

النمذجة الجيومكانية لأخطار حركة المواد الصخرية على منحدرات طريق عقبة ضلع، عسير، المملكة العربية السعودية : دراسة تطبيقية

صبحي عبد الحميد عبد الجواد عبد الحميد

مدرس الجيومورفولوجيا ونظم المعلومات الجغرافي كلية الآداب، جامعة بورسعيد

المستخلص

تعد حركة المواد الصخرية علي أسطح المنحدرات من أكثر الأخطار الجيومورفولوجية في المناطق الجبلية، وهي انعكاس للظروف المحيطة التي يمر بها المنحدر ولاسيما "منحدرات طريق عقبة ضلع" والذي يعد أحد المداخل الرئيسية لمدينة أبها حاضرة عسير المقامة علي حافة سلسلة جبال السروات جنوب غربي المملكة العربية السعودية ، ويصل طوله من بدايته عند مدينة أبها علي قمم جبال السروات نحو 64.2 كم تقريباً وقبل الوصول لمدينة الدرب بنحو 10 كم ويصل متوسط عرض الطريق ما بين 10 إلي 15 متر تقريباً وهو يكاد لا يبتعد عن الحافة الصخرية الملازمة للجانب الشرقي له الا في مواقع محددة ، ولا تقل زاوية انحدار الطريق عن 45° مما أدى لكثرة إنحناءاته ، حيث يلنزم الطريق جزء من منحدرات كل من : وادي قصري و وادي عقالة وشعب صبري، كما توجد بها العديد من الإنشاءات الهندسية التي تمت إقامتها للتغلب علي وعورة سطح المنطقة بإقامة 3 أنفاق و 67 جسراً ، وقد تم استخدام "نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن البعد" لتحليل الخرائط والدراسة الميدانية لدراسة خطر حركة المواد الصخرية ، كما تم تطبيق العديد من التحليلات علي صور الأقمار الصناعية ، وقد انتهت الدراسة بتحديد للمواقع المهددة بحركة المواد الصخرية وقد بلغت سرعة حركة المواد الصخرية لأكثر من 33.7 كم/ساعة، وكان أكثر أنماط حركة المواد الصخرية شيوعاً هي: الانهيار الصخري والانزلاق الصخري والسقوط الصخري الأمر الذي يعجل من ضرورة اتخاذ الإجراءات الفنية لمعالجة هذه المشكلة بأسرع ما يمكن لتأمين مسار الطريق وحفاظاً على أرواح رواده. الكلمات المفتاحية: المؤشرات الجيومورفولوجية، التعلم العميق، الذكاء الصناعي، حركة المواد الصخرية.

تاريخ المقالة:

تاريخ استلام المقالة: 2 يونيو 2023

تاريخ استلام النسخة النهائية: 27 يوليو 2023

تاريخ قبول المقالة: 23 سبتمبر 2023

Geospatial Modeling of Mass movement Hazards on the Slopes of Aqaba Dhalaa Road, Asir, Kingdom of Saudi Arabia: An Applied Study

Sobhi Abdel Hamid Abdel Gawad Abdel Hamid

Geomorphology and GIS lecturer ,Faculty of Arts, Port Said University

Abstract

The movement of rock materials on slope surfaces is the most common geomorphological hazards in mountainous areas, and it is a reflection of the surrounding conditions experienced by the slope, especially the "Aqaba Dhalaa Road Slopes". This road is one of the main entrances to the city of Abha, the capital of Asir region, south-west of the KSA. The average width of the road is about 10 to 15 meters, which is almost not far from the rocky edge adjacent to the eastern side except in specific locations. The angle of slope of the road is not less than 45, resulting in numerous curves. The road traverses parts of the slopes of Wadi Qasri, Wadi Aqala, and Shu'ub Sabri. The area also features several engineering structures that have been constructed to overcome the roughness of the terrain, including 3 tunnels and 67 bridges. GIS and RS Techniques have been used to analyze maps; a field study has been made to see the danger of movement of rock materials, and many analyzes have been applied to satellite images. The study has ended with the identification of sites threatened by the rock movement where the speed of movement of rock has reached more than 33.7 km/h. The most common patterns of movement of rock materials were: Rock collapse, rock slide and rock fall; something that accelerates the need to take technical measures to address this problem as soon as possible to secure the route of the road and preserve the lives of the road users and trippers.

Keywords: Geomorphological Indicators, Deep Learning, Artificial Intelligence, Rockfall Hazards..

Article history:

Received 6 June 2023

Received in revised form 26 July 2023

Accepted 23 September 2023

المقدمة

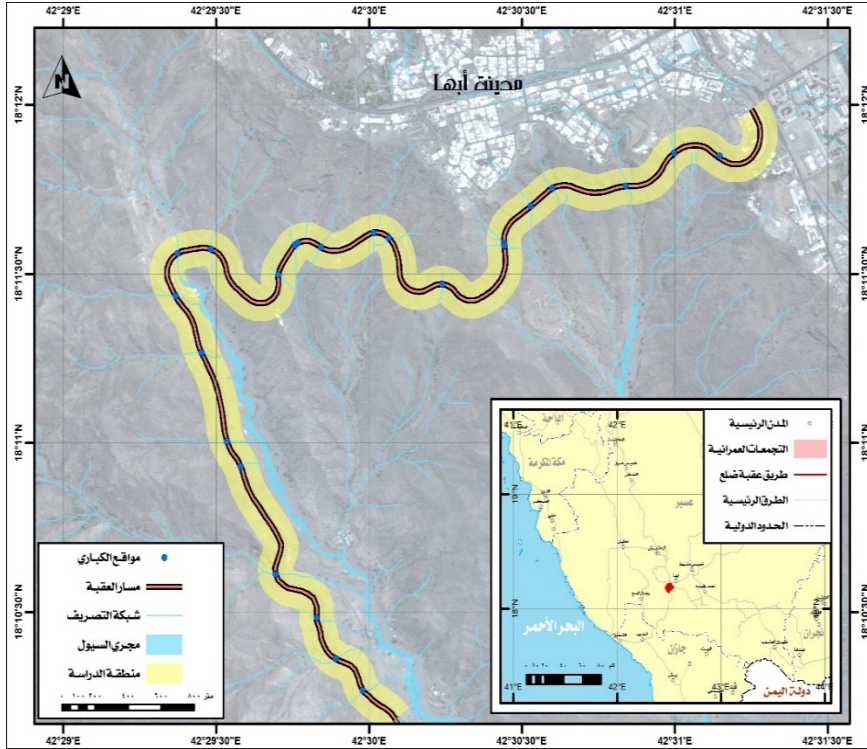
تعد دراسة المنحدرات بشكل عام أحد العناصر المهمة في أي نظام طبيعي إضافة إلى أنها نتاج طبيعي لمجموعة من المتغيرات التي حدثت للبيئة المحيطة علي مر الزمان، كما انه من الصعوبة تحديد وقت حدوث حركة المواد الصخرية علي المنحدرات لتفاوتها من حيث نوعية الحركة ومن أهمها: السقوط الصخري **Rockfall** للكتل الصخرية علي سطح المنحدرات التي تزيد زاوية انحدارها عن 70° والانزلاق الصخري **Slides** للمنحدرات ذات الزوايا الحادة ، وجميعها تتم بشكل فجائي لا يمكن توقع وقت حدوثه وتستغرق ثواني معدودة مخلفة آثار كارثية إذا ما حدثت. وحيث إن طابع المنطقة الجبلي وجيولوجيتها تعود إلى ما قبل الكامبري كل ذلك يرفع من مستوي خطورة منحدرات طريق عقبة ضلع "موضع الدراسة"، كما أن مشكلة التنبؤ بحدوث حركة للمواد الصخرية في أي منطقة لازالت تشكل محور اهتمام الدراسات الجيومورفولوجية وتزداد أهميتها في المناطق التنموية والمناطق الحضرية لما تخلفه من آثاره تدميرية، نتيجة لارتباطها بخصائص المنحدرات.

يتأثر الطريق محور الدراسة بخطر حركة المواد الصخرية وهي عملية تنفصل فيها الكتلة الصخرية عن الواجهة الحرة شديدة الانحدار من الحافة الصخرية وتهبط بسرعة كبيرة تحت تأثير الجاذبية الأرضية، لذا أغلق الطريق أكثر من مرة بسبب الانهيارات الصخرية المتكررة التي تحدث عقب تساقط الامطار أشهرها الإغلاق الذي بدأ من 2 ديسمبر 2018م لمدة 20 يوم لصيانة بعض المواقع علي الطريق التي تأثرت بحركة المواد الصخرية وإغلاق العقبة في 4 أغسطس 2020م حيث أغلقت "عقبة ضلع" لمدة سبعة أيام متواصلة ، آخرها اغلاق عقبة ضلع 13 مارس 2023م لصيانة بعض المواقع على الطريق نتيجة الانهيارات الصخرية.

موقع وأهمية منطقة الدراسة

يقع مسار الطريق أقصى جنوب غربي المملكة العربية السعودية ويمتد فلكياً بين خطي طول 12.25° 20' 42" و 34.7° 32' 42" شرقاً وبين دائرتي عرض 12.25° 20' 42" و 17.8° 49' 17" شمالاً ، وقد تم البدء في إنشاء الطريق مع بداية عام 1977م على أحد جوانب المنحدرات الجبلية لحوض وادي ضلع وهو يمر في العديد من التكوينات الصخرية دون وضع مسافة أمنة خاص بالطريق، لذا كان عرضه لأنماط عديده من حركة المواد الصخرية علي منحدراته، ويبلغ طول مسار الطريق من بدايته عند مدينة أبها ووصولاً لمدينة الدرب نحو 82كم تقريباً شكل (1)، ويقع الجزء المعرض لأخطار حركة المواد

الصخرية في بداية الطريق من جهة مدينة أبها بطول بلغ 8.5 كم وبمتوسط عرض يبلغ 15 متر تقريباً، ويتسم مسار الطريق بكثرة انحناءاته التي بلغت (473) منحنى وقد بلغ ارتفاع أعلى منسوب للطريق 2238 متراً فوق مستوى سطح البحر بينما كان أدنى منسوب للطريق 1561 متراً وقد بلغت أقصى زاوية انحدار لسطح الطريق 63.6° بمتوسط زاوية ميل سطح الطريق 9.5° .



المصدر: اعتماداً على الخرائط الطبوغرافية مقياس 50.000/1 وصورة القمر الصناعي Pleiades 1A بدقة وضوح 0.50 متر.

شكل (1) موقع منطقة الدراسة

تبرز أهمية هذه الدراسة في أنها تناقش أحد أهم الأخطار الجيومورفولوجية التي تهدد شبكة الطرق في المناطق الجبلية بشكل عام، ومنطقة الدراسة بشكل خاص، حيث تكمن أهمية هذا الطريق في كونه أحد المداخل الرئيسية لحاضرة عسير وأحد أهم محاور النقل الحيوية التي تربط مدينة أبها عاصمة المنطقة بالتجمعات العمرانية الجبلية المتاخمة للمنطقة وتلك الموجودة على السهل الساحلي في تهامة عسير، وهذه المشكلة تمس أمن واستقرار السكان ورواد الطريق وسوف يتم تناولها من خلال توظيف التقنيات الجيومكانية بالدمج مع أنظمة الذكاء الصناعي في دراسة أخطار حركة المواد الصخرية على منحدرات الطريق من خلال

العمل على البرمجيات المتخصصة لنمذجة ومحاكاة حركة المواد الصخرية وتوظيف قدرات الذكاء الاصطناعي متمثلاً في تطبيق لنماذج التعلم العميق **Deep Learning** عبر مجموعة من الخوارزميات المتخصصة لدراسة كافة الضوابط والمحددات للخروج بخريطة للمواقع المهدة بخطر حركة المواد الصخرية بما يدعم أعمال التنمية والتطوير بالمنطقة.

مشكلة الدراسة

يمكن تحديد مشكلة الدراسة من خلال الإجابة على التساؤلات التالية:

1- ما العوامل المحفزة لحدوث حركة للمواد الصخرية في منطقة الدراسة؟

2- كيف يمكن تفعيل دور الجيومورفولوجية التطبيقية والأساليب الحديثة والبرامج المتخصصة في رسم خريطة للمواقع المهدة بخطر حركة المواد الصخرية.

