ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

تقييم كفاءة بحيرة سد دهوك واثره على الاستدامة البيئية باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي

Evaluation of the Efficiency of Duhok Dam Lake and Its Impact on Environmental Sustainability Using AI Techniques

د. نهرين حسن عبود، الجامعة العراقية، العراق، nahrain.al-saadi@aliraqia.edu.iq

تاريخ استلام البحث: 16 / 7 / 2025 تاريخ قبول البحث: 10 / 9 / 2025

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

الملخص:

يهدف هذا البحث إلى تقييم الكفاءة التخزينية والاستدامة البيئية لبحيرة سد دهوك في بيئة جبلية شبه جافة شمال العراق، اعتمدت الدراسة تكاملية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد ونموذجي RUSLEو SDR لتقدير الفقد الرسوبي وحساب الميزانية المائية الشهرية للمدة 1981–2024 جرى تحليل بيانات NASA-POWERالمناخية، وخرائط FAOللتربة، وصور Landsat-8 OLI (2025)، ونموذج الارتفاع الرقمي SRTM-DEMبدقة 30م لدراسة التفاعلات الهيدرولوجية والجيومورفولوجية للحوض، أظهرت النتائج أن مساحة الحوض تبلغ 134.4كم² بانحدارات تتجاوز 60% في 97% من المساحة، ما يجعله عالي القابلية للتعرية، بلغ معدل الفقد الرسوبي السنوي نحو 42 طن/هكتار/سنة، فيما بلغت الحمولة الفعلية الواصلة إلى البحيرة 0.18–0.20 مليون م³/سنة أي ما يعادل 0.4% من السعة التصميمية (52 مليون م³)، مع فقدٍ تخزيني سنوي يقارب 1.2% وأظهرت الميزانية المائية الشهرية فائضاً مائياً بحدود 3.5 مليون م³/شهر خلال الفترة الرطبة (كانون الثاني،نيسان)، مقابل عجز يقارب 1.0 مليون م³/شهر في الصيف (حزيران،أيلول)، نتيجة فاقد بالتبخر بلغ 32% من الوارد السنوي، وتشير النتائج إلى أن بحيرة سد دهوك تفقد تدريجياً كفاءتها التخزينية والبيئية بفعل الترسيب والتبخر، مما يستدعي إعادة تأهيل الغطاء النباتي، وتطبيق ممارسات حفظ التربة(P<0.6) وتبين أن كل انخفاض بنسبة 1% في الخزن الفعلي يؤدي إلى تدهور نوعية المياه بنسبة 2–3%، مما يجعل الكفاءة التخزينية مؤشراً أساسياً على الاستدامة البيئية للخزانات الجبلية في البيئات الجافة.

الكلمات المفتاحية: نموذجRUSLE–SDR ؛ الفقد الرسوبي؛ الميزانية المائية؛ الاستدامة البيئية.

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

Abstract:

This study evaluates the storage efficiency and environmental sustainability of the Duhok Dam reservoir in a semi-arid mountainous basin of northern Iraq. An integrated GIS and remote sensing approach combined with RUSLE–SDR models was employed to quantify soil erosion, sediment yield, and monthly water balance for the period 1981–2024. Datasets from NASA-POWER, FAO soil maps, Landsat-8 OLI (2025), and SRTM-DEM (30 m) were analyzed to determine hydrological–geomorphological interactions.

The results indicate that the watershed extends over 134.4 km² with slopes exceeding 60% across 97% of its area, reflecting high erosion susceptibility. The average annual soil loss was estimated at 42 tons ha^{-1} yr^{-1}, while the actual sediment yield reaching the reservoir reached 0.18–0.20 million m^3 yr^{-1}—equivalent to 0.4% of the design capacity (52 million m^3)—causing an annual storage reduction of about 1.2%. The seasonal water balance revealed a surplus of 3.5 million m^3 $month^{-1}$ during the wet season (January–April) and a deficit of 1.0 million m^3 $month^{-1}$ during the dry season (June–September), with evaporation losses reaching 32% of total inflows.

Findings confirm that Duhok Reservoir is gradually losing its functional and ecological capacity due to sedimentation and excessive evaporation. Sustainable management should focus on vegetation restoration, soil-conservation measures ($P < 0.6$), and dynamic water-level regulation. Each 1% reduction in active storage corresponds to a 2–3% deterioration in water quality, making storage efficiency a critical indicator of reservoir sustainability in arid mountain regions.

Key words : *RUSLE–SDR model; Sediment yield; Water balance; Environmental sustainability*

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

أولا : المقدمة

تُعدّ بحيرة سد دهوك واحدةً من أهم الموارد المائية في إقليم كردستان العراق، إذ شُيّد السد عام 1987 عند مخرج الحوض الرئيس ليخدم أغراض الشرب والزراعة والري ضمن سهل سميل، ويقع الحوض في نطاق المنطقة الجبلية العالية التابعة لسلسلة زاكروس، ويتميز ببنيةٍ تركيبيةٍ معقدة تتكون من طياتٍ محدبةٍ ومقعّرةٍ متعاقبةٍ وصخورٍ تعود إلى العصور الكريتاسية والجيوراسية، لاسيما تكوينات شيرانش، قمچوقا، آقانا وبيلاسبي، التي تتألف بشكل رئيسي من الحجر الجيري والدولومايت والمارل، وهي صخورٌ شديدة التأثر بعمليات الكارست والانهيارات الأرضية(Buday & Jassim, 1987; Aziz, 2002) ، وقد أسهمت هذه الخصائص الجيولوجية في تكوين تضاريس وعرة ذات قمم حادة ومنحدرات شديدة الميل، انعكست بوضوح على خصائص الجريان السطحي وزيادة قابلية التعرية في المنطقة، مما جعل الحوض بيئة نشطة جيومورفولوجياً.

ويمتد الحوض طبوغرافيا على مساحةٍ تقارب 134.4 كم²، ويتراوح ارتفاعه من أقل من 600 م عند مناطق البحيرة إلى أكثر من 2500 م في قمم الجبال، وتُظهر شبكة التصريف نمطًا شجريًا متفرعًا، وقد أوضحت الدراسات المورفومترية أن الحوض يميل إلى الشكل المستطيل أو الممدود، ويتمتع بكثافة تصريفية منخفضة تبلغ نحو (0.47 كم/كم²)، مما يدل على أن الشبكة المائية غير مكتملة التطور، وأن الجريان السطحي متوسط الشدة مع سعةٍ زمنيةٍ أطول لتركيز الجريان(Hassan, 2001; Barzinji, 2003) ، وهو ما يعكس تأثير التضرس والانحدارات في التحكم بسرعة الجريان وتوزيع المياه داخل الحوض.

أما الترب السائدة فهي فقيرة ورقيقة التكوين على السفوح، إذ تنتشر ترب الانتيسول قليلة التطور، بينما تتركز الأتربة الأعمق نسبيًا في قيعان الوديان الصغيرة وتُستغل في الزراعة المحدودة(Buringh, 1960) ، وتُظهر هذه الترب محتوى عالٍ من الغرين يصل إلى نحو (62%)، مما يجعلها سهلة الانفصال والانجراف مع مياه الأمطار، وهذا ما يفسر شدة التعرية المائية المنتشرة في المنطقة (Karim et al., 1998; Nikolov, 1983).

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

من حيث الانحدار، فإن أكثر من (97%) من مساحة الحوض تتجاوز ميولها (60%)، ما يجعل المنطقة عرضةً لحركاتٍ انزلاقيةٍ وانسيابيةٍ لمواد السطح تحت تأثير الجاذبية، فضلًا عن أن شدة الانحدار تُسرّع من سرعة الجريان وتضاعف خطر الانجرافات وتآكل التربة (McCool et al., 1987; Brhane & Mekonen, 2009)، وهو ما يرفع من معدلات الفقد الرسوبي داخل المنحدرات المتصلة بالبحيرة.

أما المناخ السائد فهو من النمط المتوسطي شبه الجاف، يتميز بفصلٍ رطب يمتد من أيلول حتى نيسان وفصلٍ جاف طويل يستمر من ستة إلى سبعة أشهر، ويبلغ معدل الأمطار السنوي نحو (560 ملم)، تتركز أغلبها في فصل الربيع على شكل عواصف مطرية قصيرة وعالية الشدة، في حين يفوق معدل التبخر السنوي كميات الأمطار المتساقطة بوضوح، إذ يبلغ متوسط درجة الحرارة السنوي (19.4°م)، مع صيفٍ حار تصل حرارته في تموز إلى (32.8°م) وشتاءٍ بارد تنخفض حرارته في كانون الثاني إلى نحو (5°م)، وتُظهر البيانات المناخية تباينًا واضحًا في شدة الهطول وارتفاع معدلات التبخر، مما يؤدي إلى تفاوتٍ مكاني وزماني في كفاءة الجريان السطحي وتغذية الخزان.(Critchfield, 1974; Aziz, 2002)

إن تضافر العوامل الجيولوجية المعقدة والطبوغرافية الوعرة والانحدارات الشديدة وهشاشة الترب والظروف المناخية المتقلبة يجعل حوض سد دهوك بيئة ديناميكية شديدة الحساسية تجاه التغيرات الطبيعية والبشرية، ويُسهم ذلك في تسارع معدلات التعرية وزيادة الترسيب في الخزان، الأمر الذي يُهدد كفاءته التخزينية ويؤثر سلبًا في استدامة خدماته المائية والبيئية، لذا تبرز أهمية تقييم كفاءة بحيرة سد دهوك ضمن إطارٍ علمي يعتمد التحليل المكاني والزماني لتحديد العوامل الأكثر تأثيرًا في أدائها الهيدرولوجي والبيئي، وتقديم مؤشراتٍ كميةٍ يمكن الاستناد إليها في تطوير استراتيجيات إدارةٍ مستدامةٍ تُسهم في الحفاظ على موارد المياه، وإطالة العمر التشغيلي للخزان، وضمان استمرارية خدماته الاقتصادية والبيئية في ظل ظروفٍ مناخيةٍ متغيرة ومتزايدة التحدي.

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

1. المشكلة:

تعاني بحيرة سد دهوك خلال المدة (1981–2024) من تزايد الضغوط الطبيعية والبشرية، أبرزها الانحدارات الشديدة التي تغطي أكثر من 60% من مساحة الحوض، وهشاشة الترب الفقيرة بالمواد العضوية، والتعرية المائية الناتجة عن تذبذب الأمطار وارتفاع معدلات التبخر، أدى ذلك إلى تراكم الطمى في قاع الخزان وتراجع سعته التخزينية بما يهدد كفاءته التشغيلية واستدامته البيئية، الأمر الذي يستدعي تقييماً علمياً دقيقاً للعوامل المؤثرة واقتراح حلول إدارة متكاملة للحد من التدهور المستقبلي.

