطبيق طريقة التحليل الهرمي (AHP) بدقة لتقدير أهمية كل عامل مؤثر في تقييم المخاطر الجيومورفولوجية. تعتمد طريقة AHP على إجراء المقارنات الثنائية بين المعايير لتحديد الأهمية النسبية لكل طبقة، وفق مقياس (Saaty, 1980) الذي يتراوح بين (١) للدلالة على الأهمية المتساوية و(٩) للدلالة على الأهمية القصوى، كما هو موضح في الشكل (٦). بعد ذلك، تم إعداد مصفوفة المقارنات البينية بين جميع الطبقات كما ورد في جدول (٩) لاستخراج الأوزان النهائية لكل معيار. ثم تم حساب نسبة الاتساق (Consistency Ratio - CR) للتحقق من منطقية ودقة هذه المقارنات، واعتمدت النتائج التي كانت فيها نسبة الاتساق أقل من (٠.١)، لضمان

موثوقية ودقة النتائج العلمية في تحديد تأثير كل طبقة على تقييم مستويات المخاطر المورفومناخية في المنطقة المدروسة، كما هو مبين في جدول (١) و (٢). تعد هذه الخطوة أساسية لضمان أن يكون النموذج التنبؤي مبنياً على أساس علمي دقيق، حيث تعكس الأوزان النسبية لكل طبقة مدى تأثيرها الحقيقي في عملية تقييم المخاطر، مما يساهم في إعداد خرائط دقيقة تساعد المخططين وصانعي القرار على اتخاذ التدابير الوقائية والتخطيطية المناسبة للتقليل من المخاطر الجيومورفولوجية في المنطقة المدروسة. جدول (١) مصفوفة المقارنات الزوجية لمؤشرات تقييم المخاطر الجيومورفولوجية

الطبقة	الانحدار	نوع الصخور	كثافة المائبة	الشبكة	الارتفاع	الغطاء النباتي	التربة	قسام السطح
الانحدار	1	1.22	1.47	1.69	1.83	2.2	2.2	2.2
نوع الصخور	0.82	1	1.18	1.39	1.5	1.8	1.8	1.8
كثافة الشبكة المائبة	0.68	0.85	1	1.15	1.2	1.5	1.5	1.5
الارتفاع	0.59	0.72	0.87	1	1.08	1.3	1.3	1.3
الغطاء النباتي	0.55	0.67	0.83	0.93	1	1.17	1.17	1.17
التربة	0.45	0.56	0.67	0.77	0.85	1	1	1
قسام السطح	0.45	0.56	0.67	0.77	0.85	1	1	1

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على نموذج AHP. جدول (٢) نسب أهمية العوامل في تقييم المخاطر الجيومورفولوجية في منطقة الدراسة

الرقم	اسم الطبقة	المرتبة	الأهمية النسبية (%)
1	الانحدار	1	22
2	نوع الصخور	2	18
3	كثافة الشبكة المائبة	3	15
4	الارتفاع	4	13
5	الغطاء النباتي	5	12
6	التربة	6	10
7	قسام السطح	7	10

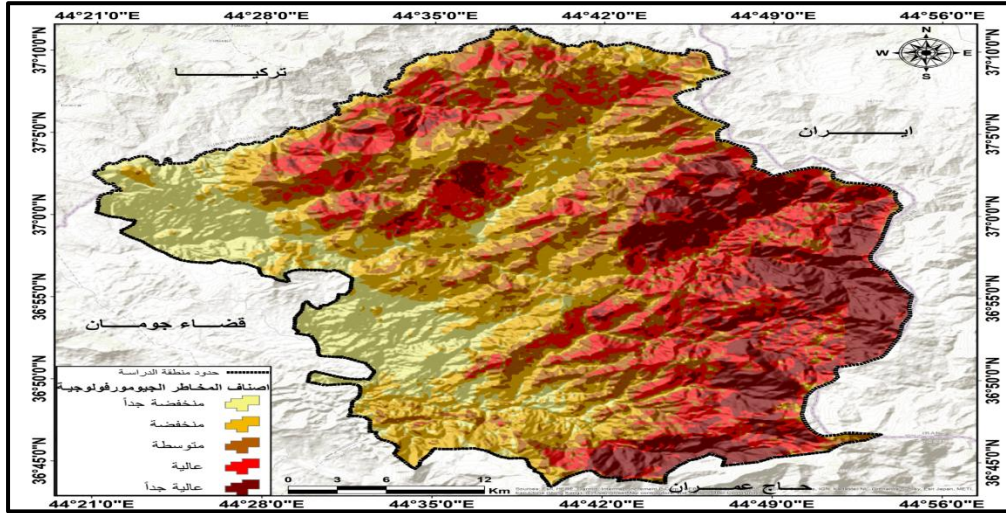
المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على نموذج AHP.

٢- الطرائق الخرائطية المستخدمة لتطوير الخرائط مخاطر الجيومورفولوجية هي:

١-٢ خرائط الكوربليت (Choropleth Maps) تعد من الأدوات الأساسية في التحليل الجغرافي المكاني، حيث تتيح إمكانية تمثيل البيانات الكمية المرتبطة بوحدات مكانية محددة عبر تظليلها بدرجات لونية تعكس تباين القيم. في مجال تحليل المخاطر الجيومورفولوجية، تستخدم هذه الخرائط لعرض الأنماط المكانية للظواهر الطبيعية المرتبطة بمخاطر مثل الانهيارات الأرضية، التعرية، أو الفيضانات، وذلك من خلال تمثيل متغيرات مثل الانحدار، نوع التربة، الغطاء النباتي، وكثافة التصريف السطحي. تساعد هذه الخرائط على تحديد المناطق الأكثر عرضة للخطر بناءً على درجة الخطورة الظاهرة من التمثيل اللوني، مما يسهل على الباحثين والمخططين تقييم الحالة العامة للمخاطر الجيومورفولوجية واتخاذ القرارات المناسبة للتقليل من آثارها. كما تعد خرائط الكوربليت فعالة في عرض العلاقة بين العوامل المسببة للمخاطر وتوزيعها الجغرافي، حيث يمكن إعداد خرائط متعددة تظهر كل عامل على حدة، ثم مقارنتها أو دمجها في نماذج تقييم شاملة. ويعزز هذا النوع من الخرائط فهم الديناميات المكانية وتحديد أولويات المناطق التي تتطلب تدخلات وقائية أو تخطيطاً خاصاً^(١). وتبرز أهمية خرائط الكوربليت خصوصاً في الدراسات الجيومكانية التي تعتمد على نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، حيث تعد هذه الخرائط من المخرجات الأساسية التي تستخدم في تفسير البيانات وتحويلها إلى معرفة قابلة

للتفويض^(٦). وقد أظهرت دراسات عديدة فاعلية خرائط الكوربث في مجال تحليل المخاطر الطبيعية، مثل دراسة (Ayalew and Yamagishi)^(٣) التي استخدمت خرائط الكوربث لتحليل وتوزيع خطورة الانزلاقات الأرضية في إثيوبيا، وبينت أهمية الدمج المكاني بين العوامل المورفومترية والجيولوجية في رسم خرائط الخطورة. تم استخدام تدرجات اللون الأحمر لتمثيل المخاطر الجيومورفولوجية في المنطقة كما في الخريطة (٣)، إذ أن تدرجات اللون الأحمر تعطي طابعاً ودلالة واضحة على الخطر، بالإضافة إلى كونها أكثر إدراكاً من قبل قارئ الخريطة وتساهم في تفسير النتائج بشكل واقعي. وتكمن أهمية هذا الاختيار في سرعة الإدراك البصري للون الأحمر، الذي يعد من أكثر الألوان جذباً للانتباه، مما يساعد في إيصال المعلومة بشكل مباشر وسريع، لا سيما في الخرائط التي تستخدم لأغراض تحليلية أو تحذيرية. كما أن التدرج اللوني يساهم في توضيح شدة الخطورة، من المناطق ذات الخطورة المنخفضة إلى العالية، مما يعزز من فعالية الخريطة كأداة توعوية وتحليلية دقيقة.