أسباب اختيار الموضوع

1- يعد طريق عقبة ضلع أحد الطرق الرئيسية التي تربط بين التجمعات العمرانية على جبال نهران والسروات بمثيلاتها في النطاق الساحلي من سهل تهامة على البحر الأحمر.

2- تعرض طريق عقبة ضلع لخطر حركة المواد الصخرية التي تتميز بالسرعة والفجائية بما يهدد مسار الطريق بشكل شبه دائم ومن أهمها حركة السقوط الصخري والانزلاق الصخري.

3- تُعد منطقة الدراسة محور اهتمام وفق خطط التنمية لتحقيق رؤية المملكة العربية السعودية 2030م ومن ثم فإن هذه الدراسة سوف تساهم في الكشف عن الخصائص المورفولوجية للمنحدرات والأخطار المرتبطة بحركة المواد الصخرية.

الدراسات السابقة

توجد العديد من الدراسات العربية والأجنبية التي تناولت توظيف النماذج الرياضية ونظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد في نمذجة ومحاكاة حركة المواد الصخرية على المنحدرات بشكل عام كما يلي : دراسة (نيران ، 2021م) التي تبين أن هناك حركات بطيئة عند السفوح لكنها مستمرة وكذلك انزلاقات ثانوية بسيطة من الممكن ان تكون سريعة بالرغم من أن موادها غير مشبعة بالماء ما نتج عن ذلك شكل المنحدر المحدب في الطية وبذلك فان الطية في مرحلة الشباب من دورتها التعاقبية الدافيزية، ، ودراسة (أبو القاسم عبدالفتاح الأخضر وآخرون ، 2019م) وقد أبرز في دراسته مدى تأثير التجوية الميكانيكية في تغيير الخواص الهندسية للكتل الصخرية المتاخمة للطريق الجبلي

جادو شمال غرب ليبيا كما أشار إلى مدى تأثير عمليات شق الطريق الجبلي في تحديد نوع ونمط حركة الصخور علي سطح المنحدرات الطريق وأثبت أن الحركة الرئيسية للكتل الصخرية في المنطقة من نوعيه السقوط الصخري تحت تأثير الخصائص الفيزيائية والميكانيكية بفعل تغير الاتزان واستقرار الكتل الصخرية علي المنحدرات. ودراسة (صبحي عبد الحميد، 2018م) التي تناول فيها الخصائص الطبيعية العامة للمنطقة وقام بعمل تحليل مورفومتري لمنحدرات السقوط الصخري وعوامل تشكيلها واستخدم النماذج التجريبية ونظم المعلومات الجغرافية في رصد المواقع المهددة بخطر السقوط الصخري كما استخدم التقييم متعدد المعايير **M.C.E** لنمذجة العوامل المؤثرة في حركة السقوط الصخري وتقدير معامل الأمان علي منحدرات منطقتيه كما قام بتطبيق المؤشرات الجيومورفولوجية في تقييم خطر السقوط الصخري، ودراسة (سيد محمود مرسي، 2010م) حيث تناول معالجة الموضوع رياضياً والقيام ببعض التحليلات الاحصائية للتنبؤ بمناطق السقوط الصخري المحتملة في منطقة "سدمنت الجبل بمحافظة بني سويف"، كما تناول (طارق كامل فرج، 2012م) عرض للقوي المسؤولة عن التساقط الصخري ودينامية حركة السقوط ذاتها للصخور ومعدلات السقوط المحتملة واقترح مجموعة من الحلول للحد من تساقط الصخور ، ودراسة (أحمد السيد معتوق، 2001): حيث تناول في دراسته وضع التضايف بين العوامل الطبيعية والبشرية المؤثرة في الانزلاقات الأرضية بالمنطقة ودراسة (عبد الله علام عبده، 1997م) ، إضافة لدراسة (Das., Wegmann,2022) إضافة الي دراسة (Huang, Song, Yi, et al , 2019) ودراسة (Chang-jo F.chun . 1999) ، ودراسة (Ayala 2003) ودراسة (Arthur 2009) ، والتي من خلالها تم توظيف أعمال النمذجة الجيومكانية في رصد وتحديد مدى خطورة حركة المواد الصخرية على المنحدرات.

اهداف الدراسة

- 1- تفعيل دور الجيومورفولوجيا التطبيقية لدعم اتخاذ القرار في خطوة تطويرية هادفة لتنمية الطريق عبر الفاء الضوء على عملية حركة المواد الصخرية على طريق عقبة ضلع.
- 2- تصميم قاعدة بيانات جغرافية قادرة على استيعاب المتغيرات الجيومكانية المؤثرة على حدوث حركة للمواد الصخرية.
- 3- إجراء عملية تقييم للوضع الراهن لهذه المنحدرات ومعرفة المواقع المهددة بخطر حركة المواد الصخرية بأنواعها إجراء التحليلات

- المكانية لتحديد مواقع الخطر باستخدام التقنيات الجيومكانية وأعمال المسح الميداني.
- 4- تصنيف المناطق وفقاً لدرجة خطورتها من خلال تطبيق مجموعة من المؤشرات الجيومورفولوجية.
- 5- إبراز العلاقة المتبادلة بين العوامل المؤثرة على استقراره سفوح منحدرات المنطقة واحتمالية حدوث حركة للمواد الصخرية عليها.

مصادر البيانات

- الخرائط:
- الخرائط الطبوغرافية مقياس 1/50.000: بعدد (6 لوحات) اصدار وزارة البترول والثروة المعدنية، إدارة المساحة الجوية عام 1982م والتي تحمل أرقام (1،2،3 /4425 و2،3/4426).".
 - الخرائط الجيولوجية: مقياس 1/100.000: إصدار وزارة البترول والثروة المعدنية، وكالة الوزارة للثروة المعدنية عام 1971م.
- الدراسات النصية السابقة.
- الصور الجوية وصور الأقمار الصناعية:
- صورة جوية لمدينة أبها، بدقة 1 متر ملتقطة عام (1951م).
 - صورة جوية لمدينة أبها، بدقة 1 متر ملتقطة عام (1974م).
 - مرئيات الأقمار الصناعية:
 - **Pleiades 1A** (1)، بدقة 50 سم ملتقطة عام (2020م).
 - **Spot 5** (2) عام 2017م بدقة وضوح 5 متر (MS) و2.5متر (Pan).
 - **Landsat 9** عام 2022م بدقة وضوح 10 متر.
 - **Geo Eye** (3) عام 2010م بدقة وضوح 1.8متر (MS) و0.46متر (Pan).
- نموذج الارتفاعات الرقمي **Digital Elevation Model** (1):
بدقة وضوح 5متر².

(1) **Pleiades Neo**: قمر صناعي أمريكي متاحة صورة لأغراض تجارية بدقة 30 سم ويقوم بالتصوير في عدد أطيف بلغت 6 أطيف.

(2) **Spot 5**: قمر صناعي فرنسي لأغراض تجارية بدقة 5 متر سم أطلق عام 2002م ويقوم بالتصوير في عدد أطيف بلغ اجمالي عددها 5 أطيف.

(3) **Geo Eye**: قمر صناعي أمريكي متاحة صورة لأغراض تجارية بدقة 30 سم ويقوم بالتصوير في عدد أطيف بلغ اجمالي عددها 5 أطيف.

- **الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة:** العناصر المناخية بمحطات (أبها والسودة) الفترة ما بين عام (1981م الي 2021م).

- **الدراسة الميدانية**

يعد الكتاب المجسم لأي جيومورفولوجي علي وجه التحديد ، حيث لا تكتمل أي دراسة جيومورفولوجية بدونها ، والتي تهدف الي : (1) الحصول على بيانات حقلية عن الظاهرات التي يتم دراستها ، (2) أهميتها في التأكد من صحة بعض البيانات التي يتم الحصول عليها من الدراسات السابقة ، (3) التأكد من نتائج تحليل صور الأقمار الصناعية وتدقيقها ، (4) التقاط الصور الفوتوغرافية التوضيحية ، (5) تدقيق الإحداثيات المكانية لبعض المواقع التي حدث بها حركة للمواد الصخرية علي منحدرات الطريق ، (6) عمل بعض القياسات للمنحدرات الموجودة علي جانب الطريق ، هذا وقد بدأت الدراسة الميدانية ببعض الزيارات الاستطلاعية التي تهدف الي التعرف على منطقة الدراسة وتقسيم خطة العمل التي استغرقت 24 يوماً متقطعة بدأت في شهر مارس 2020م وانتهت في أواخر شهر سبتمبر 2020م.

التحليل والمناقشة

تعتبر المنحدرات أكثر الأنظمة الطبيعية المتأثرة بالتغيرات البيئية المحيطة حيث تعتبر نتيجة طبيعية لتضافر العديد من الضوابط والمحددات حددها (Shumm , 1956) من قبل، والتي لكل منها تأثيره المنفرد أو المتضافر مع باقي العناصر وتساهم في حركة المواد الصخرية على منحدرات منطقة الدراسة وهي كالتالي:

1- الخصائص الطبوغرافية:

أ- الخريطة الكنتورية:

يلاحظ من تحليل شكل (2) و(3) تفاوت الارتفاعات على طول مسار الطريق الذي تم تقسيمه الي القطاعات التالية:

- **القطاع الأول:** يبدأ من الكيلو 74 بعد مدينة الدرب باتجاه مدينة أبها يتراوح ارتفاعه ما بين 1561 متراً – أقل من 1836 متراً بطولي يبلغ 3 كم تقريباً، وبمعدل انحدار يصل لنحو 68° تقريباً.
- **القطاع الثاني:** يبدأ من الكيلو 77 من مدينة الدرب باتجاه مدينة أبها يتراوح ارتفاعه ما بين 1835 متراً – 1993 متراً بطول يبلغ 1.7 كم تقريباً، وبمعدل انحدار يصل لنحو 47° تقريباً.

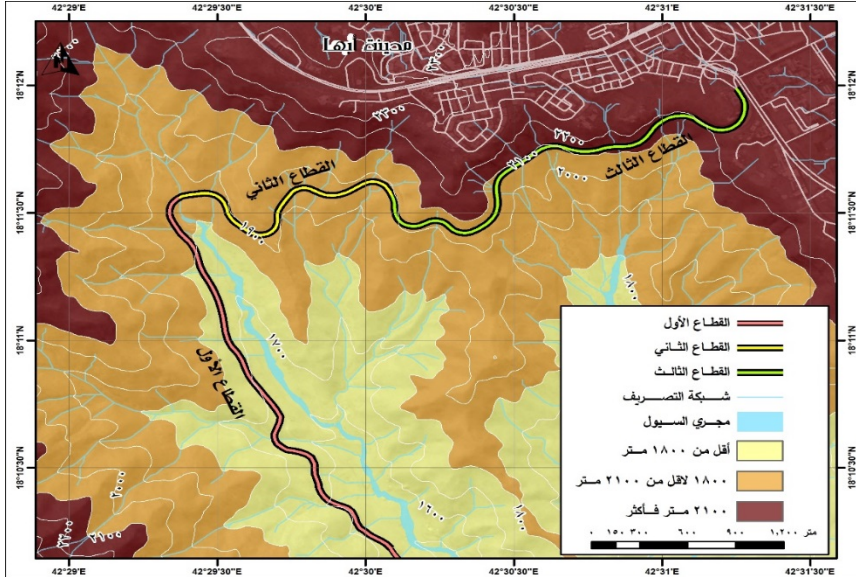
(1) DEM: تم استخدام صور القمر الصناعي الأمريكي Ikonos ذات الخاصية التجسيمية (Stereo-pair) لإنشاء DEM بدقة وضوح تصل الي 5 م.

- **القطاع الثالث:** يبدأ من الكيلو 81 من مدينة الدرب باتجاه مدينة أبها يتراوح ارتفاعه ما بين 1994 متراً - 2256 متراً بطول بلغ 3.8 كم تقريباً، وبمعدل انحدار يصل لنحو 63 تقريباً.