2. **الفرضية:**

تفترض الدراسة أن كفاءة بحيرة سد دهوك تتأثر بدرجة معنوية بالعوامل الجيولوجية والطبوغرافية والمناخية، اذ تؤدي الانحدارات الشديدة وهشاشة الترب وتذبذب الأمطار وارتفاع معدلات التبخر إلى زيادة معدلات الترسيب داخل الخزان وفقدان جزء من سعته التخزينية السنوية، مما يعكس انخفاضًا تدريجيًا في كفاءته التشغيلية واستدامته البيئية.

3. الأهمية:

تكمن أهمية هذا البحث في كونه يُقدِّم تقييماً علمياً متكاملاً لكفاءة بحيرة سد دهوك بوصفها مورداً مائياً استراتيجياً لتأمين مياه الشرب والري في المنطقة. كما يُسهم في توضيح أثر التعرية والترسيب في استدامة الخزان وكفاءته التخزينية، ويقدّم إطاراً عملياً لإدارة الموارد المائية على نحوٍ مستدام، بما يحدّ من المخاطر البيئية المحتملة في المستقبل.

4. الأهداف:

- تقييم كفاءة بحيرة سد دهوك في تلبية الاحتياجات المائية والبيئية.
- تحليل الخصائص الجيولوجية والطبوغرافية وأثرها في عمليات التعرية والترسيب.
- تقدير حجم الفاقد التخزيني للخزان الناتج عن تراكم الرسوبيات.
- تحديد تأثير العوامل المناخية وخصائص التربة في كفاءة السد.
- اقتراح استراتيجيات للإدارة المستدامة تضمن الحفاظ على السعة التخزينية واستمرارية الخدمات البيئية للخزان.

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

5. المنهج العلمي

يعتمد البحث على المنهج التحليلي التطبيقي القائم على الدمج بين الدراسة الميدانية والتحليل المكاني والزماني باستخدام التقنيات الحديثة.

6. مناقشة الدراسات السابقة

أظهرت الدراسات السابقة، سواء على المستوى المحلي أو الإقليمي أو العالمي، اهتمامًا واسعًا بتقدير معدلات التعرية المائية وفقد التربة باستخدام نماذج USLEو RUSLE ومشتقاتها ، فقد ركزت الدراسات العراقية وآخرون،(Hassan؛1998 ، Barzinji 2001 ، Karim2003)على الخصائص المورفومترية للأحواض الجبلية في شمال العراق، وبينت أثر الانحدارات الحادة وضعف الترب (Entisols, Rendzolls, Chromoxererts) في تسريع الفقد الرسوبي، كما وفرت دراسات أخرى مثل(Nikolov,1983) خرائط تقدير عامل المطر (R) على مستوى العراق، أما الدراسات العربية في الأردن وسوريا والجزائر (السمري، 2011؛ الزيادي، 2015؛ حمدان، 2018) فقد طبقت تقنيات GIS مع RUSLE وأكدت أن التعرية تتضاعف في المنحدرات ضعيفة الغطاء النباتي، بينما بينت دراسات أخرى (الخطاب، 2020) أهمية استخدام نموذج MUSLEلزيادة دقة التقدير خلال العواصف المطرية، وفي المقابل ركزت الدراسات الأجنبية(Wischmeier & Smith2003، Renard 1978 وآخرون، Panagos 1997 وآخرون) على تطوير النماذج النظرية وتطبيقها على نطاقات عالمية، وأكدت أن البيئات الجبلية المتوسطية وشبه الجافة هي الأكثر عرضة للتعرية السريعة وفقد التربة.

ورغم هذه الجهود، فإن معظم الدراسات السابقة اتسمت إما بالطابع العام (على مستوى وطني/إقليمي) أو ركزت على أحواض أخرى غير بحيرة سد دهوك، كما أن القليل منها دمج بين الدراسة المكانية (GIS/RS) والتحليل المناخي طويل المدى مع التركيز على الأثر المباشر على السعة التخزينية للخزانات.

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

ان ما تتميز به هذه الدراسة هو دمج المعطيات المناخية الحديثة (1981–2024) مع تحليل الغطاء الأرضي الحالي من بيانات Landsat 2025 ومعاملات R, K, LS, C, P داخل بيئة GIS لتقدير فقد التربة والترسيب في حوض سد دهوك بدقة مكانية وزمانية، اما الإضافة الجديد في هذه الدراسة يتمثل في:

1. استخدام بيانات ميدانية وأقمار صناعية حديثة لإنتاج خرائط تفصيلية لعوامل نموذج RUSLE
2. التركيز على الجانب التطبيقي لإدارة الاستدامة البيئية للخزان، وليس مجرد تقدير الفقد على مستوى الحوض.
3. توفير قاعدة علمية محلية يمكن الاستناد إليها في السياسات المائية لإطالة العمر التشغيلي للسد.

وبذلك، فإن الدراسة الحالية لا تكتفي بمحاكاة النتائج السابقة، وإنما تقدم مقاربة تكاملية تربط بين التحليل المناخي والطبوغرافي والبيئي لإعطاء صورة دقيقة عن ديناميكية التعرية والترسيب في بحيرة سد دهوك.

ثانيا: المنهجية العلمية.

1. بيانات الدراسة، اعتمد البحث على مجموعة متنوعة من البيانات المكانية والزمنية:

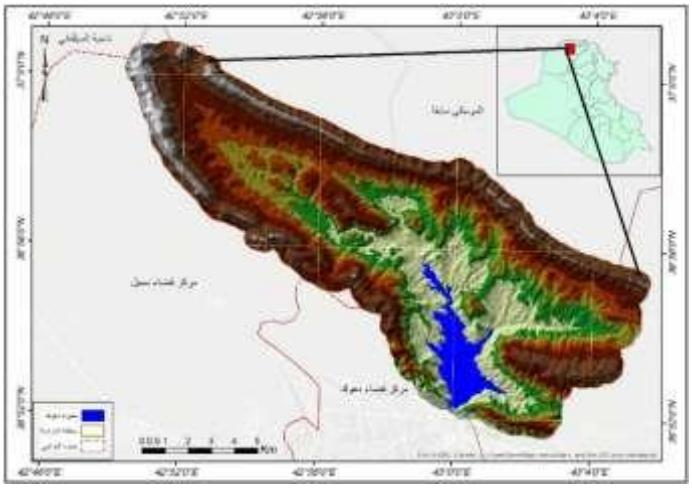
- البيانات المناخية :بيانات الأمطار ودرجة الحرارة والبخر–نتح للفترة (1981–2024) من قاعدة بيانات NASA POWER فضلا عن سجلات محطات الأرصاد القريبة من دهوك، استخدمت هذه البيانات لحساب عامل المطر (R) السنوي والموسمي.
- البيانات الطبوغرافية :نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) بدقة 30 م من بعثة SRTM، جرى معالجته في بيئة GIS لاستخراج الانحدار وشبكة التصريف وحدود الحوض.
- البيانات الأرضية :طبقة التربة الهيدرولوجية (Soil Map) بصيغة Shapefile استُخدمت لتوليد عامل قابلية التربة للتعرية (K) وفق تصنيف FAO.
- بيانات الغطاء الأرضي :صور Landsat 8 OLI(23 حزيران 2025) التي جرى تصحيحها وتصنيفها باستخدام مؤشرات الطيف(NDVI, NDWI, NDBI) ، لإنتاج خريطة الغطاء الأرضي الحديثة وتقدير معامل الغطاء والإدارة.(C) .

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

2. موقع منطقة الدراسة.

تقع منطقة الدراسة في محافظة دهوك ضمن إقليم كردستان العراق، على بعد نحو (2 كم) شمال مدينة دهوك، إداريًا، تتبع المنطقة لوحدات إدارية محلية تابعة لقضاء دهوك، وتُعدّ البحيرة والخزان مصدرًا استراتيجياً لتوفير مياه الشرب والري لسهل سميل والمناطق الزراعية المجاورة، ينظر الحريطة (1) .

خريطة (1) موقع منطقة الدراسة من العراق



المصدر :اعتمادًا على نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) لمنطقة الدراسة استخدام أداة ArcGIS 10.7.

أما فلكياً، فإن الحوض يقع بين دوائر العرض (11 ′87 36 °− ″15 ′01 37°) شمالاً، وبين خطوط الطول(55 ′84 °42 – 10 ′06 °43) شرقاً، بمساحة إجمالية تقارب 134.37كم²، يحد المنطقة من الشمال ومن الجنوب جبل دهوك ومن الشرق والشمال الشرقي ناحية زاويتا ومن الغرب جبل بيخَير (Aziz, 2002).

3. معالجة البيانات(Data Processing)

تمت جميع المعالجات باستخدام برمجيات ArcGIS 10.7، وفق المراحل الآتية:

أ- **استخراج حدود الحوض** :جرى قص DEM باستخدام أداة *RasterToPolygon* للحصول على حدود حوض سد دهوك بمساحة تقارب (134.4 كم²).

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

ب- **القياسات المورفومترية:** يتم اشتقاق الخصائص المورفومترية للحوض المائي عبر خطوات متكاملة تبدأ بجمع البيانات الطبوغرافية) خرائط كنتورية أو نماذج الارتفاع الرقمي(DEM ، ثم تحديد حدود الحوض وشبكة التصريف باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، بعد ذلك تُحسب مؤشرات الشكل مثل معامل الاستطالة والاستدارة، فضلا عن قياسات الشبكة النهرية كالرتب والكثافة والطول والتفرع، كما تُشتق الخصائص التضاريسية كقيم الانحدار والارتفاع وعاملLS، ليُصار في النهاية إلى تحليل هذه النتائج كما في الجدول (1)، وربطها بالعمليات الهيدرولوجية والجيومورفولوجية لفهم ديناميكية الحوض.

الجدول :(1) المعايير المورفومترية الرئيسة لحوض سد دهوك

المعيار المورفومتري	المعادلة	القيمة التقديرية لحوض سد دهوك	المصدر
المساحة الكلية للحوض (Basin Area)	A = Σمساحة الحوض	134.4	Hassan (2001); Barzinji (2003)
محيط الحوض (Basin Perimeter)	P = طول محيط الحوض	53	Chow (1964)
معامل الشكل(Form Factor)	$Ff = A / Lb^2$	0.35	Chow (1964)
معامل الاستدارة (Circularity Ratio)	$Rc = 4\pi A / P^2$	0.60	Miller (1953)
معامل الاستطالة (Elongation Ratio)	$Re = (2 * \sqrt{(A/\pi)}) / Lb$	0.67	Schumm (1956)
الكثافة التصريفية (Drainage Density)	Dd = ΣL / A	0.47	Horton (1945); Hassan (2001)

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

المعيار المورفومتري	المعادلة	القيمة التقديرية لحوض سد دهوك	المصدر
التكرار النهري (Stream Frequency)	Fs = ΣNu / A	2.5	Horton (1945)
معامل الطول إلى العرض (Aspect Ratio)	Ra = Lb / W	2.85	Strahler (1964)
طول الحوض الرئيس (Basin Length)	Lb = √A	20	Horton (1945)
طول مجرى النهر الرئيس (Main Stream Length)	Lms = مجموع أطوال المجاري الرئيسة	22	Horton (1945)
النسبة الطولية للمجرى (Stream Length Ratio)	Rl = Lsm / Lsm-1	1.5	Strahler (1964)
النسبة الطولية بين الروافد (Bifurcation Ratio)	Rb = Nu / Nu+1	3.2	Strahler (1964)
الترتيب النهري (Stream Order – تصنيف Strahler)	حسب تصنيف Strahler	5	Strahler (1957)
أقصى ارتفاع وأدنى ارتفاع (Max & Min Elev.)	Zmax , Zmin	2500 – 600	Aziz (2002); Hassan (2001)
الفرق التضاريسي (Relief)	H = Zmax – Zmin	1900	Strahler (1952)
معامل التضرس (Ruggedness Number, Rn)	Rn = (Relief × Drainage Density) / 1000	0.89	Strahler (1952); Horton (1945)

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

المعيار المورفومتري	المعادلة	القيمة التقديرية لحوض سد دهوك	المصدر
كثافة التضرس (Relief Ratio, Rr)	Rr = H / Lb	0.095	Schumm (1956)
معدل الانحدار العام للحوض (Average Slope)	S = (Σ tan θ / n) × 100	60%> على 97% من المساحة	McCool et al. (1987)

المصدر: بالاعتماد على بيانات الحوض.