خريطة (٣) مخاطر الجيومورفولوجية باستخدام طريقة الكوربث الفعال

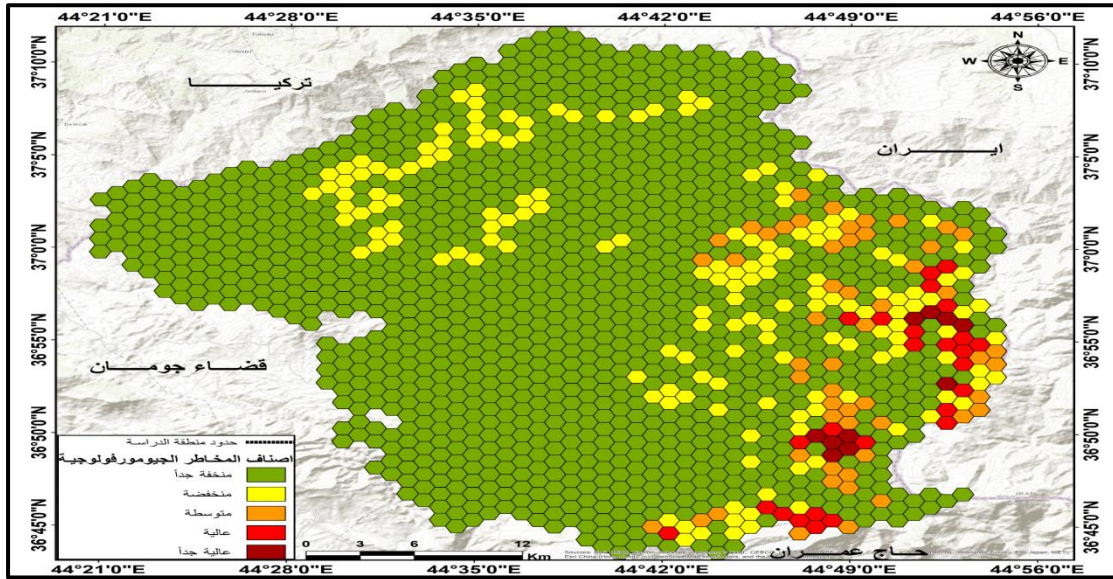


المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على طريقة كوربث الفعال، ومخرجات برنامج (ArcGIS).

٢-٢ خرائط الهيراركية (Hierarchical Maps) تعد خرائط الهيراركية من الأدوات الكارتوغرافية الحديثة التي تستخدم لتمثيل العلاقات المكانية والبنوية بين العناصر الجغرافية وفق تسلسل هرمي، حيث يتم تنظيم المعطيات في مستويات متعددة من التفاصيل أو من حيث الأهمية الجغرافية أو الموضوعية. وفي سياق تحليل المخاطر الجيومورفولوجية، تؤدي خرائط الهيراركية دوراً محورياً في تصنيف المناطق الخطرة اعتماداً على عدد من العوامل المكانية والبيئية وفق ترتيب منطقي يظهر العلاقة السببية والتأثيرية بين هذه العوامل. تبرز هذه المنهجية مدى تأثير كل عامل على المخاطر الجيومورفولوجية، وتعد من الأدوات المهمة في التخطيط المكاني وإدارة الكوارث^(٤) كما أن خرائط الهيراركية تساعد في بناء نماذج مرنة قابلة للتحديث، وتستخدم على نطاق واسع في دراسات تحليل الانهيارات الأرضية، تقييم أخطار الفيضانات، وتحديد مناطق الهشاشة البيئية^(٥)، تنقسم الخرائط الهيراركية إلى الأقسام الآتية:

٢-٢-١ خرائط السداسية (Hexagonal Mapping): تعد الخرائط السداسية إحدى أدوات التمثيل المكاني الحديثة التي تعتمد على تقسيم المساحة الجغرافية إلى خلايا سداسية الشكل بدلاً من الوحدات التقليدية المربعة أو الإدارية. يتميز الشكل السداسي بخصائص هندسية فريدة، منها تساوي المسافة إلى الجيران الستة، ما يمنح تحليلاً مكانياً أكثر دقة وتجانساً، ويقلل من تشوه الاتجاهات أو التحيز المكاني الذي قد يظهر في الشبكات المربعة^(٦). في مجال تحليل المخاطر الجيومورفولوجية، تستخدم هذه الخرائط لتوزيع وتحليل المتغيرات الطبيعية كالتعرية، والانحدار، وكثافة التصريف، ومواقع الانهيارات الأرضية، بطريقة تظهر الأنماط المكانية بدقة وحيادية أعلى. كما أنها تعد مناسبة لدمج البيانات البيئية والجيومورفومترية متعددة المصادر ضمن شبكة متجانسة، مما يسهل من عملية التحليل الإحصائي المكاني والنمذجة. من خلال هذه التقنية، يمكن إنشاء خريطة مخاطر تتكون من خلايا سداسية ملونة بدرجات خطورة معينة، بناءً على مؤشرات مجمعة لكل خلية، مما يتيح تقييماً بصرياً واضحاً لدرجة الخطورة الجيومورفولوجية عبر المنطقة المدروسة. وقد أثبتت الخرائط السداسية فعاليتها في تحليل المخاطر الطبيعية في دراسات متعددة، لا سيما في المناطق الجبلية أو ذات التضاريس المعقدة، حيث توفر دقة أعلى في الكشف عن التغيرات الطبوغرافية والتفاعلات البيئية^(٧). يتضح من خلال خريطة (٤) تم استخدام الأشكال السداسية لتمثيل المخاطر الجيومورفولوجية، مع استخدام متغير اللون لتمثيل شدة الظاهرة، فإن هذه الطريقة تعد مناسبة لعرض البيانات على المواقع الحقيقية للظاهرة، وذلك لما تتمتع به من قدرة إدراكية عالية في إيصال المعلومة إلى القارئ أو

