



Using Artificial Neural Networks to study landslides and Rockfall Hazards in Maswar, Amran District

Mohammed Nasser Qasim Al-Bakri ^{1,*}, Belqees Mabkhoot Nasser Salah ¹

¹Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of Arts and Humanities - Sana'a University, Sana'a, Yemen.

*Corresponding author: m.albakri@su.edu.ye

Keywords

1. Artificial Neural Network (ANN)
2. Geomorphological Hazards
3. Machine Learning
4. Landslides
5. Rockfall

Abstract:

This study aims to a Spatial develop an Artificial Neural Network (ANN)-based model for predicting landslide and rockfall hazards and to produce a susceptibility map for these phenomena in Maswar District, Amran Governorate, Yemen, utilizing Geographic Information Systems (GIS) techniques. Twelve geological, geomorphological, hydrological, climatic, environmental, and anthropogenic factors influencing hazard occurrence were evaluated. Spatial datasets were collected, preprocessed, and standardized into a uniform digital format for model building. The dataset, comprising historical records and field observations of landslide and rockfall events, was partitioned into training, validation, and testing subsets. The ANN model incorporated two hidden layers to maximize predictive performance, and its outputs were exported to the ArcGIS environment for spatial susceptibility mapping.

The resulting map classifies the study area into five susceptibility levels: very low, low, moderate, high, and very high. Approximately (30.44%) of the district falls within the high to very high susceptibility categories. Model validation yielded an Area Under the Curve (AUC) of (0.68) for the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, indicating satisfactory predictive capability. The model achieved an overall accuracy of (0.72), a precision of (0.714), and a recall of (0.50), demonstrating operational effectiveness. The generated susceptibility map exhibits strong spatial correspondence with previously published hazard maps.

The findings indicate that the produced map provides reliable hazard modeling. This research underscores the value of integrating machine learning with GIS to support spatial planning and natural hazard risk management.

استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية في دراسة أخطار الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري في

مديرية مسور - عمران

محمد ناصر قاسم البكري^{1*}، بلقيس مبخوت ناصر صلاح¹

إقسام الجغرافيا والجيوفورماتكس، كلية الآداب والعلوم الإنسانية - جامعة صنعاء، صنعاء، اليمن.

*المؤلف: m.albakri@su.edu.ye

الكلمات المفتاحية

1. الشبكة العصبية الاصطناعية
2. الأخطار الجيومورفولوجية
3. التعلم الآلي
4. الانزلاقات الأرضية
5. التساقط الصخري

الملخص:

هدفت الدراسة إلى بناء نموذج مكاني باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) للتنبؤ بأخطار الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري، وإنتاج خريطة القابلية لحدوثها في مديرية مسور بمحافظة عمران - اليمن، اعتماداً على تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS). اعتمدت الدراسة على تحليل اثني عشر معياراً جيولوجياً وgeomorphological وهيدرولوجياً ومناخياً وبيئياً وبشرياً مؤثراً في نشأة الأخطار، جُمعت البيانات المكانية، وجرى معالجتها وتحويلها إلى صيغة رقمية واحدة لاستخدامها في بناء النموذج؛ إذ قُسمت قاعدة بيانات العينات إلى بيانات تدريب وتحقق واختبار، تحوي كل السجلات التاريخية والمشاهدات الميدانية لأخطار الانزلاق والتساقط الصخري، واستخدم النموذج طبقتين مخفيتين لتحقيق أفضل أداء تنبؤي، وجرى تحويل مخرجاته إلى بيئة ArcGIS لإنتاج خريطة مكانية لقابلية التعرض للأخطار، أظهرت النتائج تصنيف منطقة الدراسة إلى خمس فئات من القابلية: منخفضة جداً، منخفضة، متوسطة، عالية، وعالية جداً؛ إذ تقع حوالي (30.44%) من المساحة ضمن الفئات ذات القابلية العالية إلى العالية جداً، وأظهرت النتائج كفاءة مقبولة لنموذج الشبكة العصبية؛ إذ بلغت قيمة المساحة تحت منحنى ROC ($AUC = 0.68$) مما يدل على أن قدرات التنبؤ للنموذج جيدة، وبلغت الدقة الكلية ($Accuracy = 0.72$)، والدقة الإيجابية ($Precision = 0.714$)، بينما سجل مؤشر الاستدعاء ($Recall = 0.50$) ما يعكس كفاءة النموذج، وأظهرت الخريطة تطابقاً مع خريطة الأخطار السابقة، نستنتج أن الخريطة التي أُنتجت تتميز بالموثوقية في نمذجة الأخطار، وهنا تبرز أهمية دمج تقنيات التعلم الآلي مع نظم المعلومات الجغرافية لدعم التخطيط المكاني وإدارة المخاطر الطبيعية.

المقدمة:

تشكل المخاطر الجيومورفولوجية، مثل: الانهيارات الأرضية والتعرية المائية، تهديدًا مباشرًا للأنشطة البشرية والبنية التحتية، لا سيما في المناطق الجبلية وشبه الجافة، وتعد من أكثر المخاطر الجيومورفولوجية شيوعًا وكارثية محتملة، وهي ظواهر معقدة تحدث في العديد من البيئات والمواد الجغرافية المكانية (Azarafza et al., 2021, P1)، وقد أدى التطور السريع في تقنيات نظم المعلومات الجغرافية والذكاء الاصطناعي الجيومكاني إلى توفير أدوات فعالة لتحليل هذه المخاطر والتنبؤ بها بدقة عالية.

وتُعد الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Network – ANN) من أكثر تقنيات التعلم الآلي استخدامًا في نمذجة الظواهر الطبيعية المعقدة نظرًا لقدرتها على التعامل مع العلاقات غير الخطية بين المتغيرات (Pham et al., 2020, P1270).

على مدى العقود الماضية اقترح العديد من الباحثين أساليب تنبؤ مختلفة يمكن تصنيفها إلى ستة أنواع رئيسية هي: (1) الإحصاءات الكلاسيكية (مثل الانحدار اللوجستي Logistic Regression (Chiessi et al., 2016), (Das et al., 2010), (Aiswarya et al., 2023)، وتحليل التمييز Discriminant Analysis (Yousef et al., 2020)، والانحدار الخطي Linear Regression (Ullah et al., 2022, p. 2)، الإحصاءات القائمة على المؤشرات (مثل: ترجيح الأدلة Weighting of evidence، والتحليل الاستدلالي Heuristic Analysis (3) التعلم الآلي (مثل: المنطق الضبابي Fuzzy Logic Systems (Pradhan, 2010)، آلات المتجهات الداعمة

Yousef et al., 2020)، أشجار الغابات Random Forest (4) الشبكات العصبية الاصطناعية Artificial Neural Networks (Nanehkaran et al., 2023)، (5) تحليل القرار متعدد المعايير Multi Criteria Decision Analysis (Afza et al., 2022) (6) الإحصاءات الأخرى، وقد أثبتت عدد من الدراسات فاعلية نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية في نمذجة القابلية للانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري مقارنة بالأساليب الإحصائية التقليدية (Nanehkaran et al., 2023).

وقد أجريت عدة دراسات سابقة درست الأخطار داخل اليمن وخارجة منها: دراسات أجرتها هيئة المساحة الجيولوجية والثروات المعدنية: قامت بدراسة (12) موقعًا تعرضت لانهيارات أرضية أو يُحتمل تعرّضها لانهيارات، وقدمت تقريرًا مفصلاً لكل موقع، تضمن تحديد الموقع وخصائصه الطبيعية والبشرية، وأسباب الانهيار، والأضرار الحاصلة أو المحتملة، إضافة إلى المعالجات، وتصنيف درجة الخطورة، وقد أجريت هذه الدراسات في أعوام مختلفة (2007م و 2010م و 2013م و 2020م و 2021م)، ونكرت أن أسباب الانهيارات تتمثل في: العمليات التكتونية، نوعية صخور المنطقة، وغزارة الأمطار، وشدة الانحدار، ومجاميع الكسور، والمسافات البينية الكبيرة بينها، إضافة إلى التعرية والتجوية، والاستغلال البشري، كما أشارت إلى استخدام مواد غير مناسبة أثناء دك الطريق، وشق الطرق ضمن مناطق سبق أن تعرّضت لانزلاقات، وعدم وجود جدران سائدة، وضعف

تصريف المياه عن الطرق الأسفلتية، ووجود طبقات طينية وتربة منقولة، وبقايا الانزلاقات الأرضية السابقة، وقد صُنِّفت جميع المواقع ضمن فئة الخطورة العالية جدًا، باستثناء طريق بيت عذاقة الذي صُنِّف ضمن فئة الخطورة العالية.

وتناولت دراسة ناجي، عادل حمود لطف، (2021م): الخصائص الجيولوجية والطبوغرافية لمنطقة الدراسة، وركزت على أقسام النقوس الرئيسة (المحدبة والمقعرة والمستقيمة)، ونسبة طول الطريق الذي يمر على كل نوع، وتوصلت إلى أن المنحدرات في منطقة الدراسة تتعرض لأخطار جيومورفولوجية (الانهيارات الأرضية) خاصة خلال موسم سقوط الأمطار، مما يؤدي إلى توقف الطريق.

أما دراسة: Bordbar Mojgan et al.(2022) تناولت النمذجة المكانية متعددة المخاطر عبر مجموعات التعلم الآلي والتقنيات الفوقية لكشف عن مجريات الأمور في منطقة كرمان شاة- أيران، وللوصول إلى خريطة الأخطار، أعدت خريطة لمناطق التي تعرضت للأخطار سابقة، إضافة إلى خرائط للعوامل المؤثرة فيها، والمتمثلة في: الارتفاع، ودرجة الانحدار، واتجاه الانحدار، والنقوس، والمسافة إلى الأنهار، والمسافة إلى الطرق، والمسافة إلى الصدوع، وكمية هطول الأمطار، والليثولوجيا، واستخدام الأرض، والنشاط الزلزالي، وأخيرًا، أنتجت خريطة الأخطار بهدف دعم متخذي القرار في تحقيق التنمية المستدامة.

مشكلة الدراسة:

تعاني مديرية مسور من تكرار حوادث الأخطار الجيومورفولوجية خلال فترات سقوط الأمطار نتيجة

لتضاريسها العالية وتكوينها الصخري المتتابع والمتفاوتة الصلابة، وانتشار القرى على القمم وعلى جوانب المنحدرات، وإقامة المدرجات الزراعية وشق الطرق الممهدة وسط المنحدرات لربط القرى ببعضها وبالمديريات المجاورة لها، مما جعلها عرضة للأخطار الجيومورفولوجية أهمها الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري، ونتج عنها خسائر مادية وبشرية، ومع تطور تقنيات الذكاء الاصطناعي الجيومكاني، أصبحت الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) أداة قوية للتنبؤ بهذه المخاطر نظرًا لقدرتها على معالجة البيانات الضخمة والمتعددة المصادر.

أهداف الدراسة:

هدفت الدراسة إلى بناء نموذج مكاني باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) للتنبؤ بأخطار الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري، وإنتاج خريطة القابلية لحدوثها في مديرية مسور بمحافظة عمران - اليمن، اعتمادًا على تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS).

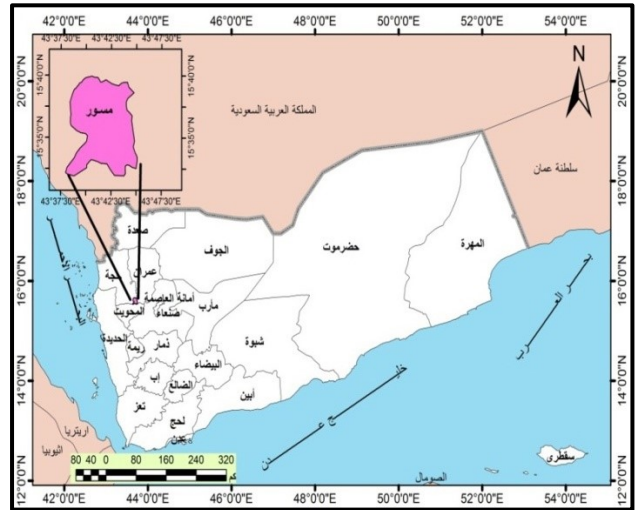
أهمية الدراسة:

تتمثل أهمية الدراسة بتوظيفها للشبكات العصبية الاصطناعية بالتكامل مع GIS للتنبؤ بمخاطر الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري نظرًا لقدرتها على معالجة البيانات الضخمة والمتعددة المصادر، وتبرز أهمية البحث أيضًا في كونه يطبق أنموذجًا متطورًا على منطقة تفتقر للدراسات الجيومورفولوجية، وإنتاج خرائط مكانية دقيقة تدعم متخذي القرار للتخفيف من آثار المخاطر الجيومورفولوجية المرتبطة كالانزلاقات الصخرية والتساقطات الصخرية والتعرية والحد منها.