ويلاحظ ان حوض سد دهوك يتميز بشكل طولي ذو انحدارات شديدة وتباين تضاريسي كبير مما يجعله معرضًا للتعرية والانجرافات، لكنه في الوقت نفسه يوزع الجريان على مدد زمنية أطول مما يقلل من ذروة الفيضانات، لذا فأن القيم المورفومترية تشير إلى حوض غير متوازن بين الاستجابة السريعة للأمطار وبين طول مسافة الجريان، ما يستوجب إجراءات وقائية للحد من الانجراف والترسيب في البحيرة، والجدول اعلاه يشير الى المعايير المورفومترية الرئيسة لحوض سد دهوك وكالاتي:

- المساحة الكلية للحوض (134.4) كم²، تشير إلى حجم المساحة التي تستجمع مياه الأمطار، ومساحة متوسطة بالنسبة لأحواض المنطقة الجبلية(Barzinji, 2003؛ Hassan, 2001) ، مما يعكس قدرة الحوض على جمع مياه كافية لتغذية البحيرة مع بقاءه عرضة للتذبذب المطري.
- محيط الحوض (53) كم، يمثل الحدود الطبوغرافية الخارجية للحوض. قيمته متوسطة وتدل على أن الحوض ليس دائريًا تمامًا بل يميل للشكل المستطيل(Chow, 1964)
- معامل الشكل (0.35) ، القيمة المنخفضة (0.5>) تشير إلى حوض ممدود الشكل، مما يطيل زمن التركيز ويخفف من شدة الفيضانات المفاجئة.(Chow, 1964)
- معامل الاستدارة (0.60)، هذه القيمة متوسطة، أي أن الحوض ليس دائريًا (1) ولا مستطيلًا جدًا (0.5>) هذا يعكس اعتدالًا في الاستجابة الهيدرولوجية للأمطار.(Miller, 1953)
- معامل الاستطالة(0.67) ، أقل من الواحد الصحيح، ما يؤكد مظهر الحوض الممدود نسبيًا وتأثيره في إطالة زمن الجريان وتخفيف ذروة الفيضانات.(Schumm, 1956)

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

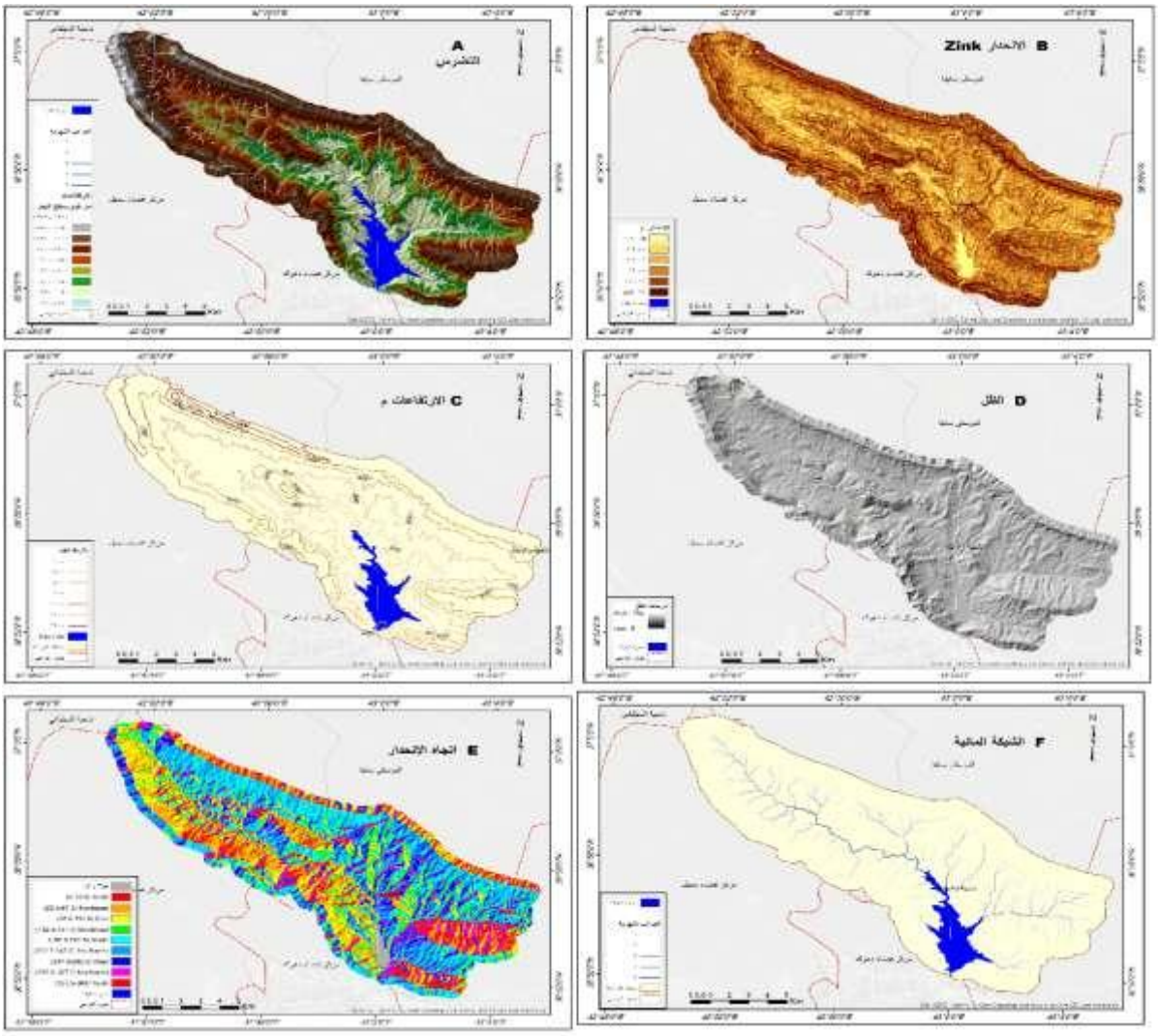
- الكثافة التصريفية (0.47) كم/كم²، قيمة منخفضة مقارنة بالمعيار 1< كم/كم² للأحواض شديدة التصريف، ما يعكس نفاذية التربة والصخور الكارستية ويقلل من سرعة الجريان السطحي (Horton, 1945 Hassan, 2001).
- التكرار النهري 2.5 نهر/كم² يدل على وجود شبكة نهرية متوسطة الكثافة، ارتفاع القيمة نسبيًا مقارنة بالكثافة التصريفية يدل على أن المجاري موجودة لكنها قصيرة ومتقطعة.(Horton, 1945)
- معامل الطول إلى العرض(2.85) ارتفاع هذه القيمة يؤكد الشكل الطولي للحوض مما يقلل من احتمالية الفيضانات المفاجئة لكنه يزيد من فقد المياه بالتبخر خلال مسافة الجريان.(Strahler, 1964)
- طول الحوض الرئيس 20 كم يعكس الامتداد الطولي العام للحوض، ويؤثر مباشرة على زمن التركيز (Horton, 1945).
- طول مجرى النهر الرئيس 22كم يطابق تقريبًا طول الحوض، ما يدل على سيطرة مجرى رئيسي واحد على التصريف.(Horton, 1945)
- النسبة الطولية للمجرى(1.5) ارتفاع القيمة يشير إلى أن المجرى يكتسب امتدادًا متزايدًا مع تقدم الرتبة، ما يعكس التطور النشط للشبكة النهرية.(Strahler, 1964)
- النسبة الطولية بين الروافد(3.2) تقع ضمن الحدود الطبيعية (3–5)، ما يشير إلى نظام تصريف طبيعي غير متأثر بشكل كبير بالبنى التكتونية.(Strahler, 1964)
- الترتيب النهري(5) حسب تصنيفStrahler ، الحوض ذو شبكة متقدمة نسبيًا من الروافد، ما يعكس تنوع التضاريس وقدرة الحوض على تصريف كميات كبيرة من المياه.(Strahler, 1957)
- أقصى وأدنى ارتفاع 2500 م 600 م الفرق الكبير يعكس طبيعة الحوض الجبلية الوعرة (Aziz, 2002 Hassan, 2001).
- الفرق التضاريسي 1900 م قيمة عالية جدًا تؤكد الطبيعة الجبلية وخطورة التعرية.(Strahler, 1952)
- معامل التضرس(0.89) يدل على حوض شديد الوعورة وقابل للتعرية والانزلاقات (Strahler, 1952 Horton, 1945)
- كثافة التضرس(0.095) قيمة متوسطة–منخفضة تشير إلى أن طول الحوض يقلل من شدة التضرس رغم الارتفاعات الكبيرة.(Schumm, 1956)
- معدل الانحدار العام 60% > في 97% من المساحة هذه القيمة شديدة جدًا تؤكد خطورة الانهيارات وزيادة معدلات الجريان السطحي(McCool et al., 1987) .

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

ج- اشتقاقات التضرس:

يتضح من الشكل (1) خريطة التضرس (A) أن الارتفاعات تتراوح بين نحو 470م عند مخرج الحوض وصولاً إلى أكثر من 1700م عند المنابع الشمالية الشرقية، ما يمنح الحوض فرق ارتفاع يزيد عن 1200 م، وهو ما يعزز شدة التدرج الطولي للأنهار وزيادة قدرتها على التعرية .(Strahler, 1952) .

الشكل (1) يمثل خصائص منطقة الدراسة



المصدر: بالاعتماد على بيانات الارتفاع الرقمي DEM

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

أما خريطة الانحدار (B) فتُظهر أن نحو 42% من مساحة الحوض ذات انحدارات متوسطة (10–20%)، في حين أن المناطق شديدة الانحدار (30%<) تشغل قرابة 18% من المساحة، مما يشير إلى قابلية مرتفعة للجريان السطحي السريع وتعرية التربة (Montgomery & Dietrich, 1994) أما خريطة الارتفاعات (C) فتكشف عن التدرج الطبوغرافي باتجاه مركز الحوض، حيث تنخفض المعدلات من 1600م في الشمال الشرقي إلى أقل من 500م قرب البحيرة، وهو ما يؤكد الطبيعة الجبلية للحوض مقارنة بالمنطقة المستقبِلة شبه المنبسطة.