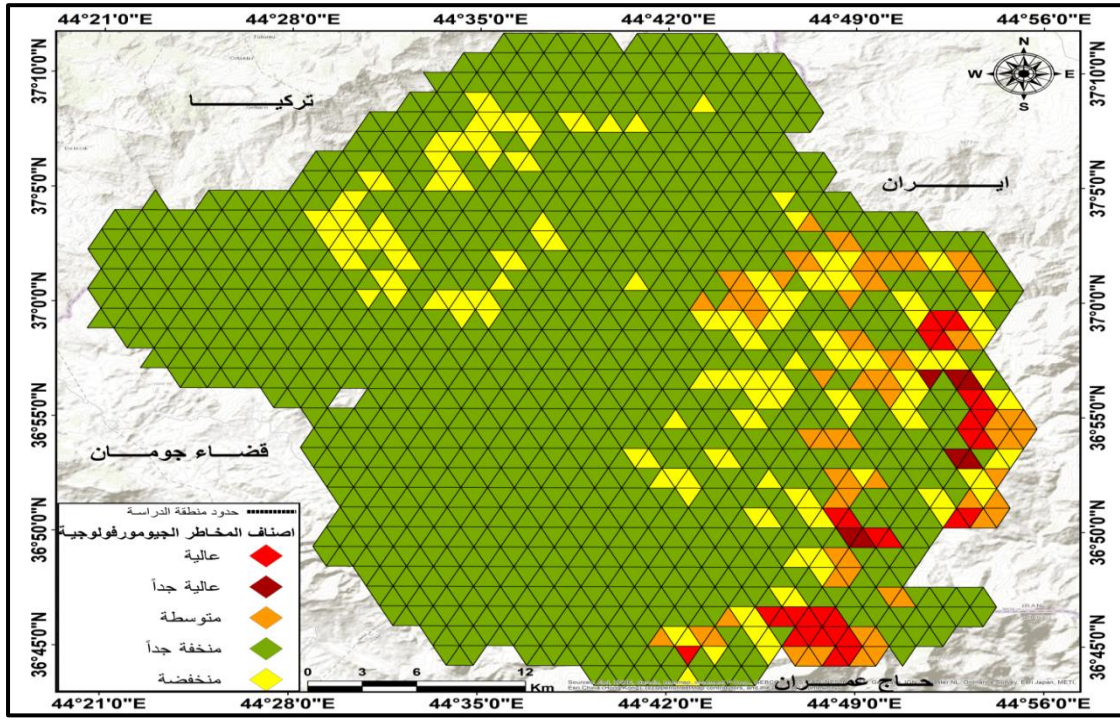
المتلقي، حيث تتيح تمثيلاً بصرياً دقيقاً ومحاكياً للواقع. وتكمن قوة هذه الطريقة في الدمج بين الشكل الهندسي المتوازن (السداسي) والتدرج اللوني الذي يستخدم للإشارة إلى مستويات الخطر المختلفة، مما يسهل على المستخدم فهم التوزيع المكاني للمخاطر دون تعقيد أو تشويش بصري، تفضل الأشكال السداسية على غيرها من الشبكات مثل المربعات أو المثلثات لأنها توفر تغطية أكثر توازناً وتقلل من الانحرافات الناتجة عن المحاور الاتجاهية التقليدية. كل خلية سداسية تتصل بست خلايا مجاورة، مما يخلق تمثيلاً انسيابياً واستمرارية مكانية تعد مثالية لعرض الظواهر الطبيعية التي تتوزع تدريجياً عبر الحيز الجغرافي، كما هو الحال مع الانزلاقات الأرضية أو التعرية المائية. فإن استخدام تدرج لوني واضح في هذا النموذج يساهم في تعزيز الإدراك البصري، إذ يستطيع المراقب بسهولة التمييز بين مناطق الخطر المرتفع والمنخفض، مما يعزز من فعالية النموذج كأداة دعم قرار في تخطيط استخدام الأرض وإدارة المخاطر البيئية. وما يميز هذه الطريقة كذلك هو توافقها العالي مع أدوات نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، إذ يمكن بسهولة تحليل وحدات السداسية على أساس عدد من المتغيرات البيئية والطبوغرافية (مثل الانحدار، نوع التربة، الغطاء النباتي)، ودمج نتائجها مع نماذج احتمالية أو إحصائية لتقديم تقييم دقيق لتوزيع الخطر. لذلك، فإن خريطة السداسيات تمثل خياراً فعالاً ومناسباً لتمثيل وتحليل المخاطر الجيومورفولوجية في المناطق الجبلية مثل ناحية سيدكان، حيث توفر توازناً بين الدقة المكانية وسهولة الإدراك البصري، مما يجعلها أداة عملية ومتكاملة في السياقات البحثية والتطبيقية على حد سواء. خريطة (٤) مخاطر الجيومورفولوجية باستخدام الأشكال السداسية



المصدر: من عمل

٢-٢-٢ خرائط المثلثات (TRIANGLE Mapping): تعد طريقة المثلث إحدى المنهجيات الجيومكانية المعاصرة التي تستخدم لتصنيف وتقييم المخاطر الجيومورفولوجية بطريقة مرئية ومنهجية، حيث تعتمد على تحليل وتبويب المعطيات الجغرافية وفق ثلاث فئات أو محاور رئيسية تتسبب إلى رؤوس مثلث متساوي الأضلاع. بحيث تقسم المنطقة المدروسة إلى قطاعات وفق هذه المتغيرات، ثم تصنف داخل المثلث حسب نسب كل عامل. يعد هذا الأسلوب مفيداً في حالات تعدد العوامل المؤثرة وتداخلها المكاني، حيث يوفر تمثيلاً بصرياً واضحاً لدرجات الخطورة وتباينها بين أجزاء المنطقة الجغرافية محل الدراسة^(٨)، وفي سياق تحليل المخاطر الجيومورفولوجية، يتم إدخال قيم العوامل في نموذج رياضي يحدد موضع كل وحدة مكانية داخل المثلث بناءً على الوزن النسبي لكل عامل. وتستخدم النتيجة لتحديد درجة الخطورة لكل منطقة فرعية وفق موقعها داخل المثلث؛ فكل زاوية من زوايا المثلث تمثل أعلى تأثير لعامل معين، بينما تمثل المناطق الوسطى التوازن أو الاعتدال. تعد هذه الطريقة فعالة في بناء خرائط مركبة لتقييم المخاطر، خصوصاً في المناطق الجبلية أو الوعرة التي تشهد تفاعلات معقدة بين العوامل الطبيعية، كما هو الحال في ناحية سيدكان ضمن إقليم كردستان. وقد أثبتت طريقة TRIANGLE فعاليتها في عدة دراسات ميدانية، حيث استخدمت لتقدير احتمالية الانهيارات الأرضية، والانجرافات، وتدهور الغطاء النباتي من خلال ربط العوامل البيئية بطريقة بصرية تحليلية تعتمد على المثلث المفاهيمي^(٩). يتضح من خلال خريطة (٥) تم اعتماد طريقة الثلاثية (Triangle) في تمثيل المخاطر الجيومورفولوجية ضمن هذه الدراسة، من خلال استخدام شبكة من الأشكال المثلثية لتقسيم منطقة البحث وتحليلها مكانياً. يعد هذا الأسلوب من النماذج الهيراركية المفيدة في تمثيل الظواهر المكانية، خاصة في البيئات الجبلية والمعقدة طبوغرافياً مثل ناحية سيدكان، لما يوفره من مرونة عالية في محاكاة انسياب التضاريس، وقدرته على تمثيل التغيرات الطفيفة في الشكل الأرضي بدقة. تتيح الأشكال المثلثية تقسيم الحيز الجغرافي إلى وحدات صغيرة متجانسة ترتبط ببعضها البعض عبر زوايا وأضلاع، مما يخلق

شبكة تحليلية دقيقة. كما أن استخدام متغير اللون داخل كل وحدة مثلثية يسمح بعرض تدرج المخاطر بشكل بصري واضح، الأمر الذي يعزز الإدراك المكاني ويسهل على المستخدم استنتاج مناطق الخطر دون الحاجة إلى تحليل رقمي معقد. من الناحية الإدراكية، تعتبر الخرائط الثلاثية أداة فعالة في إيصال المعلومات المكانية، إذ أن تمثيل الظاهرة عبر وحدات صغيرة متماسكة يعكس صورة قريبة من الواقع، ويسهم في تحسين الفهم البصري والتميز بين مستويات الخطورة. وعند دمج هذا النموذج مع نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، يصبح من الممكن تحليل تأثير العوامل البيئية المختلفة بدقة عالية، ومقارنة النتائج على مستويات محلية دقيقة. بالتالي، فإن نموذج الخرائط الثلاثية يعد مناسباً جداً لتحليل وتفسير المخاطر الجيومورفولوجية في البيئات الجبلية ذات التركيب المعقد، ويوفر توازناً جيداً بين التفاصيل الدقيقة والتمثيل البصري الفعال، وهو ما يجعله خياراً تطبيقياً متميزاً في الدراسات الجغرافية والبيئية المعاصرة. خريطة (٥) مخاطر الجيومورفولوجية باستخدام الأشكال الثلاثية