منطقة الدراسة:

تقع منطقة الدراسة وسط المرتفعات الشمالية الغربية لليمن تتحصر فلكياً بين خطي طول (30 38 43) و (30 48 43) شرقاً ودائرتي عرض (0 32 15) و (30 39 15) شمالاً، وهي بهذا الموقع الفلكي تقع في الركن الجنوبي الغربي لمحافظة عمران وتتبعها إدارياً، يحدها من الشمال والغرب محافظة حجة ومن الجنوب محافظة المحويت شكل (1)، وتبعد عن مركز محافظة عمران (45) كم تقريباً مساحتها (132.63) كم²، وتتكون المديرية من (186) قرية و (12) عزلة، وقد بلغ عدد سكانها (48899) ألف نسمة عام 2025م حسب إسقاطات الجهاز المركزي للإحصاء، ومركز المديرية بيت عذاقة.

شكل (1): موقع منطقة الدراسة



المصدر: الخريطة الإدارية للجمهورية اليمنية

تتكشف في المنطقة صخور متتابعة من صخور الأساس (القاعدية) إلى تكوين عمران الجيرية (شكل 2)، وهي بمساحات ونسب متباينة، فصخور القاعدة المتمثلة في صخور بركانية متحولة وصخور رسوبية متحولة، وجرانيت وسيانيت وجابرو، والتي تعرضت لعمليات التحول نتيجة للأحداث التي

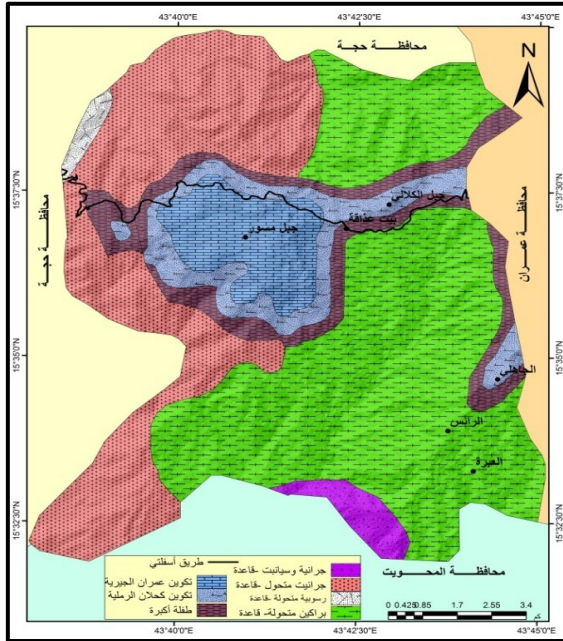
تعرضت لها، وهي تغطي معظم مساحة المنطقة إذ بلغت (101.64 كم²) بنسبة (76.64%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، تعلوها صخور طفلة أكبر وتغطي (11.62 كم²) بنسبة (8.76%)، وتعلو طفلة أكبر صخور تكوين كحلان الرملية (9.59 كم²) بنسبة (7.23%)، وصخور عمران الجيرية تظهر على القمم تغطي مساحة (9.78 كم²) بنسبة (7.37%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وقد مزقت المنطقة الصدوع حيث بلغ عددها (26) صدعاً (شكل 3)، وبلغ مجموع أطوالها (76.122 كم)، ويغلب عليها النوع الاعتيادي، وهي في اتجاهات متباينة، ويتباين الارتفاع في منطقة الدراسة من (998م) فوق مستوى سطح البحر إلى (3216م) على قمة بيت فايز الواقعة على جبل مسور، وقد صنفت الارتفاعات إلى خمس فئات (شكل 4)، بينما صُنِّفَت المنحدرات إلى سبع فئات حسب تصنيف (Yong, 1972, P173) (شكل 5)، وسيطرت على المنطقة المنحدرات الشديدة والشديدة جداً والجرفية بنسبة (82.6%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، مما جعل المنطقة أكثر عرضة للأخطار، وتمثل المنحدرات الدنيا بنسبة (16.98%)، وتتراوح معدلات التقوس بين (-66 و +73) (شكل 6)، يمثل المستقيم من (0-1) نسبة (44.22%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، ويمثل المقعر بنسبة (28.32%) أما المحذب فيمثل (27.77%)، وقد تكونت في المنطقة شبكة تصريف وصلت إلى الرتبة السادسة (شكل 7)، مما نشط التعرية على المنحدرات وبعّد جبل مسور خط تقسيم مياه باتجاه الشمال إلى وادي شرس واتجاه الجنوب إلى وادي لاعة والواديان تابعان لحوض وادي مور.

ومناخ منطقة الدراسة شبه جاف معتدل الحرارة، إذ يتراوح المعدل السنوي خلال الفترة من 1990-2025م بين (17-22°م) (شكل 8)، وأمطارها صيفية حيث تتلقى كمية أمطار متباعدة وقد بلغ معدل مجموع الأمطار خلال الفترة من 1990-2025م تراوح ما بين (373-1100 ملم) (شكل 9)، وللغطاء النباتي دورين الدور الأول حماية من الانهيارات والدور الثاني عمل مسبب لحدوثها إذ أنه كلما ارتفعت كثافة الغطاء النباتي قل وقوع الانهيارات الأرضية أو التعرية والعكس إذا تراجعت كثافة الغطاء النباتي، وتراوح قيمة مؤشر كثافة الغطاء النباتي (NDVI) Normalized Deference Vegetation Index في منطقة الدراسة بين (-0.016 - 0.41+) (شكل 10).

ويوجد في منطقة الدراسة (186) قرية تربط القرى ببعضها وبالمديريات المجاورة شبكة من الطرق الترابية (شكل 11).

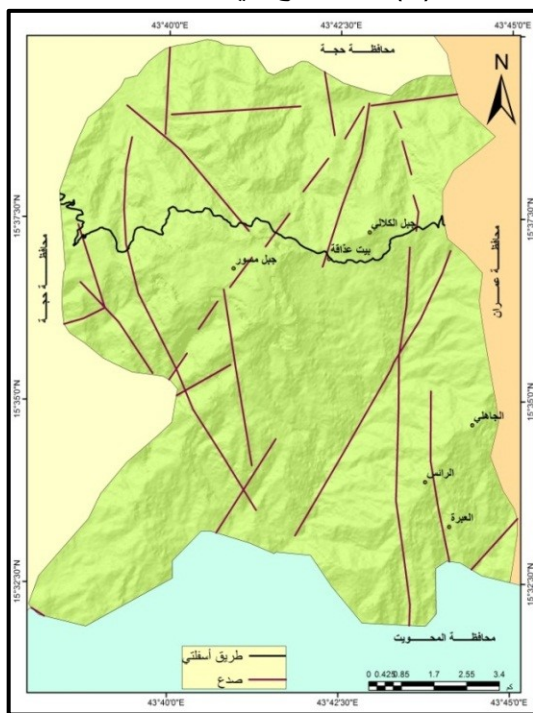
إن طبيعة المنطقة الجبلية وتكويناتها الصخرية المتباعدة الصلابة والأحداث الباطنية التي تعرضت لها جعلها عرضة للأخطار الجيومورفولوجية منها: الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري خاصة خلال موسم تساقط الأمطار، وتزداد الخطورة عند ارتفاع كمية التساقط المطري، وقد رُصد (48) موقعاً تعرضت لأخطار انزلاقات أرضية وتساقط صخري (شكل 12).

شكل (2): حده لمحة منطقة الدراسة



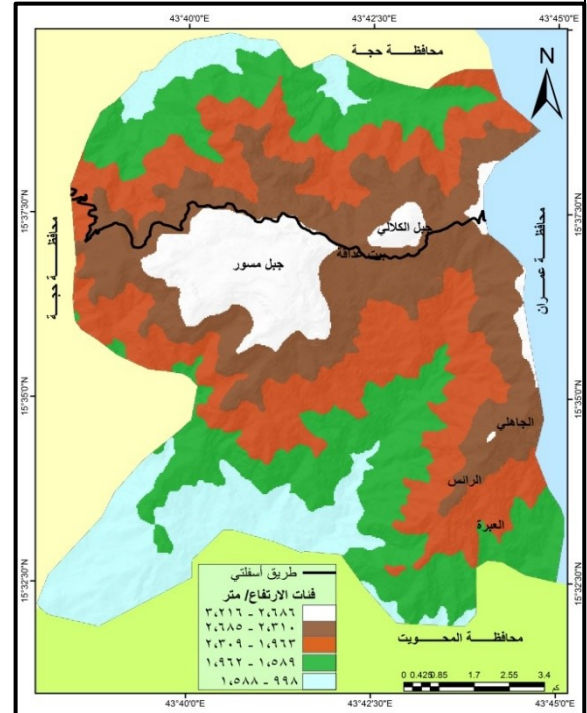
المصدر: Geological Map, Sheet Al- Hudavdah, 1:250000.

شكل (3): الصدوع في منطقة الدراسة



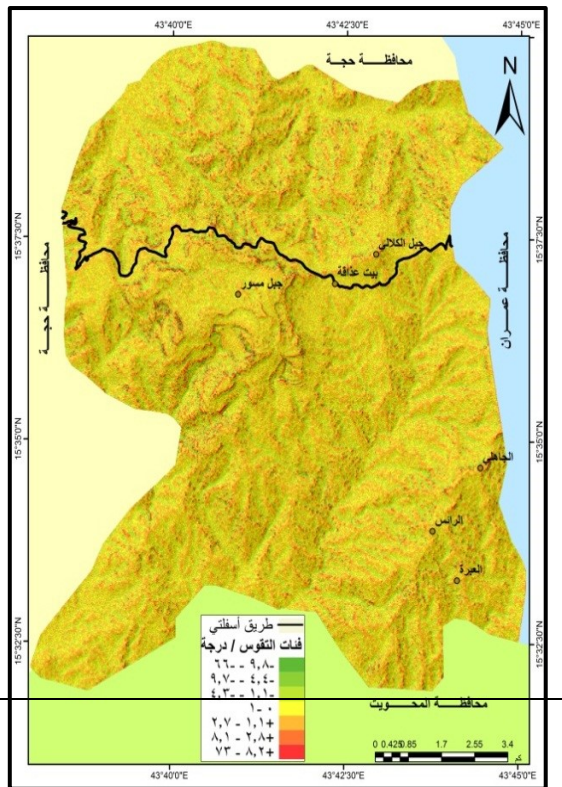
المصدر: الخريطة الجيولوجية، لوحة (15G) مقياس 1:250000

شكل (4): الارتفاعات في منطقة الدراسة



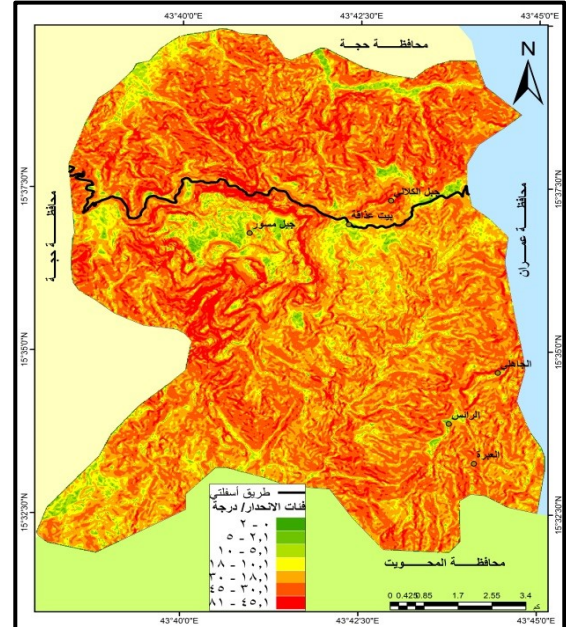
المصدر: نموذج الارتفاعات الرقمي (DEM) باستخدام برنامج (ARC GIS)