2- الخصائص الجيولوجية

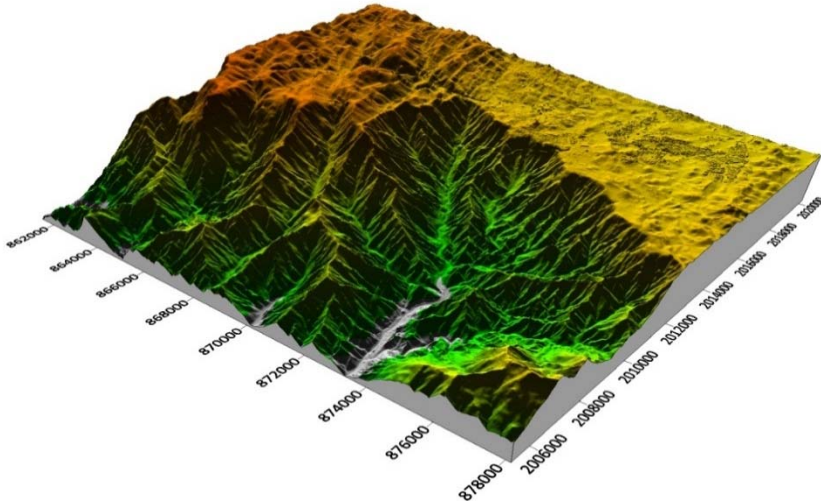
يتضح من تحليل شكل (4) أن منطقة الدراسة جزءاً من الدرع العربي القديم الذي تأثر بحركتي الرفع والانكسار التي تعرضت لها منطقة الدراسة على مر العصور الجيولوجية بداية من عصر ما قبل الكامبري والتي أدت الي ظهور العديد من القمم الجبلية المنفردة مثل جبل ذره وكوثر الشامى وكوثر اليماني (Greenwood, 1985)، ويمكن حصر التنوع الصخري بالمنطقة وفق النحو التالي:

- **الصخور النارية:** وتنتمي لفترة ما قبل الكامبري وهي عبارة عن صخور أشهرها الجرانيت والكتل البازلتية وتمثل جزءاً من صخور القاعدة (أحمد محمود الشنطي، 1993م، ص:16) تلك الصخور النارية تغطي معظم منطقة الدراسة، بمساحة بلغت 82702م² بنسبة 77.7% من منطقة الدراسة شكل (2).
- **الصخور المتحولة:** أشهرها صخر الشست، وهو أكثر الصخور المتحولة انتشاراً في المنطقة والذي يظهر في الأجزاء الشرقية لمدينة أبها، بالإضافة إلى مجموعة الحجر الأخضر هو صخر شستي متحول من صخور نارية قاعدية ومن صخور رسوبية متحولة (محمد صبري محسوب، 1407، ص4) والتي تظهر في جنوب شرق منطقة الدراسة وتكون أشكال السطح في مناطق الصخور المتحولة أقل تضرساً بشكل عام وبمساحة بلغت 14149م²، بنسبة 13.3% من منطقة الدراسة.

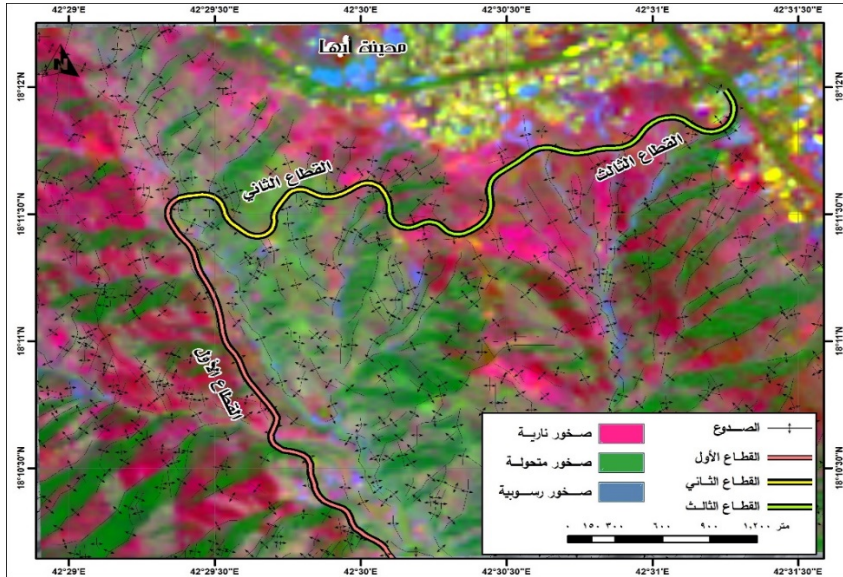


المصدر: نموذج الارتفاعات الرقمي بدقة وضوح 5 متر.
شكل (2) الخصائص الطبوغرافية لمنطقة الدراسة

- الصخور الرسوبية والرواسب السطحية: تتمثل في رواسب الزمن الرابع وهي رواسب سطحية حديثة التكوين جلبتها مياه الأودية وأرسبتها في قيعان الأودية وهي رواسب وديان طميية حديثة التكوين او رواسب أعيد ترسيبها وتتكون من الحصى والرمل والسلت، اضافة لصخور الحجر الرملي بمساحة بلغت 9648م²، بنسبة 9.1% من منطقة الدراسة.



المصدر: نموذج الارتفاعات الرقمي بدقة وضوح 5 متر.
شكل (3) نموذج ثلاثي الأبعاد لطبوغرافية منطقة الدراسة



المصدر: الخرائط الجيولوجية مقياس 1/100.000 وتحليل PCA لصورة القمر الصناعي Pleiades 1A بدقة وضوح 0.50 متر.

شكل (4) التوزيع الجغرافي للتكوينات الجيولوجية بمنطقة الدراسة

ومما سبق يمكننا ملاحظة أن الصخور النارية والمتحولة شغلت نسبة 91% من تكوينات منحدراته بينما الصخور الرسوبية نحو 9% تقريباً مما يجعل المنطقة مهددة بأخطار السقوط الصخري والانزلاق الصخري بشكل أكبر من أي نمط آخر من أنماط حركة المواد الصخرية المحتملة حال توافر الظروف المهيئة لذلك، ويمكن من خلال الربط بين الطبوغرافيا والجيولوجيا تقسيم مسار الطريق الي قطاعات وفق التضاريس تحديد التكوينات الجيولوجية في قطاعات الطريق جدول (1) وشكل (4) إلى ما يلي:

- **القطاع الأول:** شغلت فيه الصخور النارية نسبة تبلغ 55.5% بينما جاءت الصخور الرسوبية في المرتبة الثانية بنسبة 24.6% وجاءت الصخور المتحولة في المرتبة الأخيرة بنسبة بلغت 19.9% من إجمالي مساحة القطاع الأول البالغة 10091 متر مربع تقريباً.

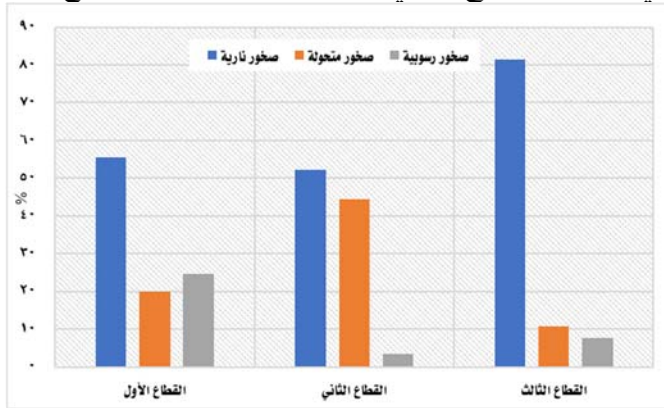
جدول (1)

التوزيع الجغرافي للتكوينات الجيولوجية على طول منحدرات الطريق

الإجمالي		القطاع الثالث		القطاع الثاني		القطاع الأول		نوعية الصخور / القطاع
%	المساحة 2م	%	المساحة 2م	%	المساحة 2م	%	المساحة 2م	
77.7	82702.2	81.5	74479.0	52.1	2626.2	55.5	5597.0	الصخور النارية
13.3	14149.6	10.8	9902.7	44.4	2238.4	19.9	2008.5	الصخور المتحولة
9.1	9647.9	7.7	6987.4	3.5	175.2	24.6	2485.3	الصخور الرسوبية
100	106500	100	91369.1	100	5039.8	100	10090.8	الإجمالي

المصدر: اعتماداً على تحليل الخرائط الجيولوجية.

- **القطاع الثاني:** شغلت فيه الصخور النارية نسبة تبلغ 52.1% بينما جاءت الصخور المتحولة في المرتبة الثانية بنسبة 44.4% وجاءت الصخور الرسوبية في المرتبة الأخيرة بنسبة بلغت 3.5% من إجمالي مساحة القطاع الثاني البالغة 5039.7 متر مربع تقريباً.



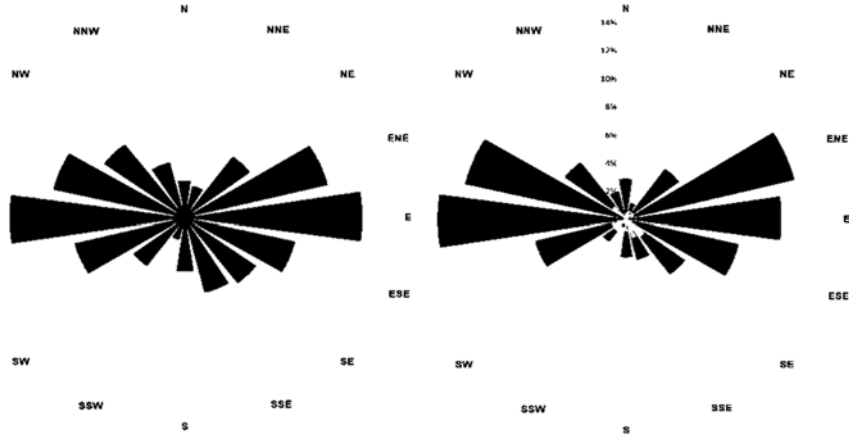
المصدر: اعتماداً على الجدول السابق

- شكل (5) التوزيع الجغرافي للتكوينات الجيولوجية على طول قطاعات الطريق**
- **القطاع الثالث:** شغلت فيه الصخور النارية مساحة بلغت نسبتها 81.5% بينما جاءت الصخور المتحولة في المرتبة الثانية بنسبة 10.8% وجاءت الصخور الرسوبية في المرتبة الأخيرة بنسبة 7.7% من إجمالي مساحة القطاع الثالث البالغة 5039.7 متر مربع تقريباً.

3- البنية الجيولوجية

تعد الانكسارات مواطن ضعف في التكوين الصخري لذلك تم العمل على تحليل المرئيات الفضائية باستخدام بعض أساليب المعالجة المتخصصة **Lineation Extraction** عن طريق برنامج **PCI Geomatica** والتي تم فيها استخراج التراكيب الخطية عبر عدد من المعالجات الرقمية المتغيرة على الطيف المرئي رقم (4) **NIR**، ويلاحظ من تحليل شكل (4) أن المنطقة تعرضت لبعض الحركات الأرضية التي نتج عنها العديد من الانكسارات التي اختلفت في اتجاهاتها وأطوالها شكل (5) و(6)، وقد انعكس تأثير هذه الصدوع على اتجاهات شبكات التصريف وكذلك في إعطاء بعض الحافات بشكل قائم الزاوية، وفق نتائج تحليل صور الأقمار الصناعية جدول (2)، وأيضاً أن المنطقة يوجد بها 978 صدعاً يصل إجمالي أطوالها 684.2 كم بمتوسط طول بلغ 0.413 كم، ويمكن تقسيمهم كالتالي:

- **الصدوع ذات الاتجاه الشمالي/الجنوبي:** تأخذ اتجاه صدع الأردن وتبلغ أعداد تلك الصدوع نحو 254 صدع، بنسبة 25.97% من إجمالي عدد صدوع المنطقة، ويبلغ مجموع أطوالها 211.3 كم، بنسبة 30.9% من إجمالي أطوال صدوع منطقة الدراسة.



المصدر: الخرائط الجيولوجية مقياس 1/100.000 وتحليل صورة القمر الصناعي Pleiades 1A بدقة وضوح 0.50 متر.

شكل رقم (6) أعداد الصدوع بمنطقة الدراسة. شكل رقم (7) أطوال الصدوع بمنطقة الدراسة.

