

النمذجة البيئية للسدود الافتراضية وتقييم آثارها باستخدام التقنيات الجيومكانية في حوض وادي كارزا بمحافظة دهوك
Environmental Modeling of Virtual Dams and Assessment of Their Impacts Using
Geospatial Techniques in the Karza Valley Basin, Duhok Governorate

م.م. زينب جبر عواد
قسم الجغرافية، كلية التربية، جامعة المستنصرية، بغداد، العراق

Abstract

This study aims to employ geospatial techniques in environmental modeling to identify optimal locations for virtual dams in the Karza Valley Basin, Duhok Governorate, using Landsat-8 imagery and a Digital Elevation Model (DEM) with a spatial resolution of 10 m. The Analytical Hierarchy Process (AHP) was applied to determine the weights of criteria and to construct a spatial model for classifying suitability levels. The study seeks to identify the most efficient dam sites and analyze the environmental and geomorphological constraints influencing site selection, thereby supporting water resource planning decisions and enhancing sustainable water management.

The results of the spatial analysis revealed a clear variation in suitability levels within the basin, where high-suitability areas are concentrated in the central and upper parts characterized by moderate slopes and suitable geological formations, while medium suitability dominates a larger portion of the basin. Low-suitability areas are mainly associated with steep slopes and geomorphologically unstable conditions. In terms of proportional distribution, high-suitability areas represent a limited share (20–30%), medium suitability dominates (40–50%), while low suitability ranges between (20–30%). This pattern highlights the importance of spatial modeling in identifying the most efficient locations. The findings also indicate the presence of environmental and geomorphological constraints, such as slope steepness and lithological characteristics, which may affect project efficiency and should be considered in planning. Accordingly, the study confirms the effectiveness of geospatial modeling in decision-making support, improving water planning efficiency, and achieving sustainable water resource management in the study area

Email:

zynbjbr2@uomustansiriyah.edu.iq

Published: 1- 6 -2026

Keywords: النمذجة الجيومكانية، (GIS)، التحليل الهرمي (AHP)، الملائمة المكانية، السدود الافتراضية.

هذه مقالة وصول مفتوح بموجب ترخيص
CC BY 4.0

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



المخلص

يهدف البحث إلى توظيف التقنيات الجيومكانية في النمذجة البيئية لتحديد المواقع المثلى للسدود الافتراضية في حوض وادي كارزا بمحافظة دهوك، اعتماداً على مرئيات Landsat-8 وبيانات نموذج الارتفاع الرقمي (10 م)، مع استخدام أسلوب (AHP) لتحديد أوزان المعايير وبناء نموذج مكاني لتصنيف درجات الملاءمة. ويسعى إلى تحديد المواقع الأكثر كفاءة وتحليل المحددات البيئية والجيومورفولوجية المؤثرة، بما يدعم قرارات التخطيط المائي ويعزز الإدارة المستدامة للموارد المائية.

أظهرت نتائج التحليل المكاني تبايناً واضحاً في درجات الملاءمة داخل الحوض، إذ تركزت المناطق عالية الملاءمة في الأجزاء الوسطى والعليا ذات الانحدارات المعتدلة والتراكيب الجيولوجية المناسبة، مقابل انتشار أوسع للملاءمة المتوسطة، في حين ارتبطت الملاءمة الضعيفة بالمناطق شديدة الانحدار أو غير المستقرة جيومورفولوجياً. وعلى مستوى التوزيع النسبي، شكلت المناطق عالية الملاءمة نسبة محدودة (20-30%)، مقابل سيطرة الملاءمة المتوسطة (40-50%)، وتراوح الملاءمة الضعيفة بين (20-30%). ويعكس هذا النمط أهمية النمذجة المكانية في تحديد المواقع الأكثر كفاءة، وتشير النتائج أيضاً إلى وجود محدّدات بيئية وبيومورفولوجية، مثل شدة الانحدار وطبيعة التكوينات الصخرية، قد تؤثر في كفاءة هذه المشاريع وتستدعي أخذها بنظر الاعتبار عند التخطيط. وبذلك يؤكد البحث فاعلية النمذجة الجيومكانية في دعم اتخاذ القرار، وتعزيز كفاءة التخطيط المائي، وتحقيق إدارة مستدامة للموارد المائية في منطقة الدراسة.

المقدمة

تعاني العديد من الأحواض المائية، ولا سيما في المناطق الجبلية وشبه الجافة، من مشكلات بيئية وهيدرولوجية متزايدة تتمثل في ندرة الموارد المائية، وتكرار الفيضانات المفاجئة، وتسارع عمليات التعرية المائية، وتدهور التربة والموارد الطبيعية. وقد ازدادت حدة هذه المشكلات خلال العقود الأخيرة نتيجة التغيرات المناخية وما رافقها من تذبذب كميات الأمطار وارتفاع درجات الحرارة وتزايد شدة العواصف المطرية قصيرة المدة، الأمر الذي أدى إلى تغير أنماط الجريان السطحي وزيادة الضغوط على الأنظمة البيئية المائية.

وفي إطار البحث عن حلول مستدامة لإدارة الموارد المائية والحد من المخاطر البيئية المصاحبة، برزت السدود الافتراضية بوصفها أحد الأساليب الحديثة التي تعتمد على النمذجة الرقمية والمحاكاة المكانية لتحديد أفضل المواقع المقترحة لإنشاء السدود قبل تنفيذها فعلياً. إذ تتيح هذه النماذج دراسة كفاءة السدود المقترحة في تنظيم الجريان السطحي، وتقليل ذروة الفيضانات، وزيادة فرص خزن المياه، والحد من فقدان التربة ونقل الرواسب، فضلاً عن تقييم آثارها البيئية والهيدرولوجية المحتملة بصورة مسبقة.

وقد أسهم التطور الكبير في التقنيات الجيومكانية، ولا سيما نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد والنماذج الرقمية للارتفاعات، في تحسين دقة تحليل الخصائص الطبيعية للأحواض المائية وتحديد المواقع الملائمة للسدود الافتراضية استناداً إلى معايير طبوغرافية وهيدرولوجية وبيئية متعددة. كما وفرت هذه التقنيات إمكانيات متقدمة لمحاكاة السيناريوهات المختلفة وتقييم التأثيرات البيئية المتوقعة للسدود قبل تنفيذها، مما يسهم في تعزيز كفاءة التخطيط والإدارة المستدامة للموارد المائية.

وتتجلى أهمية ذلك في حوض وادي كارزا بمحافظة دهوك، الذي يتميز بحساسية عالية للتغيرات المناخية والتضاريسية، حيث تؤثر خصائصه الطبيعية بصورة مباشرة في حجم الجريان السطحي وشدة التعرية المائية. ومن هذا المنطلق تهدف الدراسة إلى تقييم الآثار البيئية والهيدرولوجية للسدود الافتراضية المقترحة في الحوض من خلال تحليل تأثيرها في الجريان السطحي والتعرية المائية والعمليات الرسوبية، بما يوفر أساساً علمياً لدعم قرارات إدارة الموارد المائية وتحقيق التنمية البيئية المستدامة.

مشكلة الدراسة:

تتمثل مشكلة الدراسة في التساؤلات الآتية (ما مدى قدرة تقنيات الجيومكانية على تحديد المواقع الأكثر ملاءمة لإنشاء السدود الافتراضية في منطقة الدراسة؟ وما المعايير الجيومكانية والهيدرولوجية المعتمدة في نمذجة ملاءمة مواقع هذه السدود؟ وما طبيعة الآثار البيئية المتوقعة الناتجة عن إنشاء السدود الافتراضية على النظامين الهيدرولوجي والبيئي في منطقة الدراسة؟).

فرضية الدراسة:

تفترض الدراسة أن توظيف تقنيات الجيومكانية (GIS و RS) يسهم بفاعلية عالية في تحديد المواقع الأكثر ملاءمة لإنشاء السدود الافتراضية في منطقة الدراسة، من خلال اعتماد مجموعة من المعايير الجيومكانية والهيدرولوجية التي تتيح إنتاج خرائط ملاءمة مكانية دقيقة. كما تفترض الدراسة أن إنشاء السدود الافتراضية يؤدي إلى آثار بيئية وهيدرولوجية إيجابية تتمثل في تقليل الجريان السطحي والحد من التعرية المائية وتحسين إدارة الموارد المائية في الحوض المدروس.

أهداف الدراسة:

- 1- بناء نموذج جيومكاني وبيئي للسدود الافتراضية في حوض وادي كارزا بالاعتماد على تقنيات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد والبيانات الطبوغرافية والهيدرولوجية.
- 2- تحديد المواقع المثلى لإنشاء السدود الافتراضية من خلال تطبيق أساليب التحليل المكاني متعدد المعايير وتحليل الخصائص الطبيعية المؤثرة في اختيار المواقع.
- 3- إنتاج خرائط جيومكانية توضح درجات ملاءمة المواقع المقترحة والتوزيع المكاني للسدود الافتراضية داخل حوض الدراسة.



- 4- تقييم التأثيرات البيئية والهيدرولوجية المحتملة للسدود الافتراضية من خلال تحليل التغيرات المتوقعة في خصائص الحوض المائي.
 - 5- تحليل أثر السدود الافتراضية في الجريان السطحي والحد من مخاطر الفيضانات والتعرية المائية وتقليل نقل الرواسب داخل الحوض.
 - 6- دراسة تأثير السدود الافتراضية في التربة والغطاء النباتي والمياه الجوفية بوصفها من أهم العناصر البيئية المتأثرة بإنشاء السدود.
 - 7- بيان دور السدود الافتراضية في تعزيز إدارة الموارد المائية وتحقيق الاستخدام الأمثل للمياه والحد من تدهور الموارد الطبيعية في منطقة الدراسة.
- أهمية الدراسة:**

تتبع أهمية البحث من دوره في دعم الإدارة المستدامة للموارد المائية من خلال نمذجة السدود الافتراضية وتقييم آثارها البيئية والهيدرولوجية، بما يسهم في الحد من مخاطر الفيضانات والتعرية المائية وتحسين كفاءة استثمار الموارد المائية. كما تبرز أهميته في توظيف التقنيات الجيومكانية الحديثة، ولا سيما نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد، لتحديد المواقع الأكثر ملاءمة لإنشاء السدود الافتراضية وإنتاج خرائط دقيقة تدعم التخطيط البيئي وصنع القرار في إدارة الأحواض المائية.

مناهج الدراسة:

اعتمدت الدراسة على مناهج علمية متكاملة شملت **المنهج الوصفي التحليلي** لوصف وتحليل الخصائص الطبيعية لمنطقة الدراسة وتفسير العلاقات بين عناصرها الجغرافية، و**المنهج الكمي** في معالجة البيانات المناخية والهيدرولوجية وتحويلها إلى قيم رقمية قابلة للتحليل الإحصائي. كما تم استخدام **منهج التحليل المكاني** ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتحليل المعايير المؤثرة في اختيار المواقع الملائمة للسدود الافتراضية مثل الانحدار والارتفاع والقرب من المجاري المائية واستخدامات الأرض. إضافة إلى ذلك، تم توظيف تقنيات الاستشعار عن بعد لاستخراج وتحليل البيانات الطبوغرافية والغطاء الأرضي بالاعتماد على المرئيات الفضائية ونماذج الارتفاع الرقمية (DEM)، فضلاً عن استخدام منهج اتخاذ القرار متعدد المعايير (MCDA) باستخدام أسلوب AHP لدمج المعايير وإنتاج خرائط ملاءمة مكانية دقيقة.

