

اختيار أولى لمواقع سدود باستخدام الاستشعار عن بُعد، نُظْم المعلومات الجغرافية وعملية التحليل الهرمي في مديرية الحصين، محافظة الضالع، اليمن

إبراهيم عبد الحميد الأكلحي^{١*} و بدران عبدالقادر الدهمشي^٢
^١ قسم العلوم الجيولوجية، كلية البترول والموارد الطبيعية، جامعة صنعاء، صنعاء، اليمن،
^٢ الصندوق الاجتماعي للتنمية، صنعاء، اليمن.

*Corresponding author: i.alakhaly@su.edu.ye

الكلمات المفتاحية:

١. التحليل الهرمي
٢. السدود
٣. نُظْم المعلومات الجغرافية
٤. الاستشعار عن بُعد
٥. اليمن

معلومات البحث:

- تاريخ البحث:
 الاستلام: ٢٢ فبراير ٢٠٢٤
 القبول: ٢٩ مارس ٢٠٢٤
 النشر: ٥ مايو ٢٠٢٤

الخلاصة

هدفت هذه الدراسة لإختيار مواقع محتملة لبناء السدود بمديرية الحصين، محافظة الضالع، اليمن، باستخدام الاستشعار عن بُعد، نُظْم المعلومات الجغرافية، وعملية التحليل الهرمي. بُنيت قاعدة بيانات للمديرية، فارتفاعاتها تتراوح ما بين ١٠٧٦ و ٢٣٨٥م، و ٣٥% من أراضيها منبسطة. المعدل السنوي لهطول الأمطار يتراوح ما بين ٢٢٧ و ٤٠٤مم. صخورها متباينة. مواقع السدود المحتملة حُدثت إعتقاداً على المعايير العامة لمنظمة الفاو، المعايير الواردة في الدراسات السابقة، ومعايير مقترحة من خبراء ومختصين بهذا المجال، حُلَّت تلك المعايير إحصائياً وأُعدمت سبعة منها، عُملت خرائط للمعايير المختارة، ثم أُعيد تصنيفها بناءً على درجة الملاءمة المكانية كمواقع لسدود محتملة بمقياسٍ مُوحَّد، بعد دمج طبقات كل المعايير المعاد تصنيفها والمضروبة بأوزانها النسبية توصلنا لخريطة ملاءمة مكانية لمواقع السدود المحتملة مُصنَّفة لخمس فئات؛ وتبيَّن أن ٠,١٤% من مساحة المديرية عالية الملاءمة، و ٣١,٧٢% ملائمة، و ٦٢,٣٠% متوسطة الملاءمة، و ٥,٧١% ضعيفة الملاءمة، و ٠,١٣% غير ملائمة. نوصي بالمواقع عالية الملاءمة الواقعة في سيلة أوفينة، وادي الذلعة، وشكع.

المحتويات:

١. المقدمة
٢. الأعمال السابقة
٣. المنهجية
- ٤- النتائج والمناقشة
- ٥- الاستنتاجات والتوصيات
- ٦- المراجع

١. المقدمة:

الجافة وشبه الجافة، التغيرات المناخية والتي انعكست سلبيًا على الوضع المائي، محدودية الموارد المائية فلا أنهار ولا بحيرات، النمو السكاني الكبير، التوسع العمراني بدون تخطيط، وسوء إدارة الموارد المائية منذُ زمنٍ بعيد، فالقوانين والتعليمات غير فعالة لإدارة إمدادات المياه وتوزيعها. تُلثي مساحة اليمن تُصنّف بأنها شديدة الجفاف (المعدل السنوي لهطول الأمطار أقل من ٥٠مم) ومعظم

تُعد الموارد المائية من أهم متطلبات بناء المجتمعات المدنية والريفية وتطورها، فتقدير وإدارة الموارد المائية يكتسب مكانةً كبيرةً في التخطيط الاستراتيجي لشعوب العالم، خاصةً في المناطق الجافة وشبه الجافة. تُعتبر اليمن من أكثر البلدان التي تعاني من ندرة المياه، ويعود ذلك لوقوعها ضمن المناطق

الأمطار، فحصاد مياه الأمطار من أهم وأقدم التطبيقات المعروفة في هذا المجال.

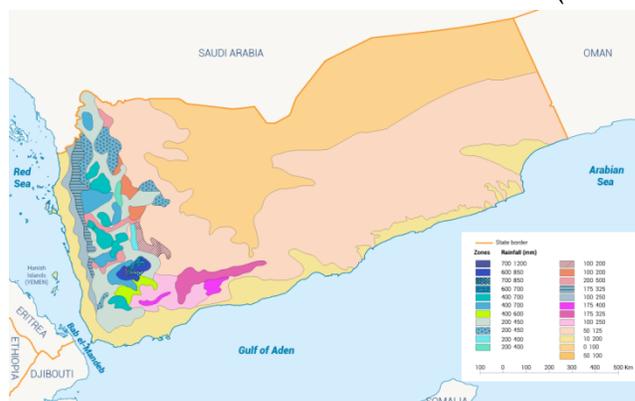
تعاني محافظة الضالع -بما فيها مديرية الحصين- كغيرها من المحافظات اليمنية من شح الموارد المائية نتيجة لانخفاض المعدل السنوي لهطول الأمطار وزيادة استهلاك المياه بسبب زيادة عدد السكان، مما شكّل ضغطاً على مشاريع حفر آبار المياه الجوفية. فهناك مستجمعات مائية (Watersheds) في المديرية تجري فيها المياه في مواسم الأمطار دون الاستفادة منها، مما يستدعي إقامة حواجز وسدود لجمعها وتخزينها والاستفادة منها وتغذية المياه الجوفية، لذا تكمن مشكلة الدراسة في التعرف على أنسب المواقع المحتملة لبناء السدود.

تهدف الدراسة الحالية إلى إختيار أفضل المواقع المحتملة لبناء السدود في مديرية الحصين، باستخدام الاستشعار عن بعد (Remote Sensing, RS) ونظم المعلومات الجغرافية (Geographic Information System, GIS) بالتكامل مع عملية التحليل الهرمي (Analytic Hierarchy Process, AHP)، اعتماداً على معايير محددة وموزونة.

لهذه الدراسة أهمية اقتصادية واجتماعية، إذا ما تم استغلال مياه الأمطار والسيول الجارية في المديرية بالشكل المطلوب، حيث ستوفر السدود المياه للمناطق القريبة منها، مما يسهم في زيادة الإنتاج الزراعي، كما أنها ستحقق إستدامة بيئية، وستغذي المياه الجوفية، وستحمي من أخطار السيول التي قد تتعرض لها بعض مناطق المديرية. كما أن هذه الدراسة ستضع أمام المخططين ومُتخذي القرار -في مجال إدارة الموارد المائية- مجموعة من الخيارات المبنية على أسس علمية وتقنية مقارنةً بالوسائل التقليدية، وستوفر الوقت والجهد والمال.

منطقة الدراسة:

المناطق المتبقية تُصنف بأنها قاحلة (المعدل السنوي لهطول الأمطار أقل من ٢٠٠ مم) وهناك مناطق يصل فيها المعدل السنوي لهطول الأمطار لأكثر من ٢٥٠ مم (المرتفعات الغربية)، حيث يتركز معظم السكان، كما أن هناك مناطق يصل فيها معدل الهطول المطري إلى أكثر من ٨٠٠ مم [1] (شكل ١).



شكل ١: المعدل السنوي لهطول الأمطار في اليمن [1]

يتجاوز الطلب السنوي على المياه في اليمن تقديرات الموارد المائية المتجددة، فهناك استنزاف كبير للمياه الجوفية يُقدر بأكثر من ضعف معدل إعادة تغذيتها. فالتزايد المستمر في الطلب المائي يؤدي إلى اتساع الفجوة بين موارد المياه والاستهلاك. مما يؤثر سلباً على الأمن المائي والغذائي.

أدركت الدولة مدى حساسية الوضع المائي، ودفعها ذلك لتبني استراتيجيات تضمن تحقيق الإدارة المتكاملة والتنمية المستدامة في قطاع المياه، كاستراتيجية حصاد مياه الأمطار، فهي من أفضل الطرق التي يُمكن من خلالها التغلب على الظروف المناخية الجافة، والمرتبطة بتدني الهطول المطري، ونمط توزيعه الزماني والمكاني. فالمياه أحد أهم الموارد التي يجب توفرها والحفاظ عليها، لتحقيق التنمية المستدامة، ونتيجة لزيادة الطلب على هذا المورد الهام والمحدود، واعتماد عددًا من القطاعات عليه؛ كالقطاع الزراعي والاجتماعي، كان لابد من زيادة الجهد والبحث عن حلول لتفادي شح الموارد المائية؛ كبناء السدود لجمع مياه الأمطار والسيول الجارية في مواسم

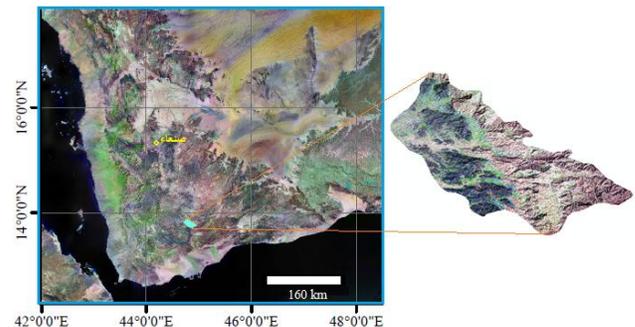
٢. الدراسات السابقة:

تُعد السدود من أعظم المنجزات الحضارية التي شيدها الإنسان على مجاري الأودية، وساهمت في استقراره منذ القدم، حيث حَفَظَت المياه الجارية وحدت من السيول الموسمية الجارفة، وَرَوَّت الأراضي الزراعية، وَحَوَّلَت الفيافي الجرداء إلى مروجٍ خَضراء، وخير شاهد على ذلك سد مأرب.

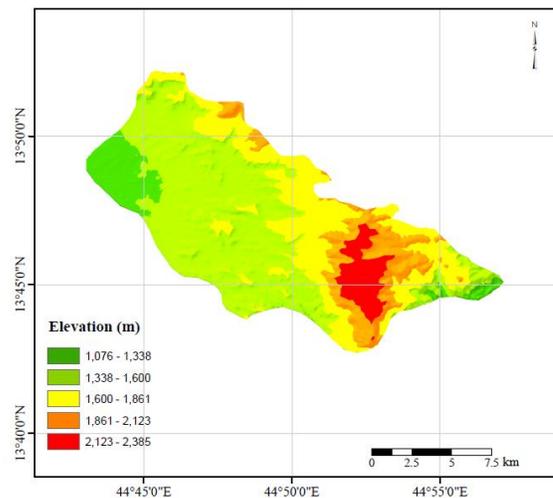
تناولت العديد من الدراسات أهمية الحفاظ على المياه بصفته موردًا قابلاً للاستنزاف، حيث تم القيام بكثيرٍ من الدراسات الخاصة باستخدام التقنيات الحديثة للتعرف على المواقع المناسبة لحصاد مياه الأمطار -خاصةً السدود- في كثير من الدول؛ كاليمين [2]، السعودية [٣-٧]، الإمارات [8]، سوريا [٩-10]، الأردن [١١-12]، فلسطين [١٣-15]، العراق [١٦-٢١]، المغرب [٢٢-23]، إيران [٢٤-25]، تركيا [26]، الهند [٢٧-28]، باكستان [٢٩-30]، الصين [٣1]، نيجيريا [٣٢-33]، إثيوبيا [٣٤-37]، كينيا [٣٨-39]، رواندا [٤٠]، كوبا [٤١]، كوسوفو [٤٢]، استراليا [٤٣] وكوريا الجنوبية [٤٤]. فبعض الدراسات استخدمت الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية للتعرف على أفضل المواقع لإنشاء السدود [3, 4, 13, 14, 16, 18, 29, 32, 33]، بينما دراسات أخرى اعتمدت على الاستشعار عن بُعد، نُظِم المعلومات الجغرافية، وعملية التحليل الهرمي في اختيار المواقع المناسبة لإقامة لسدود، اعتمادًا على معايير متعددة وموزونة [٥-٢٠، ١٥، ١٢، ٣٤، ٣٠، ٢٨، ٤٠، ٣٦، ٤٤، ٤٢]. وهناك تشابه في بعض المعايير وتوافق -نوعًا ما- من قبل الباحثين في استخدامها، كما أن هناك تباينًا في استخدام معايير أخرى، كما تختلف المعايير من دراسةٍ لأخرى كمًّا ونوعًا.

حددت منظمة الأغذية والزراعة (الفاو) إطارًا عامًا للمعايير الأساسية التي يجب معرفتها وأخذها بعين الاعتبار عند اختيار مواقع حصاد مياه الأمطار وهي؛ الوضع الهيدرولوجي، المناخ، الوضع الطبوغرافي، الزراعة، التربة، والوضع الاجتماعي والاقتصادي [45-47].

تقع مديرية الحصين في جنوب محافظة الضالع بين خطي طول (٤٤,٧١٨ و ٤٤,٩٥٣ درجة) شرقًا، ودائرتي عرض (١٣,٧١١ و ١٣,٨٧٠ درجة) شمالًا، وعلى بُعد حوالي ١٨٧ كم جنوب العاصمة صنعاء (شكل 2)، ومدينة الحصين هي مركزها، وتبلغ مساحتها ١٩٨ كم^٢، ويقطنها ما يُقارب من ٥٥.١٠ نسمة، تنتوع تضاريسها ما بين مرتفعات جبلية، هضاب، سهول، وأودية. وتتراوح الارتفاعات فيها ما بين ١٠٧٦ و ٢٣٨٥ م فوق مستوى سطح البحر (شكل 3)، والمعدل السنوي لهطول الأمطار فيها يتراوح ما بين ٢٢٧ و ٤٠٤ مم. الأمطار هي المصدر الرئيس لمياه الجريان السطحي في المديرية، حيث يعتمد سكانها على المياه الجوفية والأمطار الموسمية في الشرب والاستخدامات المنزلية والري، وتجري في المديرية عدة أودية، ومن أشهرها؛ وادي الذلعة، وادي عتبة، وادي العليلي، ووادي العقلة.