• **الصدوع ذات الاتجاه الشرقي / الغربي:** تأخذ هذه الصدوع اتجاه البحر المتوسط، ويعرف هذا النظام من الصدوع باسم الصدوع التثيية (Said, R., 1962, p.35)، وتبلغ أعداد تلك الصدوع نحو 74 صدع، بنسبة 7.5% من إجمالي عدد صدوع المنطقة، ويبلغ مجموع أطوالها 58.7 كم، بنسبة 8.6% من إجمالي أطوال صدوع منطقة الدراسة.

جدول (2) اتجاهات وأطوال الصدوع في منطقة الدراسة

الاتجاه	العدد	% من أعداد الصدوع	إجمالي الأطوال/كم	% من أطوال الصدوع
شمال / جنوب	254	25.97	211.3	30.9
شمال شرق/جنوب غرب	302	30.88	261.8	38.3
شرق/غرب	74	7.57	58.7	8.6
شمال غرب/جنوب شرق	348	35.58	152.3	22.2
الإجمالي	978	%100	684.2	%100

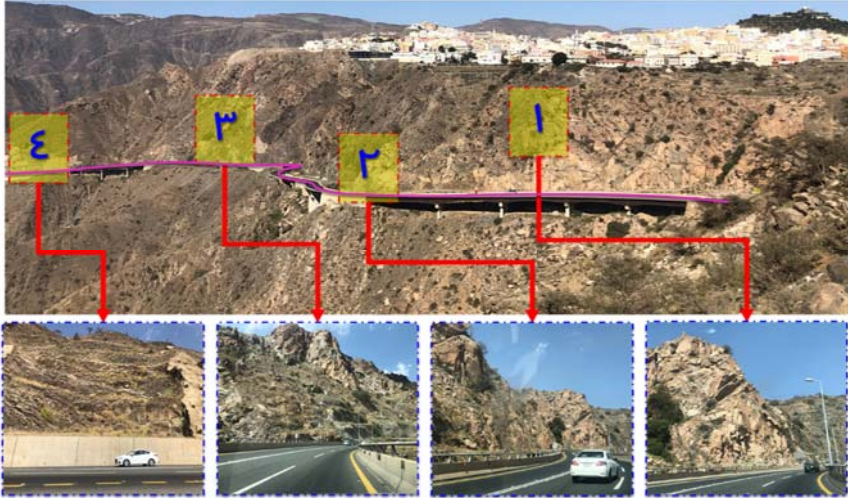
المصدر: اعتماداً على نتائج تحليل صور القمر الصناعي الفرنسي Sentenal-2 بعد إجراء

تحليل Lineation Extraction

- الصدوع ذات الاتجاه الشمالي الشرقي/الجنوبي الغربي: ينفق هذا الاتجاه مع اتجاه خليج العقبة، وتبلغ أعداد تلك الصدوع نحو 302 صدع، بنسبة 30.8% من إجمالي عدد صدوع المنطقة، ويبلغ مجموع أطوالها 261.8 كم، بنسبة 38.3% من إجمالي أطوال صدوع منطقة الدراسة.
- الصدوع ذات الاتجاه الشمالي الغربي / الجنوبي الشرقي: وتعرف باسم الصدوع الأريثيرية نسبة إلى أخدود البحر الأحمر (Said, 1962, p.35)، وتبلغ أعداد تلك الصدوع نحو 348 صدع، بنسبة 35.6% من إجمالي عدد صدوع المنطقة، ويبلغ مجموع أطوالها 152.3 كم، بنسبة 22.2% من إجمالي أطوال صدوع منطقة الدراسة. كما يلاحظ مدى تأثير الفواصل والشقوق بدرجة كبيرة على صخور منحدرات الطريق صورة (1) حيث تعمل على إضعاف الصخور وتوغل تأثير التجوية الميكانيكية داخل هذه الفواصل، وبالتالي تفتت الصخور، هذا وتنتشر الشقوق والفواصل في كل أنواع الصخور الموجودة بمنطقة الدراسة سواء كانت صخور نارية أو متحولة أو رسوبية، وهي متعددة الاتجاهات فمنها المتعامدة أو مائلة عكس اتجاه الانكسارات او معها ، وترجع نشأة هذه الفواصل والشقوق إلى نوع الصخر: وتتمثل في انكماش الصخور وتمدها تبعاً لتكويناتها المعدنية، وتأثرها باختلاف المدى الحراري السنوي واليومي ليلاً ونهاراً ، كما يمكن إرجاع نشأة بعض منها كنتيجة طبيعية لأعمال إزالة "الضغط أو الحمولة" التي تعلق الصخر وتسمى في هذه الحالة بالفواصل الصفائية وترجع نشأتها إلى عمليات القص والتوتر التي تصاحب النشأة التكتونية (حسن رمضان سلامة، 1983، ص11).

يمكن من خلال تحليل العلاقات المكانية بين قطاعات الطريق السالف الإشارة إليها تحديد الموقع التي تعتبر مصدر تهديد في قطاعات الطريق إلى ما يلي:

- **القطاع الأول:** جاء متقاطعاً مع صدوع بلغ عددها 10 صدوع بنسبة 25.6% من إجمالي عدد الصدوع بإجمالي طول بلغ 2109 متر تقريباً.
- **القطاع الثاني:** جاء متقاطعاً مع العديد من الصدوع بلغ عددها 13 صدوع بنسبة 33.3% من إجمالي عدد الصدوع بإجمالي طول بلغ 2670 متر تقريباً.
- **القطاع الثالث:** جاء متقاطعاً مع العديد من الصدوع بلغ عددها 16 صدوع بنسبة 41.1% من إجمالي عدد الصدوع بإجمالي طول بلغ 3236 متر تقريباً.



صورة (1) الوضع الراهن لبعض الحافات الصخرية على طريق عقبة ضلع، أبريل 2020م

4- زوايا الانحدار بمنحدرات الطريق:

يمكن من خلال العمل تبعاً لتصنيف (Young,1972,P.173) تقسيم منحدرات الطريق على النحو التالي:

- **القطاع الأول:** يلاحظ أن واجهات منحدراته التي تقل زوايا انحدارها عن 18° شكلت نسبة 42.7% منها ويتفق توزيعها الجغرافي مع المناطق السهلية المنبسطة والأجزاء المرتفعة من جوانب بعض الأودية والأجزاء السفلية من المنحدرات ، بينما واجهات المنحدرات التي تزيد زوايا انحداراتها عن 18°: شغلت نسبة 57.2% من منحدرات الطريق، وتعتبر هي المستهدفة بالدراسة بسبب انتشارها

اضافه الي أنها المهدة بخطر حركة المواد الصخرية والتي تتمثل في كل من حركات "القفز والتدحرج" وفقاً لزاوية ميل منحدرات الطريق بشكل عام ، وتتواجد في شكل منقطع في بعض المواقع ومتصل في مواقع أخرى على الطريق مباشرة في مسافة تباعد أقل من (5) متر على طول مسار الطريق.

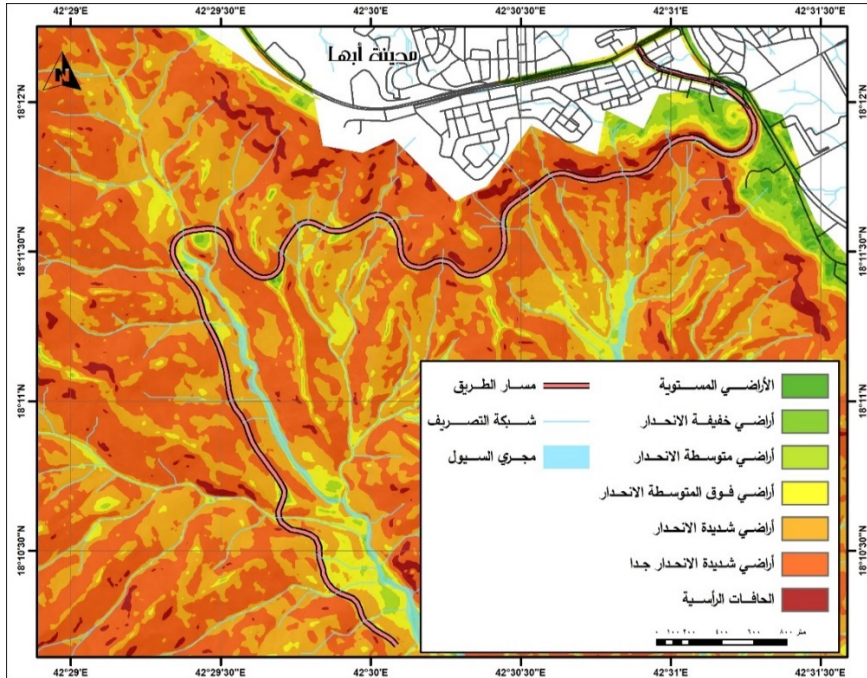
جدول (3)

التوزيع الجغرافي لزاويا انحدار المنحدرات على طول مسار الطريق

الإجمالي		القطاع الثالث		القطاع الثاني		القطاع الأول		القطاع / التكوين
%	المساحة	%	المساحة	%	المساحة	%	المساحة	
0.1	272.2	صفر	صفر	0.2	100	0.2	172.2	الأراضي المستوية
1.1	2618.2	1.1	1035.5	1.5	749.6	0.9	833.1	أراضي خفيفة الانحدار
7.8	18378	5.2	4754.5	9.8	5027.7	9.4	8595.4	أراضي متوسطة الانحدار
28.3	66695	18.2	16694	39.2	20166	32.3	29836	أراضي فوق المتوسطة الانحدار
48.1	113184	50.1	45817	40.1	20650	50.6	46717	أراضي شديدة الانحدار
12.9	30389	22.5	20554	7.3	3742.7	6.6	6092.3	أراضي شديدة الانحدار جدا
1.6	3735.8	2.9	2669.7	2.1	1066.1	0.0	صفر	الحافات الرأسية
100	235272	100	91525	100	51501	100	92246	الإجمالي

المصدر: اعتمادا على تحليل نماذج الارتفاعات الرقمية DEM بدقة 5 متر.

- **القطاع الثاني:** يلاحظ أن واجهات منحدراته التي تقل زوايا انحدارها عن 18° : شكلت نسبة 50.7% من منحدرات الطريق ويتفق توزيعها الجغرافي إلى حد ما مع المجاري الرئيسية للأودية والأجزاء المرتفعة من جوانب الأودية والأجزاء السفلية من المنحدرات، بينما واجهات المنحدرات التي تزيد زوايا انحداراتها عن 18° : شغلت نسبة 49.5% من منحدرات الطريق، وتعتبر هذه الفئة هي المستهدفة بالدراسة بسبب أنها المناطق المهددة بخطر حركة: "السقوط الصخري" بشكل خاص إضافة إلى حركتي "القفز والتدحرج" وفقاً لزواوية ميل منحدرات الطريق بشكل عام.
- **القطاع الثالث:** يلاحظ أن واجهات منحدراته التي تقل زوايا انحدارها عن 18° : شكلت نسبة 42.5% من منحدرات الطريق ويتفق توزيعها الجغرافي إلى حد ما مع الأجزاء المرتفعة من جوانب الأودية والأجزاء السفلية من المنحدرات، بينما واجهات المنحدرات التي تزيد زوايا انحداراتها عن 18° : شغلت نسبة 75.5% من منحدرات الطريق، وتعتبر هذه الفئة هي المستهدفة بالدراسة حيث إنها المناطق المهددة بخطر حركة السقوط الصخري بشكل أساسي مع أنماط أخرى للحركة مثل "القفز والتدحرج" وفقاً لزواوية ميل منحدرات الطريق.



المصدر: اعتماد على نموذج الارتفاعات الرقمي DEM، بدقة وضوح 5 متر
شكل (8) زوايا الانحدار بمنطقة الدراسة

مما سبق يمكن لنا الخروج بأن 62.6% من منحدرات الطريق مهددة بخطر حركة السقوط الصخري بشكل خاص وكذلك "الانزلاق والقفز" لصخور المنحدرات بعد اصطدامها حيث تؤثر شدة الانحدار من ناحية واتجاه الانحدار من ناحية أخرى على جريان المياه السطحية الناتجة عن التساقط المطري، فكلما زاد الانحدار زاد الجريان وترتب على ذلك وجود احتمالية عالية لحركة المواد الصخرية بشكل أسرع والعكس صحيح، ويمكن اعتبار الخصائص الانحدارية انعكاساً لعامل الجاذبية التي تمثل دورها انعكاس للعمليات الجيومورفولوجية المكونة لسطح الأرض.