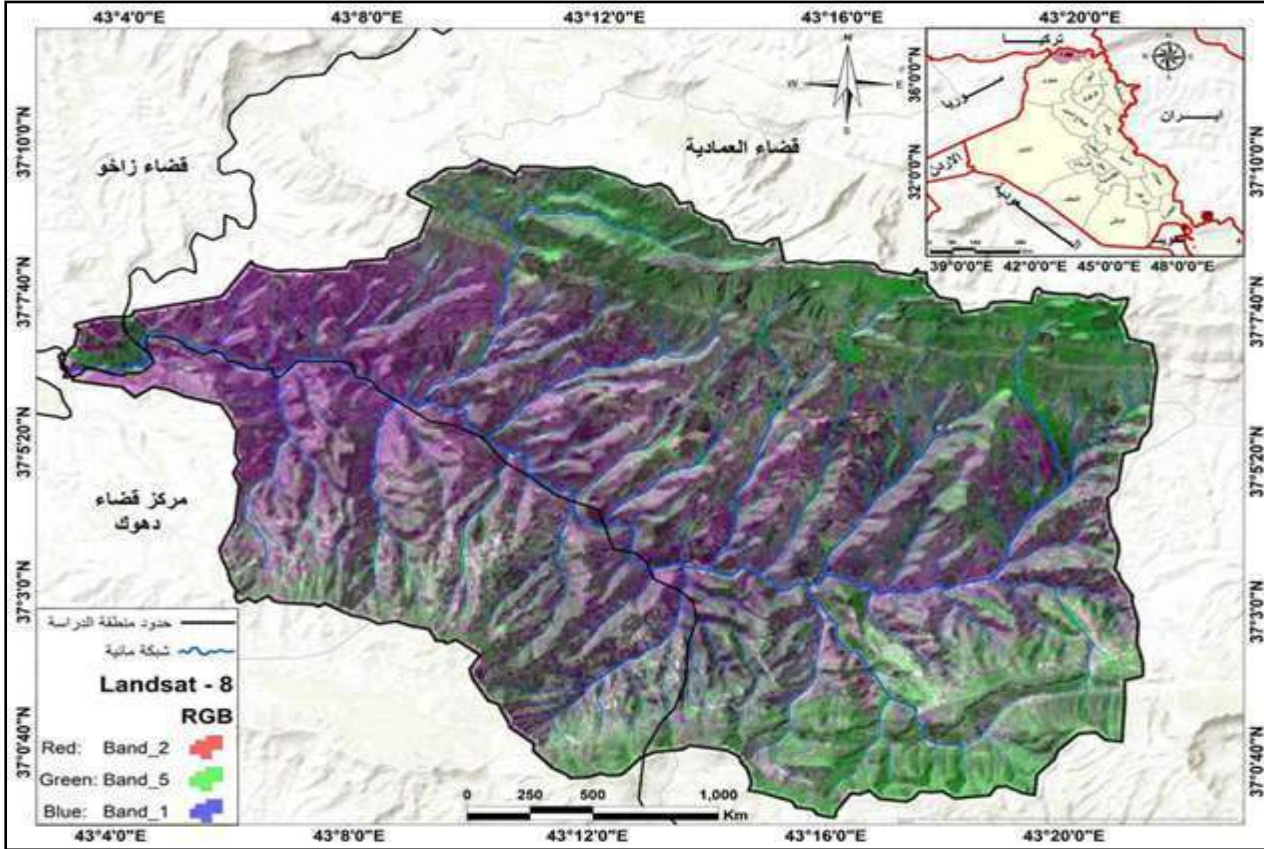
مواد وطرق العمل:

1- موقع منطقة الدراسة:

تقع منطقة الدراسة ادرياً ضمن محافظة دهوك في شمال العراق، يمتد بين خطي طول (43 5 0 - 0 43 20) شمالاً، ودائرتي عرض (37 0 0 - 37 9 0) شرقاً، أما حدودها الادارية فقد يمتد حوض نهر

كارزا ضمن ثلاث وحدات إدارية هي (قضاء العمادية، وقضاء دهوك، وقضاء زاخو) كما في خريطة (1).
وتبلغ مساحة المنطقة نحو (323.62) كم².

خريطة (1) حدود منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد خريطة العرافي بمقياس 1:1000000، ومخرجات برنامج ArcGIS.

1- تحليل الملاءمة البيئية لمواقع السدود الافتراضية:

يقصد بتحليل الملاءمة البيئية هو تقييم مكاني تهدف إلى تحديد أكثر المواقع توافقاً مع الشروط الطبيعية والبيئية لإنشاء السدود، وذلك من خلال دمج مجموعة من العوامل المؤثرة ضمن بيئة Geographic Information Systems. تعتمد هذه العملية على تحويل الظواهر الطبيعية المختلفة إلى طبقات مكانية رقمية (Raster أو Vector)، ثم إعادة تصنيفها وفق درجات ملاءمة تعكس مدى صلاحية كل موقع⁽¹⁾. تشمل معايير التحليل عادةً العوامل الطبوغرافية مثل الارتفاع والانحدار واتجاه الانحدار، والعوامل الهيدرولوجية ككثافة شبكة التصريف وقرب الموقع من المجاري المائية، إضافة إلى العناصر المناخية مثل كمية الأمطار، والعوامل الجيولوجية المتمثلة بنوع التكوينات الصخرية ومدى نفاذيتها واستقرارها، فضلاً عن خصائص التربة⁽²⁾. ويتم بعد ذلك توحيد هذه الطبقات وإعطائها أوزاناً نسبية تعكس أهميتها في اختيار الموقع،

باستخدام أساليب تحليل القرار مثل Multi-Criteria Decision Analysis، وغالباً ما تطبق تقنية Analytic Hierarchy Process لتحديد هذه الأوزان بشكل علمي⁽³⁾.

بعد دمج الطبقات المكانية الموزونة، ينتج نموذج الملاءمة خريطة نهائية تصنف المنطقة إلى درجات (عالية، متوسطة، منخفضة الملاءمة)، بحيث تمثل المناطق ذات القيم العالية المواقع الأكثر ملاءمة لإنشاء السدود الافتراضية من حيث الكفاءة التخزينية والاستقرار البيئي وتقليل المخاطر⁽⁴⁾. وتعد هذه الخطوة أداة حاسمة لدعم اتخاذ القرار، إذ تساهم في تقليل التكاليف الميدانية وتوجيه الجهود نحو المواقع المثلى، كما في شكل (1).

شكل (1) مخطط خطوات ومراحل البحث



المصدر: من عمل الباحثة.



2- المؤشرات البيئية المؤثرة في تحديد المواقع الملائمة للسدود الافتراضية:

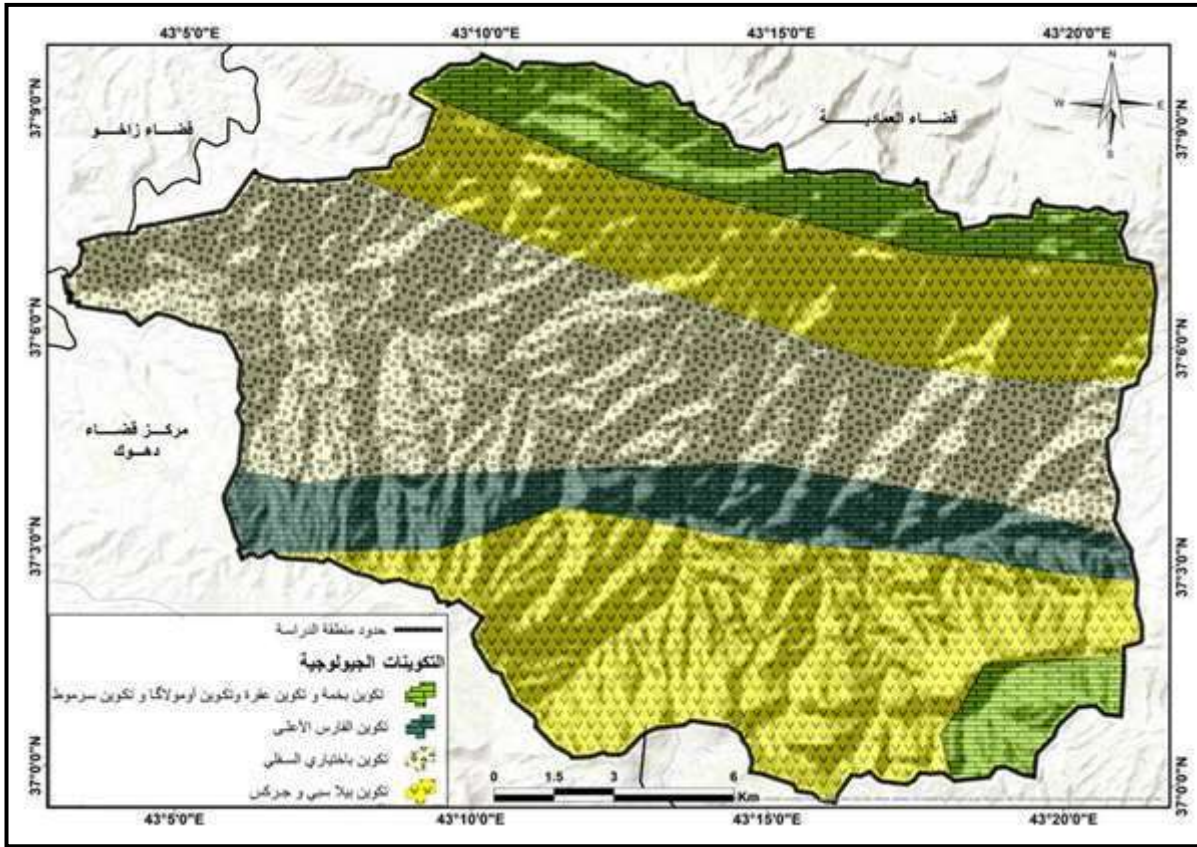
تشير المؤشرات البيئية المؤثرة في تحديد مواقع السدود الافتراضية إلى مجموعة العوامل الطبيعية التي تستخدم لتقييم مدى صلاحية الموقع من الناحية الهيدرولوجية والجيومورفولوجية والجيولوجية والمناخية. وتمثل هذه المؤشرات الأساس الذي تبنى عليه عمليات التحليل المكاني داخل بيئة (GIS)، حيث يتم تحويل كل مؤشر إلى طبقة مكانية قابلة للقياس والمقارنة⁽⁵⁾، وتشمل هذه المؤشرات مجموعة من العوامل الرئيسية، أبرزها:

1-2 التكوينات الجيولوجية: يتضح من خلال الجدول (1) أن التكوينات الجيولوجية في منطقة الدراسة

تتباين في درجة ملاءمتها لإقامة السدود تبعاً لخصائصها الصخرية ومدى استقرارها وفعاليتها. إذ يحتل تكوين بيلا سبي وجركس المرتبة الأولى من حيث المساحة بنسبة (41.03%) وبدرجة ملاءمة متوسطة، ما يشير إلى إمكانية استغلاله في إنشاء السدود ولكن مع ضرورة اتخاذ معالجات هندسية لتقليل مخاطر التسرب وعدم التجانس الصخري. في المقابل، يأتي تكوين باختياري السفلي بنسبة (36.34%) ضمن فئة الملاءمة الضعيفة، وهو ما يعكس طبيعة تكويناته الفتاتية وضعف تماسكها وارتفاع فعاليتها، الأمر الذي يجعله أقل ملاءمة لإقامة السدود.

أما التكوينات المتمثلة في بخمة وعقرة وأومولاكا وسرموط، فرغم أنها تشغل نسبة محدودة (11.45%)، إلا أنها تعد الأكثر ملاءمة، نظراً لكونها تتصف بصلابتها صخورها وقابليتها العالية لتحمل الضغوط، مما يجعلها مواقع مفضلة لإنشاء السدود من الناحية الجيولوجية. في حين يصنف تكوين الفارس الأعلى بنسبة (11.18%) ضمن الملاءمة الضعيفة، بسبب خصائصه الرسوبية المفككة نسبياً والتي قد تزيد من احتمالية التسرب وعدم الاستقرار.

خريطة (2) التكوينات الجيولوجية لمنطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على خريطة الجيولوجية لشمال العراق بمقياس رسم 1:50000، ومخرجات برنامج ArcGIS.