شكل ٢: الموقع الجغرافي للمديرية



شكل ٣: نموذج ارتفاع رقمي للمديرية (الدقة المكانية ١٠ م)

والمناخية والبشرية، لمعالجتها وتحليلها للوصول إلى النتائج المرجوة. فالمديرية بحاجة ماسة إلى موارد مائية كافية لتلبية احتياجات السكان المنزلية والزراعية. جُمعت البيانات الخاصة بالمديرية من مصادر مختلفة، ثم حُللت للحصول على المعلومات ثم عرض ومناقشة النتائج. تم استخدام الاستشعار عن بُعد وبرنامج نُظَم المعلومات الجغرافية (ArcGIS 10.3) والخاص بمعالجة وتحليل وعرض البيانات. حُدثت سبعة معايير ووزنت باستخدام عملية التحليل الهرمي، وعُمِلت الخرائط الرقمية لبيانات هذه المعايير، وحُوّلت بيانات هذه الخرائط إلى بيانات شبكية وأُعيد تصنيفها حسب درجة الملاءمة المكانية بمقياس من (1) إلى (5)، ثم دُمجت بيانات كل المعايير بعد أن تم ضرب كل معيار بوزنه النسبي والذي تم الحصول عليه من عملية التحليل الهرمي، لنحصل في النهاية على خريطة الملاءمة المكانية والتي تُحدد أنسب المواقع المحتملة لبناء السدود في المديرية، تلى ذلك عرض وتحليل ومناقشة النتائج. ويمكن تلخيص المنهجية المتبعة لهذه الدراسة في الشكل (٤).

٢,٣. جمع البيانات:

في هذه الدراسة تم استخدام العديد من البيانات، والتي تم الحصول عليها من جهات محلية ودولية مختلفة [48-54] (جدول ١)، وكانت هذه البيانات على شكل خرائط ورقية، بيانات نصية، مرئيات فضائية، نماذج ارتفاعات رقمية (digital elevation model, DEM). تم تحويل الخرائط الورقية -الجيوولوجية والطبوغرافية- إلى خرائط رقمية والعمل عليها باستخدام برنامج (ArcGIS 10.3)، كما تم استخدام برامج أخرى: مثل (SAS Planet)، (Google Earth)، (Watershed modeling System)، و (Global Mapper)، للتحقق من دقة البيانات ومطابقتها وتحديث جوانب القصور في بعض البيانات، كما تم استخدام برنامج (Excel) لتحديد قيم الأوزان النسبية للمعايير المستخدمة في هذه الدراسة.

أشارت نتائج الدراسات السابقة إلى أن المعايير التي تم اختيارها كانت حساسة للبيئات الطبيعية والبيئية والاقتصادية، وأن الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية أدوات مفيدة لعمل طبقات للبيانات ذات الصلة ومعالجتها وتحليلها وعرضها، وتُوفر خيارات أفضل لإدارتها. كما تؤكد هذه الدراسات أهمية تطبيق التقنية في اختيار أنسب المواقع لإنشاء السدود، لسهولة تنفيذها وفعاليتها وتوفيرها للوقت والجهد والمال.

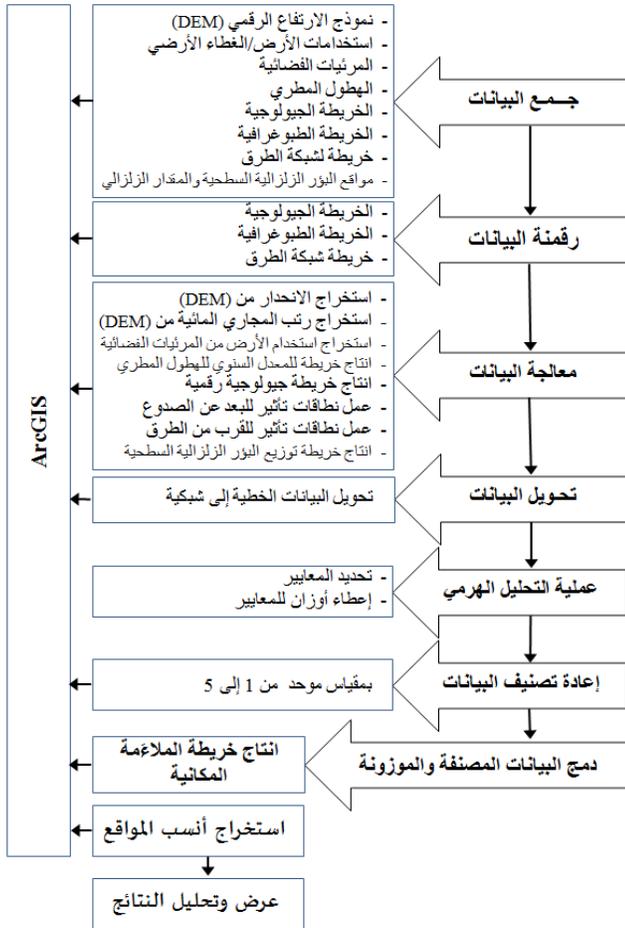
تتشارك هذه الدراسة مع بعض ما سبقته من دراسات في كونها تتطرق لتطبيق الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية، وبالتكامل مع عملية التحليل الهرمي لاختيار أنسب المواقع لإنشاء السدود للاستفادة من مياه الأمطار والسيول الجارية، وتختلف عن تلك الدراسات في النطاق المكاني، حيث تُعد من الدراسات التي أهتمت بمديرية الحصين، والتي تتسم بمحدودية مواردها المائية بسبب انخفاض معدل هطول الأمطار وتذبذبها زمنيًا ومكانيًا في ظل التغير المناخي الذي نشهده، كما أنها استخدمت عملية التحليل الهرمي وفق معايير محددة وموزونة تم تحديدها من قِبل الخبراء والمختصين في هذا المجال والمجالات ذات الصلة، مع الأخذ في الاعتبار المعايير العامة التي حددتها الفاو ونتائج التحليل الإحصائي للمعايير المستخدمة في الدراسات السابقة. بالإضافة إلى اتباعها أسلوب إعادة تصنيف المعايير في اتخاذ القرار المكاني لإنتاج الخرائط الموضوعية اعتمادًا على الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية من خلال معالجة وتصنيف وتحويل البيانات إلى خرائط رقمية وإعداد جداول لمعايير الملاءمة الخاصة بها، وصولًا إلى خرائط لمدى الملاءمة المكانية لتحديد المواقع المحتملة والأكثر ملاءمةً لبناء السدود.

٣. المنهجية:

١,٣. منهجية التحليل

أُستخدم المنهج الوصفي التحليلي القائم على وصف الخصائص العامة للمديرية، اعتمادًا على البيانات الطبيعية،

جُمعت المعايير التي أوصى بها الخبراء والمختصون مع المعايير المستخدمة في الدراسات السابقة، وتم تحليلها إحصائياً، لاختيار أهمها وأكثرها تأثيراً واستخداماً، مع الأخذ بعين الاعتبار المعايير العامة التي حددتها منظمة الفاو، ومراعاة الجوانب المتعلقة بالأمان، الكلفة الاقتصادية، وخدمة المجتمع المحلي في المديرية.



شكل ٤: المنهجية المتبعة في الدراسة الحالية

جدول ١: البيانات التي تم استخدامها في عمل هذه الدراسة

م	البيانات	الاستخدام	المصدر
١	نموذج ارتفاع رقمي (دقة مكانية ١٠ م)	لعمل خرائط الارتفاعات، الانحدارات، ورتب المجاري المائية.	[53]
٢	مرئيات استخدام الأرض/الغطاء الأرضي	للتعرف على استخدامات الأرض/الغطاء الأرضي.	[52,48]
٣	بيانات الهطول المطري	لمعرفة معدل الهطول السنوي وتوزيعه المكاني.	[51,48]
٤	الخرائط الجيولوجية	لمعرفة الوحدات الصخرية وتوزيعها، والصدوع واتجاهاتها.	[50]

٣,٣. أسلوب التحليل المتبع في اختيار المواقع الملائمة للسود:

١,٣,٣. عملية التحليل الهرمي:

تُعد عملية التحليل الهرمي إحدى طرق تحليل القرار متعدد المعايير، وهي نظرية لبناء المؤشرات باستخدام المقارنة المزدوجة، وتعتمد على آراء الخبراء والمختصين ومنتخذي القرار في حدود مقياس محدد، حيث توظف الأساليب الكمية في عملية اتخاذ القرار الخاص بانتقاء البديل الأمثل من بين مجموعة من البدائل، واختيار أنسبها وفق معايير متعددة وموزونة، وذلك بعد ترتيب الخيارات المختلفة أمام بعضها البعض استناداً إلى أهميتها [55-57].

أثبتت عملية التحليل الهرمي نجاحها وكفاءتها العالية في حل المشاكل المعقدة واتخاذ القرارات متعددة المعايير، وأجريت العديد من الدراسات لمعالجة قضية المفاضلة والاختيار بين مجموعة من البدائل لتحقيق هدف محدد. كما أُسْتُخِدِمَت من قِبَل عدد كبير من الباحثين في إجراء دراسات بحثية وتطبيقية تتعلق بتحديد المواقع المحتملة لبناء السدود، باستخدام معايير محددة وموزونة. وفي مناطق تشابه جغرافياً ومناخياً منطقة الدراسة الحالية [24, 22, 18, 11, 6, 30, 28, 26, 44, 42, 38, 36, 35, 32].

٢,٣,٣. تحديد المعايير:

في هذه المرحلة تم تحديد المعايير التي تدعم قرار اختيار أفضل المواقع المحتملة لإنشاء السدود في مديرية الحصين. بالاعتماد على آراء الخبراء والمختصين في عدد من المجالات ذات الصلة؛ كإدارة الموارد المائية، هندسة الموارد المائية، إدارة الموارد الطبيعية، الإدارة البيئية، الهندسة المدنية، جيولوجيا المياه، الجيولوجيا الهندسية، الاستشعار عن بُعد، ونظم المعلومات الجغرافية، بخصوص المعايير المؤثرة والتي يجب أخذها بعين الاعتبار عند اختيار مواقع السدود، ومدى أهمية كل معيار. كما تمت الاستعانة بالدراسات السابقة - وبالذات الحديثة- والتي أُجريت في نفس موضوع هذه الدراسة وفي مناطق جغرافية ومناخية مشابهة لبلدنا.

عام- بعدة عوامل كالتربة والتضاريس والمُناخ، أي أنه يتأثر بالعوامل الطبيعية والبشرية، مما يؤدي إلى اختلافه وتنوعه من مكانٍ لآخر.

٣. رُتبة المجرى المائي Stream order:

ويُقصد بها التدرج الرقمي لمجموع الروافد المائية التي تتكون منها الأودية داخل الحوض المائي، حيث تتباين هذه الروافد من حيث الشكل والحجم والرتبة تبعاً لمرحلة النشوء والعوامل الجيومورفولوجية، وتقيد دراستها في معرفة كمية التصريف المائي وتقدير سرعة الجريان وإمكانية التنبؤ بمخاطر السيول والفيضانات، كما يمكن استخدامها في معرفة مراحل التطور الجيومورفولوجي التي بلغها الحوض المائي. إن ازدياد عدد المجاري المائية في الحوض المائي تعني رفع كفاءة الشبكة المائية وزيادة قدرتها على نقل مياهه وحمولته، وبالتالي زيادة كمية التصريف المائي.

تعتبر رُتب المجاري المائية من العوامل الهامة التي تؤخذ بعين الاعتبار عن إختيار المواقع المحتملة لبناء السدود [66,65]، فهي تمثل المسارات التي تجري فيها المياه في مواسم الأمطار. تتوزع المجاري المائية في الحوض المائي بشكل رُتب، حيث تقلُّ عدداً وتزدادُ سَعَةً من رتبةٍ لأخرى، فتبدأ بمجري صغيرة الحجم وكثيرة العدد تمثل الرتبة الأولى، وتلتقي مع بعضها البعض لتكون الرتبة الثانية، والتي تكون أقل عدداً وأكثر سَعَةً من الرتبة الأولى، وتلتقي مع بعضها البعض لتكون الرتبة الثالثة، وهكذا. فمع زيادة قيمة رُتبة المجرى المائي تزيد كمية المياه الواردة إليه؛ أي زيادة في كمية التصريف [66,65]، فكلما كانت الرتبة كبيرة كلما كان موقعها أكثر ملاءمةً للموقع المقترح لبناء السد، لأنها أقل نفاذية وكميات المياه القادمة إليها تكون كبيرة [65-67]، فعند هطول الأمطار يتوفر فيها مقدار كافٍ من المياه الجارية.