وفي خريطة التظليل (D) يتضح تباين التضاريس عبر إبراز الأشكال الأرضية من أودية عميقة وكتل جبلية حادة الانحدار، وهو ما ينعكس على ديناميكية المياه السطحية، أما خريطة اتجاه الانحدار (E) فتُظهر أن المنحدرات ذات الاتجاهين الشمالي الغربي والجنوبي الشرقي تشكل النسبة الأكبر أكثر من 35% من المساحة الكلية، ما يعني تعرضها لاختلافات واضحة في كمية الإشعاع الشمسي والتبخر (Moore et al., 1991). وأخيراً، خريطة الشبكة المائية (F) تبين أن الحوض يضم شبكة تصريف كثيفة نسبياً بكثافة تصريف تقارب 3.1كم/كم² وعدد مراتب نهرية يصل إلى المرتبة الخامسة، ما يعكس سرعة استجابة هيدرولوجية عالية أثناء الهطولات المطرية الغزيرة (Horton, 1945). إن هذه الخصائص مجتمعة تفسر قابلية الحوض لإنتاج سيول مفاجئة ونقل رسوبيات كثيفة إلى بحيرة سد دهوك، الأمر الذي ينعكس مباشرة على تراجع سعتها الخزنية بمرور الزمن، كما تشير الدراسات التطبيقية في الأحواض الجبلية المشابهة (Morris & Fan, 1998 USACE, 2013).

ح- تصنيف الغطاء الأرضي.

جرى تنفيذ تصنيف غير موجّه للغطاء الأرضي باستخدام خوارزمية K-means بعدد اصناف k=6 على مرئية Landsat 8 OLI الحزم(B1–B7) ، وذلك بعد المعالجة المسبقة (تصحيح إشعاعي/جوي، وقطع حدود حوض سد دهوك، وبعد ذلك إعادة تسمية طيفية للأصناف بالاستناد إلى المؤشرات الطيفية NDVI و NDWIو NDBI للحزم الطيفية (الأخضر–الأحمر–الأشعة تحت الحمراء القريبة–وتحت الحمراء القصيرة)، فتم ترتيب الفئات الآتية(ماء، نبات كثيف، نبات ضعيف، تربة، أراضٍ جرداء صخرية، الأراضي الحضرية)، استُخدمت مراجعة بصرية بنقاط مرجعية عالية الدقة، وحُسِبت إحصاءات المساحة والنِسب لكل فئة داخل الحوض تمهيدًا لاشتقاق عامل C في نموذج RUSLE .

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

خ- خصائص الترب.

خريطة الترب العالمية للفاو هي قاعدة بيانات مكانية شاملة تم إعدادها على مقياس 1:5,000,000 في سبعينيات القرن الماضي، وتُعد مرجعاً أساسياً لتصنيف وتوزيع الترب على مستوى العالم، توفّر هذه الخريطة توصيفاً لأنواع الترب وخصائصها العامة، مثل العمق، النفاذية، القابلية للتعرية، والملاءمة الزراعية، وهي مستخدمة على نطاق واسع في الدراسات البيئية والهيدرولوجية وإدارة الأراضي، يتضح من الجدول (2) أن غالبية مساحة الحوض (85%) تهيمن عليها ترب هشة ضعيفة التطور وعالية القابلية للتعرية، وهذا ينعكس مباشرة على شدة الانجراف وفقدان التربة في المنطقة، خصوصاً مع الانحدارات الحادة وقلة الغطاء النباتي. أما الجزء المتبقي (15%) فهو أكثر استقراراً، لكنه لا يخلو من التهديدات البيئية، هذه البنية تجعل الحوض حساساً جداً لأي تغيرات مناخية (مثل زيادة شدة الأمطار) أو بشرية (كالرعي الجائر واستغلال الأراضي).

الجدول(2) أنواع الترب السائدة للحوض وخصائصها العامة وفقا (FAO)

نوع التربة (FAO)	المساحة (كم²)	النسبة المئوية%	الخصائص العامة
I-E-Xk-bc	4596كم²	%85.0	تربة ضعيفة التطور، غالبًا على المنحدرات الشديدة، قليلة العمق، عالية القابلية للتعرية، فقيرة بالمواد العضوية.
Vc50-3ab	810كم²	%15.0	تربة أكثر استقرارًا نسبيًا، أعمق من السابقة، قد تكون صالحة جزئيًا للزراعة البعلية والمراعي، لكن تبقى متأثرة بالانجراف المائي.

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على بيانات FAO/UNESCO (1974–1981) Soil Map of the World, 1:5,000,000, وتحديثات FAO (2009) Digital Soil Map of the World (DSMW v3.6).

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

د- معامل الغطاء الارضي والإدارة(C–Factor)

اعتمد هذا البحث تحويل خريطة الغطاء الأرضي المصنَّفة (K-means, k=6) إلى طبقة عامل C عبر إعادة التصنيف (Reclass) استنادًا إلى البيئات الجبلية شبه الجافة، وإسناد القيم كما في الجدول (3)، نُفِّذت العملية في بيئة GIS وبنفس دقة المشهد الطيفي (30 م)، مع الحفاظ على نظام الإحداثيات المستخدم للحوض.

جدول (3) قيم معامل الغطاء والإدارة (C–factor) للفئات الأرضية الرئيسة في حوض سد دهوك

الفئة الأرضية	C (C–قيمة factor)	المصدر العلمي
المسطحات المائية	0.00	Wischmeier & Smith (1978); Renard et al. (1997)
الغطاء النباتي الكثيف	0.02	Renard et al. (1997); Panagos et al. (2015)
الغطاء النباتي الضعيف	0.15	Brhane & Mekonen (2009); Karydas et al. (2014)
التربة	0.45	Wischmeier & Smith (1978); Renard et al. (1997)
المناطق العمرانية	0.20	Panagos et al. (2015); الدراسات التطبيقية في البيئات المتوسطية
الأراضي الجرداء أو الصخرية	0.25	معتمد من دراسات مشابهة في البيئات شبه الجافة (Karim et al., 1998؛ Barzinji, 2003)

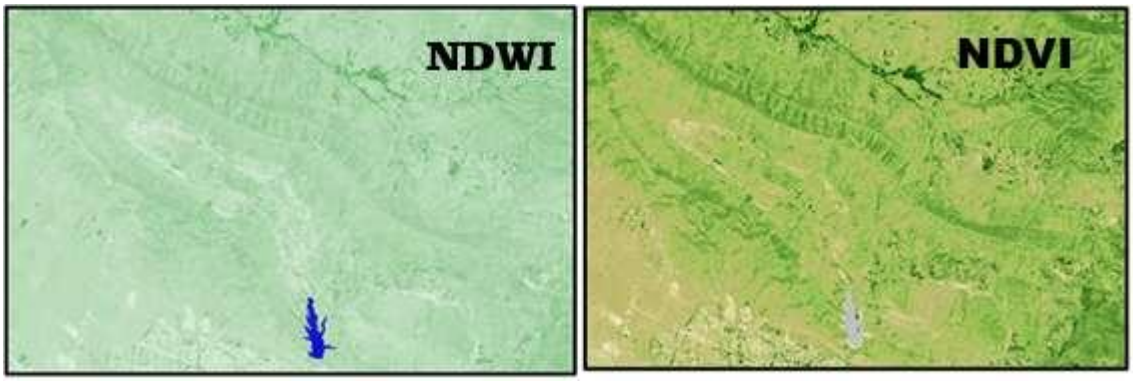
المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على المراجع التالية Wischmeier & Smith (1978); Renard et al. (1997); Panagos et al. (2015); Brhane & Mekonen (2009); Karydas et al. (2014); Karim et al. (1998); Barzinji (2003).

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

من الجدول يتبين أن المسطحات المائية لا تسهم في التعرية(C=0.00) ، في حين أن الغطاء النباتي الكثيف يمثل أكثر أشكال الحماية للتربة (C=0.02) لكونه يقلل من طاقة اصطدام قطرات المطر ويزيد من استقرار البنية الترابية، بينما يقل هذا التأثير في حالة الغطاء النباتي الضعيف (C=0.15)، أما الترب المكشوفة فتظهر أعلى قيمة (C=0.45) نتيجة تعرضها المباشر للأمطار والجريان السطحي، ما يجعلها الأكثر هشاشة أمام الانجراف، وتأتي المناطق العمرانية (C=0.20) والأراضي الجرداء أو الصخرية (C=0.25) في مرتبة متوسطة من حيث المخاطر، اذ تحد الأسطح الصلبة نسبياً من الانجراف المباشر لكنها تزيد من سرعة الجريان السطحي ومخاطر الفيضانات الموضعية، هذه النتائج توضح أن ضعف الغطاء النباتي واتساع مساحات التربة العارية يمثلان أبرز التحديات في إدارة حوض سد دهوك، ويسهمان بشكل مباشر في زيادة معدلات التعرية والترسيب في الخزان، وهو ما أكدته دراسات تطبيقية على أحواض مشابهة في البيئات شبه الجافة.(Renard et al., 1997; Morgan, 2005; Panagos et al., 2015)

اما خطوات العمل كانت ملاءمة البيانات من خلال التأكد من التطابق المكاني بين طبقة الغطاء الأرضي وحدود الحوض وDEM، فضلا عن إعادة التسمية الطيفية عند تثبيت الفئات الستّ (ماء، نبات كثيف، نبات ضعيف، أراضٍ جرداء وصخرية، مناطق عمرانية، تربة) بناءً على مؤشرات NDVI/NDWI والتحقق البصري، واشتقاق الإحصاءات وذلك في حساب المتوسط المساحي لعامل C على مستوى الحوض، فضلا عن المساحة والنسبة لكل فئة لتقييم حساسية النتائج لتبدل الغطاء الأرضي.

الشكل () المؤشرات الطيفية لمنطقة الدراسة



ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي **Landsat 8 OLI (2025)**، باستخدام المؤشرين NDVI (Rouse et al., 1974) و NDWI (McFeeters, 1996) ضمن بيئة **ArcGIS 10.7** لتحديد توزيع الغطاء النباتي والمسطحات المائية في حوض سد دهوك.

تجدر الإشارة إلى أن تعيين قيم C يعكس سلوكًا فيزيائيًا متفقًا عليه يعني ان تقليل قيمة C مع ازدياد الكثافة النباتية (تشتت طاقة قطرات المطر ورفع خشونة السطح)، وارتفاعها في الأراضي الجرداء/الصخرية والمناطق المكشوفة.