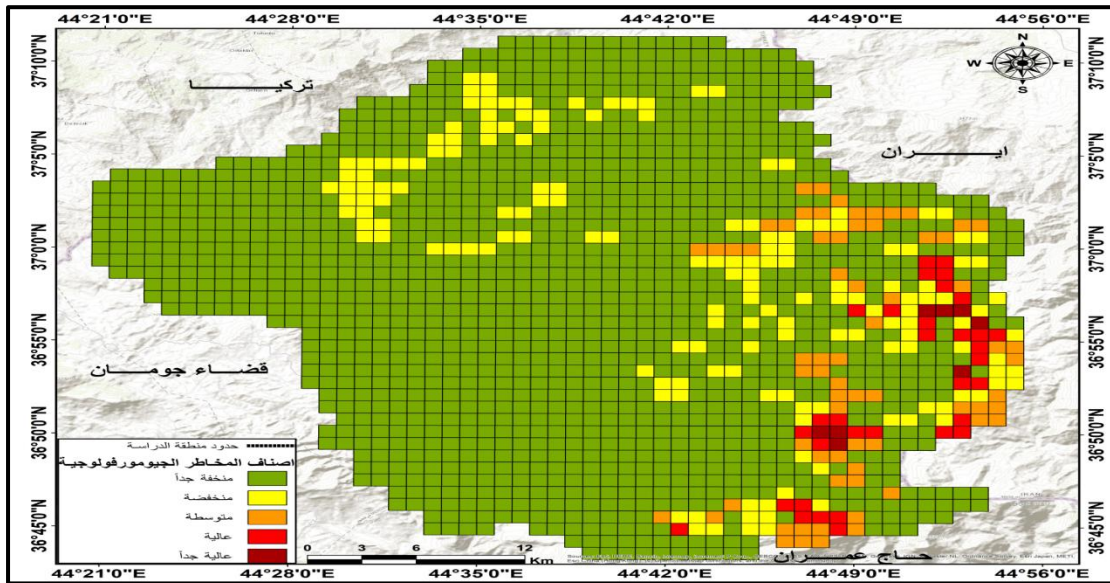


المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على طريقة المثلثات، ومخرجات برنامج (ArcGIS).

٢-٢-٣ خرائط المربعات (SQUARE Map):

تعد طريقة المربعات إحدى المنهجيات الكارتوغرافية الحديثة المستخدمة في التحليل المكاني متعدد المتغيرات، حيث تعتمد على تقسيم المنطقة المدروسة إلى شبكة منتظمة من المربعات (Grid Cells) وتحليل كل مربع كوحدة مستقلة من حيث توافر أو تراكم العوامل الجيومورفولوجية المؤثرة. تستخدم هذه الطريقة بشكل واسع في نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتقييم المخاطر الطبيعية مثل الانهيارات الأرضية، التعرية، الفيضانات، وغيرها، إذ يمكن لكل مربع أن يخزن قيمة رقمية تمثل درجة الخطورة بناءً على وجود أو غياب أو شدة عدد من العوامل البيئية^(١٠). تعتمد طريقة المربعات على مبدأ المعالجة الخلوية، حيث يتم تراكم الطبقات المختلفة (مثل الانحدار، نوع التربة، الغطاء النباتي، كثافة التصريف) باستخدام عمليات منطقية أو حسابية، ويتم تجميع هذه القيم داخل كل مربع باستخدام مؤشرات إحصائية أو طرق ترجيح متعددة مثل AHP أو الوزن الخطي. توفر هذه الطريقة دقة تحليل مكانية عالية، وتعتبر فعالة في إنشاء خرائط تقييم المخاطر التي تتسم بالوضوح والمرونة، بالإضافة إلى سهولة المقارنة بين أجزاء المنطقة المدروسة. كما تسمح هذه الشبكة المربعة بتطبيق تقنيات التحليل الإحصائي المكاني مثل الانحدار اللوجستي أو التحليل الجيوديسي، ما يعزز من القدرة على التنبؤ بالمناطق عالية الخطورة^(١١). وتعد طريقة المربعات مفيدة بشكل خاص في المناطق التي لا تتوفر فيها وحدات إدارية أو طوبوغرافية واضحة، إذ يمكنها تعويض غياب التقسيمات الطبيعية من خلال فرض شبكة تحليلية منتظمة تضمن شمولية الدراسة وتجانس المعالجة. يتضح من خلال خريطة (٦) تم استخدام طريقة المربعات (Square) في تمثيل المخاطر الجيومورفولوجية من خلال تقسيم منطقة الدراسة إلى شبكة من الخلايا المربعة المتجانسة من حيث الحجم والمساحة، وتطبيق تدرج لوني على هذه الخلايا بما يمثل شدة المخاطر في كل منها. وتعد هذه الطريقة من أكثر الأساليب انتشاراً في التحليل المكاني، نظراً لبساطتها وسهولة إدراجها ضمن برامج نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وتحليلها إحصائياً. توفر الخلايا المربعة أساساً منتظماً لتوزيع وتحليل البيانات، مما يسهل عملية الربط بين المتغيرات

الطبيعية وتوزيع الظواهر الجيومورفولوجية. ويستخدم تدرج اللون داخل كل خلية لتمثيل مستوى الخطورة، حيث تظهر الألوان الداكنة مناطق ذات خطر مرتفع، بينما تظهر الألوان الفاتحة مناطق الخطر المنخفض، مما يسهل إدراك الأنماط المكانية المرتبطة بالخطر. ورغم أن هذه الطريقة قد لا تحاكي الانسيابية الحقيقية للتضاريس كما تفعل الأشكال المثلثية أو السداسية، إلا أنها فعالة في تمثيل الظواهر على مستوى إقليمي أو واسع النطاق، خصوصاً عند الحاجة إلى تحليل إحصائي منظم أو عند استخدام نماذج خلوية تعتمد على البكسلات. ومن مميزات المهمة أنها تتناسب تحليل البيانات المتوفرة من الأقمار الصناعية أو النماذج الرقمية للارتفاعات (DEM)، كون هذه البيانات نفسها تأتي غالباً بشكل شبكي مربع. من الناحية الإدراكية، توفر هذه الطريقة تمثيلاً مباشراً وسهل القراءة للمتلقي، حيث يمكن تتبع امتداد الخطر ضمن شبكة بسيطة ومتناسقة، ما يجعلها مناسبة لأغراض التخطيط المكاني وإعداد خرائط الإنذار المبكر. كما أن الشبكة المربعة تتيح مقارنة إحصائية مباشرة بين الوحدات، مما يساعد في تحليل الفروق المكانية بدقة وتقييم مناطق الخطر الأكثر أهمية. وبذلك، تعد طريقة المربعات خياراً منطقياً وعملياً في دراسة وتحليل المخاطر الجيومورفولوجية، خصوصاً عند الحاجة إلى التوازن بين سهولة التنفيذ والدقة المكانية المقبولة، وهي مناسبة للمراحل التحليلية الأولية، أو عند التعامل مع قواعد بيانات واسعة النطاق. خريطة (٦) مخاطر الجيومورفولوجية باستخدام شبكة المربعات