٤. الهُطول المطري Rainfall:

		(١:٠٠٠٠٠٠)	
٥	الخرائط الطبوغرافية (١:٠٠٠٠٠٠)	للتحقق من دقة نموذج الارتفاع الرقمي، ومعرفة أسماء المناطق والأودية.	[50,48]
٦	شبكة الطرق	لمعرفة مدى إمكانية وسرعة الوصول لمواقع السدود المحتملة.	[51,49]

وبناءً على ما سبق، تم اختيار سبعة معايير، وتم ترتيبها حسب درجة أهميتها وعلى النحو الآتي:

١. الانحدار Slope:

الانحدار هو ميل مستوى سطح الأرض عن المستوى الأفقي ويُقاس بالدرجات أو كنسبة مئوية، وله دور كبير في اختيار مواقع إقامة السدود [58-62]، لتأثيره على اتجاه وسرعة جريان المياه السطحية، حيث كلما قلَّ الانحدار قلت سرعة الجريان وزادت إمكانية الاحتفاظ بكميات كبيرة من المياه الجارية. كما أن زيادة الانحدار يؤدي إلى زيادة سرعة الجريان، وهذا قد يؤدي إلى انجراف التربة وزيادة كمية الرواسب المنقولة [63]. كما أن المناطق شديدة الانحدار معرضة لحدوث الانهيارات الأرضية، وهذا بدوره سينعكس سلباً على موقع السد وبحيرته، كما أن المناطق شديدة الانحدار طرقها وعرة وخطرة، مما يزيد من تكاليف النقل، وبالتالي ارتفاع تكلفة المشروع، فالمناطق شديدة الانحدار غير آمنة وكثيرة الكلفة.

٢. استخدام الأرض/الغطاء الأرضي Land use/land cover

يُعد استخدام الأرض وصفاً لكيفية استغلال السكان للأرض والنشاط الاقتصادي والاجتماعي، كالاستخدامات الحضرية والزراعية للأراضي، بينما الغطاء الأرضي يُشير إلى الغطاء الأرضي الطبيعي الموجود على سطح الأرض.

يؤثر استخدام الأرض/الغطاء الأرضي بشكل كبير في تحديد المواقع المحتملة لإنشاء السدود، وذلك لما له من أهمية بالغة في الحفاظ على أكبر كمية من المياه الجارية. فمثلاً؛ كلما قلت كثافة الغطاء النباتي، يقل الفاقد من المياه السطحية بالتشريح، فيزداد الجريان السطحي للمياه، بينما في المناطق ذات الغطاء النباتي الكثيف يزداد التشريح وبالتالي يقل الجريان السطحي [46,64]. ويتأثر الغطاء النباتي بشكل

(Rock mass quality)، كما أنها قد تكون نشطة من الناحية التكتونية.

٧. شبكة الطرق Road network:

تعتبر شبكة الطرق من المعايير الاقتصادية والاجتماعية المؤثرة في اختيار مواقع السدود [71,65,18,16]، وذلك لما لها من أهمية في سرعة وسهولة الوصول لتلك المواقع، والتقليل من تكاليف النقل للمعدات والمواد الإنشائية خلال فترة الإنشاء، والمراقبة والصيانة بعد ذلك واللذان قد تُجرى بشكلٍ دوري مستقبلاً. فسرعة وسهولة الوصول لتلك المواقع يُمكن من ربطها اقتصادياً بالسكان المحليين.

٤. النتائج والمناقشة:

٤.١. تحديد الشكل الهرمي:

ليست هناك قاعدة ثابتة لبناء الأشكال الهرمية، فعملية البناء الهرمي تعتمد على نوع القرار الذي يُراد اتخاذه، فإذا كان هذا القرار عبارة عن اختيار موقع من بين عدة مواقع، يمكن البدء بالمستوى الأخير وذلك بوضع البدائل المتاحة، وسيحوي المستوى التالي المعايير التي سنحكم من خلالها على هذه المواقع، أما المستوى الأعلى فسينتكون من عنصر واحد فقط، وهو الغرض الشامل الذي من أجله يُتخذ القرار بناءً على المعايير الموجودة وأهمية إسهام كلٍ منها في تحقيقه.

يُلخص الشكل (٥) بناء الهيكل الهرمي لغرض اختيار أنسب المواقع المحتملة لبناء السدود في المديرية، والمكون من العناصر الأساسية لتحديد القرار، حيث يحتوي المستوى الأول منه على سمات المعايير المختارة، بينما يضم المستوى الثاني المعايير المعتمد عليها في اتخاذ القرار، أما المستوى الأعلى ففيه تم تحديد الهدف الرئيس من عملية التحليل الهرمي، وهو تحديد المواقع المحتملة لبناء السدود.

٤.٢. تقييم الأهمية النسبية للمعايير:

يعتبر المطر معيار أساسي عند اختيار المواقع المناسبة لإنشاء السدود، لأنه من خلاله نستطيع معرفة كمية المياه التي ستُجمع وستُخزن في بحيرة السد المقترح [68]، حيث تؤثر كمية الهطول المطري على معدل نفاذ أو تسرب المياه خلال مسامات التربة وشقوق الصخور، وهذا بدوره يؤثر على كمية المياه التي سيتم جمعها، فإذا تجاوزت شدة الهطول معدل التسرب فإن ذلك يزيد من إمكانية حصاد مياه الأمطار؛ فمع زيادة كمية الهطول تزداد رطوبة التربة وتقل نسبة تسرب ونفاذ المياه خلالها فيزيد الجريان السطحي للمياه.

٥. الوحدات الصخرية Rock units:

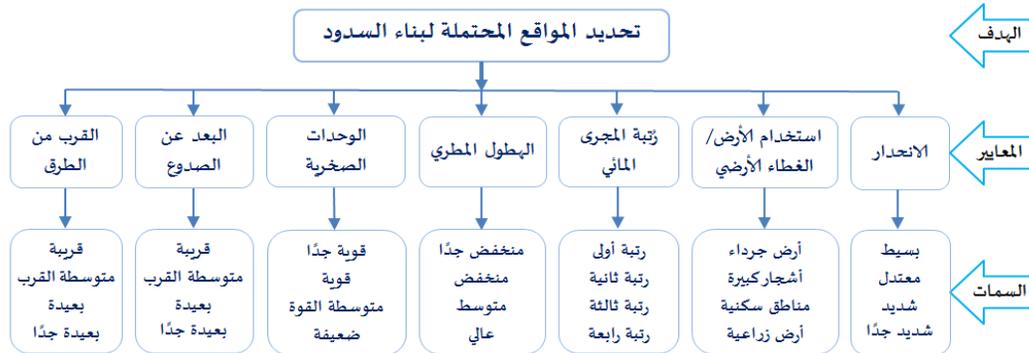
يجب أخذ الوحدات الصخرية وتوزيعها بعين الاعتبار عند تحديد المواقع المحتملة لبناء السدود [69,25,18]؛ فمن المتطلبات الجيوتقنية لمواقع إنشاء السدود أن تكون المواقع المختارة مكونة من صخور قوية ومتماسكة قادرة على تحمل جسم السد ولا تسمح بتسرب المياه من خلالها، أو من خلال أكتاف السد. كما يجب ألا تكون عمليات التجوية للصخور في المواقع المقترحة شديدة وعميقة. فالصخور المتواجدة في موقع معين لها تأثير-أيضاً- في اختيار نوع السد المقترح فيه [69] وطبيعة المواد الإنشائية التي ستستخدم في إنشائه [70,38].

٦. الصدوع Faults:

الصدوع من المعايير الهامة والحاسمة التي يجب دراستها بعناية عند اختيار المواقع المناسبة لإنشاء السدود [72,71,65]، حيث تلعب-مع غيرها من الخصائص الجيولوجية- دوراً كبيراً في تحديد ثبات السد وقدرته على تخزين المياه [38,18]. فعند اختيار مواقع السدود يجب التحري عن التراكيب الجيولوجية؛ كالصدوع ومعرفة اتجاهها وتوزيعها وكثافة إنتشارها؛ فمن المتطلبات الجيوتقنية لمواقع إنشاء السدود أن تكون المواقع المختارة بعيدة عن الصدوع والفواصل، والتي غالباً ما تُمثل نطاقات ضعف وممرات لنفاذ المياه خلالها، مما يجعل مستويات الصدوع سريعة التأثير بعمليات التجوية، وبالتالي ضعف جودة الكتلة الصخرية

(١) إلى (٩)، حيث يُساهم هذا المقياس في إجراء مقارنات منطقية بين المعايير وبحسب الأهمية، ويبدأ هذا المقياس بدرجة أهمية (١) والتي تُمثل أهمية متساوية، ثم درجة (٢) والتي تُمثل أهمية ضعيفة، وهكذا تزداد الأهمية وصولاً لدرجة أهمية (٩) (جدول ٣).

تم جمع المعايير المؤثرة في اختيار المواقع المحتملة لبناء السدود وترتيبها حسب الأهمية (جدول ٢). وبناءً على تقييم الأهمية النسبية لكل معيار ومقارنة كل معيارين مع بعضهما، تم استخدام المقياس الذي وضعه ساعتاني [74,73,56,55]، والذي يتدرج تصاعدياً وحسب الأهمية من



شكل ٥: الهيكل الهرمي لاختيار أنسب المواقع المحتملة لبناء السدود في المديرية

جدول ٢: ترتيب المعايير حسب الأهمية

م	المعيار	السبب
١	الانحدار	تفضل المواقع قليلة الانحدار لتوفر عاملي الأمان وقلة الكلفة.
٢	استخدام الأرض/الغطاء الأرضي	تُفضل المناطق الجرداء والتي ينعلم فيها الغطاء النباتي أو يكون متناثرًا.
٣	رتبة المجرى المائي	تُفضل المجاري المائية ذات الرتبة الأعلى، لأنها أقل نفاذية وكمية المياه القادمة إليها تكون كبيرة.
٤	معدل الهطول المطري السنوي	تُفضل المواقع التي فيها المعدل السنوي لهطول الأمطار كبيرًا.
٥	الوحدات الصخرية	تُفضل الوحدات الصخرية القوية والمتماسكة، لتتحمل جسم السد المقترح، كما تُفضل الأكتاف القوية، ويمكن استخدام الوحدات الصخرية ذات المواصفات الهندسية الجيدة في عملية الإنشاء.
٦	البُعد عن الصدوع	يُفضل أن يكون الموقع المقترح بعيدًا عن أماكن الصدوع، وخاصةً الصدوع الرئيسية والنشطة تكتونيًا.
٧	القرب من الطرق	يُفضل أن يكون الموقع المقترح قريبًا من شبكة الطرق ليسهل الوصول إليه.

٣، ٤. وزن المعايير:

تم تحديد مقياس لكل معيار من المعايير السبعة باستخدام مصفوفة المقارنة المزدوجة المطوّرة من قبل ساعتاني [75,74]، حيث تتضمن مقياس تصاعدي مكون من تسعة أوزان، وهي مصفوفة للمقارنة بين كل زوجين من المعايير المختارة بدلالة المقياس الأساسي للأهمية (جدول ٣)، تُستخدم لإعطاء الأوزان وحساب مدى درجة ثبات الأحكام (أي مدى منطقية الخبراء والمختصين في اختيار الوزن النسبي لكل معيار).

يتطلب إعداد مصفوفة المقارنة المزدوجة استخدام معايير مختلفة لإنشاء مصفوفة النسبة، حيث تؤخذ هذه المقارنات المزدوجة بوصفها مدخلات والأوزان النسبية المستخرجة بوصفها مخرجات، وبعد تشكيل مصفوفة المقارنة المزدوجة، يتم حساب الوزن لكل معيار. وتشمل عملية حساب الأوزان على العمليات الآتية [74]:

١. إيجاد مجموع القيم لكل عمود من أعمدة مصفوفة المقارنة المزدوجة.

جدول ٣: المقياس الأساسي للمقارنة المزدوجة [55]

درجة الأهمية	التعريف	التفسير
١	أهمية متساوية	يتساوى المعياران في تحقيق الهدف
٢	أهمية ضعيفة	-
٣	أهمية معتدلة	يزيد معيار عن الآخر بنسبة بسيطة
٤	أهمية أكثر اعتدالاً	-
٥	أهمية قوية	يُؤيد بشدة معيار عن المعيار الآخر
٦	أهمية أقوى	-
٧	أهمية قوية جداً	يُفضل بشدة معيار عن المعيار الآخر
٨	أهمية شديدة القوة	-
٩	أهمية قصوى	جميع الدلالات تؤيد معيار عن الآخر

مقارنته بالمعيار (j). والقيمة المتبادلة تخصص للمعيار (j) معبرة عن درجة الأهمية. الجدول (٤) يوضح مصفوفة المقارنة المزدوجة للمعايير المختارة.

وبناءً على مصفوفة المقارنة المزدوجة، تم حساب الأوزان (W) للمعايير (i) من خلال تطبيق المعادلة (١)، وذلك بقسمة قيمة الأهمية النسبية للمعيار على مجموع القيم للعمود الذي هو فيه، والجدول (٥) يوضح مصفوفة المقارنة المزدوجة الموحدة، ووزن كل معيار من المعايير المختارة، وأهميته مقارنة بالمعايير الأخرى.

٢. قسمة القيمة المعطاة لكل معيار في المصفوفة على مجموع قيم العمود الذي يقع فيه هذا المعيار، والمصفوفة الناتجة تسمى مصفوفة المقارنة المزدوجة الموحدة.

٣. احتساب المتوسط للمعايير المختارة في كل صف من صفوف مصفوفة المقارنة المزدوجة الموحدة، أي قسمة مجموع القيم الموحدة لكل صف على عدد المعايير. وهذه المتوسطات تمثل الأوزان النسبية للمعايير التي يتم مقارنتها.