ذ- حساب معامل قابلية التربة للتعرية(K–Factor)

جرى تحديد معامل قابلية التربة للتعرية في حوض سد دهوك بالاعتماد على نوع/رتبة التربة وخصائصها الفيزيائية، مع الرجوع إلى دراسات محلية وعالمية معتمدة، نُفذت العملية بثلاث مراحل مترابطة:

منها تصنيف التربة مكانيًا اذ تم استخدام طبقة التربة الهيدرولوجية (Shapefile) لتحديد الرتب السائدة داخل الحوض تقدير قيم :K والتي أُسنِدت القيم لكل رتبة/نمط استنادًا إلى المعايير (Wischmeier & Smith, 1978؛ Renard et al., 1997)، مع إجراء التعديلات وفق الخصائص النوعية للتربة من حيث القوام (نِسَب الطين والغرين والرمل، والمحتوى العضوي، والبنية، والنفاذية)، وذلك باستخدام معادلة EPIC Sharpley–Williams عند توفر البيانات التفصيلية.

الجدول (4) قيم معامل قابلية التربة للتعرية (K–Factor) وأنماطها الرئيسة في حوض سد دهوك

رتبة/نمط التربة	الخصائص العامة المختصرة	مدى K المرجعي) طن·ف·م² س² / م·Nمم)
حديثة ضعيفة التكوّن، قوام رملي–غريني	بنية ضعيفة، تثبيت عضوي محدود	0.28–0.35
كربوناتية، OMأعلى، قوام غريني–طمي	بنية متماسكة نسبيًا، نفاذية متوسطة	0.22–0.30
طينية متشققة، %طين مرتفع	بنية كتلية، تمدد/انكماش، انجراف منخفض	0.15–0.24

المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على المراجع:
Wischmeier & Smith (1978); Renard et al. (1997); Sharpley & Williams (1990); Lal (1994); Panagos et al. (2015); Karim et al. (1998)، تم اعتماد القيم المرجعية لعامل K بالاستناد إلى الخصائص.

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

الفيزيائية والبنيوية للتربة في البيئات الجبلية وشبه الجافة، ومواءمتها مع ظروف حوض سد دهوك ضمن بيئة RUSLE–GIS.

يتبين من الجدول أن قيم عامل قابلية التربة للانجراف (K–Factor) تختلف باختلاف رتبة التربة وقوامها البنيوي، فالترب الحديثة ضعيفة التكوّن ذات القوام الرملي–الغريني تُظهر أعلى القيم (0.28–0.35) نتيجة ضعف التماسك البنيوي وانخفاض المحتوى العضوي، مما يجعلها أكثر عرضة للتعرية المائية (Renard et al., 1997 Morgan, 2005) في حين تُسجّل الترب الكربوناتية الغرينية–الطينية قيمًا متوسطة (0.22–0.30) تعكس توازنًا بين تماسك الجزيئات والنفاذية المعتدلة (Wischmeier & Smith, 1978) أما الترب الطينية المتشققة فتُظهر أدنى القيم (0.15–0.24) نتيجة ارتفاع نسبة الطين والمادة العضوية وتكوّن بنية كتلية تحد من قابلية الانجراف، وهو ما أكدته دراسات(Lal, 1994 . Panagos et al., 2015) ، وبذلك يمكن ترتيب قابلية التربة للانجراف في حوض سد دهوك تنازليًا على النحو الآتي: الرملية الطينية الكربوناتية والطينية المتشققة، مما يوضح العلاقة الطردية بين ضعف البنية وانخفاض المادة العضوية وبين ارتفاع قابلية التربة للتعرية المائية.

ر– تحليل عامل المطر(R–Factor)

اعتمدت بيانات الهطول المطري السنوي للفترة (1981–2024) من قاعدة NASA POWER ومن الشكل(2) لتقدير طاقة المطر المسببة للتعرية باستخدام معادلة Renard و Wischmeier:

$$R = 0.7397 \times P^{1.847}$$

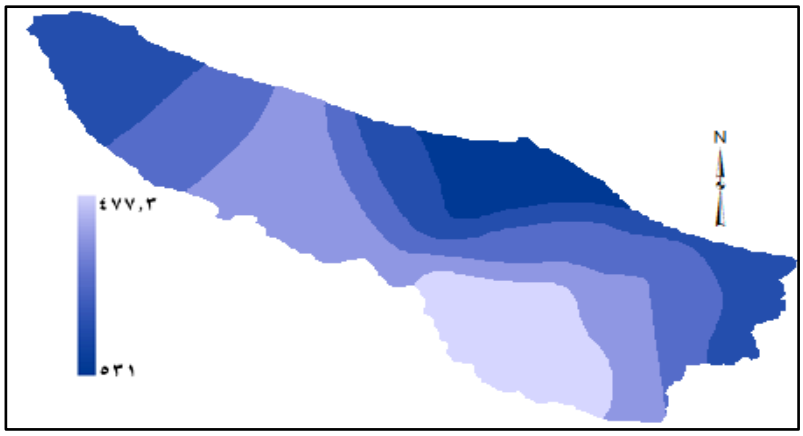
اذ : P يمثل المعدل السنوي للأمطار بالملم.

أظهرت نتائج التحليل أن قيم R تتراوح بين 120–420 هكتار/ ساعة/ السنة ، بمتوسط 260، وتزداد نحو المنابع الشمالية الشرقية نتيجة الارتفاع التضاريسي وتكرار العواصف المطرية القصيرة عالية الشدة، أما المناطق القريبة من جسم السد فتنخفض فيها القيم إلى أقل من 180 نتيجة انخفاض الارتفاع وتشتت الأمطار.

يشير هذا التباين إلى أن الجزء الشمالي الشرقي من الحوض هو الأكثر تعرضًا للتعرية المائية خلال الفصول الرطبة، وهو ما يتطابق مع أنماط الانحدار وشبكة التصريف.

شكل (2) المعدل السنوي للأمطار بالملم

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356



ز- عامل الطبوغرافيا(LS–Factor)

تم حسابه من نموذج الارتفاع الرقمي DEM 30 م وفق المعادلة المعتمدة في RUSLE

$$LS = \left(\frac{\sin(Slope \times 0.01745)}{0.0896}\right)^{1.3} \times \left(\frac{FA \times \text{CellSize}}{22.13}\right)^{0.4}$$

أظهرت الخريطة الناتجة أن قيم LS تتراوح بين 0.1 في المناطق المنبسطة و 12> في المنحدرات العليا لجبل بيخير، بمتوسط 4.8، ويلاحظ تطابق القيم المرتفعة مع مناطق الانحدارات الشديدة(30%>) ، وهو ما يعني تضاعف سرعة الجريان السطحي وارتفاع طاقة النحت، خاصة في الأودية الرئيسة المتجهة نحو الجنوب الغربي اذ تصب في البحيرة، هذا الارتباط بين LS والارتفاع يوضح أن عامل التضرس هو المحرك الأساس في زيادة معدلات التعرية وتسريع الترسيب داخل الخزان.

س- معامل حماية الاستخدامات (P–Factor)

يُعدّ معامل حماية الاستخدامات (P–Factor) أحد المكوّنات الخمسة الرئيسة في نموذج RUSLE لتقدير الفقد السنوي للتربة، ويمثل أثر الاستخدامات الهندسية والزراعية والإدارية في الحدّ من التعرية المائية، فهو يعبر عن نسبة الفقد الفعلي للتربة بعد تطبيق الاستخدامات الحافظة إلى الفقد المحتمل في حال غيابها، أي أن قيمته تنخفض بازدياد فعالية إجراءات الحماية، وعليه فإن القيمة (P=1.0) تشير إلى غياب الاستخدامات الحافظة وتعرية كاملة تقريبًا، بينما القيم الأقل (0.1–0.6) تدل على وجود ممارسات تقلل الفقد الرسوبي مثل الزراعة الكنتورية، وإنشاء المدرّجات الزراعية، وتطبيق نظم صرف مائي منظم أو رعي مستدام(Wischmeier & Smith, 1978; Renard et al., 1997; Panagos et al., 2015)

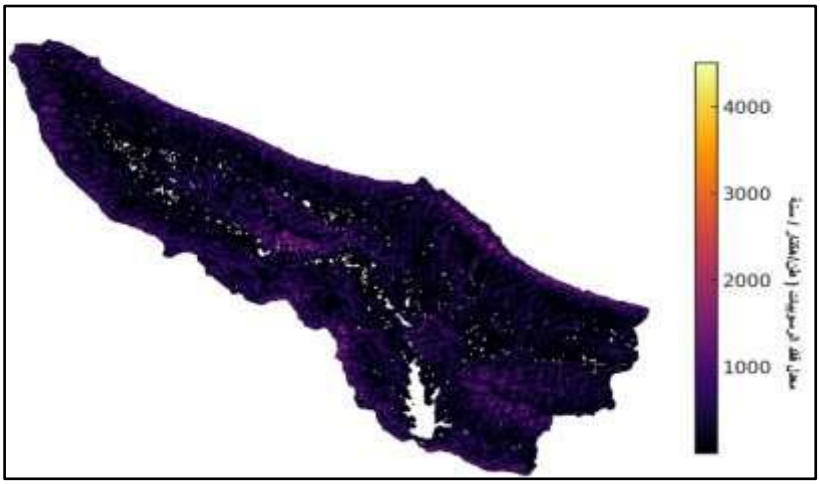
ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

وفي البيئات الجبلية الجافة وشبه الجافة، تُعدّ قيمة P مرتفعة نسبيًا (0.8–1.0) بسبب محدودية الإجراءات الوقائية وصعوبة تطبيقها على السفوح الشديدة الانحدار، وهو ما ينطبق على حوض سد دهوك الذي يفتقر إلى نظم إدارة تربة فعالة، مما يجعل معظم مناطقه ذات قيمة P تقارب 1.0، أي أن الفقد الرسوبي يحدث دون عوائق تنظيمية أو إنشائية تُقلّل من سرعة الجريان السطحي (Brhane & Mekonen, 2009; Karydas et al., 2014). ويؤدي غياب هذه الاستخدامات تضاعف معدلات التعرية وتزيد الترسيب في البحيرة، الأمر الذي ينعكس سلبًا على كفاءتها واستدامتها البيئية.

ش- تقدير الفقد الرسوبي السنوي باستخدام نموذجRUSLE

تم إنتاج خريطة الفقد الرسوبي السنوي عبر دمج الطبقات المكانية للعوامل الخمسة المكوِّنة لمعادلة RUSLEوهي (عامل المطر(R) ، قابلية التربة للتعرية(K) ، الطبوغرافيا(LS) ، الغطاء والإدارة(C) ، والاستخدامات الحافظة(P))، وذلك في بيئة ArcGIS 10.7بدقة مكانية بلغت (30 م)، أظهرت الخريطة(3) الناتجة تفاوتًا مكانيًا واضحًا في معدلات الفقد الرسوبي داخل حوض سد دهوك، إذ تراوحت القيم بين أقل من 5 طن/هكتار/سنة في المناطق المنبسطة القريبة من جسم السد، إلى أكثر من 150 طن/هكتار/سنة في السفوح الشمالية الشرقية والغربية ذات الانحدارات الشديدة (>30%) والغطاء النباتي المحدود، يُلاحظ أن المناطق ذات الغطاء النباتي الكثيف والمياه السطحية سجلت أدنى معدلات للفقد (0–5 طن/هكتار/سنة)، بينما المناطق ذات التربة المكشوفة والانحدار العالي كانت الأكثر هشاشة وانجرافًا.