شكل (6): التقوس في منطقة الدراسة



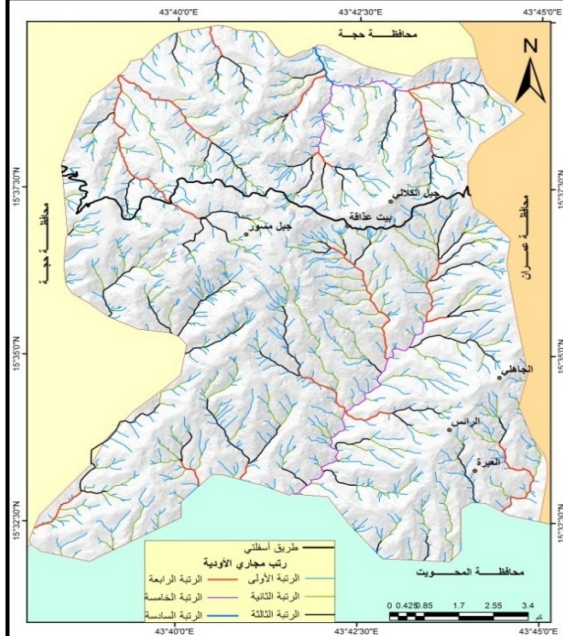
المصدر: نموذج الارتفاعات الرقمي (DEM) باستخدام برنامج (ARC GIS)

شكل (5): المنحدرات في منطقة الدراسة



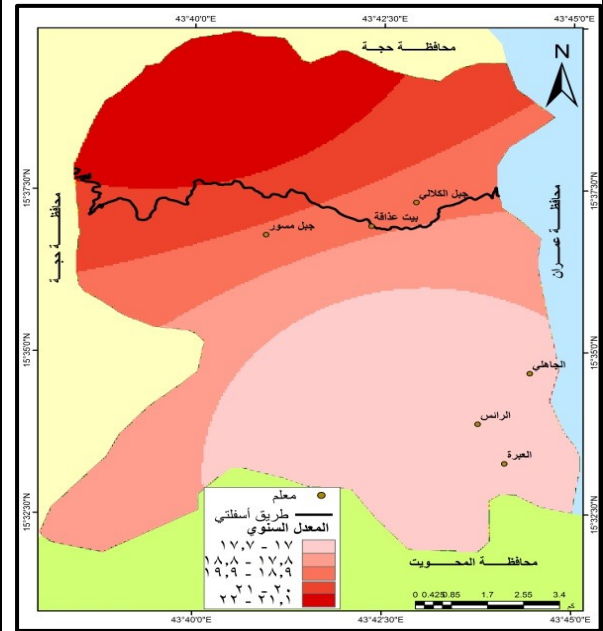
المصدر: نموذج الارتفاعات الرقمي (DEM) باستخدام برنامج (ARC GIS)

شكل (7): شبكة الأودية في منطقة الدراسة



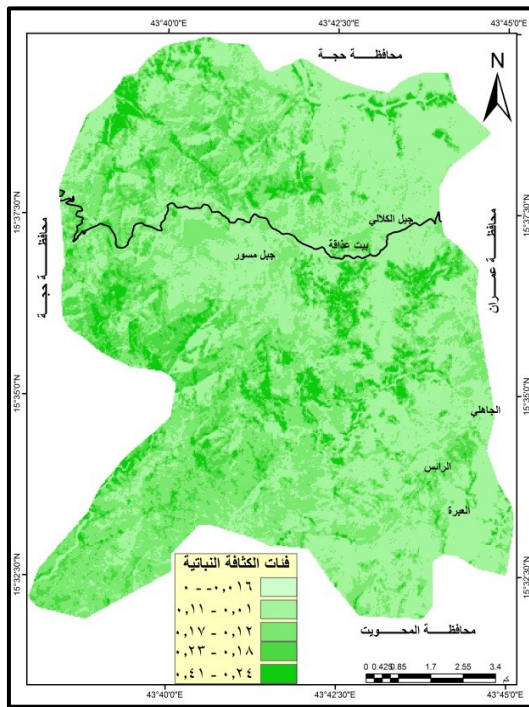
المصدر: نموذج الارتفاعات الرقمي (DEM) باستخدام برنامج (ARC GIS)

شكل (8): المعدل السنوي لدرجات الحرارة (مئوية)



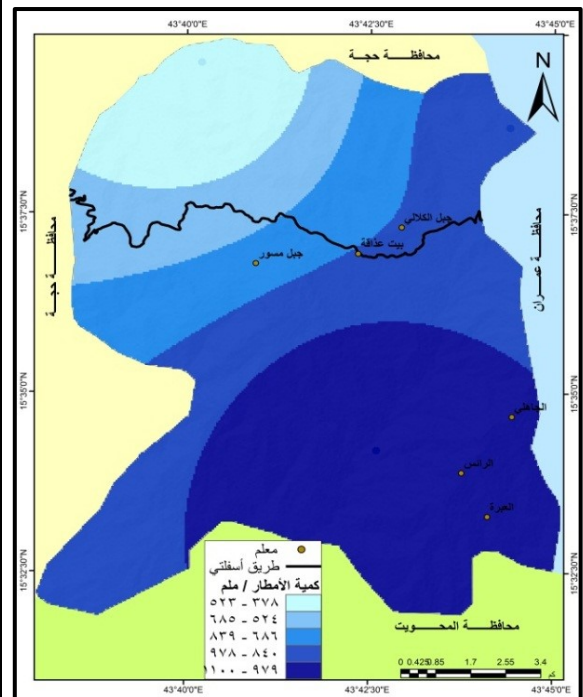
المصدر: بيانات وكالة ناسا (NASA)، الجهاز المركزي للإحصاء باستخدام برنامج (ARCGIS)

شكل (10): الغطاء النباتي



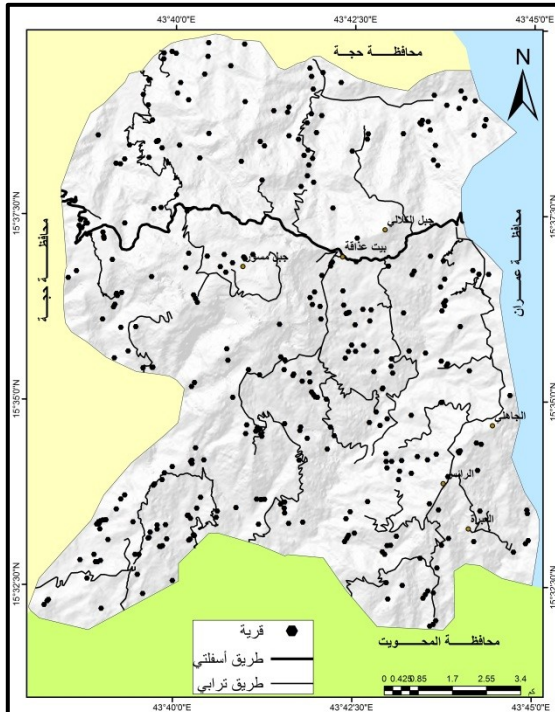
المصدر: مرئية فضائية (Landsat-9) باستخدام برنامج (ARCGIS)

شكل (9): كمية الأمطار (مم)



المصدر: بيانات وكالة ناسا (NASA)، الجهاز المركزي للإحصاء، باستخدام برنامج (ARCGIS)

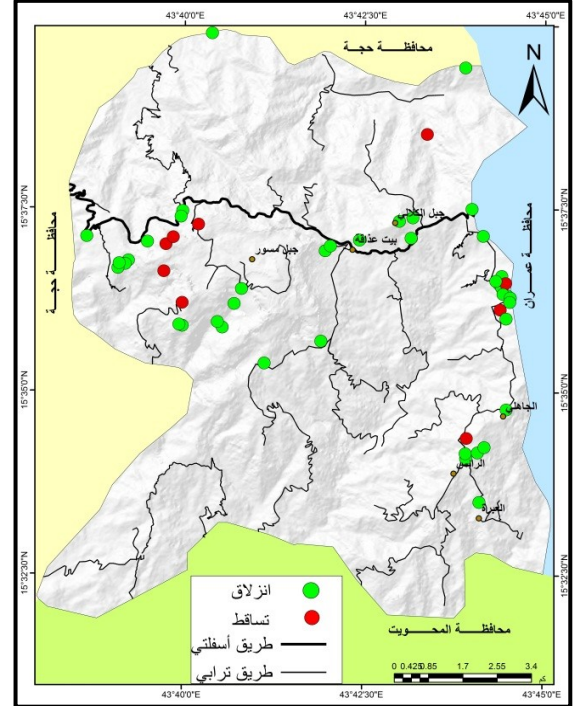
شكل (11): الطرق والقرى



المصدر: خريطة الطرق الصادرة عن المساحة والتخطيط العمراني

الخطية المعقدة (Nanehkaran et al. , 2023,) P 11) بين مختلف العوامل المؤثرة في حدوث الانزلاق والتساقط الصخري، تم تنفيذ النموذج باستخدام لغة البرمجة (Python)، تألفت بنية الشبكة من طبقة إدخال (Input layers) تمثل المعايير المؤثرة المستخدمة في الدراسة اثني عشر معيارًا، تلتها طبقتان مخفيتان (Hidden layers) تحتويان على (16 و 8) عقد عصبية على التوالي، إضافة إلى طبقة إخراج (Output layer) أحادية العقدة، وقد استُخدمت دالة التنشيط (ReLU) في الطبقات المخفية لتعزيز قدرة النموذج على تعلّم الأنماط غير الخطية لتقلل مشكلة Vanishing Gradient، في حين استُخدمت دالة (Sigmoid) في طبقة الإخراج لملاءمتها لمشاكل التصنيف الثنائي، إذ تنتج قيمًا احتمالية ثنائية تتراوح بين (0-1) (Uyanik et al., 2023, P7-8)، تعبر عن قابلية حدوث أو عدم حدوث الانهيارات الأرضية، وقد جرى تدريب النموذج باستخدام خوارزمية الانتشار العكسي (Back-propagation) لضبط الأوزان الداخلية للشبكة بشكل تكراري بهدف تقليل دالة الخطأ وتحسين دقة التنبؤ (Goodfellow et al., 2016, P171-204) ولما تتميز به من مرونة وقابلية للتكيف (Pham et al., 2020, P1271)، مع اعتماد خوارزمية التحسين (Adam) لتحسين كفاءة عملية التدريب وتسريع تقارب النموذج (Goodfellow et al., 2016, P308)، وباستناد إلى دالة الخسارة Binary Cross-Entropy، وقد أتاح هذا الإعداد للنموذج القدرة على تعلّم العلاقات غير الخطية المعقدة بين المعايير المدخلة وحدوث الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري .

شكل (12): مواقع حوادث الأخطار السابقة وتصنيفها



المصدر: العمل الميداني، وهيئة المساحة الجيولوجية

منهجية الدراسة وإجراءاتها

اعتمدت الدراسة على المنهج التحليلي الكمي لدراسة أخطار الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري باستخدام نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) نظرًا لقدرة النموذج على تمثيل العلاقات غير الخطية والمعقدة بين العوامل البيئية والجيومورفولوجية، مما يجعلها مناسبة لتحقيق أهداف الدراسة.