وقد تمت مقارنة كل معيار بالمعايير الأخرى من حيث أهميته، وذلك بقراءته من الصف للعمود (نبدأ بالمقارنة أفقياً ثم رأسياً)، من خلال تخصيص (i) معياراً لدرجة الأهمية عند

جدول ٤: مصفوفة المقارنة المزدوجة للمعايير المختارة

المعيار	الانحدار	استخدام الأرض/الغطاء الأرضي	رتبة المجرى المائي	الهطول المطري	الوحدات الصخرية	البعد عن الصدوع	القرب من الطرق
الانحدار	1.0	2	2	3	4	5	7
استخدام الأرض/الغطاء الأرضي	0.50	1.0	2	2	5	5	8
رتبة المجرى المائي	0.50	0.50	1.0	2	5	5	7
معدل الهطول المطري	0.33	0.50	0.50	1.0	2	3	5
الوحدات الصخرية	0.25	0.20	0.20	0.50	1.0	2	4
البعد عن الصدوع	0.20	0.20	0.20	0.33	0.50	1.0	3
القرب من الطرق	0.20	0.13	0.14	0.20	0.25	0.33	1.0
المجموع	2.98	4.53	6.04	9.03	17.75	21.33	35.00

بعد حساب أوزان المعايير المختارة تم حساب الوزن النهائي لكل معيار، وذلك من خلال جمع الأوزان الأولية ثم قسمتها على عدد المعايير، ثم جمعها لنحصل على المجموع النهائي.

$$w_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} / (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij}) \dots \dots \dots (1)$$

حيث تمثل W وزن المعيار، n عدد المعايير المختارة، i و j وز المعايير، و P_{ij} الأهمية النسبية لهذه المعايير.

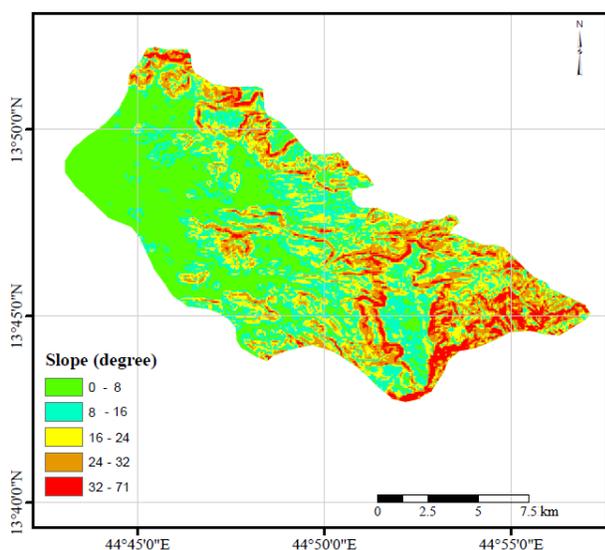
جدول ٥: مصفوفة المقارنة المزدوجة الموحدة وأوزان المعايير المختارة

المعيار	الانحدار	استخدام الأرض/الغطاء الأرضي	رتبة المجرى المائي	الهطول المطري	الوحدات الصخرية	البعد عن الصدوع	القرب من الطرق	الوزن (%)
الانحدار	0.34	0.44	0.33	0.33	0.23	0.23	0.20	30.0
استخدام الأرض/الغطاء الأرضي	0.17	0.22	0.33	0.22	0.28	0.23	0.23	24.1
رتبة المجرى المائي	0.17	0.11	0.17	0.22	0.28	0.23	0.20	19.7
الهطول المطري	0.11	0.11	0.08	0.11	0.11	0.14	0.14	11.6
الوحدات الصخرية	0.08	0.04	0.03	0.06	0.06	0.09	0.11	6.9
البعد عن الصدوع	0.07	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05	0.09	4.9
القرب من الطرق	0.07	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	2.8

تعتمد قيم مصفوفة المقارنة المزدوجة على الحكم الشخصي الذي قد يؤدي إلى التحيز لمعيار ما دون الآخر، لذا

سطح البحر في جنوب شرقها، و ٢٣٨٥ م في غربها، وقد تم استخدام برنامج (ArcGIS 10.3) لعمل خريطة للانحدارات من نموذج الارتفاع الرقمي، وتبين أن ٣٥ % من مساحة المديرية منبسطة وذات انحدار خفيف لا يتجاوز ٨ درجات، و ٢٥ % ذات انحدار ما بين ٨ و ١٦ درجة، و ١٩ % ذات انحدار يتراوح ما بين ١٦ و ٢٤ درجة، و ١٣ % يتراوح انحدارها ما بين ٢٤ و ٣٢ درجة، و ٨ % يتراوح انحدارها ما بين ٣٢ و ٧٤ درجة، واعتماداً على معيار الانحدار فالمديرية فيها مساحات كبيرة (٦٠ %) ملائمة لبناء السدود (شكل ٦).

استخدام الأرض/الغطاء الأرضي Land use/land cover: من تحليل خرائط استخدام الأرض/الغطاء الأرضي والمرئيات الفضائية للمديرية تبين أن استخدام الأرض/الغطاء الأرضي ينقسم إلى أراضي جرداء قاحلة مع أراضي فيها غطاء نباتي متناثر، وهذا يُشكل ٨٢ % من مساحة المديرية، وأراضي زراعية (١٣ %) وأراضي فيها شجيرات (٤ %)، بالإضافة للمناطق التي تمر من خلالها شبكة الطرق التي يستخدمها السكان المحليين (شكل ٧).



شكل ٦: الانحدار في المديرية

يجب تقييم الثبات بين المعايير في مصفوفة المقارنة المزدوجة، وذلك من خلال حساب قيمة نسبة الثبات (Consistency

(ratio, CR)، وذلك باستخدام المعادلة (٢)

$$CR = \frac{CI}{RI} \dots \dots \dots (2)$$

يتم حساب نسبة الثبات للمعايير الموزونة لمنع التناقضات بين المعايير، ولمنع التحيز لمعيار دون الآخر. وحتى لا يكون هناك تناقضاً في الأحكام أو الآراء من قبل المختصين، ويجب ألا تتجاوز قيمة هذه النسبة ٠,١ (١٠%) لتكون مصفوفة المقارنة المزدوجة ثابتة ومقبولة [74].

قيمة مؤشر الثبات (Consistency Index, CI)

حُسِبَتْ باستخدام المعادلة (٣)، وكانت قيمتها (٠,٠٦).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \dots \dots \dots (3)$$

حيث تُمثل n عدد المعايير المختارة، λ_{max} معامل

التحول الخطي (٧,٣٩).

ولتطبيق المعادلة (٢) يجب أخذ قيمة مؤشر الثبات العشوائي (Consistency Random Index, RI) من الجدول (٦) [74]، والذي يعتمد على عدد المعايير المستخدمة، ونظراً لاعتماد الدراسة الحالية على سبعة معايير فإن $(RI=1.32)$.

وبحساب قيمة نسبة الثبات الخاصة بهذه الدراسة نجد أن قيمتها (٠,٠٥)، أي أنها لم تتجاوز الحد الأقصى لقيمة التحليل الهرمي، وبالتالي تعد المصفوفة ثابتة ومقبولة.

جدول ٦: قيم مؤشر الثبات العشوائي

n	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠
RI	٠	٠	٠,٥٨	٠,٩٠	١,١٢	١,٢٤	١,٣٢	١,٤١	١,٤٥	١,٤٩

٤,٤. تحليل المعايير

الانحدار Slope:

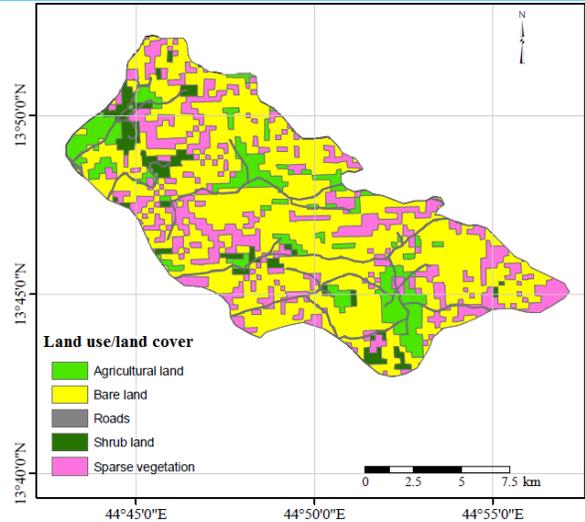
من خلال عملية التحليل لنموذج الارتفاع الرقمي للمديرية -بواسطة برنامج (ArcGIS 10.3)- اتضح أن تضاريس المديرية متباينة ما بين مرتفعات جبلية، هضاب، وأودية، وتتراوح الارتفاعات فيها ما بين ١٠٧٦ م فوق مستوى

الهطول المطري Rainfall:

تم تحليل بيانات الهطول المطري -في المديرية- للفترة من ١٩٨٣ و ٢٠١٣م بواسطة برنامج (ArcGIS 10.3)، وتم عمل خريطة لمعدل الهطول المطري السنوي لتلك الفترة، والذي تراوح ما بين ٢٢٧ مم في الجزء الشمالي الغربي منها - وهذه المناطق تُشكل ١٠ % من مساحة المديرية- و ٤٠٤ مم في المرتفعات الجنوبية الشرقية، وهذه المناطق تُمثل ١ % من مساحة المديرية (شكل ٩). واعتمادًا على المعدل السنوي للهطول المطري فالمناطق الجنوبية الشرقية ذات درجة ملاءمة مكانية عالية كمواقع لسدود محتملة، بينما المناطق الشمالية الغربية ذات درجة ملاءمة ضعيفة.

الوحدات الصخرية Rock units:

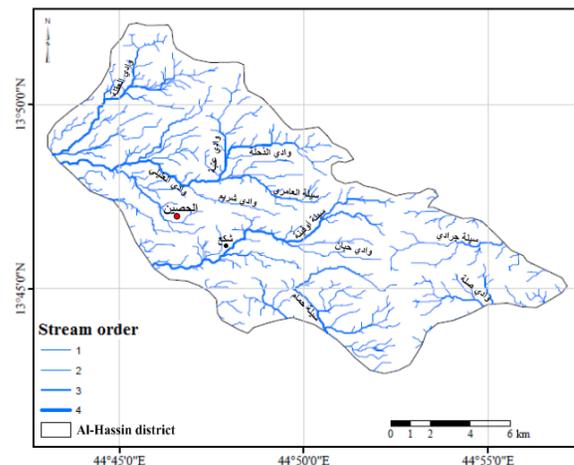
إعتمادًا على الخريطة الجيولوجية لمربع الضالع [75]، تتكون الوحدات الصخرية في المديرية من صخور القاعدة المعقدة والمكونة من النيس (gneiss)، الدايبورايت (diorite)، والمجماتيت (migmatite)، وتتركز هذه الصخور في جنوب شرق المديرية -وتُشكل ٢٧ % من مساحتها- وهي صخور قوية ومتماسكة وذات ملاءمة عالية كمواقع لسدود محتملة، وكمواد بناء مناسبة في العمليات الإنشائية. كما تتواجد صخور الحجر الرملي (sandstone) في مناطق عدة بالمديرية تمتد من شمالها لجنوبها، وتغطي ٣٠ % من مساحتها. وتتواجد في الأجزاء الشمالية والغربية صخور البازلت (basalt) وتُشكل ٢٥ %، كما تنتشر رواسب العصر الرباعي (Quaternary deposits) وتغطي ١٣ %، وتتركز في الجزء الشمالي الغربي (شكل ١٠).



شكل ٧: استخدام الأرض/الغطاء الأرضي

رتبة المجري المائي Stream order:

تم استخدام نموذج الارتفاع الرقمي في استخراج وعمل خريطة لرتب المجاري المائية بواسطة برنامج (ArcGIS 10.3)، واتضح أن رُتب الروافد المائية لأودية المديرية تتسم بالشكل الشجري وتتكون من أربع رُتب (شكل ٨). وتجري في المديرية عدة أودية ومن أشهرها: وادي الذلعة، ووادي عتبة، وادي العليلي، ووادي العقلة، كما يطلق سكان المديرية كلمة "سيلة" على بعض الأودية كسيلة أوفينة، سيلة العامري، سيلة جرادي، وسيلة حمام (شكل ٨)، ومعظم هذه الأودية تجري باتجاه الغرب. وبعض هذه الأودية منشأها تكتوني مرتبط بالصدوع الرئيسية بالمنطقة.

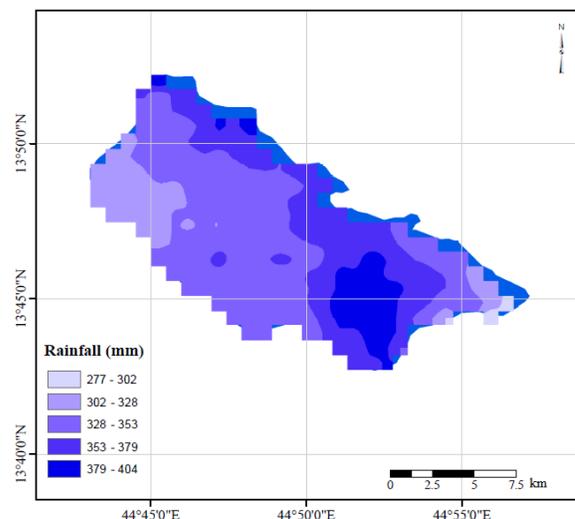


شكل ٨: رتب المجاري المائية

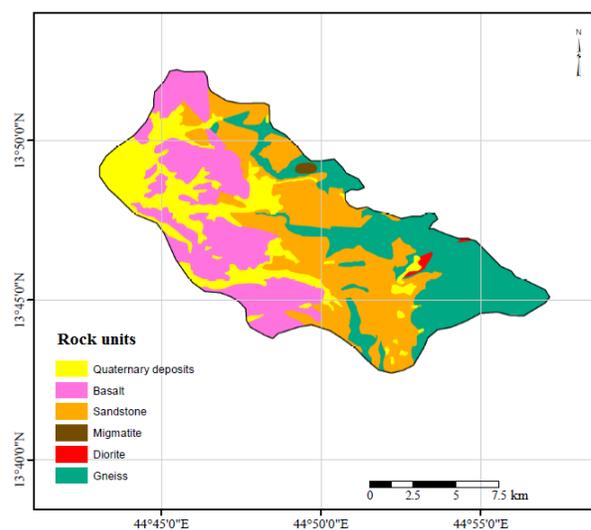
المديرية، وتوجد في شمال غربها وجنوب شرقها، والمناطق الملائمة والتي تبعد عن الصدوع مسافة تتراوح ما بين ١٨٠٠ و ٢٤٠٠ م تشكل ١٤ %، والمناطق متوسطة الملاءمة تُمثل ١٥ %، والمناطق ضعيفة الملاءمة نسبتها ٢٢ %، والمناطق غير الملائمة نسبتها ٣٦ % (شكل ١١-ب).