جدول (1) مساحة ونسبة فئات المؤشرات المكانية لإقامة السدود الافتراضية في منطقة الدراسة

المؤشر	ت	فئات المؤشر	المساحة كم ²	الوصف	%	درجة الملاءمة لإقامة السدود
التكوينات الجيولوجية	1	تكوين بيلا سبي و جركس	132.77	صخور متوسطة الصلابة بنفاذية موضعية	41.03%	ملاءمة متوسطة
	2	تكوين باختيارى السفلي	117.59	رواسب فتاتية ضعيفة التماسك عالية النفاذية	36.34%	ملاءمة ضعيفة
	3	تكوين بخمة و تكوين عقرة و تكوين أومولاگا و تكوين سرموط	37.05	صخور كلسية صلبة قليلة النفاذية مستقرة	11.45%	ملاءمة عالية
	4	تكوين الفارس الأعلى	36.17	تكوينات رسوبية ضعيفة التماسك قابلة للتسرب	11.18%	ملاءمة ضعيفة
المخاطر الجيولوجية	1	مناطق متوقعة لحركة الانهيار	191.86	مناطق غير مستقرة جيولوجياً تعاني من خطر الانزلاقات الارضية	59.28%	ملاءمة ضعيفة إلى متوسطة
	2	مناطق المحتمل خلوها من المخاطر الجيولوجية	114.73	مناطق مستقرة نسبياً	35.45%	ملاءمة متوسطة إلى جيدة
	3	المناطق النشطة لحركة الانهيار	17.03	مناطق نشطة انزلاقياً عالية الخطورة	5.26%	ملاءمة ضعيفة جداً
الارتفاعات/ متر	1	أدنى من 620	29.21	سهول جبلية	9.03%	ملاءمة متوسطة
	2	621 - 999	128.26	تلال عالية	39.66%	ملاءمة عالية
	3	1000 - 1499	133.40	جبال بسيطة الالتواء	41.25%	ملاءمة عالية
	4	1500 - 2060	32.53	جبال معقدة الالتواء	10.06%	ملاءمة ضعيفة
	1	0 - 5.97	119.81	منبسط إلى شبه منبسط	37.86%	ملائمة عالية جداً

Email: djhr@uodiyala.edu.iq



سطح الارض	2	5.98 - 10.9	108.98	انحدار خفيف	34.44%	ملائمة عالية
	3	11 - 17.4	50.50	انحدار متوسط	15.96%	ملائمة متوسطة
	4	17.5 - 26.2	25.40	انحدار شديد	8.03%	ملائمة ضعيفة
	5	26.3 - 46.1	11.73	انحدار شديد جداً	3.71%	غير ملائمة
	1	مستوي (-1)	30.37	تأثير ضعيف على الجريان	9.60%	ملاءمة متوسطة
	2	شمال (0-22.5) (360-337.5)	58.48	تبخر منخفض	18.48%	ملاءمة عالية
	3	شمال شرق (22.5-67.5)	17.41	رطوبة أفضل	5.50%	ملاءمة عالية
	4	شرق (67.5-112.5)	26.41	تأثير معتدل	8.35%	ملاءمة متوسطة
	5	جنوب شرق (112.5-157.5)	41.34	تبخر مرتفع	13.06%	ملاءمة ضعيفة
	6	جنوب (157.5-202.5)	50.04	تبخر عالي جداً	15.81%	ملاءمة ضعيفة
	7	جنوب غرب (202.5-247.5)	34.28	فقد مائي كبير	10.83%	ملاءمة ضعيفة
	8	غرب (247.5-292.5)	27.76	تأثير متوسط	8.77%	ملاءمة متوسطة
	9	شمال غرب (292.5-337.5)	30.37	تبخر منخفض نسبياً	9.60%	ملاءمة عالية
اصناف تقوس سطح الارض	1	اراضي محدبة	100.18	مناطق طاردة للمياه يتشنت فيها الجريان السطحي	30.98%	ملاءمة ضعيفة
	2	اراضي مستوية	154.77	جريان ضعيف وتجميع محدود للمياه	47.86%	ملاءمة متوسطة
	3	اراضي مقعرة	68.44	مناطق تجميع وتركيز للجريان السطحي	21.16%	ملاءمة عالية
انواع الترب	1	ارض وعرة مشققة صخرية	284.15	نفاذية عالية وتشققات تؤدي إلى تسرب المياه	87.80%	ملاءمة ضعيفة
	2	ارض جبلية وعرة	39.48	تماسك نسبي أفضل لكن ما تزال وعرة	12.20%	ملاءمة متوسطة
	1	مناطق جرداء	44.71	جريان سطحي مرتفع وانعدام تثبيت للتربة	13.82%	ملائمة عالية
	2	غطاء نباتي ضعيف جداً	87.28	حماية ضعيفة للتربة مع جريان سطحي مرتفع	26.97%	ملائمة عالية
	3	غطاء نباتي ضعيف	88.54	تأثير محدود على تقليل الجريان	27.36%	ملائمة متوسطة
	4	غطاء نباتي متوسط	72.78	تقليل نسبي للجريان وتحسين استقرار التربة	22.49%	ملائمة متوسطة
	5	غطاء نباتي كثيف	30.29	تثبيت جيد للتربة وتقليل الجريان السطحي	9.36%	ملائمة ضعيفة
	1	كثافة منخفضة جداً	80.22	جريان ضعيف وتغذية محدودة	24.80%	ملائمة ضعيفة جداً
	2	كثافة منخفضة	82.76	جريان قليل	25.59%	ملائمة ضعيفة
	3	كثافة متوسطة	72.58	توازن نسبي في الجريان	22.44%	ملائمة متوسطة
	4	كثافة عالية	61.74	جريان جيد وتغذية مناسبة	19.09%	ملائمة عالية
	5	كثافة عالية جداً	26.16	جريان مرتفع جداً مع احتمال ترسيب	8.09%	ملائمة عالية
	1	الشرق (E)	23.09	جريان جانبي محدود، تجميع مائي ضعيف نسبياً	7.14%	ملائمة ضعيفة
	2	الجنوب الشرقي (SE)	29.19	جريان متوسط مع فقدان جزئي للتجميع	9.03%	ملائمة متوسطة
	3	الجنوب (S)	71.92	جريان باتجاه مناطق منخفضة، قابل للتجميع	22.24%	ملائمة عالية
	4	الجنوب الغربي (SW)	44.94	جريان جيد نسبياً مع فرص خزن مائي	13.90%	ملائمة متوسطة إلى عالية

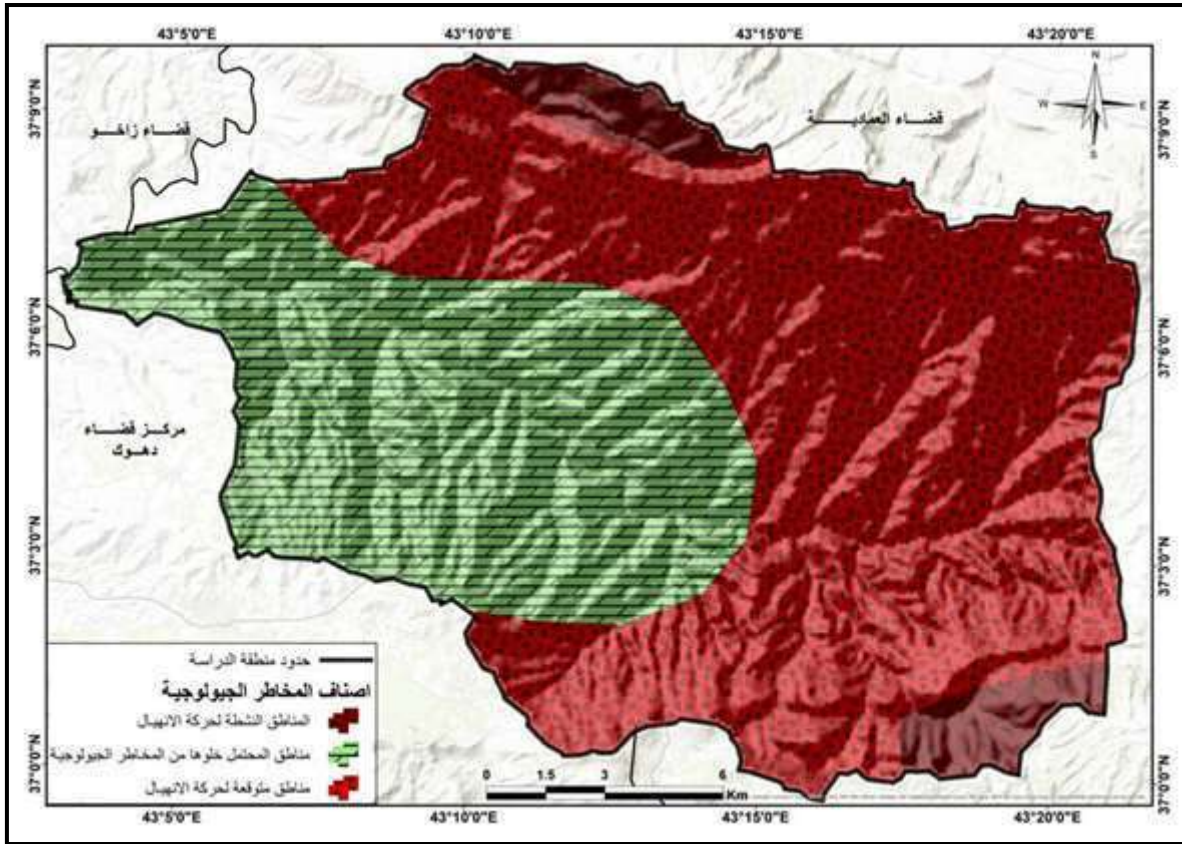


ملائمة متوسطة	13.15%	جريان متوسط، يعتمد على التضرس المحلي	42.50	الغرب (W)	5
ملائمة متوسطة	10.50%	جريان متوازن مع فرص تجميع محدودة	33.96	الشمال الغربي (NW)	6
ملائمة ضعيفة إلى متوسطة	16.41%	جريان عكسي محتمل بالنسبة لبعض الأحواض	53.04	الشمال (N)	7
ملائمة ضعيفة	7.63%	جريان متشنت، ضعف في التجميع المائي	24.67	الشمال الشرقي (NE)	8

الجدول : من عمل الباحثة بالاعتماد على خرائط مؤشرات البيئية، ومخرجات برنامج ArcGIS.

2-2 المخاطر الجيولوجية: يتبين من الجدول (1) أن توزيع هذه المخاطر داخل منطقة الدراسة غير متوازن ويؤثر بشكل مباشر على ملائمة المنطقة لإنشاء السدود. إذ تشكل المناطق المتوقعة لحركة الانهيار النسبة الأكبر من المساحة وبما يقارب 59.28%، وهي مناطق تتميز بعدم الاستقرار الجيومورفولوجي النسبي، حيث من المحتمل أن تتعرض لانزلاقات أرضية مستقبلية نتيجة عوامل طبيعية مثل الأمطار الغزيرة وتشبع التربة بالمياه وضعف التماسك الصخري، مما يجعلها مناطق ذات ملائمة ضعيفة إلى متوسطة لإقامة السدود، إذ يمكن أن تؤثر بشكل غير مباشر على استقرار المنشآت أو على زيادة الترسبات في الخزان. في المقابل، تمثل المناطق المحتملة خلوها من المخاطر الجيولوجية حوالي 35.45% من مساحة المنطقة، وهي مناطق أكثر استقراراً من الناحية الجيولوجية، وتتميز بانخفاض احتمالية حدوث الانزلاقات الأرضية، مما يجعلها الأكثر ملائمة نسبياً لإنشاء السدود، إذ تعد مناطق ذات ملائمة متوسطة إلى جيدة، إلا أنها لا تخلو من بعض المخاطر الثانوية التي قد تظهر مستقبلاً نتيجة التغيرات البيئية أو التدخلات البشرية. أما المناطق النشطة لحركة الانهيار، والتي تشكل 5.26% فقط من المساحة، فهي مناطق غير مستقرة بشكل واضح وتشهد نشاطاً فعلياً للانزلاقات الأرضية، وغالباً ما ترتبط بالمنحدرات الشديدة أو المواد المفككة، وتعد هذه المناطق غير ملائمة إطلاقاً لإقامة السدود أو حتى الاقتراب منها، نظراً لما تمثله من خطر مباشر على استقرار المنشآت الهندسية.