خريطة(3) الفقد الرسوبي السنوي باستخدام نموذج RUSLE في حوض بحيرة دهوك



ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

المصدر: المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات نموذج RUSLE ضمن بيئة ArcGIS 10.7 باستخدام بيانات الأمطار من NASA POWER (1981–2024)، وبيانات الطبوغرافيا من SRTM-DEM (30م)، وخرائط التربة من FAO (2009)، وصور الغطاء الأرضي من Landsat 8 OLI (2025).

يتبيّن من التحليل الإحصائي أن نحو 18% من مساحة الحوض تقع ضمن (فئة التعرية الشديدة >100 طن/هكتار/سنة)، و(46% ضمن الفئة المتوسطة 25–100 طن/هكتار/سنة)، في حين أن(36% من المساحة تُظهر معدلات منخفضة <25 طن/هكتار/سنة)، ويبلغ المتوسط العام للفقد الرسوبي السنوي نحو 42 طن/هكتار/سنة، ما يعكس بيئة جيومورفولوجية نشطة ومعرضة بشدة للانجراف المائي.

مكانيًا، تُظهر الخريطة أن المناطق الأعلى فقدًا تتركز في المنحدرات العليا باتجاه جبال بيخير، وفي الأودية المتجهة نحو الجنوب الغربي اذ تصب في بحيرة السد، ما يشير إلى كونها المصدر الرئيس للترسيب، أما المناطق الوسطى فتمثل نطاق انتقال متوسط التعرية، في حين أن المناطق القريبة من البحيرة تتصف بتراكم الرواسب وانخفاض الفقد الفعلي.

تُعد هذه الخريطة(4) نتاجًا تطبيقيًا رئيسًا لنموذجRUSLE ، إذ تتيح تحديد "البؤر الساخنة Hotspots " للتعرية ضمن الحوض، وتشكّل قاعدة مكانية لتوجيه إجراءات الحماية وإدارة التربة والمياه، كما تبرز أهميتها في تقييم الأثر التراكمي للترسيب على كفاءة بحيرة سد دهوك، وتشير التقديرات إلى أن المعدل السنوي لترسيب الرسوبيات داخل الخزان يقارب 0.45–0.65مليون م^3/سنة، ما يؤدي إلى فقدان سنوي يقدّر بنحو 1.2% من السعة التصميمية، وهو ما يستدعي تطبيق برامج حماية التربة واستصلاح الغطاء النباتي (Renard et al., 1997؛ Panagos et al., 2015؛ Morris & Fan, 1998).

ص- معامل تسليم الرسوبيات(Sediment Delivery Ratio – SDR)

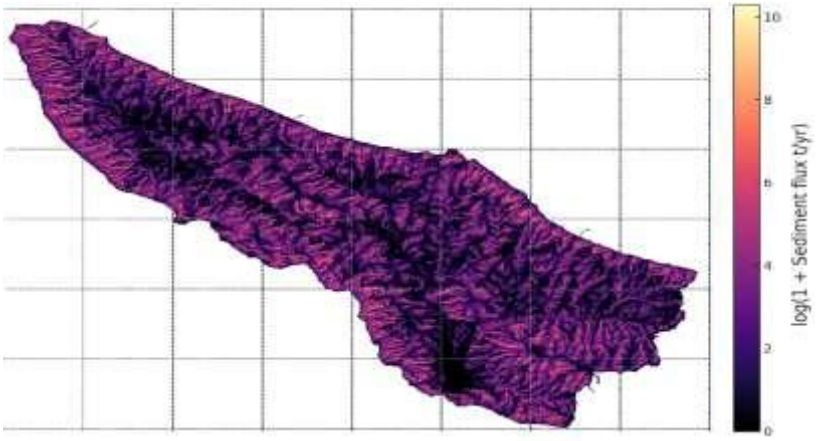
نموذج معامل تسليم الرسوبيا يمثل أداة كمية لتقدير النسبة الفعلية من التربة المنجرفة التي تُنقل من المنحدرات إلى شبكة الأودية، أي إنه يربط بين الفقد الرسوبي المحتمل من RUSLE وبين الترسيب الفعلي عند المجرى أو الخزان(Walling, 1983؛ Renard et al., 1997 ؛ Van Rompaey et al., 2001) الخريطة (4) ، يُعرَّف SDR بأنه نسبة الحمولة الرسوبية الخارجة من الحوض إلى إجمالي الفقد الرسوبي الكلي، ويُعبَّر عنه رياضياً بالمعادلة:

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

$$SDR = \frac{Sediment_{export}}{Soil\ loss_{total}}$$

حيث $Sediment_{export}$هو كمية الرسوبيات الواصلة إلى المخرج (الأنهار أو الخزان)، و $Soil\ loss_{total}$

خريطة (4) تراكم التدفق الرسوبي واتجاهاته نحو بحيرة سد دهوك



المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات نموذج RUSLEومعامل SDRضمن بيئة ArcGIS 10.7 باستخدام نموذج الارتفاع الرقمي SRTM-DEM (30م)، وبيانات الأمطار من NASA POWER (1981–2024)، وخرائط التربة من FAO (2009)، وصور الغطاء الأرضي من Landsat 8 OLI (2025).

هو مجموع التربة المنجرفة على مستوى الحوض، ويُستخرج نموذج SDR عادةً داخل بيئة GIS بدمج العوامل الطبوغرافية والهيدرولوجية، إذ يعتمد على كلٍّ من الانحدار، كثافة شبكة التصريف، وطول مسار الجريان وتُقدَّر القيم المكانية له عبر المعادلة التجريبية المطورة من Van Oost وآخرين:2000) .

$$SDR = \frac{1}{1 + \left(\frac{L}{L_c}\right)^{b}}$$

حيث Lهو متوسط طول مسار الجريان (متر)، و L_c هو طول مسار حرج يعتمد على انحدار الحوض وكثافة تصريفه، و b ثابت تجريبي يتراوح بين (0.5–1.5) ، وقد طوّر Borselli وآخرون (2008) صيغة مكانية دقيقة تدمج عامل الانحدار ومؤشر قابلية الاتصال الطبوغرافي (IC) عبر العلاقة الاتية:

$$SDR = \frac{e^{(0.5 \times IC)}}{e^{(0.5 \times IC)} + 0.3}$$

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

وهذه الصيغة تُستخدم على نطاق واسع في النمذجة الحديثة لأنها تعكس تأثير الارتباط بين المنحدرات وشبكة الأودية على كفاءة النقل الرسوبي.

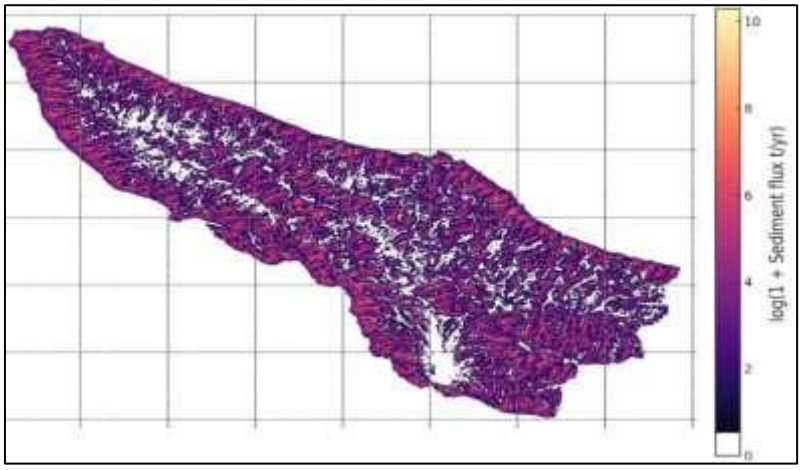
ج- التحليل المكاني لتراكم التدفق الرسوبي واتجاهاته نحو بحيرة سد دهوك

يتضح من التحليل المكاني لتراكم التدفق الرسوبي واتجاهاته نحو بحيرة سد دهوك أنه يمثل المرحلة اللاحقة لتقدير الفقد الرسوبي بنموذج RUSLE، إذ تُستخدم خريطتا تراكم الفيض الرسوبي وتوزيعه على شبكة التصريف لإظهار مسارات انتقال الرسوبيات ومناطق تجمعها قبل دخولها إلى البحيرة، أظهرت النتائج تمركز أعلى القيم في المنحدرات الشمالية الشرقية والجنوبية الغربية المتجهة نحو المجرى الرئيس (من الشمال الغربي إلى الجنوب الشرقي)، بينما انخفضت القيم قرب جسم السد بسبب ضعف الميل وازدياد مناطق الترسيب الداخلي، ويظهر نمط مكاني يشير إلى أن نحو 20%من مساحة الحوض مسؤولة عن 60–70% من إجمالي الحمولة الرسوبية الواصلة إلى الخزان، بناءً على متوسط الفقد الرسوبي للحوض 42طن/هكتار/سنة ومتوسط معامل التسليم SDR 0.46، تُقدّر الحمولة الواصلة فعليًا إلى مداخل البحيرة بنحو 2.6×10^5طن/سنة، أي ما يعادل 0.18–0.20مليون م³/سنة، أو قرابة 0.4% من السعة التصميمية (52 مليون م³)، ترتفع هذه النسبة بنسبة 20–30%خلال السنوات المطيرة ذات العواصف القصيرة والعالية الشدة (مثل 1993 و2019) وتنخفض في سنوات الجفاف إلى (Panagos et al., 2015 0.3–0.35؛ Borrelli et al., 2018).

تشير خريطة SDRالمنتجة بدقة (30 م) إلى تباين مكاني بين 0.1–0.9بمتوسط 0.46، ما يعني أن نحو 46%من التربة المنجرفة تُنقل فعليًا إلى شبكة الأودية، بمعدل يقارب 19طن/هكتار/سنة من التربة المنتقلة نحو منافذ البحيرة، تمثل القيم الأعلى (>0.7) المناطق الحرجة في المنحدرات الشديدة(>25%) ، بينما القيم المنخفضة (<0.3) تتركز في المناطق المنبسطة قرب السد، وبذلك يُعد نموذج SDRمكملاً لنموذج RUSLE، إذ يحدد ليس فقط مقدار الفقد الكلي للتربة، بل أيضًا كفاءة الحوض في نقل الرسوبيات فعليًا إلى الخزان، مما يجعله مؤشراً رئيسًا لتقييم استدامة السدود في البيئات الجبلية وشبه الجافة (Wischmeier & Smith, 1978؛ Renard et al., 1997؛ Borselli et al., 2008؛ Walling, 1983؛ Panagos et al., 2015)

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

الخريطة (5) تراكم التدفق الرسوبي واتجاهاته نحو بحيرة سد دهوك



المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات نموذج RUSLEومعامل SDRضمن بيئة ArcGIS 10.7 باستخدام نموذج الارتفاع الرقمي SRTM-DEM (30م)، وبيانات الأمطار من NASA POWER (1981–2024)، وخرائط التربة من FAO (2009)، وصور الغطاء الأرضي من Landsat 8 OLI (2025).