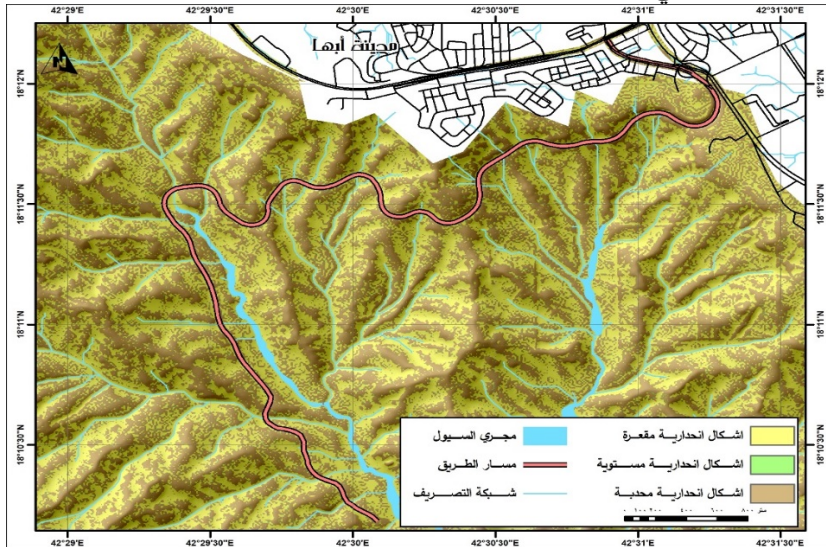
5- معدل تقوس منحدرات الطريق Curvature:

جدير بالذكر أن عملية السقوط الصخري التي تحدث فوق المنحدرات هي التي تعطي المنحدر شكله وتعمل على تقلصه فالمنحدرات المقعرة عادة ما يرتبط بها زحف لركامات الهشيم واستقراره ، في حين ترتبط المنحدرات المحدبة المقعرة بكل من حركتي السقوط الصخري وزحف الهشيم حيث يرتبط بالعنصر المحدب السقوط الصخري الناتج عن عمليات التقويض السفلى بفعل المياه الجارية التي تعد من العوامل المسؤولة عن تكوين هذا النوع من المنحدرات، إلى جانب فعل التجوية التي تعمل بصورة دائمة ومستمرة على اضعاف التماسك الصخري، أما منحدرات الجروف الرأسية المقعرة فهي الأكثر تعرضاً للانهيئات الصخرية حيث يرتبط بها كل من ظاهرتي السقوط الصخري والانزلاق الصخري والتي يرجع سبب حدوثها إلى شدة الانحدار وكثرة الفواصل الرأسية والأفقية التي على أساسها يتحدد نوع الحركة هل هي سقوط صخري أم انزلاق كذلك حجم الكتل الصخرية المتساقطة أو المنزلة (اسلام سلامة محمد، 2004، ص227).

وقد تم تطبيق طريقة Neighborhood Circle⁽¹⁾ في اشتقاق معدلات تقوس منحدرات الطريق من خلال تحليل نموذج الارتفاعات الرقمي الـ DEM شكل (8) ووفقاً لجدول (4) يمكن تصنيف عناصر تقوس منحدرات الطريق كالتالي:

1- تمتاز طريقة Neighborhood Circle بالدقة حيث يتم فيها احتساب معدل مركز القيم الرقمية Pixels عبر استخدام الشكل الدائري بنصف قطر 5 متر عبر التطبيق على نموذج الارتفاعات الرقمي Dem من خلال التحليلات ثلاثية الأبعاد ضمن حزم برمجيات ArcGIS لإنتاج خريطة تقوس المنحدرات بمنطقة الدراسة حيث يعبر التقوس عن مدى تحدب Convexity أو تقعر Concavity منطقة ما على سطح الأرض، ويتم حساب مقدار التقوس في المنطقة لكل خلية من خلايا الشكل الخلوي Raster.

- **العناصر المقعرة (قيم التقوس سالبة):** تتراوح قيمتها بين (-0.67 الي 0.1) وشغلت نسبة 68.5% من منحدرات الطريق وهي النسبة الأكبر في معدلات التقوس بالمنطقة ككل، وتتمثل في منابع الأودية، وهو يكون غالباً في الجزء السفلي من قطاعات المنحدرات وسبب نشأته يرجع الي عمليات الارساب المستمرة وما يتراكم عليه من نواتج عمليات التعرية والتجوية الدائمة ومن ثم تقل زاوية انحدار سطحه فيأخذ الشكل المقعر.
- **عناصر الدرجة القصوى:** تشغل هذه الفئة نسبة 22.6% من منحدرات الطريق نتيجة لعمليات التعرية التي ساهمت في التقليل من معدلات تحذب القمم حيث اثرت عمليات الترسيب في ملئ المناطق المنخفضة الموجودة مما ساعد على ظهور هذه الانحدارات بشكلها المستوي في هذه المناطق أكثر من غيرها.
- **اشكال انحدارية محدبة (قيم التقوس موجبة):** تشغل هذه الفئة نسبة 8.9% من منحدرات الطريق وهي تكون متلازمة مع الاشكال الانحدارية المقعرة حيث تتعرض الأجزاء العليا من هذه الأشكال الانحدارية الي فعل التعرية المائية بفعل الجريان المائي الغطائي نتيجة لتساقط الامطار وما يترتب عليها من نقل للحطام الصخري من أعالي السفوح لتتشكل فيما بعد الأشكال الانحدارية المحدبة ومن ثم تتراكم عند قاعدة المنحدر بوصفها رواسب اقدام المنحدرات فتعمل علي حماية هذه الأجزاء الانحدارية المقعرة من التعرية لهذا بقيت محافظة علي خصائصها الشكلية المقعرة.



المصدر: اعتماد على نموذج الارتفاعات الرقمي DEM، بدقة وضوح 5 متر
شكل (9) معدلات التقوس بمنطقة الدراسة

جدول (4)

التوزيع الجغرافي لمعدلات تقوس المنحدرات على طول مسار الطريق

العناصر/ القطاع	القطاع الأول		القطاع الثاني		القطاع الثالث		الإجمالي	
	الطول	%	الطول	%	الطول	%	الطول	%
المقعرة	58554.8	63.6	27912.5	54.3	74479.1	81.5	160946	68.5
الدرجة القصى	20110	21.8	23078.5	44.9	9902.8	10.8	53091.3	22.6
محدبة	13430.1	14.6	425.4	0.8	6987.5	7.6	20843	8.9
الإجمالي	92094.9	100	51416.4	100	91369.4	100	234881	100

المصدر: اعتمادا على تحليل نماذج الارتفاعات الرقمية DEM بدقة 5 متر.

6- العوامل المناخية:

تم الاعتماد على بيانات المناخ محطات الأرصاد الجوية للفترة من 1981 إلى 2021م للعناصر التالية: درجة الحرارة والرطوبة النسبية والمطر والرياح، وقد تم اختيار كل من المحطات التالية: أبها والسودة مع استبعاد بيانات محطة "الدرب" لانخفاض منسوبها عن منطقة الدراسة، حتى يمكن من خلالها التعرف على خصائص المناخ السائد في المنطقة، والموضحة بياناتهم المكانية بجدول (5) على النحو التالي:

جدول (5) بيانات محطات الأرصاد الجوية المستخدمة في الدراسة

اسم المحطة	دائرة العرض	خطوط الطول	الارتفاع عن سطح البحر (م)
أبها	18 13 59	42 39 39	2093
السودة	18 16 9.91	42 22 3.88	34.9

المصدر: الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة.

أ- درجة الحرارة:

تؤثر درجة الحرارة في باقي العناصر المناخية الأخرى، كما تساعد على نشاط التجوية الميكانيكية وحدوث تشقق وتفتت للمواد الصخرية بما يؤثر على الأشكال الجيومورفولوجية من خلال "المدى الحراري" ومن المعروف أنه كلما زاد المدى الحراري ساعد ذلك على تفكك الصخور ميكانيكياً، وكذلك تمدد وانكماش الصخور بسبب ارتفاع قيم درجات الحرارة وانخفاضها، وهذا فضلاً عن اختلاف نسب تمدد وانكماش المعادن داخل الصخر الواحد مما يؤدي إلى التشقق ثم التفكك الصخر وانفراط حبيباته الخشنة، ويمكن القول: إن عملية التجوية وتفكك الصخور لا تتوقف على المدى الحراري فقط، بل تتأثر أيضاً بنوع وتركيب الصخور، وتعتبر هذه الصخور المفككة مصدر خطر على الطريق في مواقع الانحدارات الرأسية ومناطق عدم استقرار لبعض الكتل

الصخرية على المنحدرات القريبة من الطرق والملاصقة له مباشرة مما يؤدي الي تعرضه بشكل متكرر لأنواع مختلفة من أنماط حركة المواد الصخرية المختلفة.

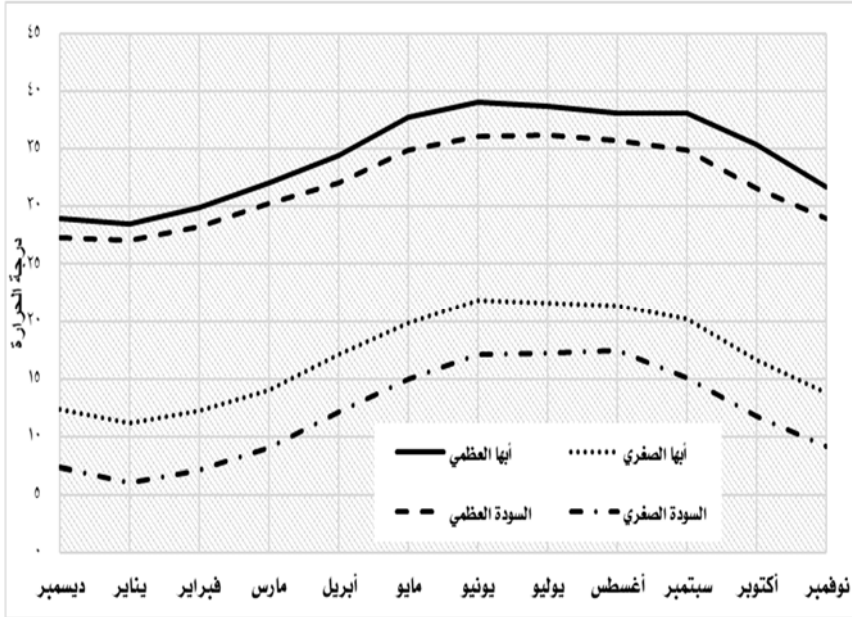
يتضح من خلال تحليل جدول (6) وشكل (10) ما يلي:

- تصل قيم درجات الحرارة العظمى الشهرية الي اعلي معدلاتها في شهر يونيو في أبها حيث سجلت 39.1 م بينما في السودة سجلت 36.2 م في شهر يوليو ثم يعود الانخفاض تدريجياً في محطات منطقة الدراسة.
- ترتفع قيم درجات الحرارة العظمى في جميع المحطات ما بين شهري أبريل ويونيو بما فيها محطة السودة.
- انخفاض قيم درجة الحرارة الصغرى بشكل كبير في شهر يناير لجميع المواقع بينما تكون أعلاها في درجة الحرارة الصغرى في محطة السودة التي سجلت 6.1 م في ذات الشهر.
- تمثل قيم درجات الحرارة الموضحة في جدول (7) الحرارة في الظل والتي تختلف تماماً عن قيم درجة حرارة الصخور المعرضة لأشعة الشمس المباشرة والتي ترتفع لنحو 50% (Ollier,1976, p.105) مما يساعد في عملية التجوية الميكانيكية.

جدول (6) المتوسط الشهري لقيم درجات الحرارة العظمى والصغرى بمحطات المنطقة الفترة 1982-2021م

فصول السنة	الشهر	أبها		السودة	
		الصغرى	العظمى	الصغرى	العظمى
شتاء	ديسمبر	12.30	29.00	7.40	27.30
	يناير	11.20	28.50	6.10	27.10
	فبراير	12.20	29.90	7.10	28.30
ربيع	مارس	14.00	32.10	9.00	30.30
	أبريل	17.10	34.40	12.10	32.10
	مايو	19.80	37.80	14.90	34.90
صيف	يونيو	21.90	39.10	17.10	36.10
	يوليو	21.60	38.70	17.20	36.20
	أغسطس	21.40	38.10	17.40	35.80
خريف	سبتمبر	20.20	38.10	15.10	34.90
	أكتوبر	16.60	35.40	11.70	31.60
	نوفمبر	13.80	31.70	9.10	29.00

المصدر: الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة، بيانات غير منشورة.