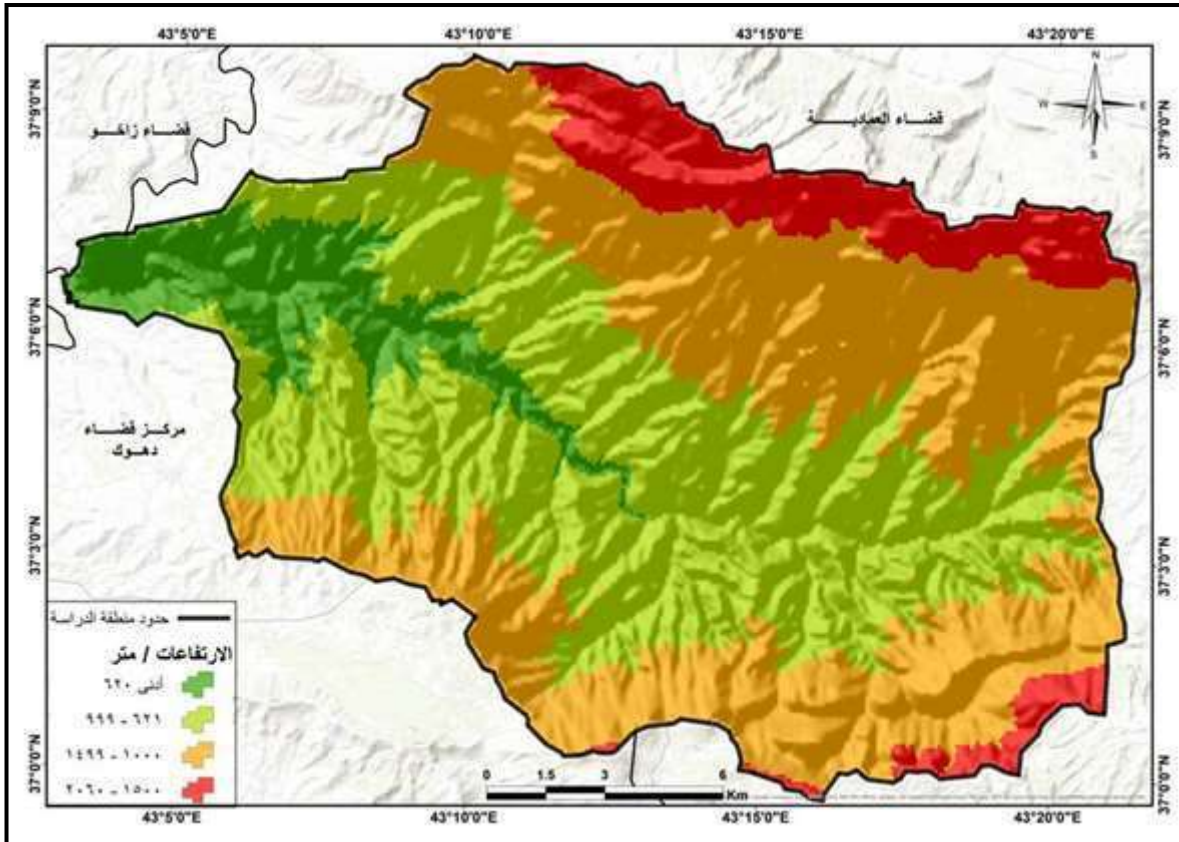
خريطة (3) المخاطر الجيولوجية لمنطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على خريطة مخاطر الجيولوجية في العراق بمقياس رسم 1:1000000، ومخرجات برنامج ArcGIS.

3-2 **الارتفاعات:** يتضح من خلال الجدول (1) أن توزيع الارتفاعات في منطقة الدراسة يظهر تبايناً واضحاً في المساحات والنسب، وهو ما ينعكس مباشرة على درجة الملاءمة لإقامة السدود. إذ تستحوذ الفئتان (1000-1499 م) و(621-999 م) على النسبة الأكبر من المساحة، بواقع (41.25%) و(39.66%) على التوالي، وهما تصنفان ضمن فئة الملاءمة العالية، نظراً لكونهما تمثلان نطاقات ارتفاع توفر توازناً مناسباً بين الانحدار وسرعة الجريان السطحي، مما يعزز كفاءة تجميع المياه ويقلل من مشاكل الركود أو الفقد. في المقابل، تشكل الفئة المنخفضة (أقل من 620 م) نسبة (9.03%) وتعد ملاءمتها متوسطة، إذ إن انخفاض فرق المناسيب قد يحد من فعالية التخزين الطبيعي ويؤثر على كفاءة السدود من الناحية الهيدرولوجية. أما الفئة العليا (1500-2060 م)، التي تمثل (10.06%) من المساحة، فتصنف ضمن الملاءمة الضعيفة، بسبب شدة الانحدارات وما يرافقها من ارتفاع في كلفة الإنشاء وزيادة احتمالية عدم الاستقرار الجيومورفولوجي.

خريطة (4) فئات الارتفاع لمنطقة الدراسة



3
4
5
6
7
8
9
10
11

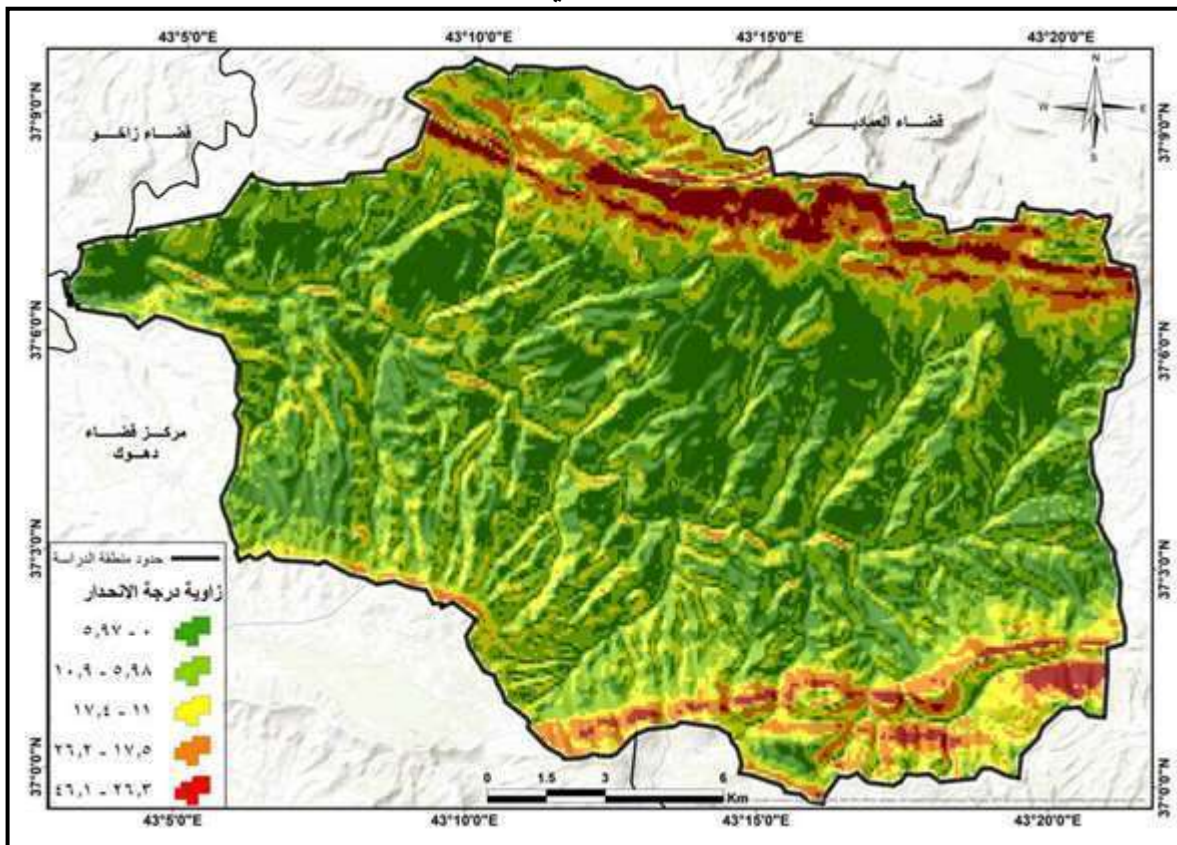
المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على (DEM) بدقة 10 متر، ومخرجات برنامج ArcGIS.

3-4 **انحدار سطح الارض:** يشير جدول (1) إلى أن أكثر من (72%) من مساحة المنطقة تقع ضمن فئتي الانحدار المنبسط إلى الخفيف (0-10.9%), وهي فئات تعد في العادة ملائمة نسبياً لإنشاء السدود الصغيرة والمتوسطة، خصوصاً في مواقع الأودية ذات المقاطع العرضية الواسعة. هذا النوع من الانحدار يسمح بتجميع المياه بسهولة وتكوين خزانات ذات سعة جيدة دون الحاجة إلى ارتفاعات إنشائية كبيرة جداً، كما يقلل من تكاليف البناء مقارنة بالمناطق الجبلية شديدة الانحدار. لذلك، يمكن القول إن الجزء الأكبر من المنطقة يوفر بيئة جيومورفولوجية مناسبة نسبياً لتخطيط مواقع السدود السطحية أو الترابية.

أما فئة الانحدار المتوسط (11-17.4%) والتي تمثل نحو (15.96%) من المساحة، فهي تمثل مناطق انتقالية قد تكون مناسبة لمواقع السدود بشرط توفر تضاريس وادية مغلقة، إذ يمكن استغلالها لإنشاء سدود أكثر تحكماً بكمية الجريان، لكنها تتطلب دراسات هندسية دقيقة بسبب زيادة سرعة الجريان واحتمالية التعرية النهرية على الجوانب. هذه الفئة غالباً ما تكون ملائمة للسدود الصغيرة أو سدود حصاد المياه أكثر من السدود الكبيرة. في المقابل، تمثل فئات الانحدار

الشديد والشديد جداً (أكثر من 17.5%) حوالي 11.74% من مساحة المنطقة، وهي مناطق غير ملائمة في الغالب لإنشاء جسم السد أو الخزانات الرئيسية، لكنها قد تكون مهمة جداً من الناحية الهيدرولوجية، لأنها تمثل مناطق التغذية السريعة للأحواض المائية. وجود هذه الانحدارات يزيد من سرعة الجريان السطحي، وبالتالي يرفع من احتمالية الفيضانات المفاجئة، مما يجعل اختيار موقع السد في أسفل هذه المناطق أكثر حساسية وأهمية للتحكم بالتصريف المائي.