عند اختيار المواقع المحتملة لإنشاء السدود يجب التحري عن مواقع الصدوع الرئيسية وخاصةً النشطة (active faults)، ويمكن معرفة ذلك من خلال تتبع النشاط الزلزالي في المنطقة، ومقارنة مواقع البؤر الزلزالية السطحية (Epicenter) مع مواقع الصدوع.

تم البحث في الموقع الإلكتروني لمركز الرصد الزلزالي العالمي [54] عن الزلازل المسجلة لديه، والتي حدثت في المديرية خلال الفترة من ١-١-١٩٠٠م وحتى ١-١-٢٠٢٤م، وتم الحصول على بيانات لستة عشر زلزالاً حدثت خلال تلك الفترة في المديرية والمديريات المجاورة لها، وتم إسقاط مواقع البؤر الزلزالية السطحية لهذه الزلازل على خريطة المديرية، فوقع أربعة منها داخل حدودها (شكل ١٠-ج)، وضربت ستة أخرى شرقها، وخمسة زلازل ضربت شمال غربها، وزلزالاً واحداً وقع في غربها، وتراوح المقدار الزلزالي لهذه الزلازل ما بين ٢,٣ و ٤,٩ درجة على مقياس ريختر، بمتوسط مقداره ٢,٩ درجة، أما الأعماق البؤرية لهذه الزلازل فقد كانت ما بين ٢ و ٢٦ كم، بمتوسط مقداره ٨,٦ كم. وبالرغم من أن ٨١ % من هذه الزلازل لم تتجاوز الثلاث الدرجات - زلازل دقيقة (Microearthquakes) - إلا أن هناك ثلاثة زلازل تجاوزت ذلك المقدار، وكان أقواها الزلزال الذي ضرب شمال غرب المديرية في ٢٥-٦-١٩٨٤م، والذي بلغ مقداره ٤,٩ درجة على مقياس ريختر، ووقعت بؤرته السطحية على أحد الصدوع الكبيرة والمتجه شمال شرق وهو الاتجاه الموازي لخليج عدن، وقد يكون هذا الزلزال مرتبط بالنشاط التكتوني في خليج عدن.



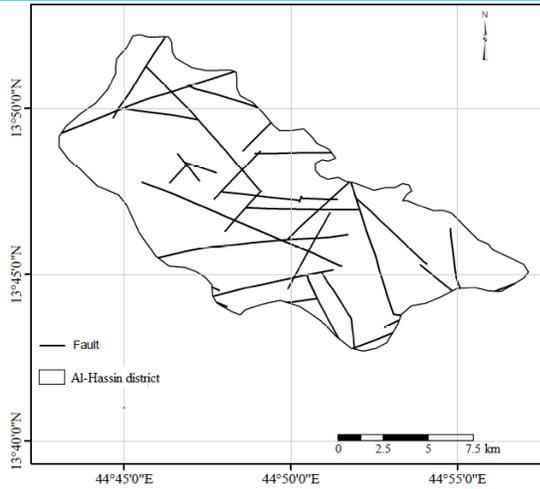
شكل ٩: المعدل السنوي لهطول الأمطار



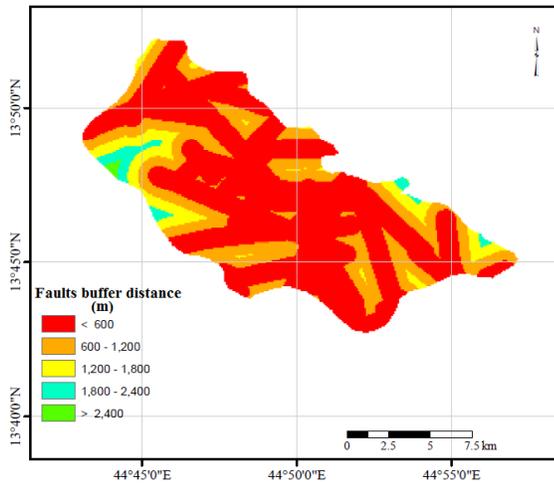
شكل ١٠: الوحدات الصخرية

الصدوع Faults:

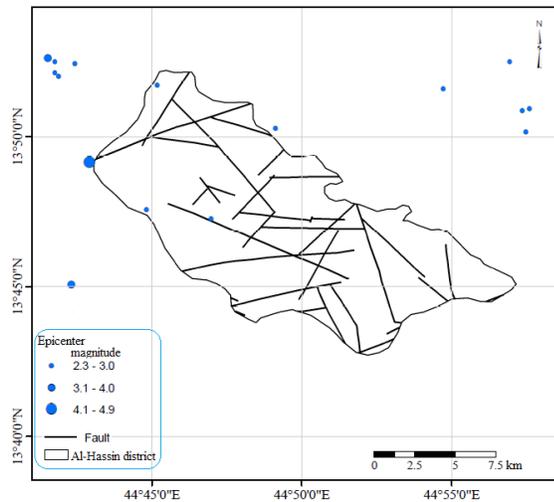
تقطع صخور المديرية عددًا من الصدوع الرئيسية والتي تأخذ اتجاهين رئيسيين وهما؛ شمال شرق (NE) وشمال غرب (NW) (شكل ١١-أ)، وهذان الاتجاهان مرتبطان بالأحداث التكتونية المرتبطة بتكون البحر الأحمر وخليج عدن. تم استخدام برنامج (ArcGIS 10.3) في عمل وتحديد نطاقات مكانية -بالأمتار- لمدى البُعد عن الصدوع (شكل ١١-ب). فالمناطق عالية الملاءمة -والتي تبعد عن الصدوع أكثر من ٢٤٠٠ م- تُشكّل ١٣ % من مساحة



أ



ب



ج

شكل ١١: أ) الصدوع في المديرية، ب) نطاقات مكانية للبعد عن الصدوع، ج) مواقع البؤر الزلزالية السطحية للزلازل التي حدثت في المديرية خلال

تم رصد هذه الزلازل بواسطة المركز الوطني للرصد الزلزالي بمحافظة ذمار (DHMR)، المركز الأوروبي المتوسطي لرصد الزلازل (CSEM/EMSC) بفرنسا، والمركز الزلزالي العالمي (ISC) في المملكة المتحدة.

ومن خلال إسقاط مواقع البؤر الزلزالية السطحية على خريطة الصدوع في المديرية (شكل ١١- ج) يظهر أن الصدوع في جنوب المديرية لا يظهر عليها أي نشاط تكتوني، بينما الصدوع في شمالها وغربها نشطة نوعاً ما، حيث وقعت عدداً من الزلازل عليها، وبالرغم من أن معظم الزلازل دقيقة (مقدارهما أقل من ٣ درجات)، لكن وقوع الزلازل الدقيقة قد يكون مؤشراً لوجود نطاقات خطية نشطة زلزالياً ترتبط بصدوع نشطة، لذلك من الأهمية بمكان أخذ ذلك بعين الاعتبار عند اختيار مواقع السدود المحتملة في المديرية.

شبكة الطرق *Road networks*:

يُفضل أن تكون المواقع المحتملة لبناء السدود أقرب ما يمكن من شبكة الطرق الموجودة في المديرية (شكل ١٢- أ). تم استخدام برنامج (ArcGIS 10.3) في عمل نطاقات بُعد مكانية -بالمتر- لمدى القرب من الطرق (شكل ١٢- ب). فالمناطق عالية الملاءمة -والتي تبعد عن الطرق مسافة لا تتجاوز ٦٠٠ م- تُشكل ٨١ % من مساحة المديرية، وتتواجد في أرجاء المديرية المختلفة، تليها المناطق الملائمة، والتي تبعد عن الطرق مسافة تتراوح ما بين ٦٠٠ و ١٢٠٠ م، وتُمثل ١٧ %. فالمديرية فيها مساحات شاسعة جداً تعزز هذا المعيار الاقتصادي والاجتماعي.

تحليلها، ودمجها، لذلك تمت عملية إعادة تصنيف بيانات المعايير المختارة على مقياس مُوحّد ومُشترك -مكون من خمس فئات- حسب درجة الملاءمة المكانية وهي: ملاءمة عالية (٥)، ملائمة (٤)، ملاءمة متوسطة (٣)، ملاءمة ضعيفة (٢)، وغير ملائمة (١) (شكل ١٣)، وهذه العملية تُسهّل التعامل مع بيانات المعايير المختارة وتُعزّز من إمكانية المقارنة بينها. وفيما يلي عرض لعملية إعادة تصنيف بيانات هذه المعايير والتي تمت باستخدام برنامج (ArcGIS 10.3):

الانحدار:

يعتمد اختيار الموقع المناسب للسد على درجة انحدار الموقع المقترح، فكلما كانت درجة انحداره بسيطة كان ذلك أفضل. تم إعادة تصنيف خريطة بيانات الانحدار بمقياس من (١) إلى (٥) بناءً على درجة الملاءمة المكانية لهذه المناطق كمواقع محتملة لبناء السدود (جدول ٧)، حيث يُمثّل ملاءمة مكانية عالية، وهي المناطق ذات الانحدار البسيط (أقل من ٨ درجات)، وتشكل هذه المناطق ٣٥ % من مساحة المديرية، وتتركز بشكل أساسي في المنطقتين؛ الغربية والشمالية الغربية، بينما (١) غير ملائمة، وهي المناطق التي يتراوح انحدارها ما بين ٣٢ و ٧١ درجة، كالمنطقتين؛ الجنوبية الشرقية والشمالية، وتشكل ٨ % من مساحة المديرية (شكل ١٣-أ).

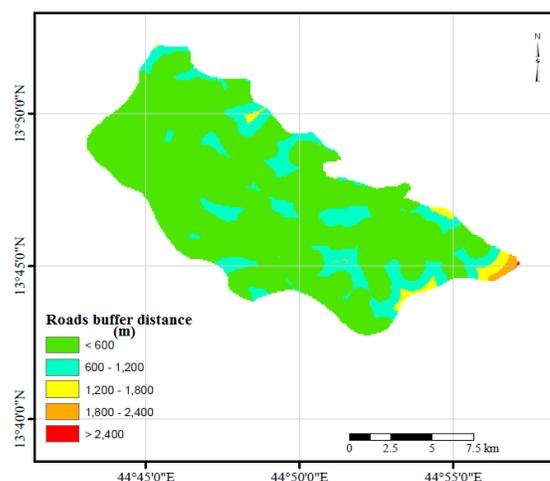
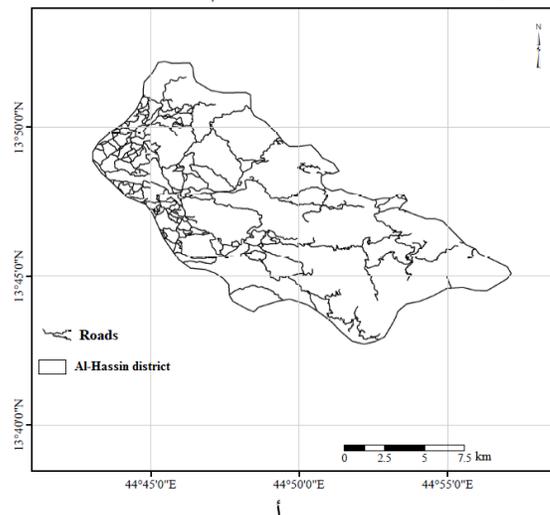
تشكل المناطق -الملائمة وعالية الملاءمة- التي لا يتجاوز انحدارها ١٦ درجة، نسبة كبيرة من مساحة المديرية تقدر بـ ٦٠ %.

جدول ٧: إعادة تصنيف بيانات الانحدار

الرتبة	الانحدار (درجة)
٥	أقل من ٨
٤	٨-١٦
٣	١٦-٢٤
٢	٢٤-٣٢
١	أكثر من ٣٢

إستخدام الأرض/الغطاء الأرضي:

الفترة ما بين ١-١-١٩٠٠ و ١-١-٢٠٢٤م.



ب

شكل ١٢: (أ) شبكة الطرق في المديرية، (ب) نطاقات بُد مكانية للقرّب من شبكة الطرق

٥,٤. إعادة تصنيف المعايير:

تم تمثيل بيانات المعايير المختارة على شكل طبقات، وتحويلها لبيانات شبكية (Raster)، ثم تحليل مدى الملاءمة المكانية لاختيار المواقع المحتملة لإنشاء السدود بالمديرية وعرضها وإدارتها بشكل مستقل، لأن كل طبقة تمثل بيانات لمعيار واحد، ولكل معيار سِمَاتٍ معينة، وهذه السمات تختلف من معيارٍ لآخر، فبعضها كمي والبعض الآخر نوعي، كما أن السمات الكمية لها وحدات قياس مختلفة، فيصعب مقارنتها،

تعتبر رتبة المجرى المائي من العوامل الهامة والتي تؤخذ بعين الاعتبار عند اختيار المواقع المحتملة لبناء السدود، وهي تمثل المسارات التي تجري فيها المياه في موسم الأمطار، فكلما زادت قيمة الرتبة للمجرى المائي كلما كانت كمية المياه الواردة إليه أكبر، لأن المياه تجري من الرتبة الأدنى للرتبة الأعلى، فكلما كانت الرتبة كبيرة كلما كان موقعها أكثر ملائمة للموقع المقترح لبناء السد، تم إعادة تصنيف بيانات خريطة رتبة المجرى المائي بمقياس من (١) إلى (٥) بناءً على درجة الملائمة المكانية لهذه الرتب كمواقع محتملة لبناء السدود (جدول ٩)، حيث (٥) يمثل ملائمة مكانية عالية، وهي المجاري المائية ذات الرتبة الرابعة، بينما (١) غير ملائمة، وهي المجاري المائية ذات الرتبة الأولى (شكل ١٣-ج).