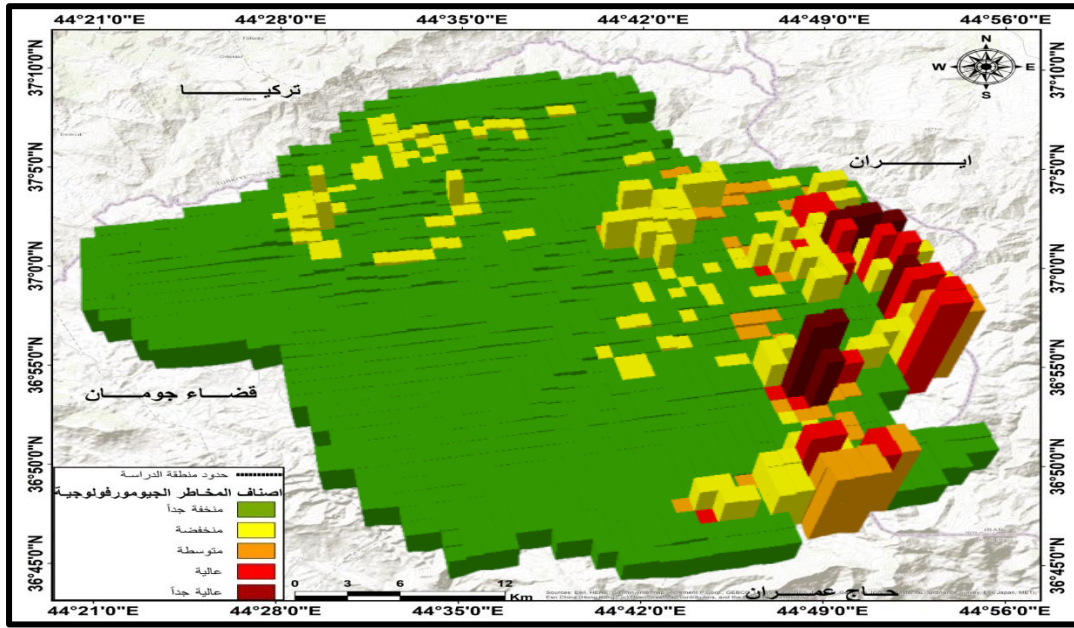


المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على طريقة المربعات، ومخرجات برنامج (ArcGIS).

٣-٢ طريقة ثلاثية الأبعاد (3D Map): تعد الخرائط ثلاثية الأبعاد (3D Maps) من الأساليب المتقدمة في نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والتي تستخدم لتمثيل وتحليل الظواهر الجيومورفولوجية بطريقة مرئية تفاعلية تعتمد على إظهار الطول والعرض والارتفاع (X, Y, Z). تمكن هذه الخرائط الباحث من استيعاب العلاقات الطبوغرافية والمكانية بشكل أكثر واقعية ووضوحاً، مما يعزز من دقة تحليل المخاطر في البيئات الجبلية أو ذات التضاريس المعقدة. وتعتبر هذه التقنية مفيدة جداً في عرض الانحدارات الشديدة، تجاوزيف الانهيارات، مستويات التعرية، والتداخل بين العوامل البنيوية والسطحية، ما يجعلها أداة قوية لتقييم المخاطر الطبيعية مثل الانهيارات الأرضية والانجرافات والانزلاقات الصخرية^(١٢). تعتمد طريقة 3D على دمج البيانات الطبوغرافية (مثل نماذج الارتفاع الرقمية DEM) مع صور فضائية وبيانات ميدانية لإنتاج نموذج تضاريسي ثلاثي الأبعاد يمكن تحليله بصرياً أو حسابياً باستخدام برامج متخصصة مثل ArcGIS Pro أو QGIS أو Global Mapper. وتتيح هذه الطريقة إمكانية إدخال الزمن كعنصر رابع (4D Mapping) لدراسة التغيرات الزمنية في المخاطر، خاصة في المناطق المتأثرة بالعوامل المناخية أو البشرية. يسهم هذا النمط من الخرائط أيضاً في دعم عمليات اتخاذ القرار من قبل الجهات المختصة في التخطيط واختيار مواقع المشاريع أو توجيه خطط الحماية والوقاية^(١٣). إن دمج التحليل ثلاثي الأبعاد في تقييم المخاطر الجيومورفولوجية يوفر فهماً أعمق للعلاقات بين المتغيرات الطبيعية. يتضح من خريطة (٧، ٨، ٩، ١٠) تم استخدام في هذه الطريقة ثلاثية الأبعاد لتمثيل المخاطر الجيومورفولوجية، مع استخدام متغير اللون لتمثيل شدة الظاهرة، فإن هذه الطريقة تعد مناسبة لعرض البيانات على المواقع الحقيقية للظاهرة، لما تتمتع به من قدرة إدراكية عالية في إيصال المعلومة للمتلقي، وذلك لقدرتها على محاكاة الواقع بشكل بصري ومجسم. إذ أن الدمج بين البعد المكاني واللون والارتفاع يسهم في تقديم تصور شمولي لطبيعة المخاطر وتوزيعها في الحيز الجغرافي المدروس. توفر هذه التقنية منظوراً واقعياً يمكن الباحث والمستخدم من فهم الفروقات المكانية في شدة الظاهرة بطريقة لا يمكن تحقيقها عبر النماذج ثنائية الأبعاد. يستخدم الارتفاع في هذا النموذج لتمثيل مستوى الخطورة (مثل احتمالية

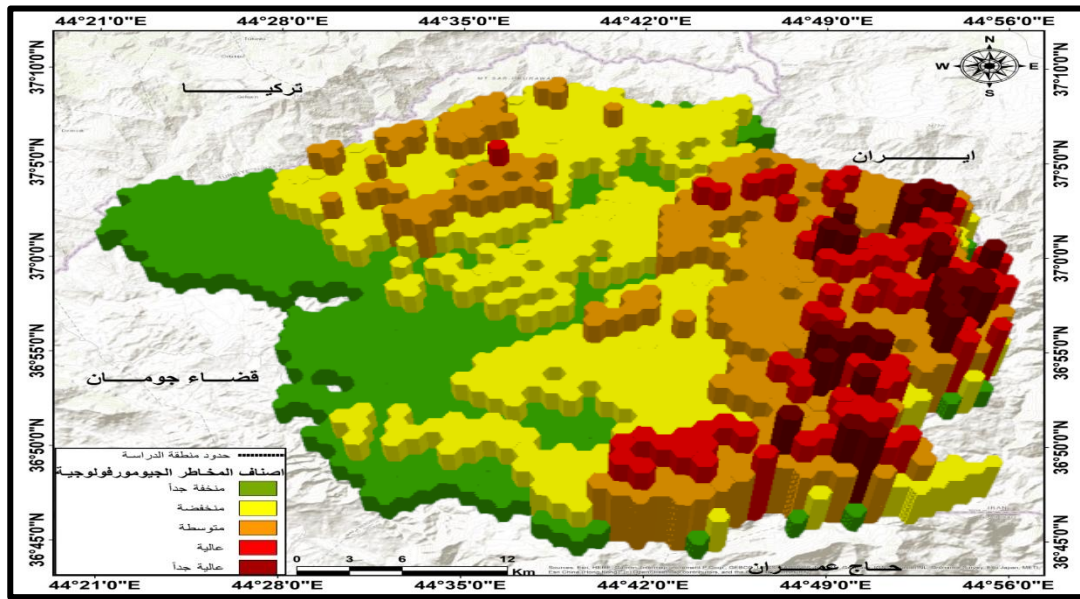
الانزلاق أو شدة التعرية)، بينما يستخدم اللون كأداة إضافية لتعزيز الفهم البصري من خلال تمييز مناطق الخطورة المنخفضة (بالأخضر) والمتوسطة (بالأصفر) والعالية (بالأحمر). إضافة إلى ذلك، فإن هذه الطريقة تتكامل بسهولة مع أدوات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والنمذجة الرقمية للارتفاعات (DEM)، حيث يمكن دمج نتائج التحليل ثلاثي الأبعاد مع بيانات أخرى مثل نوع التربة أو الغطاء النباتي، لبناء نماذج تنبؤية دقيقة لتوزيع المخاطر الجيومورفولوجية. بالتالي، فإن طريقة الخرائط ثلاثية الأبعاد تعد من أكثر النماذج فعالية لتمثيل وتحليل المخاطر الجيومورفولوجية في المناطق الجبلية، لما توفره من دقة في التمثيل المكاني، ووضوح في العرض البصري، وتكامل مع البيانات الطبوغرافية والبيئية، مما يجعلها خياراً مثالياً للأغراض البحثية والتطبيقية على حد سواء.