تمّ في هذه الدراسة بناء نموذج شبكة عصبية اصطناعية وتدريبه وتطويره Artificial Neural Network (ANN) من نوع التغذية الأمامية متعددة الطبقات Feed forward Multilayer Perceptron (MLPs) (Goodfellow et al. , 2016, P 168) لنمذجة قابلية المخاطر الجيومورفولوجية، وذلك نظرًا لقدرة هذا النوع من النماذج على تمثيل العلاقات غير

جمعت بيانات حوادث الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري من خلال العمل الميداني وتقارير هيئة المساحة الجيولوجية، وقُسمت بيانات العينات (Samples) إلى ثلاث مجموعات مستقلة، شملت بيانات التدريب (60% Training)، وبيانات الاختبار (20% Validation)، وبيانات التقييم (20%)، وقد نُفذت عملية التقسيم بصورة عشوائية لضمان حيادية النموذج وقابليته لإعادة إنتاج النتائج، واستُخدمت بيانات التدريب في ضبط أوزان النموذج، بينما تستعمل بيانات التحقق لمراقبة أداء النموذج أثناء عملية التدريب ومنع ظاهرة فراط التكيف (Overfitting) (Goodfellow et al., 2016, P113)، في حين تُخصص بيانات الاختبار لتقييم الأداء النهائي للنموذج على بيانات بصورة مستقلة، ويسهم هذا الإجراء في تحسين موثوقية النتائج ودقة التنبؤ المكاني، واستخدمت خوارزميات التصنيف الثنائي لتدريب النموذج للتنبؤ بحيث يكون التنبؤ إما بـ 1 يعني حدوث خطر انزلاق أو تساقط أو صفر يعني عدم حدوث أي خطر.

تم تدريب نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية عبر عدد ثابت من العصور التدريبية بلغ (100) عصر تدريبي (Epochs)، مع الاعتماد على بيانات التحقق (Validation) لمراقبة أداء النموذج أثناء عملية التدريب، ولم يتم تطبيق آلية الإيقاف المبكر (Early Stopping) (Goodfellow et al., 2016, P246)، إذ استمر التدريب حتى اكتمال عدد العصور المحدد مسبقاً وذلك لضمان استقرار عملية التعلم وتحقيق التوازن بين دقة التدريب وقدرة النموذج على التعميم.

اعتمدت عملية التقييم على مجموعة من المؤشرات الإحصائية شملت الدقة الكلية (Accuracy)، والاستدعاء (Recall)، والدقة الإيجابية (Precision)، ومعامل (F1) (Uyanik et al., 2023, P11-12)، إضافة إلى منحى الخصائص التشغيلية للمستقبل (ROC) ومساحة تحت منحى (AUC)، إذ تم حساب منحى (ROC) لتقييم القدرة التمييزية للنموذج، وقد استُخدمت القيم التنبؤية الناتجة عن النموذج لاحقاً في إنتاج خريطة القابلية الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري.

مصادر البيانات المستخدمة في الدراسة:

اعتمدت هذه الدراسة على منهجية متكاملة لدراسة أخطار الانزلاق والتساقط الصخري باستخدام نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية، وذلك من خلال ثلاث مراحل رئيسية:

- 1) جمع بيانات الأحداث الجيومورفولوجية المتطرفة اعتماداً على العمل الميداني ومراجعة التقارير الحكومية خلال الفترة من عام 1986 إلى 2025م.
 - 2) تحديد أهم العوامل المؤثرة بالاعتماد على مراجعة الأدبيات والدراسات السابقة ذات الصلة والعمل الميداني.
 - 3) نمذجة القابلية للمخاطر الجيومورفولوجية باستخدام نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، وهو نهج شائع في دراسات القابلية لأخطار الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري.
- حددت الدراسة (48) موقعاً شهدت أحداث أخطار سابقة، صنفت إلى (39) موقعاً انزلاقات أرضية و (9) مواقع تساقط صخري، إضافة إلى (76) موقعاً

التباين في التكوينات الصخرية واختلاف كل تكوين من حيث

صلابته ومقاومته لعمليات التعرية والتجوية التي تعمل بدورها على تفكيك الصخور وتهيئتها للحركة،

وخاصة تلك التي يتكرر حدوثها خلال فترات الأمطار، مما يمكن من تقييم المخاطر التي من المحتمل أن تتعرض لها المنطقة، إذ تم إدراج الليثولوجيا نظراً لاختلاف مقاومة الصخور للتجوية والتشقق وتُعد التكوينات الضعيفة أو المتشققة أكثر

عرضة للانزلاق والتساقط مقارنة بالصخور الصلبة

جدول (1) مصادر بيانات الدراسة والمعايير المستخدمة في نموذج (ANN)				
م	المعيار	المصدر	الدقة المكانية	السنة
1	الأمطار	بيانات وكالة ناسا (NASA)، الجهاز المركزي للإحصاء	نوع البيانات Vector	1990 – 2025
2	التكوينات الصخرية	الخريطة الجيولوجية هيئة المساحة الجيولوجية وشركة هونفر ، لوحة الحديدية	مقياس رسم 1:25000 0	1991
3	الانحدار	مشتق من (SRTM) DEM	30m	2000

لم تشهد حدوث انهيارات، وذلك بهدف تمثيل فئتي الانزلاق وعدم الانزلاق في عملية النمذجة، كما هو متبع في دراسات نمذجة القابلية، لاستخدامها في بناء قاعدة بيانات العينات المدخلة للنموذج.

وبالاستناد إلى مراجعة الأدبيات العلمية والدراسة الميدانية، اعتمد اثنا عشر معياراً تعدّ الأبرز في حدوث الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري، إذ تشير عدد من الدراسات إلى أن حدوث الانهيارات الأرضية يرتبط بتفاعل بين العوامل الجيولوجية والمناخية والجيومورفولوجية والهيدرولوجية والبيئية والبشرية المؤثرة في حدوث الأخطار، وعليه اعتمدت مجموعة من المعايير التي ثبت تأثيرها الإحصائي والمكاني في دراسات سابقة، وبما يتلاءم مع الخصائص الجيومورفولوجية لمنطقة الدراسة، وقد جُمعت هذه المعايير من مصادر مكانية متعددة، كما هو موضح في جدول (1).

تُعد الأمطار من المحفزات الرئيسة لحدوث الأخطار الجيومورفولوجية منها الانزلاق والتساقط، إذ يؤدي ارتفاع معدلات الهطول إلى زيادة تشبع التربة وتغلغل المياه داخل مسامات الصخور ووسط الفواصل والشقوق مما يضعف تماسكها فتتغلب الجاذبية على قوى التماسك فتتحرك، وتزيد غزارة الأمطار في المناطق الجبلية من احتمالية حدوث الانهيارات الأرضية (Biswakarma et al., 2020, P145) و (Saha et al., 2022, P10)، وتعدّ الأمطار العامل الأكثر أهمية في عدم استقرار المنحدر، في حين تضمنت العوامل الجيولوجية المتمثلة بالتكوينات الصخرية والصدوع من أهم العوامل المسببة لحدوث الانزلاق والتساقط الصخري وفي معرفة وتحديد مدى فاعلية العمليات الجيومورفولوجية، وذلك من خلال

جدول (1) مصادر بيانات الدراسة والمعايير المستخدمة في نموذج (ANN)				
م	المعيار	المصدر	الدقة المكانية	السنة
1	حرارة السطح	Landsat-9 (USGS)	30m	2025
2	رطوبة التربة	Landsat-9 (USGS)	30m	2025

والمتماسكة (Ayalew et al., 2005, P 22)، وتمثل الصدوع مناطق ضعف في الصخور إذ تؤدي إلى زيادة الشقوق والفواصل وتضعف تماسك الصخور، مما يساهم في عدم استقرار المنحدرات، وتُعزز احتمالية حدوث الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري في المناطق القريبة منها (Van Westen et al., 2008, P123)، كما أن كثافة الفواصل والشقوق والمسافة بينها محفزة في حدوث الانهيارات الأرضية (هيئة المساحة الجيولوجية، 2021م).

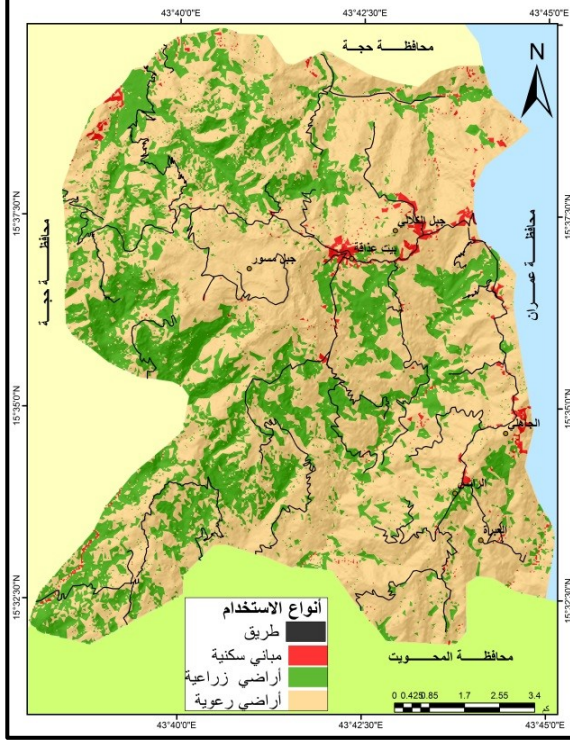
شملت العوامل الجيومورفولوجية الارتفاع، ودرجة الانحدار، ونقوس السطح التي اشْتُقت من نموذج الارتفاعات الرقمية (DEM) بدقة مكانية 30 مترًا، اعتمد الارتفاع نظرًا لتأثيره المباشر على الخصائص المناخية المحلية، وشدة التجوية، وتوزيع الأمطار مما ينعكس على استقرار المنحدرات، وقد أثبتت دراسات عديدة وجود علاقة بين التغير في الارتفاع وحدوث الانهيارات الأرضية، خاصة في البيئات الجبلية (Conforti et al., 2014, P242)، وتحدث الانهيارات الأرضية بشكل متكرر في المناطق ذات الانحدارات الشديدة والشديدة جدا والجرفية لذا فإن هذه المناطق أكثر عرضة للانهيارات الأرضية، وفي المقابل تكون

جدول (1) مصادر بيانات الدراسة والمعايير المستخدمة في نموذج (ANN)				
م	المعيار	المصدر	الدقة المكانية	السنة
4	الارتفاع	SRTM Digital Elevation Model (NASA)	30m	2000
5	الصدوع	الخريطة الجيولوجية هيئة المساحة الجيولوجية وشركة روبرتسون جروب ، لوحة (15G)	مقياس رسم 1:250000	1991
6	الشبكات المائية	مشتق من (SRTM) DEM	30m	2000
7	النقوس	مشتق من (SRTM) DEM	30m	2000
8	الطرق	المساحة والتخطيط العمراني	نوع البيانات Vector	2022
9	استخدام الأرض	Landsat-9 (USGS)	30m	2025
10	الغطاء النباتي	Landsat-9 (USGS)	30m	2025

المواقع ذات الانحدار المتوسط إلى المنخفض أكثر استقراراً نسبياً فيما يتعلق بحدوث الانهيارات الأرضية (Biswakarma et al., 2020, P146)، ويسهم تقوس السطح في التحكم في تركيز أو تشتت الجريان السطحي، إذ تزيد التقوسات المقعرة من تراكم المياه، مما يرفع من تشبع التربة ويزيد من قابلية الانزلاق، في حين ترتبط التقوسات المحدبة بانخفاض نسب التشبع (Saha et al., 2022, P9)، ويعد التقوس المحدب مصدر للانزلاق والتساقط الصخري، يهيمن التقوس المحدب على الجزء العلوي للمحدر والمستقيم وسط المحدر والمقعر أسفل المحدر، وتعكس شبكة التصريف المائية درجة تطورها إذ ترتبط القيم المرتفعة بزيادة التعرية، وتآكل قواعد المنحدرات مما يسهم في عدم استقرارها (Saha et al., 2022, P 9)، إضافة إلى ذلك أدخلت بيانات الطرق باعتبارها أحد العوامل البشرية المؤثرة على عدم استقرارية المنحدرات إذ تؤدي عمليات شق الطرق وقطع المنحدرات إلى إضعاف التوازن الطبيعي للمنحدرات وزيادة احتمالية حدوث الانزلاقات الأرضية (Ayalew et al., 2005, P23)، بينما أخرجت العوامل البيئية المتمثلة في الغطاء النباتي (NDVI)، ودرجة حرارة سطح الأرض (LST) (شكل 13)، ورطوبة التربة (NDMI) (شكل 14) واستخدامات الأراضي (شكل 15)، من مرئيات القمر الصناعي (Landsat -9) بدقة مكانية قدرها 30 متراً، يمثل (NDVI) مؤشر كثافة الغطاء النباتي، والذي يسهم في تعزيز استقرار المنحدرات من خلال تثبيت التربة وتقليل الجريان السطحي، في حين ترتبط القيم المنخفضة بارتفاع قابلية الانزلاق والتساقط (Van Westen et al., 2008, P 125).