جدول ٩: إعادة تصنيف رتبة المجرى المائي

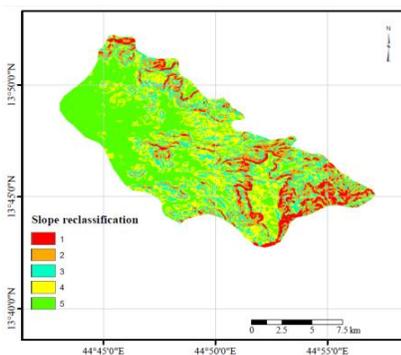
الرتبة	رتبة المجرى المائي
١	الرتبة الأولى
٢	الرتبة الثانية
٤	الرتبة الثالثة
٥	الرتبة الرابعة

يعد الغطاء النباتي من العوامل التي تساهم في الحفاظ على التربة من الانجراف، فالغطاء الأرضي المعرض للتعرية بشكل أقل يساهم في تحديد الموقع المناسب للسد بشكل أكبر. تم إعادة تصنيف بيانات خريطة استخدام الأرض/الغطاء الأرضي بمقياس من (١) إلى (٥) بناءً على درجة الملائمة المكانية لهذه المناطق كمواقع محتملة لبناء السدود (جدول ٨)، حيث (٥) يمثل ملائمة مكانية عالية، وهي المناطق الجرداء القاحلة بالإضافة للمناطق التي ينتشر بها الغطاء النباتي بشكل متناثر، بينما (١) غير ملائمة، وهي المناطق التي تنتشر فيها الأراضي الزراعية بالإضافة للمناطق التي تمر من خلالها شبكة الطرق (شكل ١٣-ب).

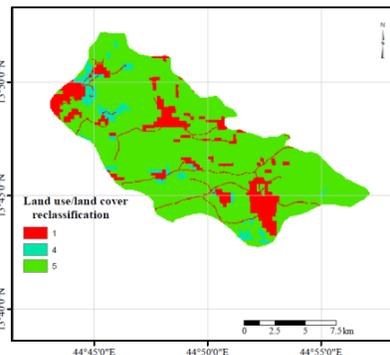
جدول ٨: إعادة تصنيف بيانات استخدام الأرض/الغطاء الأرضي

الرتبة	استخدام الأرض/الغطاء الأرضي
١	الأرض الزراعية/ الطرق
٤	الأراضي التي تنتشر فيها الشجيرات
٥	الأراضي الجرداء القاحلة/ أراضي الغطاء النباتي المتناثر

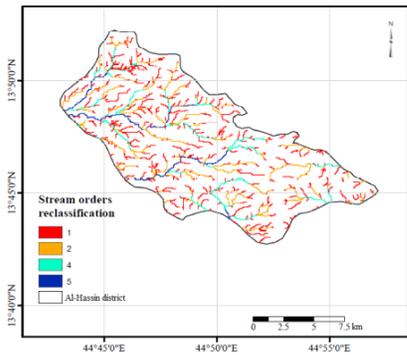
رتبة المجرى المائي:



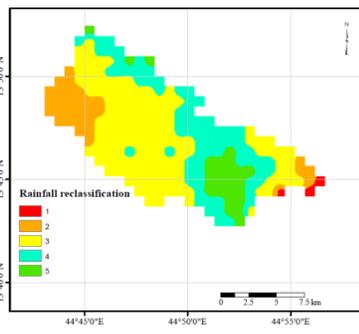
أ



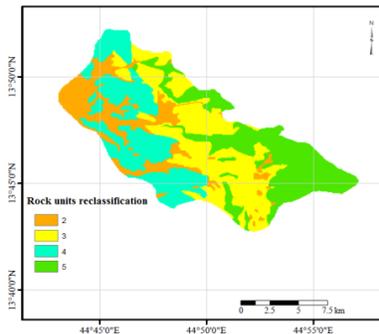
ب



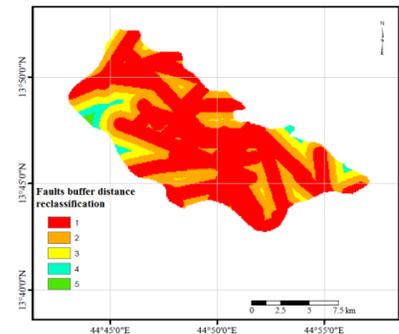
ج



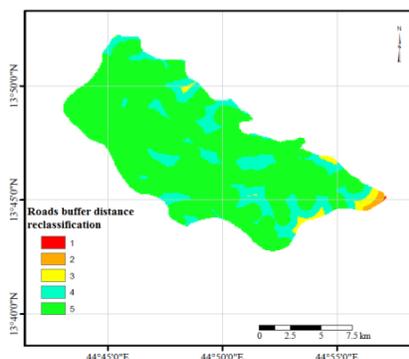
د



هـ



و



ي

شكل ١٣: نتائج إعادة تصنيف بيانات المعايير حسب درجة الملاءمة المكانية كمواقع لبناء سدود محتملة في المديرية (أ) الانحدار، (ب) استخدام الأرض/الغطاء الأرضي، (ج) رتبة المجرى المائي، (د) المعدل السنوي للهطول المطري، (هـ) الوحدات الصخرية، (و) البُعد عن الصدوع، (ي) القُرب من الطرق

جدول ١٠: إعادة تصنيف المعدل السنوي للهطول المطري

الرتبة	المعدل السنوي للهطول المطري (مم)
١	٣٠٢ - ٢٢٧
٢	٣٢٨ - ٣٠٢
٣	٣٥٣ - ٣٢٨
٤	٣٧٩ - ٣٥٣
٥	٤٠٤ - ٣٧٩

الهطول المطري:

تؤثر كمية الهطول المطري على معدل ترشيح وتسرب المياه خلال مسامات التربة وشقوق الصخور، وهذا بدوره سيؤثر على كمية المياه التي سيتم تجميعها في بحيرة السد المقترح، فمع زيادة كمية الهطول المطري تزداد رطوبة التربة ويقل ترشيح وتسرب المياه من خلالها ويزداد الجريان السطحي للمياه، فتزيد إمكانية جمع المياه. فكلما كان معدل الهطول المطري كبيراً كانت كمية المياه الجارية عالية، وبالتالي فالمناطق الأعلى في المعدل السنوي للهطول المطري أكثر ملاءمة كمواقع محتملة لبناء السدود من المناطق التي فيها معدل الهطول المطري منخفضاً، تم إعادة تصنيف بيانات خريطة المعدل السنوي للهطول المطري بمقياس من (١) إلى (٥) بناءً على درجة الملاءمة المكانية لهذه المناطق كمواقع محتملة لبناء السدود (جدول ١٠)، حيث (٥) يمثل ملاءمة مكانية عالية، وهي المناطق ذات المعدل المرتفع للهطول المطري السنوي (أكثر من ٣٧٩ مم) والمتمثلة بالمرتفعات الجنوبية الشرقية من المديرية، بينما (١) غير ملائمة، وهي المناطق ذات المعدل المنخفض للهطول المطري السنوي -أقل من ٣٠٢ مم- والمتمثلة بسهول المنطقة الشمالية الغربية (شكل ١٣-ب).

الوحدات الصخرية:

تلعب الوحدات الصخرية دوراً مهماً في تحديد المواقع المحتملة لبناء السدود، حيث يُفضل أن تكون الوحدات الصخرية في تلك المواقع قوية وذات خواص هندسية جيدة، لتتحمل جسم السد ولتحتفظ المياه المتجمعة في بحيرته، كما ينبغي أن تكون الصخور جيدة من الناحية الهندسية في بحيرة السد المقترح، تم إعادة تصنيف الوحدات الصخرية في المديرية بمقياس من (٢) إلى (٥) بناءً على درجة الملاءمة المكانية لتلك الوحدات كمواقع محتملة لبناء السدود (جدول ١١)، حيث (٥) يمثل ملاءمة مكانية عالية، وهي المناطق التي تتكون من وحدات صخرية قوية كالنيس، الداويرايت، والمجماتيت، وتتركز هذه الوحدات الصخرية في جنوب شرق المديرية بينما (٢) يمثل ملاءمة مكانية ضعيفة، وهي المناطق التي تنتشر بها رواسب العصر الرباعي في شمال غرب المديرية (شكل ١٣-هـ).

جدول ١١: إعادة تصنيف الوحدات الصخرية

الرتبة	الوحدات الصخرية
٢	رواسب العصر الرباعي
٣	الحجر الرملي
٤	البازلت
٥	النيس / الديورايت / المجماتيت

البُعد عن الصدوع:

تلعب الصدوع دورًا مهمًا في تحديد المواقع المحتملة لبناء السدود، حيث يُفضل أن تكون تلك المواقع بعيدة عن مناطق الصدوع، وخاصةً الرئيسية، لأنها مناطق ضَعْف، وذات نفاذية عالية، ويكون عمق التجوية عندها كبيرًا، مما يضعف الخواص الهندسية للكتلة الصخرية (Rock mass) ويقلل من جودتها، كما يمكن أن تكون هذه الصدوع نشطة من الناحية التكتونية، وما ينبغي أخذه بعين الاعتبار في موقع السد المقترح، لا بد من مراعاته -أيضًا- في موقع بحيرته.

تقطع الصدوع كل الوحدات الصخرية المتواجدة في أرجاء المديرية المختلفة، ولهذه الصدوع اتجاهين رئيسيين؛ شمال شرق وشمال غرب. وقد تم عمل نطاقات مكانية للبُعد عن الصدوع (شكل ١٠-ب)، ثم أُعيد تصنيف بيانات هذه النطاقات بمقياس من (١) إلى (٥) بناءً على درجة الملاءمة المكانية لهذه النطاقات كمواقع محتملة لبناء السدود (جدول ١٢)، حيث (٥) يمثل ملاءمة مكانية عالية، وهي المناطق الواقعة في النطاق البعيد عن الصدوع (أكبر من ٢٤٠٠ م)، بينما (١) غير ملائمة، وهي المناطق الواقعة في النطاق القريب من الصدوع (أقل من ٦٠٠ م) (شكل ١٣-و).

جدول ١٢: إعادة تصنيف نطاقات البُعد عن الصدوع

الرتبة	مسافة البُعد عن الصدوع (م)
١	أقل من ٦٠٠
٢	٦٠٠ - ١٢٠٠
٣	١٢٠٠ - ١٨٠٠
٤	١٨٠٠ - ٢٤٠٠
٥	أكبر من ٢٤٠٠

القُرب من الطرق:

لشبكة الطرق أهمية كبيرة عند تحديد المواقع المحتملة لبناء السدود، حيث يُفضل أن تكون تلك المواقع قريبة من مسارات الطرق، لأن قربها يُسهل من عملية الوصول لتلك المواقع، مما يُقلل من تكاليف النقل للمواد الإنشائية وللمعدات المستخدمة في العمليات الإنشائية، كما أن قُرب الطرق يقلل من تكلفة عمليتي المراقبة والصيانة واللذان قد تُجرى -مستقبلًا- بشكلٍ دوري، بالإضافة إلى أن الطرق تُسهل عملية وصول السكان المحليين لموقع السد وتقلل من تكاليف نقل المياه إلى مزارعهم، ويُفضل ألا يتجاوز بُعد الطرق عن موقع السد المقترح ١٠٠٠ م.

تم عمل نطاقات مكانية للقُرب من شبكة الطرق داخل المديرية (شكل ١١-ب)، ثم أُعيد تصنيف بيانات هذه النطاقات بمقياس من (١) إلى (٥) بناءً على درجة الملاءمة المكانية لهذه النطاقات كمواقع محتملة لبناء السدود (جدول ١٣)، حيث (٥) يُمثل ملاءمة مكانية عالية، وهي المناطق الواقعة في النطاق القريب من الطرق (أقل من ٦٠٠ م)، بينما (١) غير ملائمة، وهي المناطق الواقعة في النطاق البعيد من الطرق (أكبر من ٢٤٠٠ م) (شكل ١٣-ي).

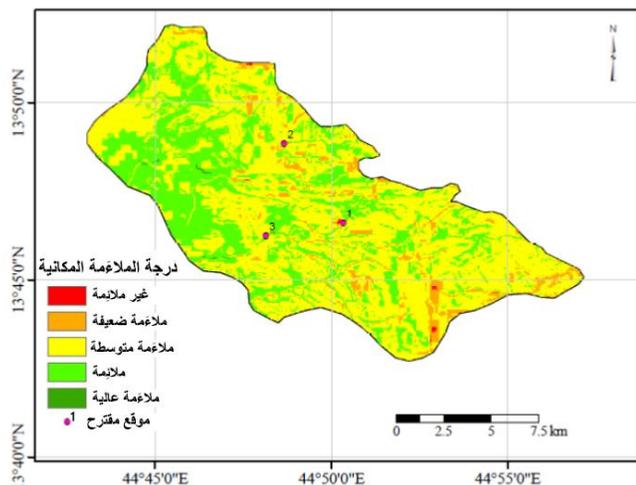
جدول ١٣: إعادة تصنيف نطاقات القُرب من الطرق

الرتبة	القُرب من الطرق (م)
٥	أقل من ٦٠٠
٤	٦٠٠ - ١٢٠٠
٣	١٢٠٠ - ١٨٠٠
٢	١٨٠٠ - ٢٤٠٠
١	أكبر من ٢٤٠٠

٦،٤. خريطة الملاءمة المكانية:

بعد الانتهاء من عملية إعادة تصنيف بيانات المعايير المختارة وفقًا لدرجة الملاءمة المكانية كمواقع محتملة لبناء السدود، والتي تم إجراؤها على مقياس مشترك ومُوحد يتراوح ما بين (١) و (٥)، تم القيام بعملية الدمج بين بيانات الطبقات الشبكية للمعايير المختارة والمعاد تصنيفها، وذلك بعد ضرب بيانات الطبقة الشبكية المعاد تصنيفها لكل معيار في الوزن النسبي الخاص به والذي تم حسابه والحصول عليه من

ولا غنى عن النزول الحقل للمواقع المقترحة للتحقق ميدانيًا من مدى ملاءمتها لبناء السدود، والمقارنة بينها واختيار البديل الأفضل والمناسب، ووفقًا لدراساتٍ تفصيلية.