شكل (10) المتوسط الشهري لدرجات الحرارة العظمي والصغرى " أبها والسودة " الفترة 1982-2021م

تؤدي التغيرات اليومية والفصلية في قيم درجات الحرارة الي اضعاف مقاومة الصخر أمام عمليات التجوية والتعرية كما يؤدي ارتفاع قيم درجات الحرارة الي تمدد المعادن المختلفة المكونة للصخر بسبب مقاومتها لذا فإن نتيجة لتكرار عمليات تسخين وتبريد الصخور تحت تأثير التغيرات الحرارية ، حيث يسمّى تعاقب حالات التمدد والانكماش التي يتعرض لها الصخر في القشرة العلوية إلى تواتر بين السطح الخارجي للكتلة الصخرية والعمق مسبباً ظاهرة التقشر الصخري الذي يحدث حسب مستويات متوازية لسطح الكتلة الصخرية ، وتساعد التغيرات اليومية والفصلية في قيم درجات الحرارة على حدوث اجهاد للكتلة الصخرية مما يؤدي إلى زيادة اتساع الفواصل ومن ثم تكثر التشققات في الاتجاهات المختلفة مما يؤدي إلى تكسر الصخر وتفتته خاصة في طبقات الصخور المنكشفة (سيد محمود مرسي، 2010، ص:125)، كما يصبى تأثير التباين في درجة الحرارة أكثر وضوحاً في التجوية الميكانيكية ويزداد مع توافر الرطوبة.

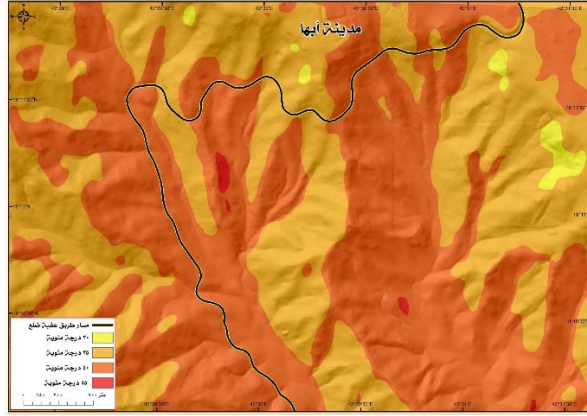
لذا من أجل الوصول لتحديد دقيق لمدي تأثير التغيرات الحرارية الفصلية علي منحدرات منطقة الدراسة تم الاعتماد علي تحليل صور القمر الصناعي Landsat 8 و Landsat 9 الطيف المرئي رقم Thermal Band (6) كمصدر للبيانات الرقمية لتحديد قيم درجات حرارة سطح الأرض وذلك بعد القيام بأعمال المعالجة الإشعاعية للطيف

(6) من خلال التصحيح الجوي الإشعاعي **Atmospheric Correction** لتحديد الطاقة الموجودة بمرئية القمر الصناعي **Landsat** وفق المنبعث من سطح الأرض فقط أو ما يطلق عليه **Surface Radiance** كدراسة مقارنة بين فصلي الصيف والشتاء لمقارنة قيم درجات الحرارة السطحية وتحديد نطاقات درجات الحرارة السطحية بمنطقة الدراسة تم العمل علي توظيف **google Earth Engine** للحصول علي صورة قمر صناعي تعكس القيم الحرارية المنبعثة من سطح الأرض بشكل واقعي .

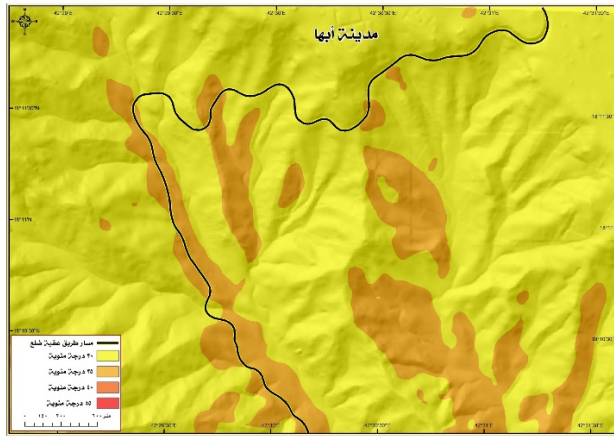
يمكن من خلال المقارنات بين شكل (11) وشكل (12) ملاحظة التباين في قيم درجات الحرارة ما بين فصلي الشتاء والصيف خلال عام 2022م حيث سجلت قيم درجات حرارة صخور سطح الأرض في فصل الشتاء قيم تراوحت ما بين 10° لأقل من 30° بينما في فصل الصيف سجلت قيم تراوحت ما بين 25° لأقل من 40°، مما يشير إلى فعالية التجوية الميكانيكية والأثر الكبير لتباين قيم درجات الحرارة، وذلك في مقارنة بسيطة خلال نفس العام وهذا أيضاً مؤشر لنشاط التجوية هذا وتعتمد شدة أو ضعف عملية التجوية في ذلك على نسيج الصخر ونمط التطرف المناخي (Cliff Ollier , 1981 , P.84) حيث تأخذ هذه العملية اشكال عدة منها (الانفراط الحبيبي، الانفصال الكتلي، ...الخ).

يظهر هذا التأثير على الأسطح الصخرية في المنطقة، كالصخور الرملية التي تكون ذات درجة صلابة عالية، إلا أنها معرضة للتجوية الميكانيكية بسبب وجود كثافة عالية من المفاصل والشقوق مما يجعل قدرتها كبيرة على ترشيق الماء داخلها، ومن أهم تأثيراته التجوية ميكانيكية بفعل تغير قيم درجات الحرارة ويتم فيها حدوث تفتت وتشظي وتحطم للصخور من أحجام وأشكال معينة إلى أحجام أصغر دون أن يحدث بها تغير في تركيبها الكيميائي وهي تنشأ في مختلف أرجاء منطقة الدراسة وخاصة تلك التي يوجد فيها اختلاف في قيم حرارتها السطحية ما بين الليل والنهار وخلال فصول العام المختلفة حيث يؤثر المدى الحراري المتفاوت في الطبقة السطحية للكتل الصخرية ولعمق يتراوح ما بين 10 الي 20سم من سطح الكتلة الصخرية، بما يعد مؤشراً قوياً لنشاط فعل التجوية الميكانيكية خلال فصل الصيف وضعفها في فصل الشتاء كما يبرز تأثير التغير في قيم درجات الحرارة للمعادن المكونة للصخر بسبب عمليتي التمدد والانكماش للمعادن المكونة للصخر مما يساعد علي تكون الفواصل والشقوق واتساع الفراغات خاصة في مناطق الضعف الجيولوجي مما يؤدي إلى تفككه إلى مفتتات أصغر حجماً نتيجة الإجهاد الصخري مع ارتفاع المدى الحراري (فتحي عبد العزيز أبو

راضي، 1998م، ص 33)، وينتج عن هذا النوع من التجوية بعض الظواهر الجيومورفولوجية بفعل تغير قيم درجات الحرارة منها: الانفراط والتفلق والتشظي والتقشر.



المصدر: اعتماد على Landsat 9 عام 2022م بدقة وضوح 15 متر.
شكل (11) قيم درجات الحرارة المنبعثة من الكتل الصخرية بمنحدرات المنطقة فصل الصيف عام 2022م



المصدر: اعتماد على Landsat 9 عام 2022م بدقة وضوح 15 متر.
شكل (12) قيم درجات الحرارة المنبعثة من الكتل الصخرية بمنحدرات المنطقة فصل الشتاء عام 2022م

ب- الرطوبة النسبية:

يتضح من تحليل جدول (7) وشكل (13) أن الرطوبة النسبية في فصل الشتاء تصل لأقصاها في شهر يناير حيث بلغت 59.1% وهي ترتفع خلال فصلي الربيع والصيف حيث تتراوح ما بين (30.9% و50.8%) في أبها مما يجعل المنطقة مهيئة للتساقط المطري خلال هذه الفترة فيما يطلق عليه موسم الأمطار الصيفية وبين (25.7% و52.1%) في السوده مما ينعكس على القمم الجبلية المواجهة للرياح

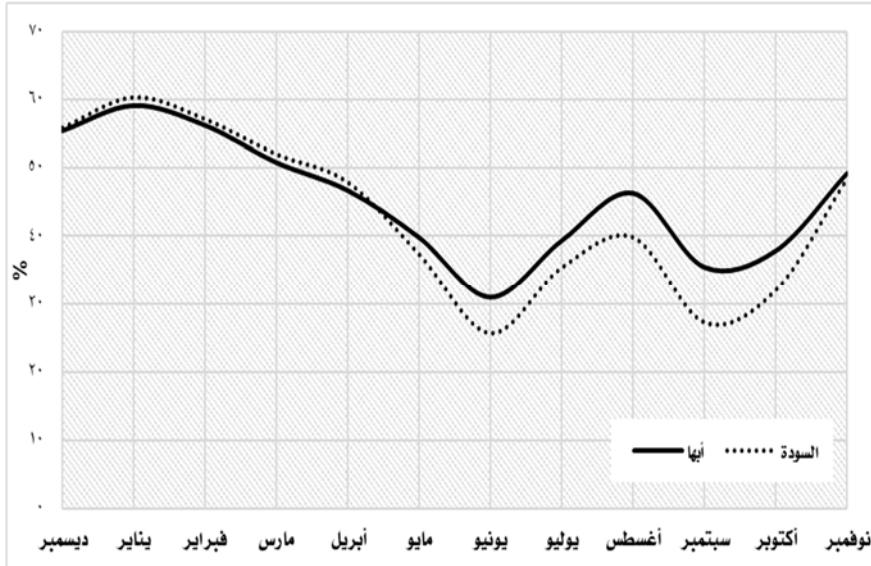
الرطوبة في تكون ظاهرة الندى في آخر ساعات الليل وتكون الضباب في أوقات مختلفة (الشريف، 1984م، ص:46).

جدول (7)

المتوسط الشهري لقيم الرطوبة النسبية بمحطات المنطقة الفترة 1981-2021م

فصول السنة	الشهر	أبها	السودة
شتاء	ديسمبر	55.40	55.90
	يناير	59.10	60.40
	فبراير	56.20	57.20
ربيع	مارس	50.80	52.10
	أبريل	46.70	48.00
	مايو	39.80	37.40
صيف	يونيو	30.90	25.70
	يوليو	39.30	35.40
	أغسطس	46.30	39.90
خريف	سبتمبر	35.40	27.30
	أكتوبر	37.80	32.00
	نوفمبر	49.20	48.50

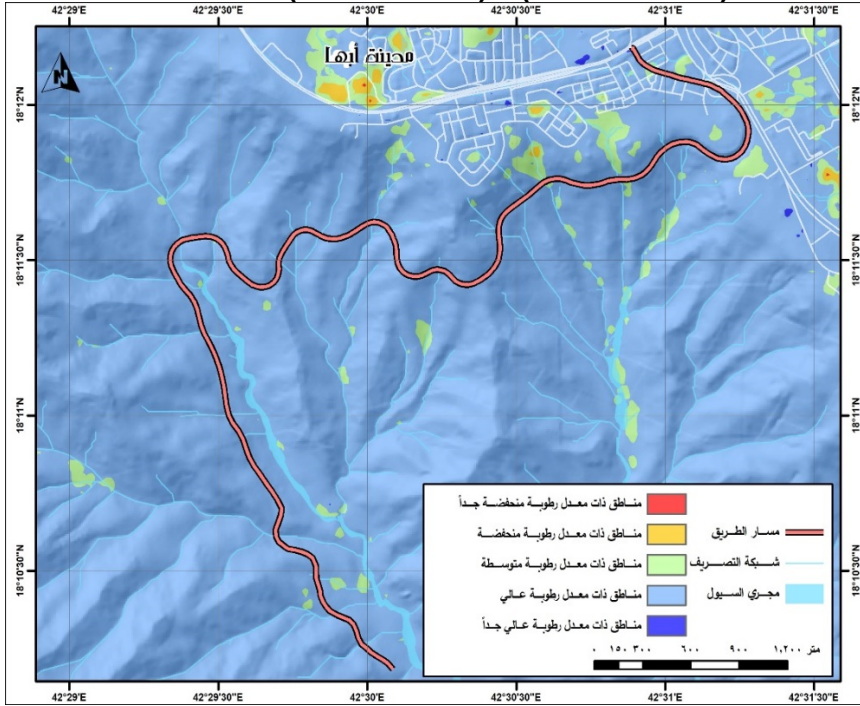
المصدر: الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة، بيانات غير منشورة.