خريطة (5) درجات الانحدار في منطقة الدراسة

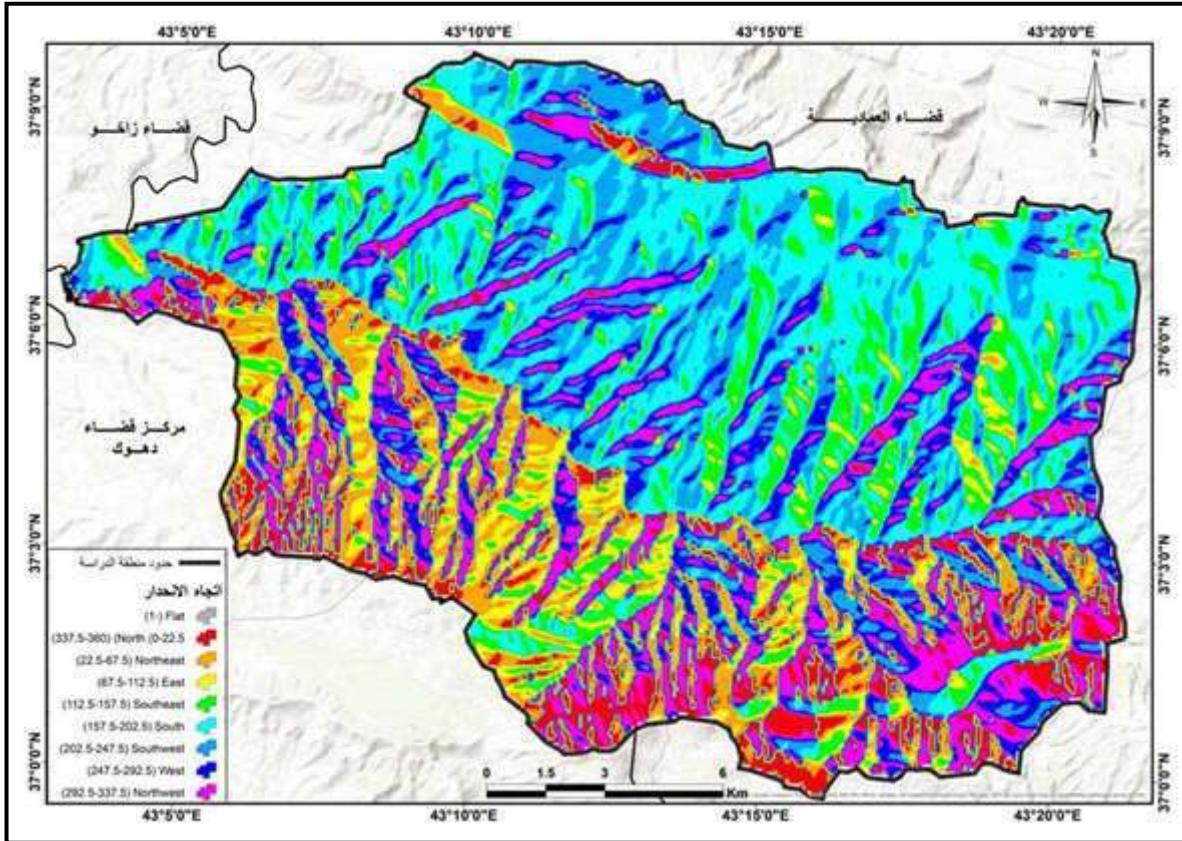


المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على (DEM) بدقة 10 متر، ومخرجات برنامج ArcGIS.

5-3 اتجاه انحدار سطح الارض: يتضح من خلال الجدول (1) أن اتجاه انحدار سطح الأرض في حوض كارزا يتباين في تأثيره على ملائمة مواقع السدود الافتراضية. إذ تظهر الاتجاهات الشمالية نسبة (33.58%) ضمن فئة الملاءمة العالية، ويعزى ذلك إلى انخفاض تعرضها النسبي للإشعاع الشمسي، مما يحد من معدلات التبخر ويساعد على تعزيز الاحتفاظ بالمياه، الأمر الذي ينعكس إيجاباً على كفاءة الخزن المائي. في المقابل، تمثل الاتجاهات الجنوبية نسبة (39.70%) ضمن فئة الملاءمة الضعيفة، نظراً لزيادة تعرضها المباشر لأشعة الشمس، مما يؤدي إلى ارتفاع معدلات التبخر وزيادة الفاقد المائي، وبالتالي انخفاض كفاءة المواقع المقترحة. أما الاتجاهات الشرقية

والغربية والمناطق المستوية، والتي تشكل معاً (26.72%) من مساحة المنطقة، فتقع ضمن فئة الملاءمة المتوسطة، إذ تتسم بتعرض شمسي معتدل نسبياً، مما يجعل تأثيرها الهيدرولوجي أقل طرفاً مقارنة بالاتجاهات الشمالية والجنوبية.

خريطة (6) اتجاه الانحدار في منطقة الدراسة

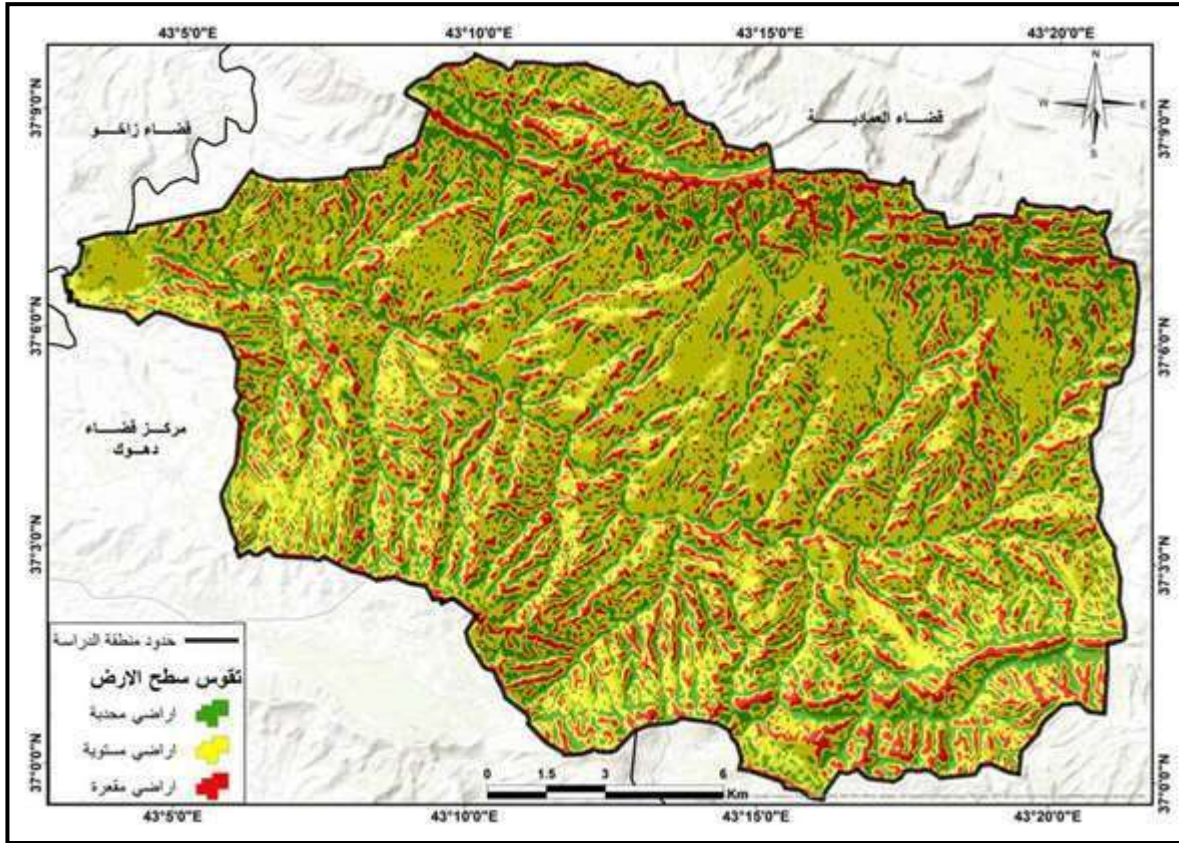


12
13
14
15
16
17
18
19

المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على (DEM) بدقة 10 متر، ومخرجات برنامج ArcGIS.

3-6 **تقعر وتحذب سطح الارض:** يتضح من خلال الجدول (1) أن تقوس سطح الأرض يتوزع بنسب متفاوتة تؤثر بشكل مباشر على تحديد مواقع السدود الافتراضية. إذ تشكل الأراضي المستوية النسبة الأكبر من مساحة المنطقة بواقع (47.86%)، ما يعني سيادة مناطق ذات جريان سطحي محدود وقدرة متوسطة على تجميع المياه، وبالتالي فهي تمثل نطاقاً واسعاً من الملاءمة المتوسطة يمكن استثماره بشروط إضافية تتعلق ببقية العوامل. في المقابل، تمثل الأراضي المحدبة نسبة (30.98%)، وهي نسبة ليست قليلة، لكنها تقع ضمن الملاءمة الضعيفة نظراً لطبيعتها الطاردة للمياه، حيث يتشتت الجريان السطحي بعيداً عنها، مما يقلل من كفاءة تغذية السدود ويجعلها أقل جدوى من الناحية الهيدرولوجية. أما الأراضي المقعرة، فرغم أنها تشغل نسبة أقل بلغت

(21.16%)، إلا أنها تعد الأكثر أهمية، إذ تقع ضمن الملاءمة العالية لكونها مناطق طبيعية لتجميع وتركيز المياه، ما يعزز من فرص نجاح إقامة السدود ورفع كفاءتها التخزينية. خريطة (7) تقوس سطح الارض في منطقة الدراسة

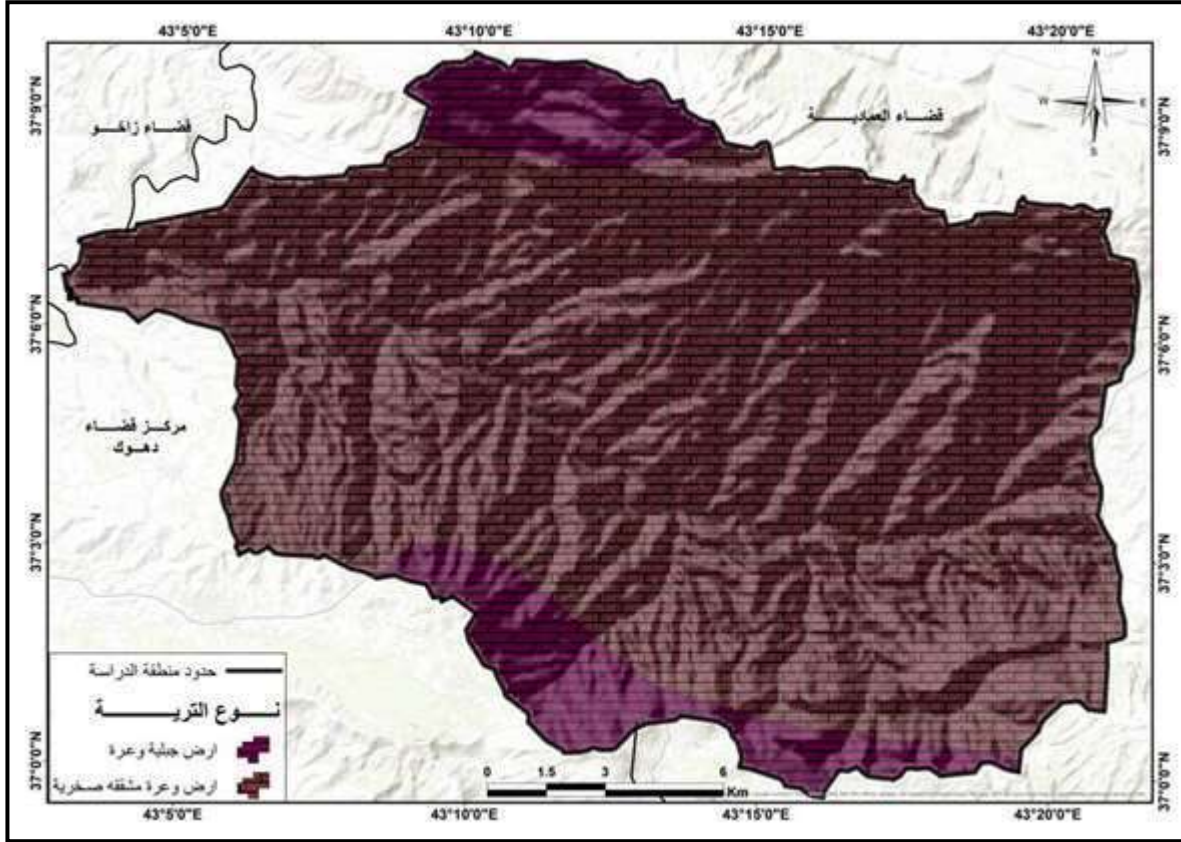


3
4

المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على (DEM) بدقة 10 متر، ومخرجات برنامج ArcGIS.