شكل ١٤: خريطة الملاءمة المكانية لمواقع السدود المحتملة في المديرية

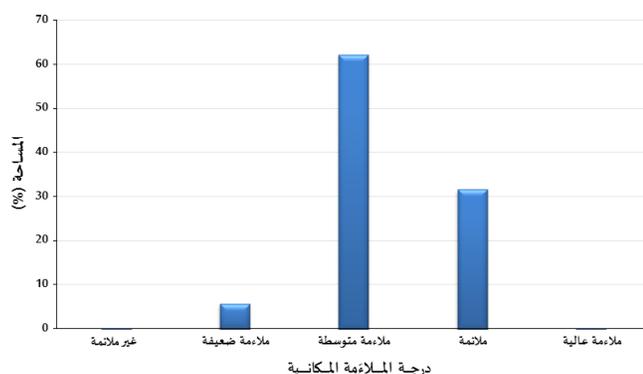
عملية التحليل الهرمي (جدول ١٤). وتم إجراء هذه العملية باستخدام أداة وزن المعايير (Weighted Overlay)، وهي من الأدوات التي يوفرها برنامج (ArcGIS)، ضمن أدوات التحليل المكاني (Spatial Analyst)، وكانت المحصلة النهائية لكل العمليات السابقة هي إنتاج خريطة الملاءمة المكانية (Suitability map) لمواقع السدود المحتملة في المديرية (شكل ١٤).

جدول ١٤: المعايير المختارة وأوزانها

المعايير	الوزن (%)
الانحدار	30.0
استخدام الأرض/ الغطاء الأرضي	٢٤,١
رُتبية المجرى المائي	١٩,٧
الهطول المطري	١١,٦
الوحدات الصخرية	٦,٩
البعد عن الصدوع	٤,٩
القرب من الطرق	٢,٨

جدول ١٥: النسبة المئوية للمساحة حسب درجة الملاءمة المكانية

درجة الملاءمة المكانية	المساحة (م ^٢)	المساحة (%)
ملاءمة عالية	269144	4٠,١٠
ملائمة	62133638	31.72
ملاءمة متوسطة	121979838	62.30
ملاءمة ضعيفة	11170849	5.71
غير ملائمة	252142	0.13



شكل ١٥: النسب المئوية للمساحة حسب درجة الملاءمة المكانية

٥. الاستنتاجات والتوصيات:

تواجه مساحات شاسعة من مديرية الحصين بمحافظة الضالع ظروفًا مناخية جافة بسبب تكرار مواسم شح الأمطار

تم دمج بيانات المعايير المختارة والمعاد تصنيفها، والموزونة باستخدام عملية التحليل الهرمي، حيث تمثلت هذه المعايير في: الانحدار، استخدام الأرض/الغطاء الأرضي، رُتبية المجرى المائي، المعدل السنوي للهطول المطري، الوحدات الصخرية، البُعد عن الصدوع، والقرب من الطرق، ونتج عن هذه العملية خريطة لدرجة الملاءمة المكانية في المديرية (شكل ١٤)، وصُنفت هذه الخريطة إلى خمس فئات؛ ملاءمة عالية وتمثل ما نسبته ٠,١٤ % من مساحة المديرية، ملائمة بنسبة 31.72 %، ملاءمة متوسطة وتشكل 62.30 %، وملاءمة ضعيفة وتمثل ٥,٧١ %، أما غير الملاءمة فتمثل ٠,١٣ % (جدول ١٥، وشكل ١٥)، ويظهر أن هناك ست مناطق في المديرية ذات درجة ملاءمة عالية كمواقع لسدود محتملة، وتتركز هذه المناطق في غرب المديرية، وهو الاتجاه الذي تتجه نحوه أوديتها. ودراسة وتحليل مناطق الملاءمة العالية تم اقتراح ثلاثة مواقع أولية في سيلة أوفينة، وادي الذلعة، وشكع (شكل ١٤).

متوسطة، ملاءمة ضعيفة، وغير ملائمة. واتضح أن ١٤,٠ % من إجمالي مساحة مديرية الحصين ذات درجة ملاءمة عالية كمواقع محتملة لبناء السدود، حيث تم اقتراح ثلاثة مواقع أولية فيها (وادي الذحلة، سيلة أوفية، وشكع).

نوصي بالاستفادة من دمج تقنيتي الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية بالتكامل مع عملية التحليل الهرمي في تحقيق أهداف الدراسات الخاصة باختيار المواقع المحتملة لإنشاء السدود، ووضع ترتيب معين للمعايير حسب درجة أهميتها من قبل الخبراء والمختصين والباحثين، وتعميمها على كافة الدراسات المشابهة. ومن الأهمية بمكان استخدام نماذج ارتفاعات رقمية ذات دقة مكانية عالية مثل (LiDAR DEM) لزيادة دقة النتائج.

٦. المراجع:

- [1] A. Noaman, F. A. Al-Nozaily and M. H. Al-Mashreki, "Yemen Water Report," (2021) <https://water.fanack.com/yemen/>. Accessed on 15 Feb. 2024.
- [2] M. Aklan, M. Al-Komaim and C. Fraiture, "Site suitability analysis of indigenous rainwater harvesting systems in arid and data-poor environments: a case study of Sana'a Basin, Yemen," *Environment, Development and Sustainability* **25**, 8319–8342 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02402-7>
- [3] E. S. Abushandi, "Dam site selection using remote sensing techniques and geographical information system to control flood events in Tabuk City," *J. Waste Water Treat. Anal.* **6**, 1–13 (2015). <http://doi.org/10.4172/2157-7587.1000189>
- [4] R. AlJubaely, A. H. Soliman, K.Hamed and A. El-Zawahry, "Dam Site Selection Using GIS-Based AHP-OWA Approach Case Study: El Kebir Shemaly River, Syria," *Journal of Al Azhar University Engineering Sector* **11**(39), 447-457 (2016).
- [5] H. Al-Ghobari and A. Z. Dewidar, "Integrating GIS-Based MCDA Techniques and the SCS-CN Method for Identifying Potential Zones for Rainwater Harvesting in a Semi-Arid Area," *Water* **13**, 704 (2021). <https://doi.org/10.3390/w13050704>
- [6] O. A. Hakeem and S. A. Ouerghi, "Integration of Geographic Information System (GIS) and Analytical Hierarchical Process (AHP) for Dams site selection in Wadi Numan watershed in the Holy City of Mecca," *Arab Journal of Sciences and Research Publishing* **8**(2), 38-66 (2022).

وعدم وجود مصادر للمياه السطحية، فالأمطار والمياه الجوفية هي المصادر الرئيسية للمياه فيها. تتراوح الارتفاعات في المديرية ما بين ١٠٧٦ و ٢٣٨٥ م فوق مستوى سطح البحر، وتتواجد فيها عدة أودية. ما يقارب من ٣٥ % من أراضيها ذات انحدار خفيف لا يتجاوز ٨ درجات. يتراوح المعدل السنوي لهطول الأمطار فيها ما بين ٢٢٧ و ٤٠٤ مم، لذلك فمعظم أراضيها قاحلة. تتكشف في جنوب شرقها صخور القاعدة المعقدة، والمكونة من النيس، الدايوريت، والمجماتيت، كما تتواجد صخور الحجر الرملي والبازلت، بالإضافة إلى رواسب العصر الرباعي. والصدوع التي تقطع هذه الوحدات الصخرية تأخذ اتجاهين رئيسيين؛ شمال غرب وشمال شرق.

تم الجمع بين تقنيتي الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية، بالتكامل مع عملية التحليل الهرمي لتحليل القرار متعدد المعايير. ولقيام بعملية الاختيار الأولي لمواقع سدود محتملة في هذه المديرية تم اختيار سبعة معايير، وتمت عملية اختيار هذه المعايير بناءً على المعايير العامة التي حددتها منظمة الفاو لاختيار مواقع حصاد مياه الأمطار، والمعايير التي حددها مجموعة من الخبراء في هذا المجال والمجالات ذات الصلة، بالإضافة إلى المعايير المستخدمة في الدراسات السابقة -وخاصةً الحديثة- في مناطق مشابهة جغرافياً ومناخياً لبلدنا، حيث تم جمع وفرز وتحليل كل هذه المعايير إحصائياً، ومن ثمَّ اختيار أكثرها شيوعاً واستخداماً، والتي تمثلت في: الانحدار، استخدام الأرض/الغطاء الأرضي، رتبة المجرى المائي، المعدل السنوي للهطول المطري، الوحدات الصخرية، البُعد عن الصدوع، والقرب من الطرق، تم تمثيل بيانات هذه المعايير وعرضها على شكل خرائط رقمية (طبقات) وتحولها لطبقات شبكية، وأُعيدَ تصنيفها بمقياس موحد ومشارك من (١) إلى (٥)، وضُربت المعايير المعاد تصنيفها بأوزانها النسبية والتي تم الحصول عليها من عملية التحليل الهرمي، ثم دُمجت بيانات تلك المعايير لإنتاج خريطة نهائية تمثل درجة الملاءمة المكانية لمواقع السدود المحتملة، وهذه الخريطة مُصنَّفة لخمس فئات؛ ملاءمة عالية، ملاءمة، ملاءمة

- for Rainwater Harvesting," *Hydrology* 7, 51 (2020). <http://doi.org/10.3390/hydrology7030051>
- [18] A. A. Othman, A. F. Al-Maamar, D.A. Al-Manmi, V. Liesenberg, S. E. Hasan, A. K. Obaid and A. M. Al-Quraishi, "GIS-Based Modeling for Selection of Dam Sites in the Kurdistan Region, Iraq," *ISPRS Int. J. Geo Inf.* 9, 244 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijgi9040244>
- [19] R. M. Faisal and M. Abdaki, "Multi-Criteria Analysis for Selecting Suitable Sites of Water Harvesting in Northern Al Tharthar Watershed," *Journal of Sustainability Science and Management* 16(7), 218-236 (2021).
- [20] K. Alkaradaghi, D. Hamamin, H. Karim, N. Al-Ansarim, S. S. Ali, J. Laue and T. Ali, "Geospatial Technique Integrated with MCDM Models for Selecting Potential Sites for Harvesting Rainwater in the Semi-arid Region," *Water Air Soil Pollut.* 233, 313 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05796-2>
- [21] O. Al-Kakey, A. A. Othman, M. Al-Mukhtar and V. Dunger, "Proposing Optimal Locations for Runoff Harvesting and Water Management Structures in the Hami Qeshan Watershed, Iraq," *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 12, 312 (2023). <https://doi.org/10.3390/ijgi12080312>
- [22] F. E. El Ghazali, N. Laftouhi, A. Fekri, G. Randazzo and M. Benkirane, "Enhancing the success of new dams implantation under semi-arid climate, based on a multicriteria analysis approach: Case of Marrakech region (Central Morocco)," *Open Geosciences* 13, 1494–1508 (2021). <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0313>
- [23] M. Aghad, M. Manaouch, M. Sadiki, M. Batchi and J. Al Karkouri, "Identifying Suitable Sites for Rainwater Harvesting Using Runoff Model (SCS-CN), Remote Sensing and GIS Based Fuzzy Analytical Hierarchy Process (Fahp) in Kenitra Province, NW Morocco," *Geographia Technica* 16, 111-127 (2021).
- [24] M. Yasser, K. Jahangir and A. Mohmmad, "Earth Dam Site Selection Using the Analytic Hierarchy Process (AHP): a case study in the west of Iran," *Arabian Journal of Geoscience* 6(9), 3417–3426 (2013).
- [25] A. Jozaghi, B. Alizadeh, M. Hatami, I. Flood, M. Khorrami, N. Khodaei and T. E. Ghasemi, "A Comparative Study of the AHP and TOPSIS Techniques for Dam Site Selection Using GIS: A Case Study of Sistan and Baluchestan Province, Iran," *Geosciences* 8, 494 (2018). <http://doi.org/10.3390/geosciences8120494>
- [26] C. B. Karakuş and S. Yıldız, "GIS-Multi Criteria Decision Analysis-Based Land Suitability Assessment for Dam Site Selection," *International*
- [7] A. A. Alzahrani, "Application of Multi-Criteria Geographic Information System to Determine the Potential of Rainwater Harvesting in the Wadi Al-Hasabah Basin Western Kingdom of Saudi Arabia," *Iraqi Journal of Desert Studies* 13(1), 62-75 (2023). <https://doi.org/10.36531/ijds.2023.139464.1034>
- [8] R. Al-Ruzouq, A. Shanableh, A. G. Yilmaz, A. Idris, S. Mukherjee, M. A. Khalil and M. B. Gibril, "Dam Site Suitability Mapping and Analysis Using an Integrated GIS and Machine Learning Approach," *Water* 11, 1880 (2019). <https://doi.org/10.3390/w11091880>
- [9] T. Ibrahim, "Identify Potential Harvesting Water Sites Using Hierarchical Analysis Method and Geographic Information System," *Al-Baath University Journal* 44(15), 57-82 (2022).
- [10] I. Alrawi, J. Chen, A. A. Othman, S.S. Ali and F. Harash, "Insights of dam site selection for rainwater harvesting using GIS: A case study in the Al-Qalamoun Basin, Syria," *Heliyon* 9 e19795 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19795>
- [11] A.R. Al-shabeeb, "The Use of AHP within GIS in Selecting Potential Sites for Water Harvesting Sites in the Azraq Basin, Jordan," *Journal of Geographic Information System* 8, 73-88 (2016).
- [12] S. Alnawaiseh and M. Alzghoul, "Potential Water Harvesting Sites Selection Using Spatial Multi-Criteria Modeling in Wadi Al Mujib Basin in Southern Jordan," *Arab Universities Union Journal* 19(1), 137-174 (2022). <https://doi.org/10.51405/19.1.6>
- [13] M. A. Burqan, "Using (GIS) in exploiting the running rainwater in the interior parts of the basin of Wadi Gaza - Hebron," *Journal of the Arab American University* 5(2), Article 3. (2019) <https://digitalcommons.aaru.edu.jo/aaup/vol5/iss2/3>
- [14] R. J. El-Kelani and M. A. Burqan, "Preliminary site selection of dams using GIS and Remote Sensing: A case study- harvesting of Daraja watershed, south West Bank, Palestine," *Journal of Geographic Researches* 23 (2020). DOI:10.36328/0833-000-032-008
- [15] A. Adham, M. Riksen, R. Abed, S. Shadeed and C. Ritsema, "Assessing Suitable Techniques for Rainwater Harvesting Using Analytical Hierarchy Process (AHP) Methods and GIS Techniques," *Water* 14, 2110 (2022), <https://doi.org/10.3390/w14132110>
- [16] A. M. Noori, B. Pradhan and Q. M. Ajaj, "Dam site suitability assessment at the Greater Zab River in northern Iraq using remote sensing data and GIS," *J. Hydrol.* 574, 964–979 (2019). <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.001>
- [17] K. Sayl, A. Adham and C. J. Ritsema, "A GIS-Based Multicriteria Analysis in Modeling Optimum Sites