شكل (13) المتوسط الشهري لقيم الرطوبة النسبية الفترة 1981-2021م
 كما يمكن من خلال تحليل صور الأقمار الصناعية تحديد
 مستويات المحتوى الرطوبي في الرواسب بمنحدرات المنطقة شكل (14)

حيث تم العمل على تحليل صور القمر الصناعي Landsat من خلال تطبيق المعادلة التالية (1):

$$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$



المصدر: اعتماد على Landsat 9 عام 2022م بدقة وضوح 15 متر.

شكل (14) مستويات الرطوبة بمنحدرات منطقة الدراسة

يلاحظ من شكل (14) أن ناتج تطبيق المعادلة السابقة تتراوح بين (1 و -1) مع العلم ان القيم الموجبة الأعلى من الصفر تعبر عن المناطق ذات الرطوبة العالية بينما القيم السالبة الأقل من "الصفر" تعبر عن المناطق ذات الرطوبة الأقل او المناطق الجافة، وعليه فإن نسبة كبيرة من المنطقة تندرج تحت تصنيف "معدل الرطوبة العالي" ، حيث تؤدي مصادر الرطوبة المختلفة إضافة لمواقع تواجد النبات الطبيعي في بعض المناطق وارتفاع مستوي الماء الجوي وحدوث عمليات النشع المستمر للمياه في الرواسب إلى زيادة مستويات المحتوى الرطوبي ، إضافة للتغيرات التي تحدث في نسبة رطوبة الكتلة الصخرية عبر تعاقب عمليات البزل والجفاف وظهور الشقوق بشكل كبير في هذه الصخور نتيجة لعمليات التشعب والجفاف مما يزيد حجم الصخور محدثه ضغوط تتبعها زحزحة ومن ثم حركة للصخور مما يساعد في تقليل درجة تحمل

(1) <https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-moisture-index>.

الكتل الصخرية على واجهات المنحدرات لإجهادات القص **Shear Stress** مما يؤدي إلى عدم استقرارها ومن ثم سقوطها لأسفل المنحدر. ج- الرياح:

تتأثر الرياح بعوامل عدة منها طبوغرافية المنطقة بحيث إنه كلما زاد ارتفاع التضاريس بالمنطقة بالأجزاء المجاورة لمسار الطريق كلما كان لها تأثير أقوى على اتجاه الرياح ونظام هبوبها ، ومما لا شك فيه أن منطقة الدراسة بظروفها الحالية تقدم بيئة مناسبة لفعل الرياح ، حيث يلاحظ دور الرياح من حيث تشكيل سطح الأرض ونحت التكوينات الصخرية الضعيفة، كما تقوم بزيادة اتساع المسافات البينية بين الشقوق والفواصل ، وتمهد بشكل تدريجي للمياه لتقوم بدورها كعامل من عوامل التعرية، كما أن سرعة الرياح واتجاهها بما تحمله من مواد عالقة يكون لها بالغ الأثر على الإنسان والأنشطة البشرية.

ومن خلال تحليل جدول (8) وشكل (15) و (16) يتضح وجود تباين كبير في سرعات الرياح بين محطات الدراسة وذلك خلال شهور السنة، يتضح أن سرعة الرياح في أبها تراوحت بين (4.8 - 5.6 كم/ساعة)، وسجل شهر سبتمبر أقل سرعة بينما أعلى سرعة فسجلت في شهر مارس بينما في السوده تراوحت سرعتها بين (4.8 - 6.9 كم/ساعة)، وسجلت أقل سرعة في شهر مايو أما أعلى سرعة فسجلت في شهر مارس ويوليو.

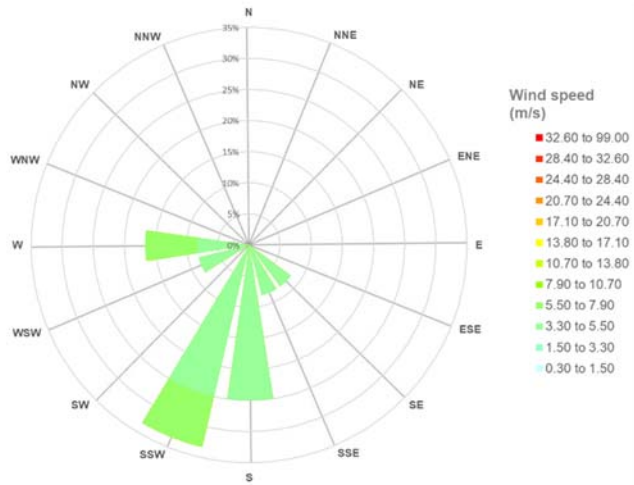
جدول (8)

المتوسط الشهري لسرعة الرياح واتجاهاتها بمحطات المنطقة 1981-2023م

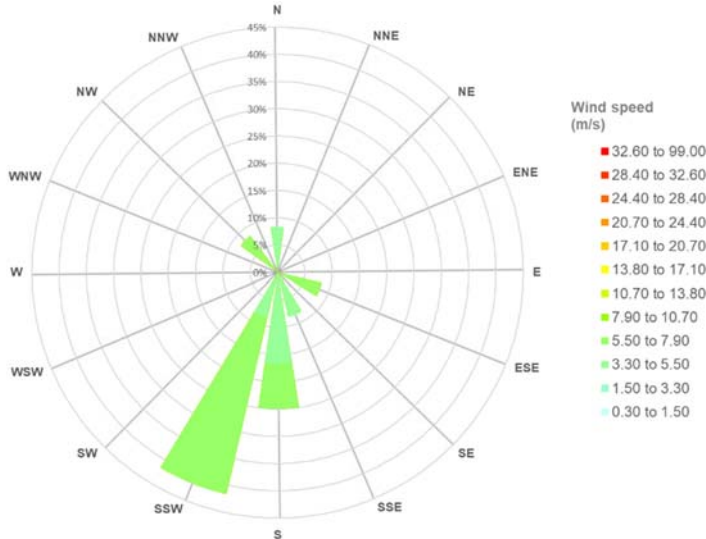
فصول السنة	الشهر	أبها		السوده	
		سرعة الرياح	اتجاه الرياح	سرعة الرياح	اتجاه الرياح
شتاء	ديسمبر	5.00	181.80	5.20	199.00
	يناير	5.10	190.40	6.00	210.50
	فبراير	5.30	192.50	6.60	210.60
ربيع	مارس	5.60	192.50	6.90	207.30
	أبريل	5.40	199.10	5.90	206.90
	مايو	4.90	204.00	4.80	171.70
صيف	يونيو	5.10	242.20	5.20	162.40
	يوليو	5.60	275.30	5.60	305.80
	أغسطس	5.00	259.40	4.90	378.00
خريف	سبتمبر	4.80	166.50	5.60	176.30
	أكتوبر	5.40	146.00	5.70	106.00
	نوفمبر	5.30	175.50	5.10	172.60

المصدر: الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة، بيانات غير منشورة.

أشار (Leopold and Miller , 1964 , PP.358-359) إلى أن أثر الرياح كعامل جيومورفولوجي يتوقف على عدة عوامل أهمها: درجة جفافية الرياح من الرطوبة، سرعة الرياح ومدى انتظام هبوبها، النبات الطبيعية من حيث الندرة ومدى قابلية الصخر ذاته للتعرية ومدى نشاط عمليات التجوية بنوعيتها، كما أنه من المعروف أن فعل الرياح في التذرية يرجع إلى قوة فعل القص **Shear Stress** على سطح الأرض وتعتمد هذه القوة على سرعة الرياح القصوى وكذلك مقدار ودرجة خشونة السطح.



شكل (15) اتجاهات الرياح في ابها الفترة 1981-2023م
المصدر: الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة، بيانات غير منشورة.



شكل (16) اتجاهات الرياح في السودا الفترة 1981-2023م
المصدر: الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة، بيانات غير منشورة.

د- الأمطار:

تبرز أهمية دراسة أكبر كمية مطر خلال اليوم الواحد في تأثيرها الكبير على الأشكال الجيومورفولوجية على منحدرات منطقة الدراسة بشكل عام وآثارها التدميرية على الطرق حيث تعمل الأمطار بصفة عامة على جرف الرواسب وترسيبها على الطرق كما تعمل على سرعة تآكل الصخور الضعيفة وتعمل على نشاط عمليات التجوية بنوعها الميكانيكية والكيميائية مما يحفز عملية حركة المواد الصخرية على المنحدرات الملاصقة للطريق ، فمن خلال تحليل جدول (9) وشكل (17) يتضح أن أكبر كمية مطر سقطت في يوم واحد كانت بمحطة "السودة" حيث بلغت 99.8 ملم وتعتبر أكبر كميات المطر التي سقطت بالمنطقة بشكل عام تليها محطة "أبها" حيث سجل قيم تساقط بلغت 80.12 ملم وذلك في 29 مارس 1997م.

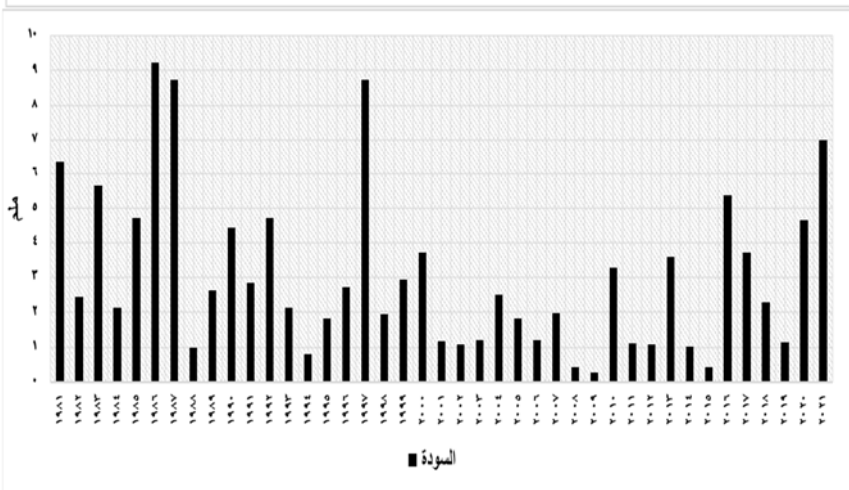
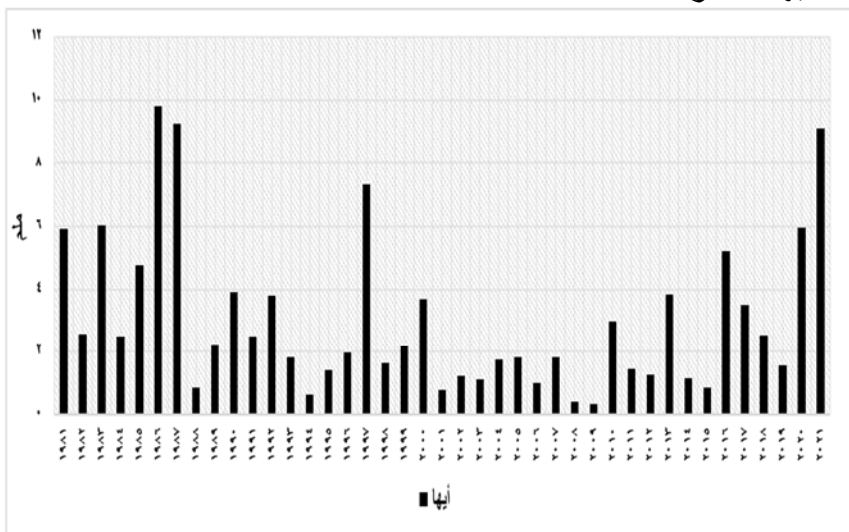
جدول (9)

اعلى كمية مطر سقطت في "يوم واحد" بالمحطات (1981 – 2021م)

المحطة	السنة	الشهر	اليوم	معدل التساقط "ملم"
السودة	1983	فبراير	3	47.45
أبها	1983	مارس	3	44.63
السودة	1990	يوليو	27	36.12
السودة	1990	أغسطس	26	36.06
أبها	1990	سبتمبر	27	36.03
أبها	1991	مايو	6	39.74
السودة	1991	يونيو	6	39.71
السودة	1997	مارس	29	99.82
أبها	1997	أبريل	29	80.12
السودة	1997	مايو	24	52.50
أبها	1997	يوليو	24	39.97
السودة	1999	أغسطس	8	30.99
السودة	2013	يوليو	1	33.87
السودة	2016	أبريل	14	71.36
أبها	2016	مايو	14	63.25
أبها	2021	سبتمبر	6	47.75
أبها	2022	يوليو	26	64.56
أبها	2022	أغسطس	25	42.83
السودة	2022	سبتمبر	26	34.13

المصدر: الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة، بيانات غير منشورة.