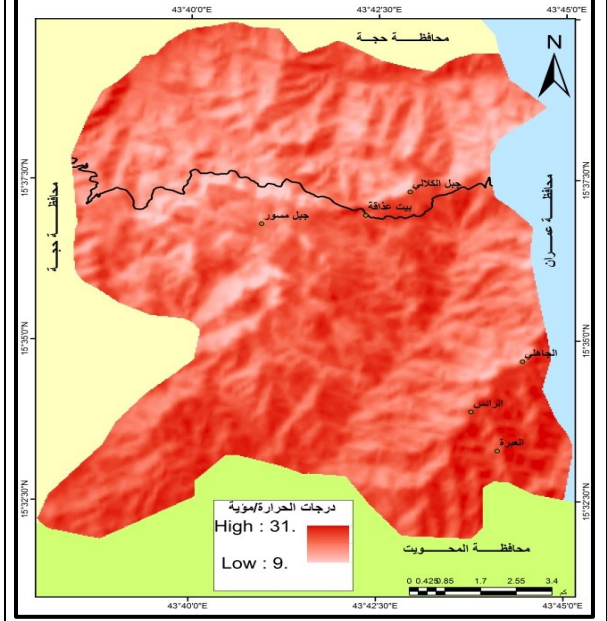
فالمناطق الجرداء أكثر عرضة لانهيارات الأرضية من المناطق ذات الأشجار الكثيفة، كما تُعد إزالة الأشجار عاملاً أساسياً آخر يسبب الانهيارات الأرضية، ويساهم الغطاء النباتي وخاصة الأشجار الخشبية الكبيرة ذات الجذور الطويلة في تحسين استقرار المنحدرات (Saha, et al, 2023, p10)، وتؤثر استخدامات الأراضي وتغطيتها على عدم استقرار المنحدرات من خلال إزالة الغطاء النباتي والرعي الجائر أو تعديل السطوح الطبيعية، ومع التوسع العمراني السريع في المناطق الجبلية، تتسارع وتيرة الأنشطة الإنشائية والتنموية مما يجعل المنحدرات عرضة للانزلاق والتساقط (Biswakarma et al., 2020, P 147)، و (Van Westen et al., 2008, P 125)، وتؤثر درجة حرارة سطح الأرض (LST) على معدلات التبخر ورطوبة التربة، كما يعكس التباين الحراري الذي قد يسهم في عمليات التجوية وتغير الخصائص الفيزيائية للتربة والصخور، وتم إدراج (NDMI) لتمثيل التغيرات المكانية في محتوى رطوبة التربة، والتي تُعد عاملاً مؤثراً في تقليل استقرار المنحدرات خاصة خلال فترات الهطول المطري (Van Westen et al., 2008, P 125).

شكل (15): استخدام الأرض



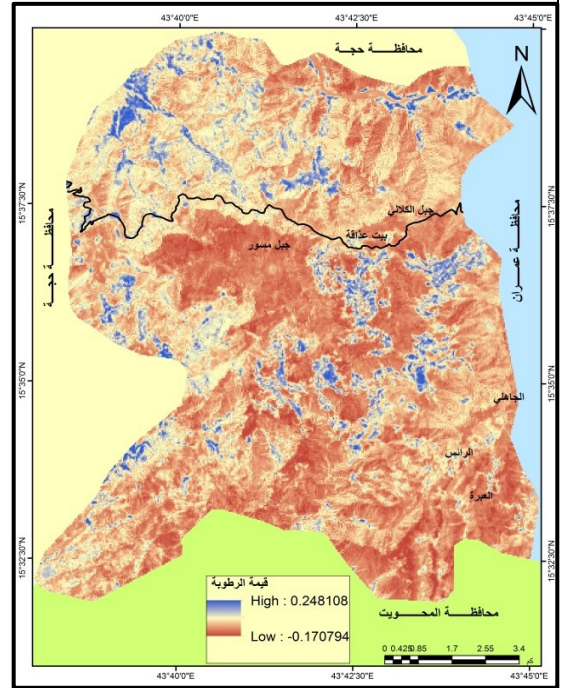
المصدر: مرئية فضائية (Landsat-9) باستخدام برنامج (ARCGIS)

شكل (13): حرارة السطح



المصدر: مرئية فضائية (Landsat-9) باستخدام برنامج (ARCGIS)

شكل (14): رطوبة التربة



المصدر: مرئية فضائية (Landsat-9) باستخدام برنامج (ARCGIS)

وبناءً على ما سبق اعتمدت هذه المعايير كمداخلات لنموذج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) نظراً لقدرتها على تمثيل التأثيرات المتداخلة والمعقدة للعوامل المؤثرة في حدوث الانزلاقات والتساقط الصخري، بما يسهم في تحسين دقة التنبؤ وإنتاج خريطة موثوقة لقابلية الأخطار.

وبعد جمع البيانات من مصادرها المختلفة، أُعدت قاعدة بيانات مكانية متكاملة لجميع المعايير المؤثرة في أخطار الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري، وقبل إدخال البيانات إلى نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية، جرى توحيد جميع الطبقات الموضوعية من حيث نظام الإحداثيات الجغرافية، كما أُعيد أخذ

له من أحداث باطنية، وقد رُصد (18) انزلاقاً وقعت على صخور طفلة أكبر، كما أن الانزلاقات تتكرر على صخور كحلان الرملية لقلة صلابتها وانتشار الفواصل فيها، وقد تم رصد (7) مواقع حصل بها انزلاق .

2- الصدوع والفواصل: نتيجة للحركات التكتونية التي تعرضت لها المنطقة، تكوّنت عدة صدوع، بلغ عددها (26) صدعاً (شكل 3)، منها سبعة صدوع رئيسة، أطولها صدع الناصرة - الموير بطول (10.293 كم)، يليه صدع ثامر القاز بطول (9.593 كم)، وصدع وادي بني علي بطول (8.270 كم)، وصدع العبرة ثويب بطول (4.346 كم)، وقد نتج عن هذه الصدوع تعقّد في المظهر التضاريسي؛ إذ ارتفع جبل مسور وسط المنطقة، وانخفض الجزء الشمالي والجنوبي، مع سيادة المنحدرات الشديدة والشديدة جداً والجرفية. أما الفواصل فتبين وجودها على مختلف أنواع الصخور، إلا أنها أكثر كثافة على الحافات الصدعية، كما في حافة جبل مسور (صورة 1) وحافة جبل الجاهلي، لتأثرها بتكون الصدع، وقد أسهمت هذه الفواصل في حدوث الانزلاقات والتساقط الصخري؛ نتيجة نشاط التجوية وتسرب مياه الأمطار عبر الفواصل، تضعف قوى التماسك بفعل التشبع بالمياه، فتغلب قوى الجاذبية، وتتحرك الكتل الصخري على المنحدر. وتزداد الخطورة عند تباعد المسافة بين الفواصل، حيث تكون الكتل المنفصلة كبيرة الحجم (المساحة الجيولوجية، 2021م)، (صورة 2).

العينات (Resampling) لتصبح جميعها بدقة مكانية موحّدة مقدارها 30*30 متر، وذلك لضمان التوافق المكاني بين البيانات، ونظراً لاختلاف نطاق القيم بين المعايير المختلفة، ولتقادي تأثير القيم الكبيرة التي قد تؤدي إلى انحياز عملية التعلم داخل الشبكة العصبية، طُبقت عملية التطبيع (Normalization) على جميع المتغيرات (Variables)، بحيث أصبحت القيم محصورة ضمن المدى (0-1) (Haykin, 2009, P296) و (Uyanik et al., 2023, P7)، وقد أُستخدِمت طريقة (Min-Max Scaling) للبيانات المستمرة، في حين مُثلت البيانات الفئوية باستخدام أسلوب الترميز الثنائي (One-Hot Encoding)، وبعد استكمال هذه الخطوات، أصبحت البيانات جاهزة للإدخال إلى نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية وبناء النموذج التنبؤي.

العوامل المؤثرة في الأخطار:

تؤثر في الانزلاقات والتساقط الصخري في منطقة الدراسة مجموعة من العوامل الطبيعية والبشرية حيث لا تعمل هذه العوامل منفردة وإنما تتداخل عدة عوامل لحدوث الخطر، وأهم تلك العوامل الأكثر تأثيراً كالاتي:

1- التكوينات الصخرية: تتكشف في المنطقة صخور متتابعة من صخور الأساس (القاعدية) إلى صخور عمران الجيرية (شكل 2)، وهي متباينة الصلابة، ويكثر تواجد الفواصل عليها، إذ تنشط التجوية وسط الفواصل، وخلال موسم الأمطار تتسرب المياه إلى الفواصل ومسامات الصخور، فتضعف قوى التماسك وتحدث الحركة. وقد تبين خلال مطابقة خريطة الأخطار السابقة مع الخريطة الجيولوجية أن أكثر الأخطار حدثت على الصخور ضعيفة المقاومة، والمتمثلة في صخور طفلة أكبر نتيجة لما تعرّضت

4- المنحدرات: يُعد الانحدار من العوامل الرئيسية المسببة للانزلاق والتساقط، ويوضح (شكل 5) و (جدل 2) سيادة فئات المنحدرات الشديدة والشديدة جدًا والجرفية، إذ تمثل نسبة (82.6%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وهذا يشير إلى ارتفاع احتمالية تعرضها لأخطار الانزلاق والتساقط الصخري، وتُعد المنحدرات التي تزيد درجة انحدارها على (80°) أكثر قابلية لحدوث التساقط، نظرًا لسرعة حركة الكتل الصخرية، حيث تستقر بعض الكتل أسفل المنحدر، وعند تعرضها للتعرية تبدأ بالحركة، كما في الحافة الغربية وحافة جبل مسور الشمالية، أما المنحدرات التي تزيد درجة انحدارها عن (18°) فتكون قابلة للانزلاقات الأرضية، وتزداد هذه القابلية إذا تجاوزت (30°) حيث ترتفع سرعة الحركة بزيادة درجة المنحدر، مما يعرض المساكن والمدرجات الزراعية على طول المنحدر للدمار، كما في بيت الكشري (صورة 3)، في حين تمثل فئات المنحدرات الدنيا، التي تتراوح درجات انحدارها بين (0-18°)، نسبة (17.4%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وهي مناطق أكثر أمانًا من خطر الانزلاق والتساقط.

جدول (2): فئات الانحدار ومساحة ونسبة كل فئة

م	فئات الانحدار (درجة)	وصف المنحدر	المساحة/ كم ²	النسبة %
1	0-2	مستوي	0.51	0.4
2	2-5	خفيف	1.52	1.1
3	5-10	متوسط	5.4	4.1
4	10-18	متوسط الشدة	15.6	11.8
5	18-30	شديد	44.5	33.6
6	30-45	شديد جدا	52.1	39.3
7	أكثر من 45	جرفي	13	9.7
		الإجمالي	132.63	100

المصدر: شكل (5).

صورة (1): كثافة الفواصل على الصخور الجيرية (حافة جبل مسور)



صورة (2): تساقط كتل صخرية كبيرة الحجم نتيجة لتباعد الفواصل



المؤثرة في حدوث الأخطار الجيومورفولوجية، بوجه عام، وفي الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري بوجه خاص؛ نظرًا لارتباطه بدرجات الانحدار وشدتها، وزيادة فاعلية عمليات التعرية (العتابي، 2021م، ص 856)، وتتباين منطقة الدراسة في الارتفاع، إذ يتراوح بين (998 - 3216م) فوق مستوى سطح البحر، بفارق ارتفاع يبلغ (2218م) (شكل 4)، وترتبط الخطورة بزيادة الارتفاع، خاصة عند تلازمه مع المنحدرات الشديدة والشديدة جدًا والجرفية، إضافة إلى وجود صخور ضعيفة المقاومة أو صخور تتخللها الفواصل والشقوق، كما في حافات جبل مسور وحافة جبل الجاهلي وجبل الكلاي وحافة العبرة.

الجاهلي وحافات جبل مسور، وتُعد مصدرًا للانزلاق والتساقط.