7-3 التربة: يتضح من خلال الجدول (1) أن خصائص التربة في منطقة الدراسة تظهر هيمنة واضحة للأراضي الوعرة المتشققة الصخرية، إذ تشكل نسبة (87.80%) من المساحة الكلية، وهي نسبة مرتفعة جداً تدل على أن أغلب المنطقة تتسم بخصائص جيومورفولوجية غير ملائمة لإنشاء السدود. هذه التربة تتميز بارتفاع النفاذية وكثرة الشقوق الصخرية، ما يؤدي إلى زيادة احتمالية تسرب المياه وضعف القدرة على الاحتفاظ بها، وبالتالي تصنف ضمن الملاءمة الضعيفة. في المقابل، تمثل الأراضي الجبلية الوعرة نسبة (12.20%) فقط من المساحة، ورغم أنها ما تزال ضمن بيئة صعبة، إلا أنها تعد أفضل نسبياً من الفئة الأولى، نظراً لدرجة تماسكها الأعلى وانخفاض التشققات مقارنة بالأراضي الصخرية المتشققة، ولذلك تصنف ضمن الملاءمة المتوسطة.

خريطة (8) اصناف الترب في منطقة الدراسة



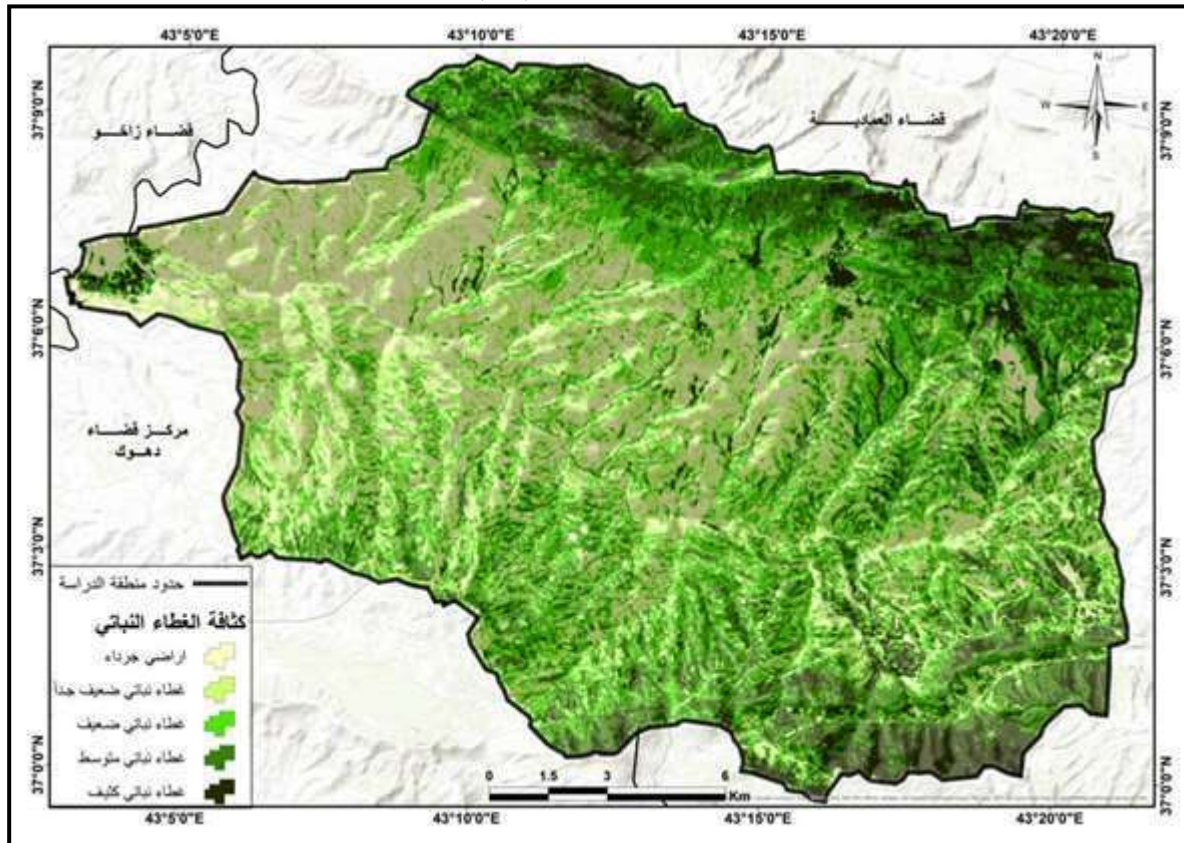
3
4
5
6
7
8
9
10

المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد خريطة بيورنك للعراق بمقياس رسم 1:1000000، ومخرجات برنامج ArcGIS.

8-3 **كثافة الغطاء النباتي:** يتضح من خلال الجدول (1) أن كثافة الغطاء النباتي في منطقة الدراسة تتوزع بشكل غير متوازن، وهو ما ينعكس مباشرة على ملاءمة مواقع السدود الافتراضية. إذ تشكل الفئات ذات الغطاء النباتي الضعيف جداً والضعيف (26.97% و 27.36%) النسبة الأكبر من المساحة، ما يشير إلى هيمنة بيئات محدودة الغطاء النباتي، وبالتالي انخفاض قدرة السطح على تثبيت التربة وزيادة الجريان السطحي، الأمر الذي يجعلها تميل إلى الملاءمة المتوسطة إلى العالية من حيث إمكانية تجميع المياه، رغم ضعف الاستقرار البيئي. في المقابل، تمثل المناطق الجرداء نسبة (13.82%)، وهي تعد عالية الملاءمة من ناحية الجريان السطحي، لأنها لا تعيق حركة المياه نحو المجاري الرئيسية، لكنها في الوقت نفسه قد تكون أكثر عرضة للتعرية. أما الغطاء النباتي المتوسط الذي يشكل (22.49%) فيمثل مناطق انتقالية ذات ملاءمة متوسطة، حيث يحقق توازناً نسبياً بين تثبيت التربة والسماح بجريان المياه. بينما تشكل مناطق الغطاء النباتي الكثيف نسبة منخفضة (9.36%)، وتعد ضعيفة الملاءمة من منظور السدود، لأنها تقلل من الجريان

السطحي وتزيد من فقدان المياه عبر النتح والاعتراض النباتي، مما يحد من كفاءة التغذية المائية للسود.

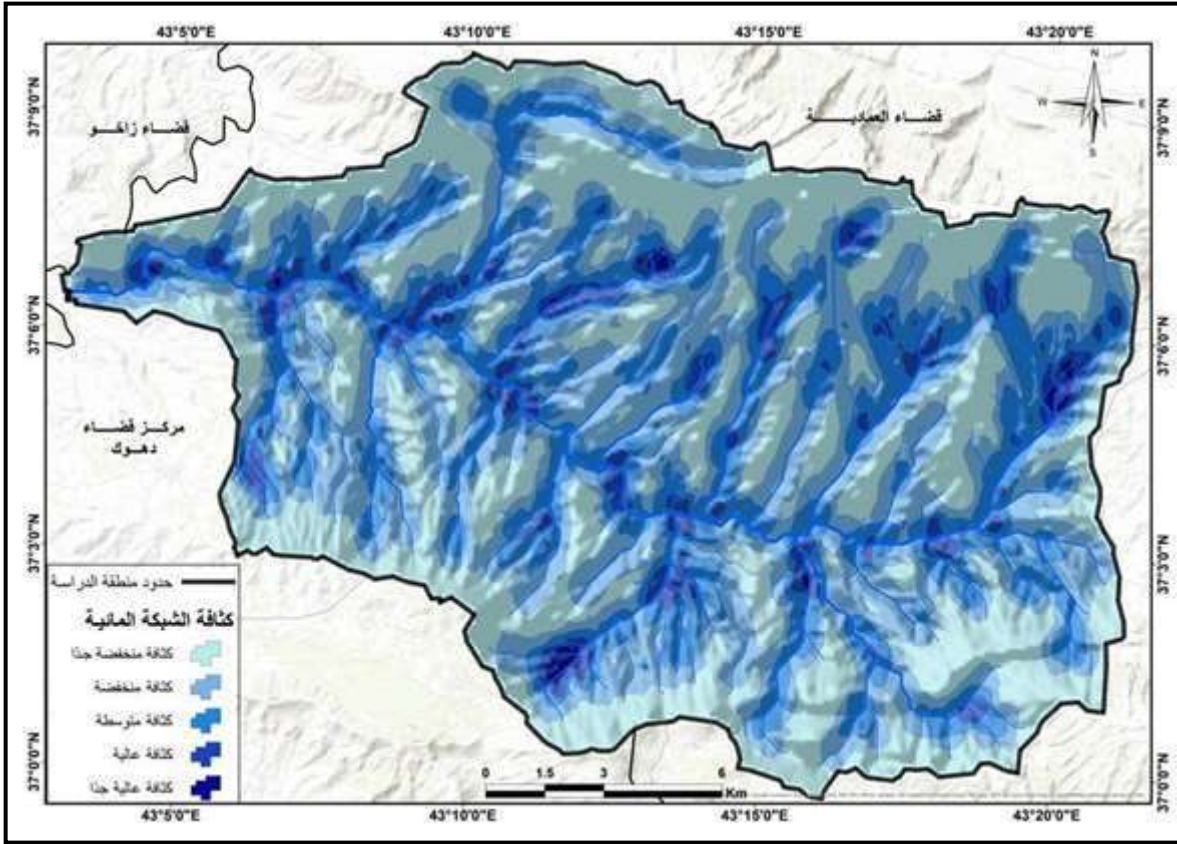
خريطة (9) كثافة الغطاء النباتي في منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على مؤشر (NDVI)، ومخرجات برنامج ArcGIS.

9-3 كثافة الشبكة المائية: يتبين من خلال الجدول (1) أن كثافة الشبكة المائية في منطقة الدراسة تتوزع بشكل متدرج، وهو ما ينعكس مباشرة على كفاءة تغذية السود الافتراضية. إذ تشكل الفئات ذات الكثافة المنخفضة جداً والمنخفضة ما مجموعه (24.80% و 25.59%)، أي ما يزيد عن نصف مساحة المنطقة، وهي تصنف ضمن الملاءمة الضعيفة إلى الضعيفة جداً، نظراً لضعف الجريان السطحي ومحدودية تغذية المجاري المائية، مما يقلل من كفاءة ملء السود واستدامتها. في المقابل، تمثل الكثافة المتوسطة نسبة (22.44%)، وهي تقع ضمن الملاءمة المتوسطة، حيث تحقق توازناً نسبياً في الجريان المائي، مما يوفر ظروفاً مقبولة لتغذية السود دون مبالغة في الفواقد أو الترسيب. أما الفئات ذات الكثافة العالية والعالية جداً، التي تشكل (19.09% و 8.09%) على التوالي، فتعد الأكثر ملاءمة، لكونها تعكس مناطق ذات جريان مائي جيد إلى مرتفع، ما يعزز من سرعة وكفاءة تغذية السود.