- of Chemoga watershed, Ethiopia," *Applied Water Science* **12**, 69 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01592-9>
- [36] M. M. Zewdie and C. Tesfa, "GIS-based MCDM modeling for suitable dam site identification at Yeda watershed, Ethiopia," *Arabian Journal of Geosciences* **16**, 369 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11409-x>
- [37] C. Chimdessa, Z. Dibaba and G. Dula, "GIS based identification of water harvesting potential area in the Bale lowland of south eastern Ethiopia," *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1-17 (2023). DOI: [10.1080/24749508.2023.2209978](https://doi.org/10.1080/24749508.2023.2209978)
- [38] F. M. Njiru and D. N. Siriba, "Site Selection for an Earth Dam in Mbeere North, Embu County, Kenya," *Journal of Geoscience and Environment Protection* **6**(7), 113-133 (2018). <https://doi.org/10.4236/gep.2018.67009>
- [39] A. A. Ali, E. N. Nyanchaga and F. N. Gichuki, "Identification of Suitable Dam Site Location and Reservoir Characteristics; A Case Study of Nanyuki River in the Upper Ewaso N'giro Basin," *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology* **8**(5), 476-493 (2021).
- [40] A. Umugwaneza, X. Chen, T. Liu, R. Mind'je, A. Uwineza, P.M. Kayumba, S. Uwamahoro, J. Umuhiza, A. Gasirabo and A.P. Maniraho, "Integrating a GIS-Based Approach and a SWAT Model to Identify Potential Suitable Sites for Rainwater Harvesting in Rwanda," *AQUA Water Infrast. Ecosyst. Soc.* **71**, 415-432 (2022). <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.111>
- [41] S. R. Vazquez and N. Mokrova, "AHP-TOPSIS hybrid decision support system for dam site selection," *Magazine of Civil Engineering* **114**(6). Article No. 11405 (2022). DOI: [10.34910/MCE.114.5](https://doi.org/10.34910/MCE.114.5)
- [42] V. Azizi and B. Idrizi, "Weighing Factors in an Analytical Hierarchy Process (AHP) for Determining Potential Location for Dam Construction in Pograxhë in Kosovo," *Geo-SEE Institute*, 30-44 (2020).
- [43] P. Preeti, Y. Shendryk and A. Rahman, "Identification of Suitable Sites Using GIS for Rainwater Harvesting Structures to Meet Irrigation Demand," *Water* **14**, 3480 (2022). <https://doi.org/10.3390/w14213480>
- [44] T. H. Choo, S. H. Ahn, D. U. Yang and G. S. Yun, "A Study on the Estimating Dam Suitable Site based on Geographic Information using AHP," 6th International Conference on Developments in Engineering and Technology. Bangkok (Thailand), Feb. 6-7. 50-56 (2017). <https://doi.org/10.17758/EIRAI.DIR0217032>
- [45] FAO. Land and Water Digital Media Series, 26. Training course on RWH (CD-ROM), in: Planning of *Journal of Environmental Science and Technology* **19**, 12561-12580 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04323-4>
- [27] I. Ahmad and M. K. Verma, "Application of Analytic Hierarchy Process in Water Resources Planning: A GIS Based Approach in the Identification of Suitable Site for Water Storage," *Water Resour. Manag.* **32**, 5093-5114 (2018). <http://doi.org/10.1007/s11269-018-2135-x>
- [28] N. L. Rane, A. Achari, S. P. Choudhary, S. K. Mallick, C. B. Pande, A. Srivastava and K. N. Moharir, "A decision framework for potential dam site selection using GIS, MIF and TOPSIS in Ulhas river basin, India," *Journal of Cleaner Production* **423** (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138890>
- [29] Z. Ateeq, M. Arslan, Z. Baig, A. Ahmad, M. U. Tanveer, A. Akhtar, A. Sohail, K. Naeem and S.A. Mahmood, "Dam Site Identification Using Remote Sensing and GIS (A case study Diamer Basha Dam Site)," *International Journal of Innovations in Science and Technology* **1**(4), 168-178 (2019). <https://doi.org/10.33411/IJIST/2019010412>
- [30] Z. Shao, Z. Jahangir, Q.M. Yasir, Atta-ur-Rahman, S. Mahmood, "Identification of Potential Sites for a Multi-Purpose Dam Using a Dam Suitability Stream Model," *Water* **12**, 3249 (2020). doi:10.3390/w12113249
- [31] X. Dai, "Dam Site Selection Using an Integrated Method of AHP and GIS for Decision Making Support in Bortala, Northwest China," M. Sc. Thesis. Lund University, Lund, Sweden, 58p (2016).
- [32] T. F. Ajibade, N. A. Nwogwu, F. O. Ajibade, B. Adelodun, T. E. Idowu, A. O. Ojo, J. O. Iji, O. O. Olajire and O. K. Akinmusere, "Potential Dam Sites Selection Using Integrated Techniques of Remote Sensing and GIS in Imo State, Southeastern, Nigeria," *Sustainable Water Resources Management* **6**, 57 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00416-5>
- [33] I. Ahuchaogu, R. E. Daffi, I. M. Ahor and E. S. Umoh, "Identification of Potential Sites for Rainwater Harvesting Structures in Akwa Ibom State, Nigeria: RS and GIS Approach," *Covenant Journal of Engineering Technology* **7**, 2 (2023).
- [34] E. S. Yegizaw, M.A. Ejegu, A. T. Tolossa, A. H. Teka, T. G. Andualem, M. A. Tegegne, W. M. Walle, S. E. Shibeshie and T. M. Dirar, "Geospatial and AHP Approach Rainwater Harvesting Site Identification in Drought-Prone Areas, South Gonder Zone, Northwest Ethiopia," *J. Indian Soc. Remote Sens.* **50**, 1321-1331 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01528-5>
- [35] Y. G. Hagos, T. G. Andualem, M. A. Mengie, W. T. Ayele and D. A. Malede, "Suitable Dam Site Identification Using GIS-based MCDA: a case study

- [62] C. Nellesmann and P.E. Reynolds, "Predicting Late Winter Distribution of Muskoxen Using an Index of Terrain Ruggedness," *Arct. Alp. Res.* **29**, 334 (1997). <https://doi.org/10.2307/1552148>
- [63] K.S. Balkhair and K. Ur Rahman, "Development and assessment of rainwater harvesting suitability map using analytical hierarchy process, GIS and RS techniques," *Geocarto Int.* **36**, 421–448 (2021).
- [64] H. Q. Hashim and K. N. Sayl, "Detection of suitable sites for rainwater harvesting planning in an arid region using geographic information system," *Appl. Geomatics.* **13**, 235–248 (2021).
- [65] K. N. Sayl, N. S. Muhammad and A. El-Shafie, "Identification of potential sites for runoff water harvesting," in: *Proc. Inst. Civ. Eng. Manag.*, Thomas Telford Ltd, pp. 135–148 (2019).
- [66] A. Adham, K. N. Sayl, R. Abed, M. A. Abdeladhim, J. G. Wesseling, M. Riksen, L. Fleskens, U. Karim and C.J. Ritsema, "A GIS-based approach for identifying potential sites for harvesting rainwater in the Western Desert of Iraq," *Int. Soil Water Conserv. Res.* **6**(4), 297–304 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.07.003>
- [67] I. A. Alwan, N. A. Aziz and M. N. Hamoodi, "Potential water harvesting sites identification using spatial multi-criteria evaluation in Maysan Province, Iraq," *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* **9**, 235 (2020).
- [68] R. Al-Adamat, "GIS as a decision support system for siting water harvesting ponds in the Basalt Aquifer/NE Jordan," *J. Environ. Assess. Pol. Manag.* **10**, 189–206 (2018).
- [69] M. E. Emiroglu, "Influences on selection of the type of dam," *Int. J. Sci. Technol.* **3**, 173–189 (2008).
- [70] G. R. Lashkaripour and M. Ghafoori, "The engineering geology of the Tabarak Abad Dam," *Eng. Geol.* **66**, 233–239 (2022). [http://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00044-3](http://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00044-3)
- [71] N. K. Ghazal and S. R. Salman, "Determining the Optimum Site of Small Dams Using Remote Sensing Techniques and GIS," *Int. J. Sci. Eng. Res.* **3**, 69–73 (2015).
- [72] A. S. Toosi, E. G. Tousi, S. A. Ghassemi, A. Cheshomi and S. Alaghmand, "A multi-criteria decision analysis approach towards efficient rainwater harvesting," *J. Hydrol.* **582**, 124501 (2020).
- [73] T. L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process Planning, Priority Setting, Resource Allocation," McGraw Hill, New York (1980).
- [74] T. L. Saaty, "Decision Making with the Analytic Hierarchy Process," *International Journal of Services Sciences* **1**, 83-98 (2008). <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- [75] Ad Dāli' D-38-78. Geological Map of Hablayn. GEODÉZIE, Czechoslovakia, Scale 1:100000 (1988)
- water harvesting schemes, Unit 22, food and agriculture organization Rome, Italy (2003).
- [46] J. M. Kahinda, E. S. Lillie, A. E. Taigbenu, M. Taute and R. J. Boroto, "Developing suitability maps for rainwater harvesting in South Africa," *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* **33**, 788–799 (2008).
- [47] A. Ammar, M. Riksen, M. Ouessar and C. Ritsema, "Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: A review," *Int. Soil Water Conserv. Res.* **4**, 108–120 (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.03.001>
- [48] Social Fund Development (SFD)
- [49] Yemeni Remote Sensing and Geographic Information System Center (YRSGISC), <https://yrsgisc.gov.ye/>
- [50] Yemen Geological Survey and Mineral Resources Board, YGSMRB
- [51] National Water Resources Authority (NWRA), <http://www.nwrayemen.org/>
- [52] Environmental Systems Research Institute (ESRI)
- [53] United States Geological Survey (USGS), <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [54] International Seismological Center (ISC), <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue>
- [55] T. L. Saaty, "A scaling method for priorities in hierarchical structures," *J. Math. Psychol.* **15** (3), 234–281 (1977). [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
- [56] T. L. Saaty, "What is the analytic hierarchy process? In: *Mathematical Models for Decision Support*. Springer, Berlin, Heidelberg, 109–121 (1988). https://doi.org/10.1007/978-3-642-83555-1_5.
- [57] R. Banai-Kashani, "A new method for site suitability analysis: The analytic hierarchy process," *Environ. Manag.* **13**, 685–693 (1989). <http://doi.org/10.1007/BF01868308>
- [58] A. K. Kadam, S. S. Kale, N. N. Pande, N. J. Pawar and R. N. Sankhua, "Identifying potential rainwater harvesting sites of a semi-arid, basaltic region of western India, using SCS-CN method," *Water Resour. Manag.* **26**, 262537–2554 (2012). <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0031-3>.
- [59] R. Agarwal, P. K. Garg and R. D. Garg, "Remote sensing and GIS based approach for identification of artificial recharge sites," *Water Resour. Manag.* **27**, 2671–2689 (2013).
- [60] I. A. Alwan, N. A. Aziz and M. N. Hamoodi, "Potential water harvesting sites identification using spatial multi-criteria evaluation in Maysan Province, Iraq," *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* **9**, 235 (2020).
- [61] H. Karimi and H. Zeinivand, "Integrating runoff map of a spatially distributed model and thematic layers for identifying potential rainwater harvesting suitability sites using GIS techniques," *Geocarto Int.* **36**, 320–339 (2021).