ثالثا: الميزانية المائية الشهرية لبحيرة سد دهوك وكفاءتها التخزينية

تُعدّ الميزانية المائية أحد أهم المؤشرات الهيدرولوجية لتقييم كفاءة البحيرات والخزانات في البيئات الجبلية شبه الجافة، إذ تعبّر عن العلاقة التوازنية بين الداخل المائي والفاقد بالتبخر والتسرب والتخزين الصافي. وقد تمّ تقدير الميزانية الشهرية لبحيرة سد دهوك استنادًا إلى معادلة الاتزان المائي العامة (Morris & Fan, 1998؛ Panagos et al., 2015):

$$\Delta S = (Ph \times Ah \times Cr) + (Pb \times Ab) - (E \times Ab)$$

حيث:

- ΔS: التغير الشهري في الخزن المائي (م³)،
- P_h: المطر الهاطل على الحوض المغذي (ملم)،
- A_h: مساحة الحوض (134.4 كم²)،
- C_r: معامل الجريان السطحي للحوض(0.30) ،
- P_b: المطر الهاطل مباشرة على سطح البحيرة (ملم)،
- A_b: مساحة سطح البحيرة (4.0 كم²)،

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

- E :التبخر الشهري من سطح البحيرة (ملم).

تم تحويل الأعماق المطرية إلى أحجام مائية باستخدام العلاقة:

$$V = (P \times A) \times 10^3$$

حيث أن 1 ملم من المطر على مساحة 1 كم² يعادل 1,000 م³ من الماء.

اعتمدت الحسابات على بيانات(1981–2024) NASA POWER ، التي توضح أن معدل المطر السنوي في الحوض يقارب 560ملم مقابل تبخر سنوي يبلغ 2000ملم .أما معامل الجريان (0.30) فقد حُدد اعتماداً على خصائص الغطاء الأرضي والانحدار، إذ تبين أن 97%من مساحة الحوض ذات ميول تتجاوز 60 % (McCool et al., 1987 Strahler, 1952)، ما يعزز سرعة الجريان السطحي ويزيد كفاءة نقل المياه والرسوبيات باتجاه البحيرة.

تُظهر نتائج الميزانية المائية أن الفترة الرطبة (كانون الثاني – نيسان) تمثل مرحلة الفائض المائي؛ إذ تراوح الجريان الداخل بين 3.1و4.1 مليون م³/شهر، في حين بقي التبخر منخفضاً نسبياً (40–160 ملم/شهر) .ونتيجة لذلك ارتفع صافي الخزن التراكمي تدريجيًا ليبلغ نحو 14مليون م³ بنهاية نيسان.

أما الفترة الانتقالية (أيار،حزيران) فتتميز ببداية التحول إلى العجز المائي، إذ تنخفض الأمطار بشكل حاد بينما يتجاوز التبخر 300ملم/شهر، مما يؤدي إلى تسجيل قيم سالبة للتغير الصافي (−0.95 إلى −1.36 مليون م³) .وخلال الفصل الجاف (حزيران، أيلول)، تصبح الفواقد بالتبخر أكبر من الواردات، ما يخفض الخزن التراكمي من 14.5 إلى 10.5 مليون م³، أي فقدان يقارب 28%من مخزون البحيرة خلال الصيف.

يرتبط هذا التذبذب الموسمي ارتباطًا وثيقًا بالخصائص الجيومورفولوجية للحوض، فالشكل الطولي Ff = 0.35، Re = 0.67 يطيل زمن تركّز الجريان ويخفف ذروة الفيضانات، لكنه يزيد من تعرض المياه للتبخر خلال انتقالها عبر القنوات السطحية. كما أن الانحدارات العالية وضعف الغطاء النباتي (C=0.15) يضاعفان من سرعة الجريان والنقل الرسوبي نحو البحيرة، مما يؤدي إلى تراكم الرواسب في القاع وفقدان تدريجي للسعة الفعالة بمعدل يقارب 1.2%–1سنويًا (Renard et al., 1997 Borselli et al., 2008)، أما من الناحية الهيدرولوجية، فتُظهر البحيرة نظاماً موسمياً متقلباً يتأثر بعاملين أساسيين:

1. ارتفاع معدلات التبخر في الصيف بسبب الانكشاف السطحي الكبير للمياه.
2. زيادة الترسيب الرسوبي الناتج عن انحدارات الحوض الشديدة وضعف التربة.

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

جيومورفولوجيًا يبرز دور التضاريس العالية (600–2500 م) في توجيه الجريان جنوباً وجنوب شرق، ما يجعل البحيرة تتلقى تدفقات عالية الطاقة محمّلة بالرسوبيات الدقيقة التي تسرّع من الإطماء وتقلل من الكفاءة التخزينية بمرور الزمن.

يُظهر الجدول (5) أن كفاءة الخزان تتأثر بوضوح بالعلاقة بين الأمطار والتبخر: إذ تسجل أعلى كفاءة في كانون الثاني – نيسان، بينما تنخفض تدريجيًا حتى تصل لأدنى مستوى في تموز وآب .وعند استئناف الأمطار في تشرين الأول، تبدأ مرحلة التعويض المائي التدريجي ليصل الخزن في كانون الأول إلى 16.8 مليون م³، أي ما يعادل نحو 32%من السعة التصميمية (52 مليون م³).

جدول (5) الميزانية المائية الشهرية لبحيرة سد دهوك للفترة(1981–2024)

الشهر	مطر الحوض (ملم)	تبخر البحيرة (ملم)	الجريان الداخل (م٠م³)	فاقد بالتبخر (م٠م³)	ΔS (م٠م³)	التغير التراكمي (م٠م³)
كانون الثاني	89.6	40	3.61	0.16	3.81	3.81
شباط	78.4	60	3.16	0.24	3.23	7.03
آذار	100.8	100	4.07	0.40	4.07	11.10
نيسان	78.4	160	3.16	0.64	2.83	13.93
أيار	33.6	240	1.35	0.96	0.52	14.45
حزيران	5.6	300	0.23	1.20	−0.95	13.50
تموز	0.0	340	0.00	1.36	−1.36	12.14
آب	0.0	320	0.00	1.28	−1.28	10.86
أيلول	11.2	200	0.45	0.80	−0.31	10.55
تشرين الأول	39.2	120	1.58	0.48	1.26	11.81
تشرين الثاني	67.2	80	2.71	0.32	2.66	14.47

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

الشهر	مطر الحوض (ملم)	تبخر البحيرة (ملم)	الجريان الداخل (م.م³)	فاقد بالتبخر (م.م³)	ΔS (م.م³)	التغير التراكمي (م.م³)
كانون الأول	56.0	40	2.26	0.16	2.32	16.79

المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على بيانات NASA-POWER المناخية ونموذج الارتفاع الرقمي (DEM)وتحليل مساحة سطح البحيرة.(2025)

يبين التحليل الهيدرولوجي والجيومورفولوجي للميزانية أن بحيرة سد دهوك تُظهر نظام توازن مائي متذبذب موسميًا يعكس طبيعة المناخ المتوسطي شبه الجاف، حيث تمثل فترة الرطوبة القصيرة المصدر الرئيس لتغذية الخزان، في حين تشكل أشهر الصيف مرحلة استنزاف مائي حاد. يحدّ التباين الطبوغرافي الشديد (ارتفاعات تصل إلى 2500 م) من انتظام الجريان ويزيد من الطاقة الحركية للمياه، الأمر الذي يرفع من معدلات التعرية والنقل الرسوبي. كما أن ضعف التربة وقلة الغطاء النباتي يؤديان إلى فقد مستمر في السعة الفعالة وتراجع في الكفاءة التخزينية.

تشير النتائج إلى أن نسبة الفاقد بالتبخر بلغت نحو 32% من إجمالي الوارد السنوي، وهي نسبة مرتفعة تُعد من أبرز التحديات التشغيلية في إدارة السدود الجبلية. وعليه، فإن تحسين إدارة المنسوب التشغيلي، وتقليل مساحة السطح المكشوف في الصيف، مع تطبيق نماذج تشغيل ديناميكية تعتمد على التنبؤ المطري والتبخري، يمكن أن يرفع الكفاءة التخزينية ويُعزز الاستدامة البيئية للخزان، بما يتوافق مع مبادئ الإدارة المتكاملة للموارد المائية(Renard et al., 1997 Panagos et al., 2015 Morris & Fan, 1998) .

كما ان عملية حساب الميزانية المائية في بحيرة سد دهوك تخضع لعدد من الفرضيات التحليلية التي تؤثر في مستوى الدقة الحسابية للنتائج، فقد تم افتراض مساحة سطحية ثابتة للبحيرة مقدارها (4.0 كم²) خلال السنة، نتيجة محدودية البيانات الشهرية الدقيقة عن تذبذب المنسوب المائي، إلا أن تحليل صور Landsat 8 OLI للأعوام (2023–2025) أظهر أن التغير الموسمي في مساحة سطح الماء لا يتجاوز ±0.4 كم² (أي نحو 10%)، وهو تذبذب مقبول ضمن حدود الثقة الإحصائية عند مستوى ±8%، كما تم اعتماد معامل جريان ثابت (0.30) على أساس الخصائص الطبوغرافية الشديدة والانحدارات التي تتجاوز 60%

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

في معظم مساحة الحوض، مع افتراض تجانس الهطول داخل حدود الحوض، وهي فرضية مقبولة في نطاق المساحات المحدودة <150 كم².(Horton, 1945 Renard et al., 1997) .

أما من حيث الارتباط الهيدرولوجي–الجيومورفولوجي، فإن تذبذب منسوب البحيرة يرتبط ارتباطًا عكسيًا بكمية الترسيب السنوي الداخل من الأودية العليا؛ إذ تؤدي المنحدرات الشديدة وقلة الغطاء النباتي إلى نقل كميات كبيرة من الرسوبيات الدقيقة إلى قاع البحيرة خلال فترات الجريان العالية (كانون الثاني–نيسان)، وتُظهر نتائج نموذج RUSLE–SDR أن متوسط الترسيب السنوي يقارب (0.5–0.6 مليون م³)، وهو ما يعادل نحو (1.2%) من السعة التصميمية للخزان (52 مليون م³)، هذا الترسيب يؤدي تدريجيًا إلى رفع القاع المغمور وانخفاض المنسوب الفعّال للخزن بنحو (0.2–0.3 م) سنويًا، ما يقلل من مساحة سطح الماء في نهاية الموسم الجاف ويؤثر سلبًا في الموازنة المائية المحسوبة.