خريطة (٧) ثلاثية الأبعاد باستخدام طريقة المربعات



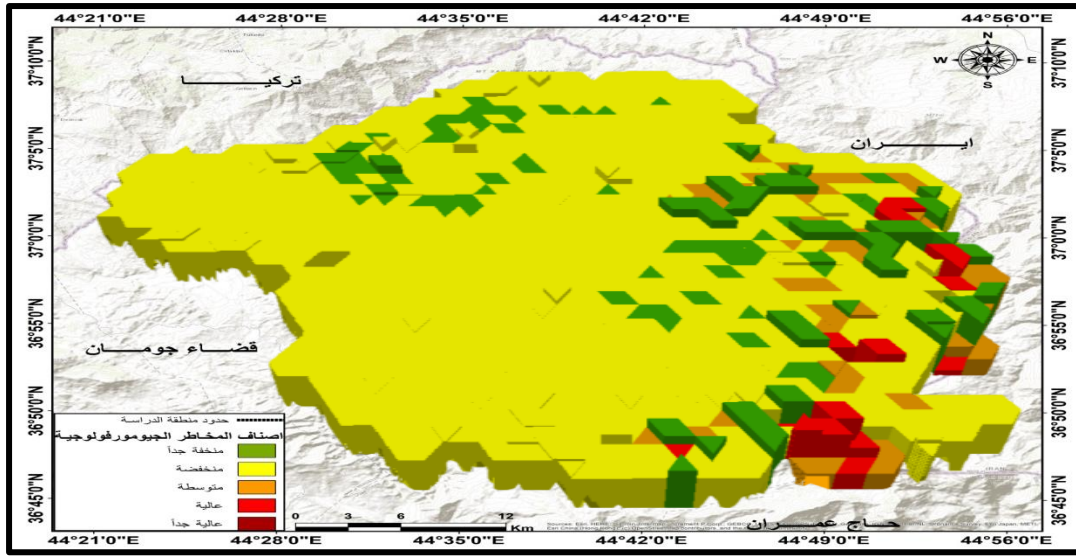
المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على طريقة المربعات، ومخرجات برنامج (ArcGIS).

خريطة (٨) ثلاثية الأبعاد باستخدام طريقة السداسية



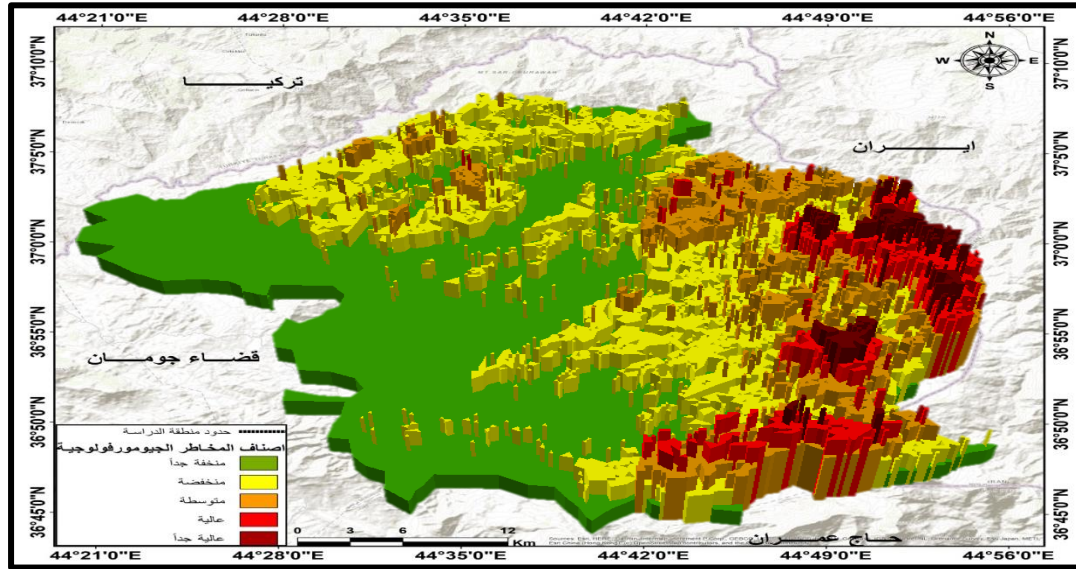
المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على طريقة السداسية، ومخرجات برنامج (ArcGIS).

خريطة (٩) ثلاثية الأبعاد باستخدام طريقة المثلثات



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على طريقة المثلثات، ومخرجات برنامج (ArcGIS).

خريطة (١٠) ثلاثية الابعاد باستخدام طريقة كوربلت



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على طريقة الكوربلت، ومخرجات برنامج (ArcGIS).

٣- التحليل الإحصائي لاختيار النماذج المثلى لتمثيل المخاطر الجيومورفولوجية: يمثل التحليل الإحصائي أداة محورية في التحقق من جودة النماذج الخرائطية المستخدمة في تمثيل وتفسير المخاطر الجيومورفولوجية، إذ إن اعتماد نموذج معين لعرض وتوزيع الظاهرة لا يكتسب موثوقيته العلمية إلا من خلال إخضاعه لمجموعة من الاختبارات الكمية التي تقيس مدى دقته وفعاليتها في محاكاة الواقع المكاني. وتكمن أهمية هذا التحليل في كونه يوفر قاعدة موضوعية لتقييم أداء النماذج المختلفة، مثل النماذج الثنائية الأبعاد، والثلاثية، وكذلك النماذج التي تعتمد على أشكال هندسية كالسداسية والمثلثية والمربعة. فكل نموذج ينتج تمثيلاً بصرياً مميزاً، لكنه يحتاج إلى توثيق رقمي يحدد مدى مطابقته للظاهرة الحقيقية، ومدى قدرته على الكشف عن مناطق الخطر بدقة عالية. تعتمد آلية التحليل الإحصائي في هذا السياق على استخدام مؤشرات تقييم كمية مثل الدقة العامة (Overall Accuracy)، ومعامل كابتا (Kappa Coefficient)، ومساحة تحت المنحنى (Area Under Curve :AUC)، إلى جانب جذر متوسط مربع الخطأ (RMSE)، والانحراف المعياري. وتعد هذه المؤشرات من أكثر الأدوات اعتماداً في البحوث الجغرافية الحديثة لكونها تعطي صورة متكاملة عن أداء النموذج من زوايا مختلفة؛ فبينما تعنى بعض المؤشرات بقياس مستوى التوافق العام بين النموذج والواقع، تهدف أخرى إلى تقدير حجم الخطأ والانحراف عن النتائج المرجعية، ما يجعل من هذا التحليل الإحصائي نهجاً علمياً دقيقاً لتحديد النموذج الأكثر كفاءة. وبناءً على هذه المعايير، يتمكن الباحث من اختيار النموذج الأنسب لتمثيل توزيع المخاطر الجيومورفولوجية في منطقة الدراسة، مما يساهم بدوره في تحسين التخطيط البيئي وتوجيه استراتيجيات التخفيف من المخاطر، فضلاً عن دعم متخذي القرار بالمعلومات الدقيقة والموثوقة. إن هذا النوع

من التحليل لا يقتصر على تقييم النماذج فحسب، بل يمثل حلقة وصل مهمة بين الجوانب النظرية للتمثيل الخرائطي والتطبيق العملي في إدارة المخاطر وتخطيط استخدام الأراضي.