صورة (3): انزلاق صخور رملية على المدرجات الزراعية (بيت الكشري)



جدول (3): فئات التقوس ومساحاتها ونسبها

الرتبة	فئات التقوس	وصف التقوس	المساحة/ كم ²	النسبة %
1	- 9.8 - 66	مقعر	0.31	0.2
2	- 4.4 - 9.7	مقعر	3.16	2.4
3	- 1.1 - 4.3	مقعر	33.89	25.6
المجموع المقعر			37.36	28.2
4	1+ - 0	مستقيم	58.52	44.1
5	- 1.1 + 2.7	محدب	28.14	21.2
6	- 2.8 + 8.1	محدب	8.0	6.0
7	- 8.2 + 73	محدب	0.61	0.5
المجموع المحدب			36.75	27.7
إجمالي مساحات الفئات ونسبها			132.63	100

المصدر: شكل (6)

6- شبكة الأودية: توجد في منطقة الدراسة شبكة مجاري الأودية، تصل رتبته إلى الرتبة السادسة (شكل 7)، وتمتلك هذه الأودية قدرةً على النحت ونقل كميات كبيرة من التربة والفئات الصخري خاصةً عند تعرض المنطقة لزخات مطرية شديدة؛ إذ تعمل على تعميق مجاريها وتوسيعها وسط المنحدرات التي تغطيها ركامات مختلطة، مما يعرض جوانب المجرى للانزلاق، كما تقوم بتوسيع مجاريها أسفل المرتفعات على حساب الأراضي الزراعية، وتُفَوِّض المنحدر من أسفل، كما في وادي بني علي (صورة 4).

5- التقوس: من خلال (شكل 6) و(جدول 3) يتضح وجود ثلاث مجموعات للتقوس. تمثل المجموعة الأولى المنحدرات المقعرة بنسبة (28.2%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وترتبط بالجزء السفلي من المنحدر، نتيجة تعرضها لتعرية شديدة بفعل تركيز المياه القادمة من أعلى المنحدرات وتكون الأودية مجاريها عليها، وهي مناطق ترسيب؛ إذ تتركز أغلب الأراضي الزراعية في هذه الأجزاء، كما في وادي بني علي ووادي مسور، أما المجموعة الثانية فهي المنحدرات المستقيمة، وتمثل نسبة (44.1%)، ويُعزى ارتفاع هذه النسبة إلى تعرض المنطقة لحركات رفع وتصدعات وعمليات تعرية شديدة، وتوجد وسط المنحدرات، وقد أُقيمت على بعض أجزائها المدرجات الزراعية، كما في بيت الكشري والعبرة، أما المجموعة الثالثة فهي المنحدرات المحدبة، وتمثل نسبة (27.7%)، وترتبط بقمة المنحدر، كما في حافة

9- كثافة الغطاء النباتي: يتنوع الغطاء النباتي في منطقة الدراسة ما بين حشائش حولية وشجيرات وأشجار معمّرة تتركز في بطون الأودية، وتتراوح الكثافة النباتية بين (-0.016- 0.41) (شكل 10)، ويلاحظ أنه كلما انخفضت الكثافة النباتية واقتربت القيم من (-1)، ازداد خطر الانزلاق والتساقط، بينما يقل الخطر كلما ارتفعت كثافة الغطاء النباتي واقتربت القيم من (1)، وتظهر أعلى كثافة للغطاء النباتي أسفل المرتفعات، كما في عزلة وادي عيال علي (صورة 5) ، وعلى جوانب مجاري الأودية الرئيسية في وادي عيال علي، وادي قلاب، وادي حجلة، وقد بيّنت الدراسة الميدانية أن أكثر الأجزاء التي حدثت فيها الانزلاقات هي المناطق ذات الكثافة النباتية المنخفضة (صورة 6).

صورة (5): النبات الطبيعي في عزلة وادي عيال علي



صورة (6): انزلاق على منحدر خالي من الغطاء النباتي



صورة (4): تطور مجرى الوادي أسفل المنحدرات



7- الأمطار: تراوحت كمية الأمطار الساقطة على منطقة الدراسة ما بين (387-1100 ملم) (شكل 9)، وتتباين هذه الكمية من شهر إلى آخر إذ تُسجّل أعلى معدلات هطول الأمطار في شهر أغسطس بمتوسط بلغ (240 ملم)، وبينما يعدّ شهر يناير أقلّ الأشهر مطراً بمتوسط بلغ (20 ملم)، وتتدفق كمية الأمطار الساقطة على منطقة الدراسة عبر مجاري الأودية، ونظراً للارتفاع العالي والانحدار الشديد جداً والجرفي الذي يغلب على منطقة الدراسة، فإن حركة السيول تكون سريعة، مما يؤدي إلى تنشيط التعرية المائية وحدوث الانزلاق والتساقط الصخري، وقد رُصد (7) انزلاقات عام 2021م، وقعت عقب سقوط الأمطار.

8- حرارة السطح: تسهم حرارة السطح في تنشيط التجوية الفيزيائية وزيادة نشاط التعرية نتيجة لجفاف التربة وموت النبات، ومن خلال الشكل (13) يتضح أن حرارة السطح في منطقة الدراسة تتباين بين (9 - 31°م)، حيث تسجل درجات حرارة أقل على قمة جبل مسور وقمة جبل الجاهلي والمنحدرات المتجهة نحو الشمال والشمال الغربي، كما في بيت سعد صلاح وبيت رباح، بينما ترتفع درجات الحرارة أسفل المرتفعات والمنحدرات المتجهة نحو الجنوب والجنوب الشرقي، كما في بني سعدي وشرق الرانس والعبرة.

إلى الإخلال بتوازن المنحدرات، ونتج عن ذلك حدوث الانزلاقات الأرضية، خاصة عقب سقوط الأمطار، ولاسيما عند شق الطريق في صخور طفلة أكبر (صورة 7)، أو عند شق الطريق على ركام المنحدرات كما في طريق الرئس (صورة 8)، كما أن عدم إنشاء قنوات تصريف يسهم في زيادة احتمالية حدوث الانزلاق، كما لوحظ في الطريق الأسفلتي.

صورة (7): انزلاق على صخور طفلة أكبر (طريق الرئس)



صورة (8): انزلاق ركام المنحدرات



ج- الزراعة: أقام الإنسان اليمني منذ القدم المدرجات الزراعية للحفاظ على التربة واستغلالها في الزراعة، وتمثل الأراضي الزراعية (30.3%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة. إلا أن إهمال هذه المدرجات أدى إلى تعرض جدرانها للتهدم وانجراف التربة،

10- استخدام الأرض: يمارس الإنسان بعض الأنشطة، مثل: شق الطرق، والرعي، والزراعة، والتجوير، والبناء بطرق عشوائية، مما كان لها أثر غير إيجابي في حدوث الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري، ومن أهم الأنشطة التي يمارسها الإنسان في منطقة الدراسة (شكل 15) والمؤثرة على أخطار الانزلاق والتساقط الصخري ما يأتي:

أ- الطرق: تمثل مساحة (0.5%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، إذ يوجد طريق أسفلتي واحد يربط المديرية بمحافظة عمران ومحافظة حجة، ويبلغ طوله في منطقة الدراسة (16.342 كم)، إضافة إلى شبكة طرق ترابية تصل بين القرى، ويبلغ مجموع أطوالها (127 كم) (شكل 11)، وقد شُقت هذه الطرق وسط المنحدرات دون إقامة حوائط إسنادية، مما أدى ب- البناء: يمثل الاستخدام السكاني نسبة (2.8%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، ويُعد من أهم الأنشطة، بعد الطرق، المؤثرة في حدوث الانزلاق والتساقط، وكان الإنسان اليمني في الماضي يختار مكان سكنه بعيداً عن الأخطار، فيبني على القمم أو على المساطب الصخرية وسط المنحدرات ويتجنب أقدام المنحدرات، إلا أنه مع زيادة عدد السكان، زحف البناء باتجاه أقدام المنحدرات (صورة 9)، إضافة إلى اختيار المواقع المرتفعة عن أخطار السيول، كما في وادي بني علي، أو قام بتسوية السطح غير آبه بالأخطار كما في بيت عذاقة (صورة 10)، أو استخدم المتفجرات لتفتيت الصخور وتوسعة الكهوف كما في قرية الجروف، مما زاد من احتمالية حدوث الانزلاقات والتساقط الصخري.

خاصة المدرجات التي أقيمت على المنحدرات التي تزيد درجة انحدارها عن (20°) مما يجعلها أكثر عرضة للانزلاق، كما حصل في بيت الكشري (صورة3).

د- الرعي: يعد الرعي الجائر من الأنشطة المؤثرة على الانزلاق والتساقط الصخري؛ إذ يؤدي إلى تدهور الغطاء النباتي، الذي يُعد عاملاً مهماً في حماية المنحدرات من التعرية والانهياريات، حيث تعمل جذور النباتات على تثبيت التربة والفتات الصخري، وقد بينت الدراسة الميداني أن أكثر الأخطار السابقة حدثت على المنحدرات الخالية من الغطاء النباتي، كما في الكلالي والرأس والجروف، وتمثل الأراضي الرعوية نسبة (66.4%) من مساحة منطقة الدراسة.

صورة (9): زحف البناء باتجاه المنحدر (العبرة)



صورة (10): انزلاق في بيت عذاقه



11- رطوبة التربة: يتبين من الشكل (14) أن مؤشر رطوبة التربة يتراوح بين (0.25 - 0.17)، ويتركز بشكل أكبر على مجاري الأودية وأسفل جبل مسور في بيت يحي زيد وحجلة، كما توجد في بيت سعد صلاح والحافة وجدم حميد، وعند مطابقة الشكل مع شكل الأخطار السابقة (شكل 12) نلاحظ عدم وجود تطابق مكاني مباشر في بعض المناطق، حيث تظهر بعض الانزلاقات في مناطق ذات قيم منخفضة من مؤشر الرطوبة، ويعزى ذلك إلى أن المؤشر يعكس الرطوبة السطحية و يتأثر بالغطاء النباتي، في حين ترتبط الانزلاقات برطوبة الطبقات العميق، وتفاعل عدة عوامل أخرى.

نتائج الدراسة ومناقشتها:

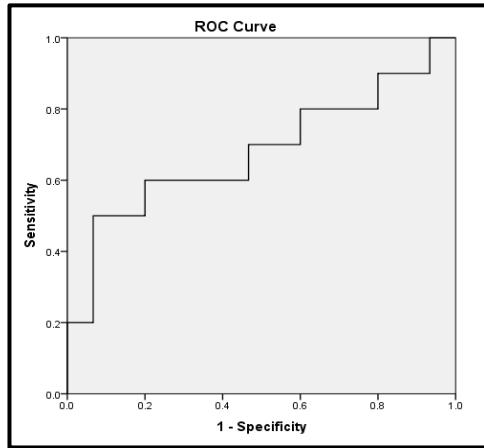
تقييم أداء نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) المستخدم في نمذجة المخاطر الجيومورفولوجية في مديرية مسور-عمران باستخدام مجموعة من المؤشرات الإحصائية المعتمدة في دراسات التعلم العميق المكانية.

أظهرت نتائج تقييم أداء نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية كفاءة تنبؤية مقبولة، حيث بلغت قيمة الدقة الكلية (0.72) (Accuracy)، مما يشير إلى قدرة جيدة للنموذج على تصنيف المناطق المعرضة وغير المعرضة لمخاطر الانزلاق والتساقط الصخري، كما بلغت قيمة الدقة الإيجابية (0.714) (Precision)، وهو ما يعكس كفاءة النموذج في تقليل حالات التنبؤ الخاطئ بالمناطق الخطرة.

سجل مؤشر الاستدعاء (Recall) قيمة (0.50)، مما يدل على أن النموذج تمكن من اكتشاف نصف

الجيومورفولوجي العالي ومحدودية بيانات الأحداث التاريخية، وبناءً على ذلك، يمكن اعتبار نموذج (ANN) المستخدم مناسباً لأغراض التنبؤ المكاني وتحديد مناطق الخطورة، مع إمكانية تحسين أدائه مستقبلاً من خلال زيادة حجم العينة وتحسين دقة البيانات المكانية المستخدمة.