خريطة (10) كثافة الشبكة المائية في منطقة الدراسة

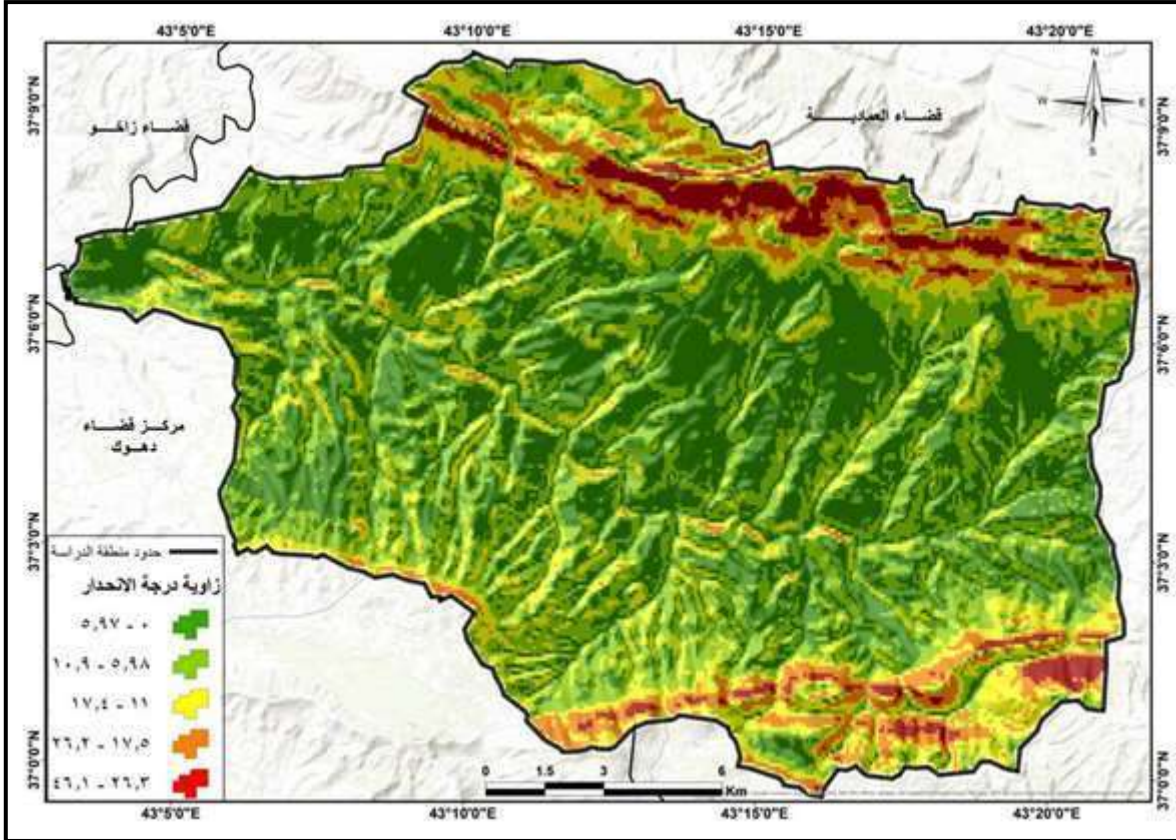
3
4
5
6
7
8
9
10

المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على (DEM) بدقة 10 متر، ومخرجات برنامج ArcGIS.

3-10 اتجاه جريان المياه: يتضح من خلال الجدول (1) أن اتجاه جريان المياه في منطقة الدراسة يتباين بشكل واضح، وهو ما ينعكس مباشرة على كفاءة تجميع المياه وإمكانية اختيار مواقع السدود. إذ تعد الاتجاهات الجنوبية (S) الأكثر ملاءمة، حيث تشكل نسبة (22.24%)، ويرتبط ذلك بكون الجريان يتجه نحو مناطق منخفضة قابلة لتجميع المياه، مما يعزز فرص إنشاء السدود ورفع كفاءتها التخزينية. كما تظهر الاتجاهات الجنوبية الغربية (SW) نسبة (13.90%)، وهي تقع ضمن الملاءمة المتوسطة إلى العالية، نظراً لكونها توفر جرياناً جيداً نسبياً مع فرص مناسبة للخرن المائي. في حين تمثل الاتجاهات الغربية (W) والشمالية الغربية (NW) نسبياً (13.15%) و(10.50%) على التوالي، وتقع ضمن الملاءمة المتوسطة، إذ يعتمد أداؤها على طبيعة التضرس المحلي ومدى توفر ظروف تجميع مناسبة. في المقابل، تسجل الاتجاهات الشمالية (N) نسبة (16.41%)، لكنها تصنف بين الملاءمة الضعيفة إلى المتوسطة، بسبب احتمالية الجريان العكسي أو ضعف التوجه نحو مناطق تجميع واضحة. أما الاتجاهات الشرقية (E) والشمالية الشرقية (NE)، والتي تمثل (7.14% و7.63%)، فتعد الأقل ملاءمة نتيجة ضعف التجميع المائي وتشتت

الجريان. كما تأتي الاتجاهات الجنوبية الشرقية (SE) بنسبة (9.03%) ضمن الملاءمة المتوسطة، لكونها تمثل حالة انتقالية بين ضعف وقوة الجريان.

خريطة (11) اتجاه جريان المياه في منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على (DEM) بدقة 10 متر، ومخرجات برنامج ArcGIS.

3- بناء نموذج تنبؤي للسدود الافتراضية:

اعتمدت الدراسة على تقنيات الذكاء الاصطناعي الجغرافي (GeoAI) ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتطوير نموذج تنبؤي مكاني عالي الدقة يهدف إلى تحديد المواقع المثلى لإنشاء السدود الافتراضية⁽⁶⁾. وقد تم ذلك من خلال تحليل ودمج مجموعة من المؤشرات المكانية والبيئية والجيومورفولوجية ذات التأثير المباشر في اختيار المواقع الملائمة، ضمن إطار نمذجة مكانية متقدمة قائمة على التعلم المكاني واستخلاص الأنماط⁽⁷⁾.

وفي هذه المرحلة، تم توظيف أسلوب التحليل الهرمي (AHP) كأداة داعمة لعمليات التعلم المكاني، من خلال إجراء مقارنات ثنائية دقيقة بين المعايير اعتماداً على مقياس ساعتي (Saaty)، بهدف اشتقاق الأوزان النسبية التي تعكس الأهمية الفعلية لكل متغير مكاني ضمن عملية اتخاذ القرار⁽⁸⁾. كما تم دمج

مخرجات (AHP) داخل النموذج الذكي لتعزيز قدرته التنبؤية وتحسين دقة تصنيف الملاءمة المكانية⁽⁹⁾ كما في جدول (2).

لضمان موثوقية النموذج واستقراره، تم اختبار الاتساق الداخلي باستخدام نسبة الاتساق (Consistency Ratio – CR)، وذلك للتأكد من أن عملية ترجيح المعايير تتم ضمن حدود منطقية وعلمية مقبولة، مما يعزز دقة النموذج وكفاءته في دعم اتخاذ القرار المكاني. وبعد التحقق من الاتساق⁽¹¹⁾، جرى اشتقاق الأوزان النسبية لكل مؤشر من المؤشرات البيئية والطبيعية المؤثرة في ملاءمة إنشاء السدود الافتراضية ضمن منطقة الدراسة، كما هو موضح في الجدول (3).

جدول (2) المصفوفة الثنائية المزدوجة للمؤشرات المؤثرة في ملاءمة مواقع إنشاء السدود

المؤشر	التكوينات الجيولوجية	المخاطر الجيولوجية	كثافة الشبكة المائية	الارتفاع	الانحدار	اتجاه الانحدار	تقوس سطح الأرض	الترب	الغطاء النباتي	اتجاه جريان المياه	التأثير البيئي
التكوينات الجيولوجية	1	1.13	1.29	1.5	1.38	1.8	2.25	2.25	3	2.57	1.8
المخاطر الجيولوجية	0.88	1	1.14	1.33	1.22	1.6	2	2	2.67	2.29	1.6
كثافة الشبكة المائية	0.78	0.88	1	1.17	1.08	1.4	1.75	1.75	2.33	2	1.4
الارتفاع	0.67	0.75	0.86	1	0.92	1.2	1.5	1.5	2	1.71	1.2
الانحدار	0.72	0.82	0.93	1.09	1	1.3	1.63	1.63	2.17	1.86	1.3
اتجاه الانحدار	0.56	0.63	0.71	0.83	0.77	1	1.25	1.25	1.67	1.43	1
تقوس سطح الأرض	0.44	0.5	0.57	0.67	0.61	0.8	1	1	1.33	1.14	0.8
الترب	0.44	0.5	0.57	0.67	0.61	0.8	1	1	1.33	1.14	0.8
الغطاء النباتي	0.33	0.38	0.43	0.5	0.46	0.6	0.75	0.75	1	0.86	0.6
اتجاه جريان المياه	0.39	0.44	0.5	0.58	0.54	0.7	0.88	0.88	1.17	1	0.7
التأثير البيئي	0.56	0.63	0.71	0.83	0.77	1	1.25	1.25	1.67	1.43	1

صدر: من عمل الباحثين باستخدام منهجية التحليل الهرمي (AHP).

جدول (3) الأوزان النسبية للمؤشرات البيئية والطبيعية المؤثرة في ملاءمة مواقع إنشاء السدود وآثارها البيئية

ت	المؤشر	الوزن النسبي (%)	الأثر البيئي المرتبط بالمؤشر
1	التكوينات الجيولوجية	18%	تؤثر في استقرار السد وتقليل احتمالية التسرب والانهيارات التي قد تسبب أضراراً بيئية.
2	المخاطر الجيولوجية	14%	تحد من أخطار الانزلاقات والتصدعات التي تهدد البيئة والمناطق المجاورة.
3	الانحدار	13%	يؤثر في معدلات التعرية والانجراف ونقل الرواسب إلى الخزان المائي.
4	كثافة الشبكة المائية	11%	تحدد كفاءة تغذية السد بالمياه واحتمالية الفيضانات أو تركيز الجريان السطحي.
5	التأثير البيئي	10%	يشمل تأثير السد في التنوع الحيوي، الأراضي الزراعية، النظام البيئي، وجودة المياه.
6	الارتفاع	8%	يؤثر في المناخ المحلي وكمية المياه المخزونة واحتمالية غمر المناطق المرتفعة أو المنخفضة.
7	الترب	8%	تؤثر في النفاذية واستقرار الأرض ومعدلات الترسيب داخل الخزان.
8	اتجاه جريان المياه	7%	يحدد مسارات انتقال الرواسب والملوثات داخل الحوض المائي.
9	تقوس سطح الأرض	5%	يساهم في تحديد مناطق تجمع المياه

المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد منهجية التحليل الهرمي (AHP).

4- التقييم المكاني لمواقع السدود الافتراضية في منطقة الدراسة:

يتبين من خلال جدول (2) وشكل (2) وجود تباين واضح في توزيع درجات الملاءمة اعتماداً على النسب المئوية، إذ جاءت فئة الملاءمة المتوسطة في المرتبة الأولى بنسبة بلغت (33.71%)، مما يدل على أن الجزء الأكبر من مساحة الحوض يقع ضمن نطاق يمكن استثماره بشروط ومعالجات هندسية مناسبة، ولا سيما أنها تتركز في الأجزاء الوسطى من منطقة الدراسة كما في خريطة (12) التي تتسم بانحدارات معتدلة وظروف جيومورفولوجية ملائمة نسبياً. تلتها فئة الملاءمة الضعيفة بنسبة (32.59%)، وهي تتوزع في مناطق متفرقة من الحوض، ويعكس ذلك وجود محددات طبيعية، مثل زيادة الانحدار أو عدم ملاءمة التكوينات الصخرية، مما يقلل من كفاءتها لإنشاء السدود. كما سجلت فئة الملاءمة الضعيفة جداً نسبة (19.46%)، وتتركز غالباً في الأجزاء الشمالية والجنوبية من منطقة الدراسة، ولا سيما في المناطق الجبلية العالية، مما يجعلها غير مناسبة وتتطلب الاستبعاد من أي تخطيط مستقبلي. في حين جاءت فئة الملاءمة العالية بأدنى نسبة بلغت (14.24%)، وتتركز بشكل محدود في بعض الأجزاء الوسطى من الحوض، وتمثل المواقع الأكثر كفاءة وملاءمة لإنشاء السدود، إلا أنها محدودة الانتشار.