٣-١ المعايير الإحصائية المستخدمة في تقييم دقة النماذج الخرائطية:

في إطار تقييم النماذج الخرائطية الخاصة بتمثيل المخاطر الجيومورفولوجية، يعد التحليل الإحصائي خطوة حاسمة لاختبار النموذج الأمثل الذي يعكس بدقة توزيع وتنوع هذه المخاطر في الحيز المكاني. ولتحقيق هذا الهدف، تم اعتماد مجموعة من المؤشرات الإحصائية التي لا تقيس فقط الدقة الرقمية للنموذج، بل تعطي أيضاً مؤشرات نوعية حول مدى تمثيله الواقعي للظواهر الجيومورفولوجية مثل الانزلاقات الأرضية، التعرية المائية، أو عدم الاستقرار الطبوغرافي. وفيما يلي عرض تفصيلي لأهم هذه المؤشرات، وربط مباشر لكل منها بالدلالة الجيومورفولوجية التي يمثلها:

• **معامل كابا (Kappa Coefficient)** هو مقياس لمدى الاتفاق بين النتائج التي يعطيها النموذج (المخرجات المصنفة على الخريطة) والواقع الفعلي، مع تصحيح الاحتمالات الناتجة عن المصادفة. ويتميز كابا بكونه لا يكتفي بحساب التوافق البسيط، بل يظهر مدى قوة هذا التوافق. في الخرائط الجيومورفولوجية، مثل خرائط مخاطر الانهيارات الأرضية، فإن ارتفاع قيمة كابا يدل على أن النموذج استطاع التمييز بدقة بين المناطق الآمنة والمناطق ذات الخطر المرتفع، بناءً على المعطيات الطبوغرافية (الانحدار، الارتفاع، نوع التربة). فإذا حقق نموذج خريطة سداسية أو ثلاثية بعد قيمة كابا تتجاوز ٠.٨، فهذا يشير إلى تطابق قوي مع الواقع الجيومورفولوجي ويؤكد فعاليته في دعم اتخاذ القرار التخطيطي^(١٤).

• **الدقة الكلية (Overall Accuracy)** هي أبسط المؤشرات المستخدمة، وتقيس نسبة المطابقة بين التصنيفات الصحيحة التي قدمها النموذج مقارنة بالإجمالي العام للعناصر المصنفة. عند تمثيل خطر تعرية التربة أو الانحدارات الشديدة، تظهر الدقة الكلية مدى قدرة النموذج على كشف وتمييز مناطق الخطر مقارنة بالبيانات المرجعية. إذا كانت القيمة مرتفعة، فهذا يظهر أن النموذج استطاع تحديد مناطق الضعف الطبوغرافي بدقة، وبالتالي فهو صالح كأداة دعم لاتخاذ القرار في إدارة المخاطر الجيومورفولوجية^(١٥).

• **جذر متوسط مربع الخطأ (Root Mean Square Error – RMSE)** يستخدم لقياس مقدار الانحراف الكلي أو متوسط الخطأ بين القيم الفعلية والقيم التي يتنبأ بها النموذج. وكلما كانت القيمة أقل، دل ذلك على دقة تنبؤية عالية. يعد RMSE مهم عند التعامل مع نماذج تمثل تدرجات المخاطر الطبوغرافية أو الاحتمالية، مثل خرائط احتمالية الانزلاق الأرضي أو تعرية المجاري المائية. انخفاض RMSE يشير إلى أن النموذج يعكس بشكل دقيق العلاقات المعقدة بين المتغيرات البيئية (كالانحدار والتربة) والنتائج الميدانية، ما يجعله جديراً بالاعتماد في التخطيط الجيومورفولوجي الوقائي^(١٦).

• **مساحة تحت منحنى (Area Under Curve – AUC)** يظهر هذا المؤشر مدى قدرة النموذج على التمييز بين المواقع التي تمثل خطورة وتلك التي لا تمثل خطورة، ويعتبر من أدق المؤشرات التي تستخدم في التقييم الكمي للنماذج التصنيفية. في حالة استخدام نموذج لتحديد مخاطر الجيومورفولوجية، إذ تساعد قيمة AUC المرتفعة (مثل ٠.٩ فما فوق) في تأكيد أن النموذج يتمتع بحساسية وخصوصية عالية في التمييز بين المناطق ذات القابلية العالية للضرر والأخرى المستقرة جيومورفولوجياً. هذا أمر بالغ الأهمية في البيئات الجبلية مثل ناحية سيدكان، حيث يمكن أن تتغير الشروط البيئية على نطاقات قصيرة^(١٧).

• **معامل الارتباط (Pearson's R)** يقيس معامل الارتباط قوة العلاقة بين متغيرين. في تقييم النماذج الخرائطية، يستخدم لقياس العلاقة بين قيم المخاطر المقدرة في النموذج والبيانات الحقيقية أو القيم المرجعية. إذا أظهر النموذج معامل ارتباط مرتفع (مثلاً +٠.٨٥) بين قيم الخطر المصنفة على الخريطة ومؤشرات ميدانية مثل شدة الانحدار أو هشاشة التربة، فهذا يعني أن النموذج يعكس بشكل علمي سليم العلاقات الجيومورفولوجية الحقيقية. وبالتالي، يكون جديراً بالاعتماد عليه في رسم خرائط المخاطر التي تسهم في دعم خطط الاستجابة والحد من الكوارث الطبيعية^(١٨).

٣-٢ **اختبار دقة النماذج الخرائطية:** يتضح من خلال بيانات الجدول (٣) وجود تباين واضح في كفاءة النماذج الخرائطية المستخدمة في تمثيل المخاطر الجيومورفولوجية في ناحية سيدكان بمحافظة أربيل، مما يتيح إمكانية تقييم مدى ملاءمة كل نوع من الخرائط لهذا الغرض، ويمكن تحليلها وفق لنوع الخريطة وكالتالي:

• **خرائط الكوربيلث:** جاءت بأقل النتائج من حيث الدقة والمؤشرات الإحصائية، حيث سجلت أقل قيمة لمعامل كابا (٠.٧١) وأعلى قيمة لـ RMSE (0.128)، مما يدل على محدودية هذا النوع في تمثيل الظواهر المعقدة، نتيجة لطبيعته المعتمدة على تقسيمات إدارية أو تصنيفية غير ديناميكية. وعليه، يعد هذا النوع الأقل مناسبة في تمثيل المخاطر الجيومورفولوجية.

- **خرائط السداسية:** فقد أظهرت تحسناً نسبياً في الأداء، مع ارتفاع في قيم الكفاءة مثل الدقة الكلية (٨٦.٢٪) و (0.84) AUC، ما يعكس قدرة أفضل على التنبؤ المكاني. ويعزى ذلك إلى كفاءة النمط السداسي في تغطية المساحة دون تداخلات فراغية كبيرة، ما يمنحه قدرة تحليلية أفضل من الكوربلث.
- **خرائط المثلثات (TRIANGLE):** خطوة أخرى في مستوى الأداء، إذ ارتفعت دقتها الكلية إلى (٨٧.٩٪) مع انخفاض RMSE إلى (٠.١٠٥)، مما يدل على تمثيل جيد للعناصر الطبوغرافية والانحدارية، كون المثلثات تتيح تحليلاً أكثر دقة للتغيرات المكانية، لاسيما في البيئات الجبلية والوعرة.
- **خرائط المربعات (SQUARE):** أكثر كفاءة، حيث حققت دقة كلية بلغت (٨٩.١٪) ومعامل ارتباط بلغ (٠.٨٥)، ما يؤكد فعاليتها في تقديم نتائج مستقرة ومتوازنة بين التمثيل والتحليل، خاصة عند التعامل مع بيانات شبكية منظمة، وتعد خياراً جيداً للتحليل شبه الديناميكي للمخاطر.
- **خرائط ثلاثية الأبعاد (3D):** فقد سجلت قفزة واضحة في الأداء، حيث بلغت دقتها الكلية (٩١.٤٪)، مع تحسن كبير في قيم (0.91) AUC وانخفاض RMSE إلى (٠.٠٨٩). ويعزى ذلك إلى قدرتها على تمثيل البعد الطبوغرافي بشكل واقعي، مما يجعلها أداة فعالة في تحليل المخاطر المرتبطة بالتضاريس، مثل الانهيارات والانحدارات الحادة. تبين النتائج أنه كلما اتجهت النماذج الخرائطية نحو التمثيل ثلاثي الأبعاد، ازدادت فعاليتها ودقتها في التنبؤ بوقوع المخاطر الجيومورفولوجية بصورة أكثر واقعية، الأمر الذي يجعل من الخرائط ثلاثية الأبعاد الخيار الأمثل والأكثر كفاءة وفقاً للمؤشرات الإحصائية المعتمدة. جدول (٣) الاختبار الإحصائي لنماذج الخرائطية