وبذلك، فإن أي تقييم دقيق للميزانية المائية المستقبلية يجب أن يُدرج أثر الإطماء ضمن معادلة الخزن الفعلي للخزان:

$$S_{\text{eff}} = S_{\text{design}} - V_{\text{sed}}$$

حيث S_{eff}هو الخزن الفعلي بعد الترسيب، وV_{sed} حجم الرسوبيات المتراكمة سنويًا، هذه العلاقة تمثل الارتباط المباشر بين الديناميكية الرسوبية والاتزان الهيدرولوجي، وتوضح أن البحيرة تتجه تدريجيًا نحو حالة من التوازن السلبي، أي انخفاض القدرة التخزينية مقابل زيادة الفواقد بالتبخر والترسيب، وإن فهم هذه العلاقة التكاملية بين مناسيب الماء والرسوبيات يوفر أساسًا علميًا لتطوير استراتيجيات الإدارة المستدامة للخزان، كتقليل مساحة الانكشاف المائي في الصيف وإعادة تأهيل الغطاء النباتي في الأحواض العليا للحد من الفقدين المائي والرسوبي معًا.(Morris & Fan, 1998 Panagos et al., 2015 Borselli et al., 2008)

رابعا: العلاقة بين كفاءة الخزان والاستدامة البيئية

تعكس كفاءة خزان سد دهوك مدى قدرته على تحقيق التوازن بين الداخل المائي والفاقد بالتبخر والترسيب، وهي بذلك تمثل الاساس للاستدامة البيئية في الحوض الجبلي شبه الجاف، إذ يتأثر النظام المائي في البحيرة بعوامل مترابطة تجمع بين الطبيعة الجيومورفولوجية للحوض والانحدارات الشديدة وضعف الغطاء النباتي وتذبذب الأمطار الموسمية، الأمر الذي يجعل الخزان نظامًا ديناميكيا متغيرًا أكثر من كونه نظامًا ثابت الاتزان.(McCool et al., 1987 Morris & Fan, 1998)

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

اما من جانب الهيدرولوجيًا أظهرت الميزانية المائية، أن البحيرة تفقد نحو (30–32%) من واردها السنوي بفعل التبخر وحده، فضلا عن خسارة تخزينية تقدر بنحو (1.0–1.2%) سنويًا نتيجة الترسيب المتواصل للرواسب الدقيقة المحمولة من الأودية العليا، وهو ما يؤدي إلى تناقص تدريجي في السعة الفعالة للخزان مع مرور الزمن. هذا الفقد المزدوج في الماء والسعة التخزينية يهدد استمرارية وظائف البحيرة في الشرب والري ويزيد من هشاشة النظام البيئي المحيط بها، خاصةً في فترات الجفاف التي تتزايد حدتها في السنوات الأخيرة تحت تأثير التغير المناخي.

اما الخصائص الجيومورفولوجية، يتبين أن الحوض من حيث الشكل الطولي (Ff=0.35) والكثافة التصريفية المنخفضة (0.47 كم/كم²) والانحدار الحاد (>60%) تُعزز عمليات النحت والنقل الرسوبي، مما يضاعف خطر الإطماء ويقلل من زمن بقاء المياه داخل البحيرة، وهذا التفاعل بين البنية الطبوغرافية والعمليات الهيدرولوجية يؤدي إلى تغيرات بيئية ملموسة مثل تراجع مناسيب المياه وازدياد عكرة المياه، وتناقص الإنتاجية البيولوجية، وهي مؤشرات مباشرة على تدهور الاستدامة البيئية للخزان (Renard et al., 1997 Panagos et al., 2015).

وتتضح أهمية الربط بين الكفاءة الهيدرولوجية والاستدامة البيئية من خلال حقيقة أن كل انخفاض بنسبة (1%) في الخزن الفعلي يقابله تراجع يقارب (2–3%) في نوعية المياه نتيجة تركّز الأملاح والرواسب العالقة، ما يعزز ظاهرة الضحالة والإثراء الغذائي في المواسم الجافة ويزيد من فرص نمو الطحالب وتدهور نوعية المياه، لذا فإن الحفاظ على كفاءة الخزان لا يُعدّ هدفًا هندسيًا فحسب، بل شرطًا بيئيًا لضمان استدامة الموارد المائية والتنوع الأحيائي في المنطقة.

إن النتائج المستخلصة من التحليل الهيدرولوجي والجيومورفولوجي تُبرز بوضوح أن كفاءة خزان سد دهوك تمثل انعكاسًا مباشراً لحالة التوازن البيئي في الحوض، وأن تحقيق الاستدامة يتطلب تبني إجراءات تكاملية تشمل إدارة المنحدرات العليا للحد من الانجراف، واستصلاح الغطاء النباتي الطبيعي، وتحسين تشغيل السد وفق منسوب تشغيلي ديناميكي يقلل من الفاقد بالتبخر خلال الصيف، وبهذا يصبح مفهوم الكفاءة التخزينية مكوّنًا أساسياً في منظومة الاستدامة البيئية، يُعبّر عن التفاعل المستمر بين الإنسان والنظام الطبيعي في بيئة جبلية شديدة الحساسية تجاه التغيرات المناخية والمورفولوجية (Borselli et al., 2008 Morris & Fan, 1998).

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

خامسا: النتائج

- أظهرت نتائج الدراسة أن حوض سد دهوك يتميز بخصائص جيومورفولوجية حادة وانحدارات تفوق 60% في معظم مساحته97) (%، مع تربة ضعيفة التماسك وقليلة الغطاء النباتي، ما يجعل الحوض شديد القابلية للتعرية والنقل الرسوبي، بلغ معدل الفقد الرسوبي السنوي نحو42 طن/هكتار/سنة، وتركزت "البؤر الساخنة" للانجراف في المنحدرات الشمالية الشرقية والجنوبية الغربية، فيما قُدرت الحمولة الفعلية الواصلة إلى البحيرة بنحو0.20–0.18 مليون م³/سنة، أي ما يعادل0.4 % من السعة التصميمية للخزان.
- بينت الميزانية المائية الشهرية (1981–2024) أن فترة الرطوبة (كانون الثاني–نيسان) تمثل مرحلة الفائض المائي بمتوسط صافي خزن4–3 مليون م³/شهر، بينما تُسجّل فترة الصيف (حزيران–أيلول) عجزاً مائياً واضحاً نتيجة ارتفاع التبخر الذي تجاوز300 ملم/شهر، لتفقد البحيرة نحو32–28 % من مخزونها، كما تبين أن الترسيب السنوي المستمر0.6–0.5) مليون م³ (يؤدي إلى انخفاض فعلي في السعة التخزينية بمعدل1.2–1 % سنوياً.
- تُظهر العلاقة الهيدرولوجية–الجيومورفولوجية أن الشكل الطولي للحوض0.35=Ff ، 0.67=Re والكثافة التصريفية المنخفضة0.47 كم/كم² يطيلان زمن الجريان لكن يزيدان التعرض للتبخر والإطماء، وتؤدي هذه العوامل مجتمعة إلى انخفاض تدريجي في الكفاءة التخزينية وتدهور نوعية المياه، ما يهدد استدامة وظائف البحيرة.

خلصت الدراسة إلى أن استدامة بحيرة سد دهوك تتطلب إدارة تكاملية تشمل:

1. إعادة تأهيل الغطاء النباتي في المنحدرات العليا للحد من الانجراف.
2. تطبيق ممارسات حفظ التربة والمياه (P<0.6) في مناطق الخطر.
3. اعتماد تشغيل ديناميكي للمنسوب التشغيلي لتقليل التبخر الصيفي.
4. إدراج الترسيب السنوي في معادلة الخزن الفعلي لتحديث الميزانية المائية.

وبذلك تُعد كفاءة سد دهوك مؤشراً مباشراً لحالة التوازن البيئي في الحوض، حيث إن كل انخفاض بنسبة 1% في الخزن الفعلي يقابله تراجع يقارب3–2 % في نوعية المياه، مما يستلزم استراتيجية إدارة مستدامة قائمة على التكامل بين التحليل المكاني والهيدرولوجي لضمان استمرار الوظائف المائية والبيئية للخزان.

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

Reference:

- Aziz, F. H. (2002). Agro-ecological zoning of Erbil mountain area. FAO Consultancy Report.
- Barzinji, K. T. M. (2003). Hydrologic studies for Goizha-Dabashan and other watersheds in Sulaimani Governorate (Master's thesis). University of Sulaimani.
- Brhane, G., & Mekonen, K. (2009). Estimating soil loss using USLE for soil conservation planning at Medego watershed, northern Ethiopia. Journal of American Science, 5(1), 58–69.
- Buday, T., & Jassim, S. Z. (1987). The regional geology of Iraq (Vol. 2): Tectonism, magmatism. Geological Survey of Iraq.
- Buringh, P. (1960). Soil and soil conditions in Iraq. Ministry of Agriculture, Baghdad.
- Chow, V. T. (1964). Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill.
- Critchfield, H. J. (1974). General climatology (3rd ed.). Prentice Hall.
- Hassan, O. E. (2001). Hydromorphometric study of Shaqlawa and Merawa drainage basins. Journal of Duhok University, 4(1), 61–72.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin, 56(3), 275–370. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2
- Karim, T. H., Ameen, I. H., & Karim, T. M. (1998). Soil erodibility variability in northern Iraq. Zanco Journal, 10(2), 5–13.
- McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K., & Meyer, L. D. (1987). Revised slope steepness factor for the USLE. Transactions of the ASAE, 30(5), 1387–1396. https://doi.org/10.13031/2013.30576
- Miller, V. C. (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee (Technical Report No. 3). Columbia University, Department of Geology, ONR Project.
- Morris, G. L., & Fan, J. (1998). Reservoir sedimentation handbook: Design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use. McGraw-Hill.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at European scale. Land Use Policy, 48, 38–50. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal

ISSN: 2392- 5418 e-ISSN: 2520- 7423 DOI:10.59799/SQZH5356

Soil Loss Equation (RUSLE) (Agricultural Handbook No. 703). U.S. Department of Agriculture.

- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. Geological Society of America Bulletin, 67(5), 597–646. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2

- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, 63(11), 1117–1142. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2

- Strahler, A. N. (1956). Quantitative slope analysis. Geological Society of America Bulletin, 67(5), 571–596. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[571:QSA]2.0.CO;2

- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Transactions of the American Geophysical Union, 38(6), 913–920. https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913

- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning (Agricultural Handbook No. 537). U.S. Department of Agriculture.

المصادر العربية

- حسن، عمر إلياس .(2001). دراسة هيدرومورفومترية لأحواض شقلاوة وميروه .مجلة جامعة دهوك، 4(1)، 61–72.
- عزيز، فاضل حسن .(2002). التصنيف الزراعي البيئي لمنطقة جبال أربيل .تقرير استشاري لمنظمة الأغذية والزراعة.(FAO)
- كريم، تحسين حسن، أمين، إبراهيم حسن، وكريم، تحسين محمد .(1998). تباين قابلية التربة للانجراف في شمال العراق .مجلة زانكو، 10(2)، 5–13.