شكل (16): منحنى ROC لتقييم أداء نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN)



المصدر : شكل 17

بعد عملية المعالجة أظهرت النتائج أن الطبقات المخفية 2 أسهمت في تقليل نسبة الخطأ (RMSE) إلى أدنى مستوياتها، بالإضافة إلى أن قدرة الشبكة على تصنيف نقاط العينة في مرحلة الاختبار (20%) أثبتت دقة النموذج في تمثيل الواقع الجيومورفولوجي لمديرية مسور.

وقد انعكس هذا الأداء الإحصائي على النتائج المكانية، إذ أنتجت خريطة القابلية للتعرض لمخاطر الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري التي أظهرت توزيعاً مكانياً منطقياً ومتسقاً لمناطق الخطورة، لا سيما في المواقع التي تتقاطع فيها المعايير الجيولوجية والجيومورفولوجية والهيدرولوجية والبشرية المؤثرة، ويؤكد هذا الترابط بين منحنى (ROC) وخريطة القابلية إمكانية الاعتماد على النموذج في دعم التخطيط المكاني وإدارة المخاطر، مع الأخذ في

حالات المخاطر الفعلية، ويُعزى ذلك إلى الطبيعة المعقدة للظواهر الجيومورفولوجية وتداخل العوامل البيئية المؤثرة، إضافة إلى محدودية حجم العينة وعدم توازنها.

بلغ مؤشر (0.588) (F1-score) وهو ما يعكس توازناً مقبولاً بين مؤشري (Precision) و (Recall).

أظهر منحنى خصائص التشغيل المستقبلية (ROC) شكلاً متدرجاً يعود إلى استخدام بيانات نقطية وعدد محدود من قيم العتبة (Thresholds)، وهو أمر شائع في النماذج المعتمدة على البيانات المكانية. تم حساب منحنى (ROC) من خلال مقارنة القيم الاحتمالية الناتجة عن نموذج الشبكة العصبية مع مواقع الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري الحقيقية، وذلك عبر تطبيق مجموعة من العتبات المختلفة وتحويل القيم المستمرة إلى قرارات ثنائية، وعند كل عتبة حُسب معدل الإيجابيات الحقيقية (TPR) ومعدل الإيجابيات الكاذبة (FPR) (Uyanik et al., 2023,P11-12).

بلغت قيمة المساحة تحت منحنى (ROC) (0.68) (AUC) مما يشير إلى دقة تنبؤية جيدة، ويعكس منحنى (ROC) شكل (16) الأداء التمييز للنموذج، حيث يُظهر منحنى متدرجاً (Stepwise) أعلى من خط العشوائية، وهو سلوك متوقع في نماذج التصنيف المعتمدة على عينات مكانية محدودة وقيم احتمالية مستمرة (Fawcett, T.,2006, P 863) و (Flach, P., 2016,P 1)، مما يشير إلى قدرة تمييزية متوسطة ومقبولة علمياً للنموذج على التمييز بين المناطق المعرضة وغير المعرضة للمخاطر الجيومورفولوجية خاصة في المناطق الجبلية ذات التعقيد

جدول (4) التوزيع المساحي لفئات خريطة القابلية للأخطار

قيمة الفئة	وصف الفئة	المساحة/ كم ²	النسبة %
-0.0023 - 0.15	منخفضة جدًا	32.97	24.86
0.16 - 0.35	منخفضة	33.79	25.47
0.36 - 0.56	متوسطة	25.5	19.23
0.57 - 0.77	عالية	20.55	15.50
0.78 - 1	عالية جدًا	19.82	14.94
المجموع		132.63	100

من خلال شكل (17) وجدول (4) تبين الآتي:

• مناطق ذات قابلية منخفضة جدًا للأخطار:

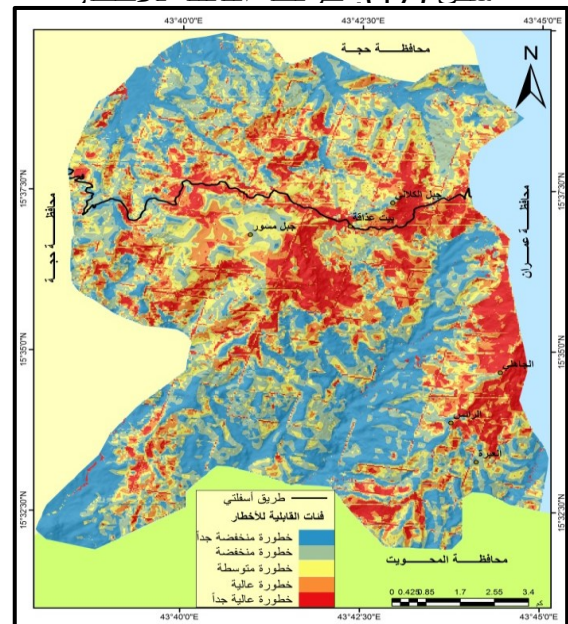
تشغل نسبة (24.86%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وتمثل مناطق تتمتع باستقرار جيومورفولوجي مرتفع، إذ تنخفض فيها احتمالية حدوث الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري إلى أدنى مستوياتها، ويُستثنى من ذلك بعض المواقع المحدودة المجاورة لمجاري الأودية، التي قد تتعرض لعمليات التعرية الناتجة عن توسع المجاري المائية. وتتميز هذه المناطق بسيادة المنحدرات المستوية إلى متوسطة الانحدار (0° - 10°)، تتكون من صخور قاعدية متماسكة، وتغطيها تربة زراعية مستقرة، إضافة إلى وجود غطاء نباتي جيد يسهم في تعزيز استقرار المنحدرات والحد من عمليات الانجراف، وتنتشر هذه الفئة في عدة مواقع من منطقة الدراسة، ولا سيما في بني العري، وبيت ثيوب، وقارة سويد، كما تغطي أغلب مساحتها المدرجات الزراعية كما في وادي عيال علي ووادي مسور.

الاعتبار أن تحسين الأداء الإحصائي قد يسهم مستقبلاً في زيادة وضوح التباين المكاني بين فئات الخطورة.

تمثل خريطة القابلية النهائية للأخطار ناتج نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية، إذ تعكس التوزيع المكاني لاحتمالية حدوث مخاطر الانزلاق والتساقط الصخري ضمن منطقة الدراسة، وقد تراوحت القيم الاحتمالية الناتجة عن النموذج بين (0-1)، بما يعكس مستويات مختلفة من القابلية، إذ تُمثل درجة قابلية الانزلاق والتساقط الصخري، والتي تم تأكيدها بناءً على بيانات تاريخية حقيقية لمواقع حدوث الأخطار، وأُعدت خريطة قابلية للانهييار للمنطقة، ولوحظ أن تتبؤات الشبكات العصبية الاصطناعية كانت قريبة من الواقع، مما يدل على الأداء المرضي لنموذج الشبكة العصبية.

صُنفت الخريطة إلى خمس فئات للقابلية باستخدام طريقة الفواصل الطبيعية (Jenks Natural Breaks)، وذلك بهدف إبراز التباين المكاني الحقيقي لمستويات الخطورة كما في الشكل (17) والجدول (2).

شكل (17): خريطة القابلية للأخطار



وزيادة قابليتها للانهيارات، خاصة في فترات الهطول المطري الغزير.

• مناطق عالية القابلية للأخطار:

تمثل (15.50%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وتعد من المناطق التي ترتفع فيها احتمالية حدوث الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري، ويرتبط انتشار هذه الفئة بوجود منحدرات شديدة إلى شديدة جدًا، إضافة إلى التكوينات الجيولوجية الضعيفة و المتشققة، فضلاً عن قربها من شبكة التصريف المائي والطرق، وهي عوامل تسهم في زيادة عدم استقرار المنحدرات وارتفاع قابليتها للانهيارات، لا سيما خلال فترات الهطول المطري الغزير أو نتيجة الأنشطة البشرية المرتبطة بشق الطرق (صورة 11).

صورة (11): انزلاق على طريق الراس



• مناطق عالية جدًا لقابلية الأخطار:

تشغل نسبة (14.94%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وتمثل الفئة الأكثر تعرضًا للانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري، وترتبط هذه المناطق بالمنحدرات الشديدة جدًا والجرفية، وتتركز على

• مناطق منخفضة القابلية للأخطار :

تشغل نسبة (25.47%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وتشير إلى أنها مناطق ذات احتمال منخفض لحدوث الانزلاقات الأرضية، إلا أنها قد تتأثر بعوامل محلية محدودة تؤدي إلى حدوث انهيارات موضعية في بعض المواقع.

وبشكل عام، تمثل المناطق ذات القابلية المنخفضة والمنخفضة جدًا بلغت نسبة (50.33%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وتتركز هذه المناطق في الأجزاء التي تتسم بسطوح مستقرة ومنحدرات مستوية إلى متوسطة، الأمر الذي أسهم في الحد من احتمالية حدوث الانزلاقات الأرضية، وتنتشر هذه الفئتين في مناطق عزلة بني أسعد، والتهام، وعلى سطح جبل مسور، وتغطيها في معظمها المدرجات الزراعية، مما يعزز من استقرار المنحدرات ويحد من تعرضها للأخطار الجيومورفولوجية.

• مناطق متوسطة القابلية للأخطار:

تمثل نحو (19.23%) من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وتُعد مناطق انتقالية بين البيئات المستقرة وغير المستقرة، حيث تتداخل فيها مجموعة من العوامل الجيولوجية والجيومورفولوجية والهيدرولوجية والبشرية التي تؤثر في درجة استقرار المنحدرات. وترتبط هذه الفئة بمنحدرات متوسطة إلى شديدة الانحدار، ويغلب عليها استخدامات الأراضي الرعوية، وتتعرض لتدحرج الكتل والمفتتات الصخرية المتساقطة والمنزلة من أعلى المنحدر نتيجة لعمليات التجوية والتعرية، كما تزداد احتمالية حدوث الانزلاقات الأرضية في هذه المناطق نتيجة تعميق وتوسع مجاري الأودية بفعل الجريان السطحي، أو بسبب شق الطرق، الأمر الذي يؤدي إلى إضعاف استقرار المنحدرات

جداً، مما يعكس مستوى مرتفعاً من التعرض لمخاطر الانزلاق والتساقط الصخري في أجزاء واسعة من المنطقة وتتركز بشكل رئيس على الحافات الصدعية، والمناطق التي تسودها تكوينات جيولوجية ضعيفة أو متشققة، إضافة إلى ضعف نسبي في الغطاء النباتي، والمناطق المتأثرة بالنشاط البشري مثل: الطرق وقطع المنحدرات، وتتركز في عدد من العزل من بينها: عزلة جبل مسور، والجدم، ومومر، وقيلاب، ويؤكد ذلك أهمية إدراج هذه النتائج في التخطيط المكاني وإدارة المخاطر.

تعكس نتائج خريطة القابلية للأخطار التأثير التراكمي للعوامل الجيولوجية والمناخية والجيومورفولوجية والهيدرولوجية والبيئية المدخلة في نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN)، إذ لعبت عوامل الانحدار، الارتفاع، التكوينات الجيولوجية، شبكة التصريف المائي دوراً رئيساً في زيادة قابلية حدوث الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري، كما في الرأس، وفي جبل الكلاي، وعلى الحافة الشرقية والجنوبية الشرقية لجبل مسور، كما أسهمت العوامل البيئية مثل: الغطاء النباتي (NDVI)، استخدامات الأراضي، ومعدل الأمطار، في تعزيز عدم الاستقرار الأرضي في بعض المناطق، لاسيما تلك التي تشهد تداخلاً بين النشاط البشري والعوامل الطبيعية كما في بيت عداقة وبيت سعد صلاح (صورة 14).

تتوافق المناطق المصنفة ضمن فئتي القابلية العالية والعالية جداً مع مواقع الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري المسجلة ميدانياً، مما يعزز من موثوقية النموذج، ونتائج تقييم الأداء باستخدام منحنى

الحافات الصدعية المحيطة بجبل مسور (صورة 12)، وحافة جبل الجاهلي (صورة 13)، وعلى حافات المصاطب الصخرية، كما في الشراقي وبني الكريبي، حيث تؤدي شدة الانحدار وضعف استقرار الكتل الصخرية إلى زيادة احتمالية حدوث الانهيارات.