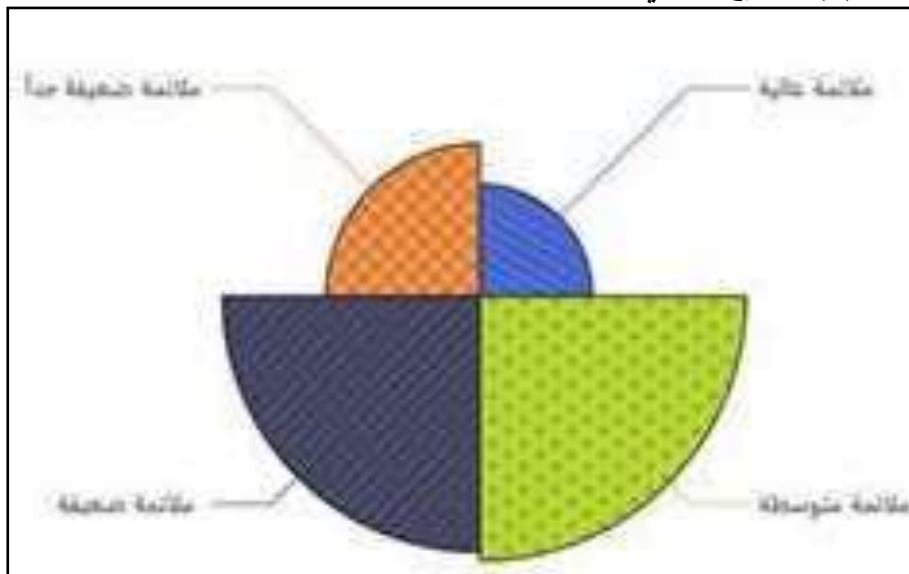
وبذلك يتضح أن غالبية مساحة الحوض تتركز ضمن المستويات المتوسطة والضعيفة، وهو ما يفرض اعتماد تخطيط دقيق قائم على استثمار المناطق المتوسطة بحذر، والتركيز على المواقع ذات الملائمة العالية، مع تجنب المناطق الضعيفة والضعيفة جداً لتقليل المخاطر وزيادة كفاءة مشاريع السدود.

جدول (4) التوزيع النسبي لفئات ملائمة المكانية لمواقع السدود الافتراضية في منطقة الدراسة

ت	صنف الملائمة	المساحة	%
1	ملائمة عالية	45.03	14.24%
2	ملائمة متوسطة	106.59	33.71%
3	ملائمة ضعيفة	103.07	32.59%
4	ملائمة ضعيفة جداً	61.54	19.46%

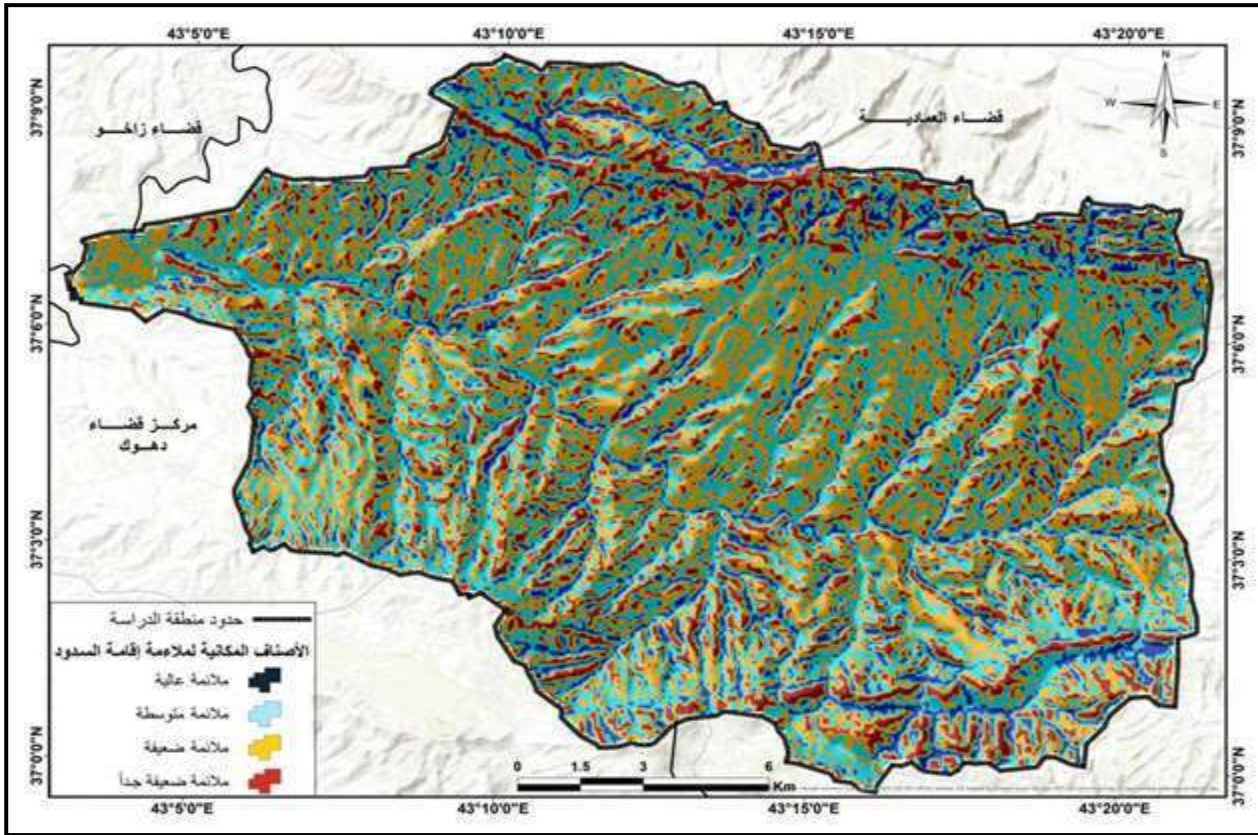
المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على خريطة (12).

شكل (2) التوزيع النسبي لأصناف الملائمة المكانية لإقامة السدود الافتراضية



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على جدول (2).

خريطة (12) الملائمة المكانية لمواقع السدود في منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على مؤشرات البيئية لمنطقة الدراسة، ومخرجات برنامج ArcGIS.

الاستنتاجات:

- 1- أكدت النتائج فاعلية التقنيات الجغرافية والجيومكانية في تكامل ومعالجة البيانات المكانية وإنتاج نماذج ملائمة دقيقة لمواقع السدود الافتراضية اعتماداً على التحليل المتكامل للمعايير.
- 2- سيطرت فئة الملاءمة المتوسطة بنسبة (33.71%) وبمساحة (106.59 كم²)، ما يعكس إمكانية جيدة للتطوير مع مراعاة المحددات البيئية والهيدرولوجية.
- 3- شكلت فئة الملاءمة الضعيفة (32.59%) و(103.07 كم²) مناطق مقيدة جيومورفولوجياً وهيدرولوجياً تحد من كفاءة استخدامها.
- 4- بلغت فئة الملاءمة الضعيفة جداً (19.46%) بمساحة (61.54 كم²)، وهي غير مناسبة تقريباً بسبب ارتفاع المخاطر الطبيعية.
- 5- سجلت فئة الملاءمة العالية أقل مساحة (14.24%) و(45.03 كم²)، لكنها تمثل أفضل المواقع هندسياً وهيدرولوجياً.
- 6- أظهر التوزيع المكاني تبايناً طبيعياً واضحاً داخل الحوض مع تركيز الملاءمة العالية في الأودية الأكثر استقراراً.



7- بينت النتائج وجود توازن بين الجدوى الهندسية والأثر البيئي، حيث قد ترتبط المواقع الأعلى ملاءمة بآثار بيئية أكبر نسبياً من الفئات المتوسطة.

التوصيات:

- 1- ضرورة اعتماد التقنيات الجيومكانية ونظم المعلومات الجغرافية كأداة أساسية في دراسات اختيار مواقع السدود، لما توفره من دقة في تكامل وتحليل البيانات المكانية.
- 2- توجيه عمليات إنشاء السدود المستقبلية نحو مناطق الملاءمة المتوسطة باعتبارها الأكثر توازناً بين الجدوى الهندسية والاستدامة البيئية.
- 3- إجراء دراسات تفصيلية ميدانية للمواقع المصنفة ضمن فئة الملاءمة العالية للتأكد من صلاحيتها التنفيذية وتقليل المخاطر المحتملة.
- 4- تجنب أو إعادة تقييم المواقع ذات الملاءمة الضعيفة والضعيفة جداً بسبب القيود الجيومورفولوجية والهيدرولوجية العالية.
- 5- تطوير نماذج تقييم مكانية أكثر شمولية من خلال إدخال مؤشرات إضافية مثل التغير المناخي والتوسع العمراني المستقبلي.
- 6- استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد بشكل دوري لمراقبة التغيرات البيئية والهيدرولوجية في حوض الدراسة وتحديث نماذج الملاءمة بشكل مستمر.
- 7- تشجيع الدراسات المستقبلية على مقارنة نتائج النمذجة المكانية مع البيانات الحقلية للتحقق من دقة النماذج وتحسينها.

الهوامش:

⁽¹⁾ Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). Principles of Geographical Information Systems. Oxford: Oxford University Press.

⁽²⁾ Adhikari, P., & Hong, Y. (2016). Flood hazard mapping and dam site selection using GIS and remote sensing techniques. Natural Hazards. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2305-1>

⁽³⁾ Malczewski, J. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. New York: John Wiley & Sons

⁽⁴⁾ Jothimani, M., et al. (2019). Dam site suitability analysis using GIS and AHP. Environmental Earth Sciences. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00574-6>

⁽⁵⁾ Hagos, Y. G., et al. (2022). Suitable dam site identification using GIS-based MCDA: A case study of Chemoga watershed, Ethiopia. Applied Water Science, 12, 69. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01592-9>

⁽⁶⁾ Li, X., Wang, Y., & Zhang, H. (2023). GeoAI-based spatial prediction for environmental suitability modeling. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.01.012>

⁽⁷⁾Wang, J., et al. (2022) Spatial machine learning for environmental decision-making: A review. *Environmental Modelling & Software*, 149, 105334. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105334>

⁽⁸⁾Chen, W., Li, X., & Wang, Y. (2021) Integration of AHP and GIS for environmental suitability analysis. *Ecological Indicators*, 129, 107930. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107930>

⁽⁹⁾Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016) Random forest in remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>

. Talukdar, S., et al. (2023) Machine learning approaches in GIS-based land suitability analysis. *Science of the Total Environment*, 858, 159884. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159884>

⁽¹¹⁾Saaty, T. L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill
 Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2021) *The Logic of Priorities: Applications in Business, Energy, Health, and Transportation*. Springer.

المصادر:

1. Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford: Oxford University Press.
2. Saaty, T. L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill
 Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2021) *The Logic of Priorities: Applications in Business, Energy, Health, and Transportation*. Springer.
3. Adhikari, P., & Hong, Y. (2016). Flood hazard mapping and dam site selection using GIS and remote sensing techniques. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2305-1>
4. Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York: John Wiley & Sons
5. Jothimani, M., et al. (2019). Dam site suitability analysis using GIS and AHP. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00574-6>
6. Hagos, Y. G., et al. (2022). Suitable dam site identification using GIS-based MCDA: A case study of Chemoga watershed, Ethiopia. *Applied Water Science*, 12, 69. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01592-9>
7. Li, X., Wang, Y., & Zhang, H. (2023) GeoAI-based spatial prediction for environmental suitability modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.01.012>
8. Wang, J., et al. (2022) Spatial machine learning for environmental decision-making: A review. *Environmental Modelling & Software*, 149, 105334. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105334>
9. Chen, W., Li, X., & Wang, Y. (2021) Integration of AHP and GIS for environmental suitability analysis. *Ecological Indicators*, 129, 107930. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107930>
10. Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016) Random forest in remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011> . Talukdar, S., et al. (2023) Machine learning approaches in GIS-based land suitability analysis. *Science of the Total Environment*, 858, 159884. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159884>