نوع النموذج	Correlation Coefficient (R)	AU C	RM SE	Overall Accuracy(%)	Kappa Coefficient (κ)
خرائط الكوربلث (Choropleth Maps)	٠.٧٧	٠.٨ ١	٠.١٢ ٨	٨٤.٥	٠.٧١
خرائط السداسية (Hexagonal Map)	٠.٨	٠.٨ ٤	٠.١١ ٢	٨٦.٢	٠.٧٤
خرائط المثلثات (Map TRIANGLE)	٠.٨٣	٠.٨ ٦	٠.١٠ ٥	٨٧.٩	٠.٧٦
خرائط المربعات (SQUARE Map)	٠.٨٥	٠.٨ ٨	٠.٠٩ ٨	٨٩.١	٠.٧٨
خرائط ثلاثية الأبعاد (3D Map)	٠.٨٨	٠.٩ ١	٠.٠٨ ٩	٩١.٤	٠.٨٢

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على برنامج SPSS.

الاستنتاجات:

- ١- يشكل التحليل الإحصائي أداة أساسية للتحقق من دقة وموثوقية النماذج الخرائطية، إذ يربط التمثيل الخرائطي بالواقع المكاني ويمنح النتائج مصداقية علمية قابلة للاعتماد في الدراسات الجيومورفولوجية.
- ٢- أظهرت المؤشرات الإحصائية المعتمدة، مثل الدقة الكلية ومعامل كبا و RMSE و AUC ومعامل الارتباط، فاعلية عالية في تقييم النماذج من جوانب متعددة، شملت مستوى التوافق، وحجم الخطأ، وقدرة التمييز بين مناطق الخطر والاستقرار.

٣- كشفت النتائج عن تباين واضح في كفاءة النماذج الخرائطية تبعاً لنوع التمثيل، حيث سجلت خرائط الكوروبلث أدنى مستويات الدقة بسبب محدوديتها في تمثيل التعقيد الجيومورفولوجي.

٤- حققت الخرائط الشبكية (السداسية، المثلثية، والمربعة) تحسناً تدريجياً في الأداء، مما يدل على قدرتها الأفضل في تمثيل التغيرات الطبوغرافية والمكانية مقارنة بالخرائط التقليدية.

٥- أثبتت الخرائط ثلاثية الأبعاد تفوقها الواضح من حيث الدقة والواقعية، كونها الأكثر كفاءة في تمثيل البعد الطبوغرافي والتنبؤ بالمخاطر الجيومورفولوجية، مما يجعلها الخيار الأمثل لدعم التخطيط البيئي وإدارة المخاطر واتخاذ القرار المكاني.

التوصيات:

١- توصي الدراسة اعتماد منهجيات مقارنة منهجية بين النماذج الخرائطية المختلفة (الكوروبلث، الشبكية، والثلاثية الأبعاد) ضمن البحث الواحد، وعدم الاكتفاء بنموذج واحد، بهدف تحديد النموذج الأكثر كفاءة استناداً إلى مؤشرات إحصائية موحدة.

٢- الالتزام باستخدام مجموعة متكاملة من مؤشرات التقييم الإحصائي، مثل الدقة الكلية، معامل كايا، RMSE، AUC، ومعامل الارتباط، بوصفها معياراً أكاديمياً أساسياً للحكم على جودة النماذج الخرائطية.

٣- التوسع في استخدام نماذج الارتفاعات الرقمية عالية الدقة وربطها مباشرة بالنماذج الخرائطية، لما لذلك من دور جوهري في تحسين تمثيل الانحدارات وعدم الاستقرار الطبوغرافي ومناطق الخطورة.

٤- تعزيز دمج بيانات الاستشعار عن بعد متعددة المصادر ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية، بهدف رفع كفاءة التحليل المكاني ودقة التنبؤ بالمخاطر الجيومورفولوجية.

٥- مراعاة الخصائص الجيومورفولوجية المحلية لمنطقة الدراسة عند اختيار أسلوب التمثيل الخرائطي، وعدم تعميم نتائج النماذج على بيانات مختلفة دون اختبارها إحصائياً.

٦- التوجه نحو اعتماد التمثيل ثلاثي الأبعاد، ولاسيما في المناطق الجبلية والوعرة، لما يوفره من قدرة عالية على محاكاة الواقع الطبوغرافي وتمثيل التعقيد المكاني بدقة.

٧- ربط نتائج النماذج الخرائطية بالتطبيقات العملية في التخطيط البيئي وإدارة المخاطر واستخدامات الأراضي، لضمان توظيف المخرجات العلمية في دعم اتخاذ القرار المكاني على أسس علمية رصينة.

هوامش البحث

(^١)Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15-31.

(^٢)Dent, B. D., Torguson, J. S., & Hodler, T. W. (2008). *Cartography: Thematic map design* (6th ed.). McGraw-Hill.

(^٣)Slocum, T. A., McMaster, R. B., Kessler, F. C., & Howard, H. H. (2009). *Thematic cartography and geovisualization* (3rd ed.). Pearson Prentice Hall.

(^٤)Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill

(^٥)Neuhold, C., Stanzel, P., & Nachtnebel, H. P. (2009). Integrating river basin management and flood risk mitigation: A GIS-based approach. *Journal of Environmental Management*, 90(3), 1236-1244 .

(^٦)Birch, C. P. D., Oom, S. P., & Beecham, J. A. (2007). Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology. *Ecological Modelling*, 206(3-4), 347-359.

(^٧)Carranza, E. J. M., & Hale, M. (2002). Where? Prospectivity mapping for base and precious metals using a knowledge-driven GIS model in the Baguio district, Philippines. *Natural Resources Research*, 11(2), 77-96.

(^٨)Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1991). GIS technology in mapping landslide hazard. In *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards* (pp. 135-175). Springer.

(^٩)Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4).

(^{١٠})Van Westen, C. J., Rengers, N., & Terlien, M. T. J. (2003). Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau*, 86(2), 404-414.

- ^(١١)Chung, C. F., & Fabbri, A. G. (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30(3), 451–472.
- ^(١٢)Bishop, M. P., James, L. A., Shroder, J. F., & Walsh, S. J. (2012). Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. *Geomorphology*, 137(1), 5–26 .
- ^(١٣)Youssef, A. M., Maerz, N. H., & Hassan, A. M. (2015). Remote sensing applications for mapping and monitoring land surface deformation in arid regions. *Environmental Earth Sciences*, 74(6), 5063–5075 .
- ^(١٤)Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46
- ^(١٥)Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185–201.
- ^(١٦)Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82.
- ^(١٧)Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874.
- ^(١٨)Mukaka, M. M. (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*, 24(3), 69–71