صورة (12): انزلاق (حافة جبل مسور)



صورة (13): انزلاق على (حافة جبل الجاهلي)



تشير هذه النتائج إلى أن نحو (30.44%) من مساحة المنطقة تقع ضمن فئتي القابلية العالية والعالية

(ROC) تدعم ذلك، إذ أظهر المنحنى قدرة جيدة للنموذج على التمييز بين مناطق الانزلاق والتساقط وعدم الانزلاق والتساقط، ما يؤكد كفاءة النموذج التنبؤية.

صورة (14): انزلاق شمال بيت عذاقه



توفر خريطة القابلية الناتجة أداة مكانية فعالة لدعم اتخاذ القرار في مجالات التخطيط العمراني في المناطق الجبلية، إدارة المخاطر الجيومورفولوجية، وتحديد المناطق الحرجة ذات الأولوية في أعمال التخفيف والمراقبة، والحد من الخسائر البشرية والمادية المرتبطة بالانزلاق والتساقط الصخري، ووضع استراتيجيات الحد من هذه المخاطر، خاصة في المناطق المصنفة ضمن فئات متوسطة القابلية والقابلية المرتفعة والمرتفعة جدًا.

توفر خريطة القابلية الناتجة أساساً علمياً مهماً يمكن الاستفادة منه في دعم التخطيط المكاني، وإدارة المخاطر، وتوجيه مشاريع البنية التحتية، وتحديد المناطق ذات الأولوية لأعمال الوقاية والرصد المستقبلي.

لدعم نتائج خريطة القابلية للانزلاقات الأرضية والتحقق من موثوقية النموذج، أُجري تحقق ميداني في

عدد من المواقع المصنفة ضمن فئتي القابلية العالية والعالية جدًا في مديرية مسور، وأظهرت المشاهدات الميدانية وجود أشكال جيومورفولوجية تنشط عليها الانزلاقات الأرضية والتساقط الصخري قديمة وحديثة، على جوانب المنحدرات إلا أنها أكثر تكراراً على الطرق ومناطق تواجد صخور طفلة كبيرة وتكوين كحلان الرملية كما في بيت عذاقه وبني سعيد، وأظهرت نتائج التحقق توافقاً بين خريطة القابلية للتأثر وبيانات مواقع الانهيار الأرضي.

وتؤكد الصور الميدانية الملتقطة وجود تطابق واضح بين مواقع حدوث هذه الأخطار والمناطق التي أظهرتها الخريطة ضمن فئات ذات القابلية العالية والعالية جدًا، لا سيما في العزل الجبلية مثل جبل مسور، بني مهدي، جبل مومر، وجبل الكلاي وجبل الجاهلي.

كما تُظهر المشاهدات الميدانية أن عدد من مواقع الانزلاقات الأرضية ترتبط بقطع المنحدرات لأغراض الطرق خاصة عقب سقوط الأمطار، مما يشير إلى دور العوامل البشرية في تعزيز عدم الاستقرار الجيومورفولوجي إلى جانب العوامل الطبيعية، وتدعم هذه النتائج القيمة التطبيقية للخريطة الناتجة كأداة فعالة لتحديد المواقع الحرجة وتوجيه إجراءات التخفيف من المخاطر، خصوصاً في المناطق المأهولة والبنى التحتية الحيوية.

صورة (15): شواهد ميدانية لحدوث الانزلاقات الأرضية في المناطق ذات القابلية العالية والعالية جدًا بمديرية مسور.

صورة (15): انزلاق صخور رملية على جانب
صدع (حافة جبل مسور)



صور (16-17): شواهد ميدانية توضح مظاهر
الانزلاقات الأرضية نتيجة لقطع المنحدرات للطرق في
المناطق المصنفة ضمن فئة القابلية العالية والعالية
جداً وفق خريطة القابلية بمديرية مسور.

صورة (16): انزلاق على طريق
الأسفلت (بيت عذاقة)



صورة (17): أولاق على طريق الأسفلت



التوصيات :

توصي الدراسة بالآتي:

- استخدام طريقة ANN لرسم خرائط قابلية
الأخطار الجيومورفولوجية، ومن المهم أن يتميز
عنصر ANN في هذا النهج بمزايا كبيرة لرسم خرائط
قابلية الانهيارات الأرضية، تحديداً لأنه يتوافق جيداً
مع الطبيعة المكانية الواسعة لظاهرة الانهيارات
الأرضية نفسها، ويستفيد منها.
- ضرورة دمج الشبكات العصبية مع نظم المعلومات
الجغرافية ليوفر رؤية استباقية للمخاطر الطبيعية.
- لصناع القرار في محافظة عمران ضرورة اعتماد
خريطة المخاطر الناتجة كمرجع عند شق أو توسعة
الطرق في مسور وعمل حوائط اسنادية وقنوات
تصريف للطريق وتجنب البناء في المناطق ذات
الخطورة العالية التي كشفت عنها الدراسة .

قائمة المصادر والمراجع

أولاً: المراجع باللغة العربية:

- [1] الجهاز المركزي للإحصاء، (2025م)، الإسقاطات السكانية في الجمهورية اليمنية للفترة 2005 - 2025م، صنعاء، اليمن.
- [2] الجهاز المركزي للإحصاء، (2005-2023م)، كتاب الإحصاء السنوي، صنعاء، اليمن.
- [3] العتايي، نادية حاتم طعمة (2021م)، النمذجة المكانية للمخاطر الجيومورفولوجية وانعكاساتها على طرق النقل جبل ميركه سور في محافظة أربيل نموذجاً، مجلة لارك للفلسفة واللسانيات والعلوم الاجتماعية، المجلد (4)، العدد (43)، جامعة واسط، صفحات البحث (851 - 873)، العراق.
- [4] مشروع الموارد الطبيعية، و روبرتسون جروب. بي. ال. سي (1990م)، خريطة جيولوجية، لوحة صنعاء (G15)، مقياس 1:25000، اليمن.
- [5] مصلحة المساحة - صنعاء (1986م) "خرائط طبوغرافية مقياس رسم 1:50000 - لوحة حجة، طبعت بمديرية المساحة لما وراء البحار، المملكة المتحدة.
- [6] هيئة المساحة الجيولوجية والثروات المعدنية (2007م)، تقييم استقرارية المنحدرات الصخرية للانهييارات الأرضية في قرية المقليل مديرية مسور- محافظة عمران.
- [7] هيئة المساحة الجيولوجية والثروات المعدنية (2021م)، تقييم استقرارية المنحدرات الصخرية للانهييارات الأرضية المحتملة ومخاطر السيول في قرنتي العراوير وسوار- عزلة الجدم - مديرية مسور- محافظة عمران.
- [8] Chiessi, V., Toti, S. and Vitale, V. (2016) Landslide Susceptibility Assessment Using Conditional Analysis and Rare Events Logistics Regression: A Case-Study in the Antrodoco Area (Rieti, Italy). Journal of Geoscience and Environment Protection, 4, 1-21. <http://dx.doi.org/10.4236/gep.2016.412001>
- [9] Das, I.; Sahoo, S.; Westen, C.; Stein, A.; Hack, R.; (2010) Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India), Geomorphology 114, 627-637. doi:10.1016/j.geomorph.2009.09.023
- [10] Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters, 27(8), 861-874.
- [11] Flach, P. A. (2016). ROC Analysis. In C. Sammut, & G. I. Webb (Eds.), Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining (pp. 1-8). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7502-7_739-1.
- [12] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press.
- [13] Hannover,(1991),"Geological Map of the Republic of Yemen, Sheet Al-Hudaydah,1:250000,Federal Republic of Germany.
- [3] 2.Aiswarya , L.; Rema, K.; Shyla, J.; Brijesh V.; & Vaisakh, V.; (2023), Landslide Susceptibility Mapping of Chaliyar River Basin by Multivariate Statistical Model, Journal of Experimental Agriculture International, Volume 45, Issue 12, Page 23-35, Article no.JEAI.109980, ISSN: 2457-0591.
- [4] 3. Ayalew .L, Yamagishi .H, (2005).The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan, Niigata University, Department of Environmental Science, Ikarashi 2-no-cho 8050, Niigata, 950-2181 Japan.
- [5] 4. Azarafza .M, Azarafza .M, Akgün .H, Atkinson .P & Derakhshani .R, (2021). Deep learning-based landslide susceptibility mapping, Scientific Reports | 11:24112 <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03585-1>
- [6] Biswakarma .P, Barman. B, arun Joshi .V, Rao .K, (2020). Landslide Susceptibility Mapping in East Sikkim Region of Sikkim Himalaya Using High Resolution Remote Sensing Data and GIS techniques Applied Ecology and Environmental Sciences, Vol. 8, No. 4, 143-153.
- [7] Conforti .M, Pascale. S, Robustelli .G, Sdao .F, (2014). Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy), Catena 113, 236-250.

ثانياً: المراجع الأجنبية

- [1] 1.Afzal, N.; Ahmad, A.; Shirazi, S.; Younes, I.; Ha, L.; (2022) GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process: a case study of Astore region, Pakistan, EQA - International Journal of Environmental Quality ISSN 2281-4485 - Vol. 48: 27-40
- [2] DOI: 10.6092/issn.2281-4485/12600.

- [20] Saha, Aphik ,Villuri, V.G.K,Bhardwaj,A. (2023), A Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Approach for Landslide Susceptibility Mapping of a Part of Darjeeling District in North-East Himalaya, India, applied Sciences, Volume 13, Issue 8. <https://doi.org/10.3390/app13085062>
- [21] Ullah, I.; Aslam, B.; Shah, S.H.I.A.; Tariq, A.; Qin, S.; Majeed, M.; Havenith, H.-B.(2022) An Integrated Approach of Machine Learning, Remote Sensing, and GIS Data for the Landslide Susceptibility Mapping. Land, 11, 1265. <https://doi.org/10.3390/land11081265>
- [22] Uyanık, H.; ,Sentürk, E.; Akpınar, M.H.; Ozcelik, S.T.A.; Kokum, M.; Freeshah, M.; Sengur, A. (2023). A Multi-Input Convolutional Neural Networks Model for Earthquake Precursor Detection Based on Ionospheric Total Electron Content. Remote Sens., 15, 5690. <https://doi.org/10.3390/rs15245690>.
- [23] Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility. Engineering Geology, 102(3–4), 112–131.
- [24] 23.Young, Anthony (1972), "Slopes", Oliver & Boyd – Edinburgh, P288.
- [25] 24. Yousef, S.; Pourghasemi, H.; Emami, S.; Pouyan, S.; eskandari, S.; & tiefenbacher, J.; (2020), A machine learning framework for multi-hazards modeling and mapping in a mountainous area, Scientific RepoRtS | 10:12144 |. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69233-2>.
- [14] Haykin, S. (2009). Neural Networks and Learning Machines (3rd ed). Pearson.
- [15] Nanehkaran, Y.A.; Chen, B.; Cemiloglu, A.; Chen, J.; Anwar, S.; Azarafza, M.; Derakhshani, R.(2023), Riverside Landslide Susceptibility Overview: Leveraging Artificial Neural Networks and Machine Learning in Accordance with the United Nations (UN) Sustainable Development Goals. Water, 15, 2707. <https://doi.org/10.3390/w15152707>
- [16] NASA (2025), GPM Integrated Multi-satellite Retrievals for Precipitation, NASA. <https://gpm.nasa.gov/data/directory>
- [17] 16. Pham .B, Prakash .I, Dou .J, Singh .S, Trinh .P, Tran .H, Le .T, Phong .T, Khoi .D, Shirzadi .A & Bui .D, (2020). A novel hybrid approach of landslide susceptibility modelling using rotation forest ensemble and different base classifiers , GEOCARTEO INTERNATIONAL, VOL. 35, NO. 12, 1267–1292. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1559885>
- [18] 17- Pradhan,B. (2010),Landslide Susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches, J. Indian Soc. Remote Sensing. 38 : 301– 320.
- [19] Saha, A.; Villuri, V.G.K.; Bhardwaj, A.(2022) Development and Assessment of GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping Models Using ANN, Fuzzy-AHP, and MCDA in Darjeeling Himalayas, West Bengal, India. Land, 11, 1711. <https://doi.org/10.3390/land11101711>