يلاحظ من شكل (17) وجود تباين في معدلات التساقط المطري خلال سنوات الدراسة وكذلك ما بين كل موقع وآخر فتكون قليلة في سنوات وتكون غزيرة في سنوات أخرى ، وكذلك في العام الواحد وتختلف من فصل لآخر، ولكن بشكل عام ومن خلال تحليل نتائج التساقط المطري اليومية خلال الفترة المذكورة اتضح أن شهر مارس قد شغل المرتبة الأولى في إجمالي عدد الأيام المطيرة خلال سنوات الدراسة بإجمالي عدد أيام بلغ 38 يوم يليه شهر إبريل بإجمالي 31 يوم كما يلاحظ أن الفترة من شهر مايو وحتى نهاية سبتمبر أشهر جافة تماماً لا تسقط بها أمطار.



المصدر: الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة، بيانات غير منشورة.
شكل (17) معدلات التساقط المطري على محطات منطقة الدراسة (1981م - 2021م)

يلاحظ من خلال دراسة جدول (10) وشكل (18) و(19)، مدي عدد الأيام الممطرة في منطقة الدراسة ونوعية الأمطار وقوتها وغازاتها من أجل تحديد الأيام السيلية أو العادية، يمكن تصنيف العواصف المطرية بالمنطقة إلى:

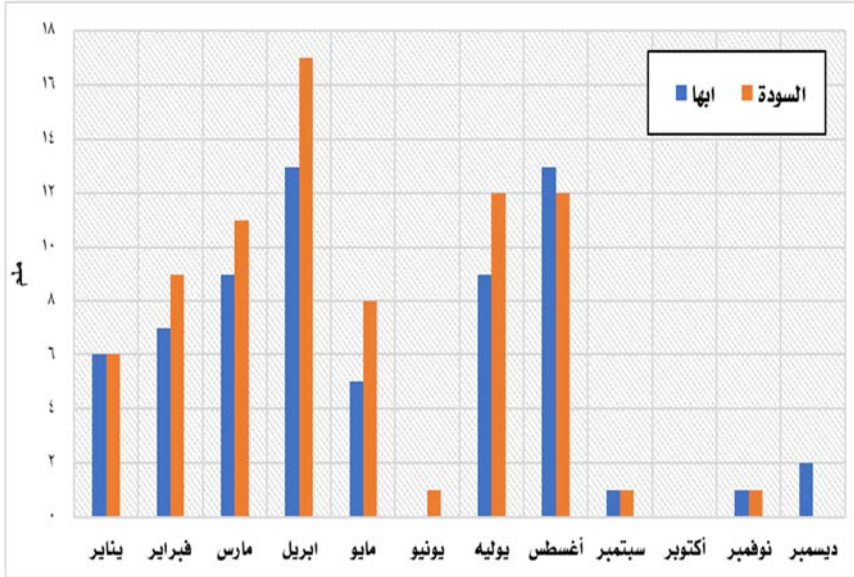
- عاصفة مطرية غزيرة وتتراوح كمية الأمطار المتساقطة من (10) ملم فأكثر: جاءت السودة في المرتبة الأولى من حيث إجمالي عدد مرات تكرارها حيث سجلت 78 تكرار لمعدل التساقط الغزير يليها أبها بمعدل تكرار بلغ 66، وقد جاء كل من شهري أبريل وأغسطس من أعلي الشهور من حيث تكرارية التساقط المطري خلال فترة الدراسة.
- عاصفة مطرية متوسطة وتتراوح كمية الأمطار المتساقطة ما بين (5-9) ملم: جاءت أبها في الترتيب الاول بمعدل تكرار 162 يليها السودة بمعدل تكرار بلغ 17 معدل تكرار، وقد جاء شهر أغسطس من أعلي الشهور من حيث تكرارية التساقط المطري خلال فترة الدراسة.

جدول (10)

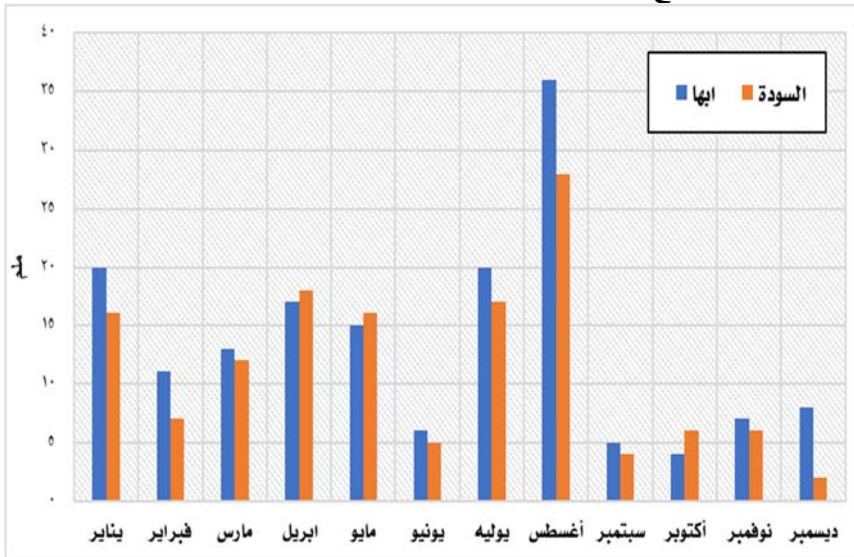
القيم التكرارية لعدد الأيام الممطرة على المنطقة (1981 - 2021م)

أقل من 4 ملم		(5-9) ملم		أكثر من (10) ملم		الشهر/ الموقع
السودة	ابها	السودة	ابها	السودة	ابها	
1246	251	16	20	6	6	يناير
1140	1137	7	11	9	7	فبراير
1242	1245	12	13	11	9	مارس
1188	1194	18	17	17	13	أبريل
1241	1246	16	15	8	5	مايو
1219	1220	5	6	1	0	يونيو
1234	1235	17	20	12	9	يوليه
1221	1214	28	36	12	13	أغسطس
1193	1193	4	5	1	1	سبتمبر
1231	1233	6	4	0	0	أكتوبر
1193	1190	6	7	1	1	نوفمبر
1236	1229	2	8	0	2	ديسمبر
14584	13587	137	162	78	66	الإجمالي

المصدر: الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة، بيانات غير منشورة.



شكل (18) معدل تكرار عدد الأيام الممطرة الأعلى من 10 ملم (1981 – 2021م)
 • عاصفة مطرية قليلة وتتراوح كمية الأمطار المتساقطة ما بين (4-0.1) ملم: جاءت محطة السودة بنحو 14584 وأبها بمعدل تكرار بلغ 13587 معدل تكرار.



شكل (19) المعدل الشهري لتكرار عدد الأيام الممطرة الأعلى من 5-9 ملم (1981 – 2021م)

يؤدي التساقط المطري إلى حالة من عدم ثبات واستقرار للمواد الصخرية على المنحدرات، مما يؤدي إلى حدوث حركة للمواد الصخرية سواء كان نمط الحركة سريعاً أو بطيئاً، حيث إن سقوطها بكميات غزيرة

تتسبب في حدوث سيول عارمة، إذا ما توفرت العوامل المساعدة على حدوثها مثل الانحدار الشديد لسطح المنطقة، وزيادة الفاصل الرأسي بين قمة وقاع المنحدر ومن ثم وصول الكتل الصخرية إلى حالة من عدم الاستقرار، وأيضاً غزارة وكثافة الأمطار، وكثافة أو محدودية الغطاء النباتي على جوانب المنحدر يؤدي إلى زيادة سرعة جريان المياه، وبالتالي قدرتها على جرف كتل صخرية في اتجاه أسفل المنحدر، ويؤثر ذلك في حركة المواد الصخرية من خلال التجوية بفعل عمليتي الترطيب والتجفيف التي تحدث في موسم تساقط الأمطار بفعل تغلغل المياه بين الطبقات الصخرية وتعمل على تشبعها بينما عند ارتفاع فيم درجات الحرارة يحدث لها تجفيف ومع تكرار هذه العملية يؤدي ذلك الي تعرض الكتلة الصخرية الي التشقق والتفكك (عبد الله صبار عبود العجيلي، 2014م، ص:237).

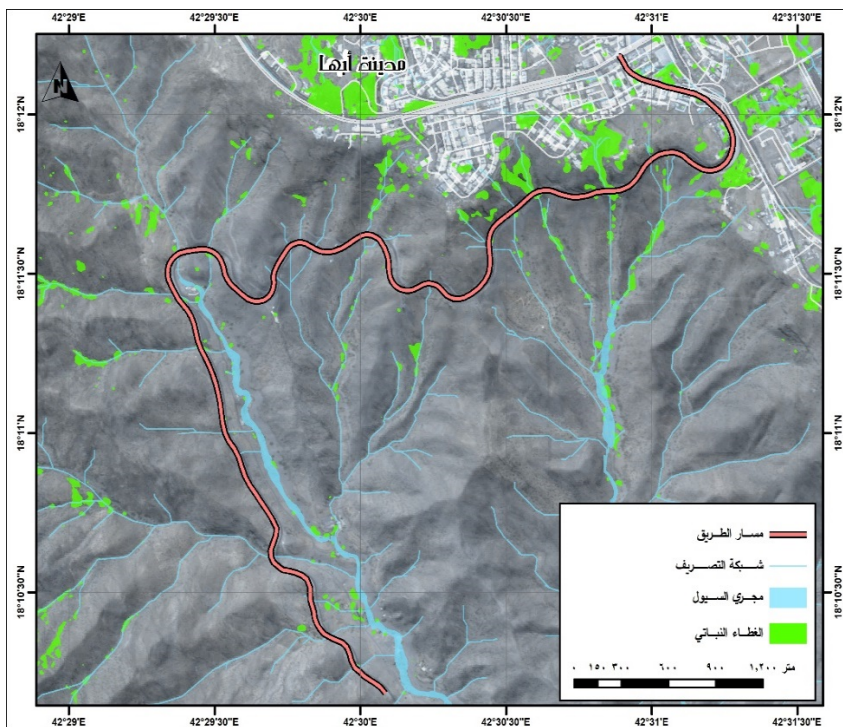
وقد ذكر (Ahnert.,1998, P., 132) أن عملية غسل المنحدر من أهم العمليات التي تتكون بواسطتها المنحدرات المقعرة، وإن أثر هذه العملية يتزايد تدريجياً باتجاه أقدام المنحدر، كما أشار (Cooke, et al, 1982 ,P.,201) إلى أن عملية غسل المنحدرات تزداد كفاءة على المنحدرات ذات درجات الانحدار المنخفضة حيث تقوم المياه الجارية سواء من خلال المسيلات أو الجريان الغطائي باكتساح ما يصادفها من المفتتات الناتجة عن التجوية.

7- الغطاء النباتي:

يعد تحديد الغطاء النباتي ومدى كثافته مؤشراً هاماً في تحديد نوعية الغطاء النباتي الموجود بالمنطقة ومدى تأثير كل من زوايا الانحدار واتجاهاته في منطقة الدراسة تم الاعتماد على تحليل صور القمر الصناعي Sentinel-2 كمصدر للبيانات وذلك لاستنتاج مؤشر النبات الطبيعي NDVI شكل (20) وفق المعادلة التالية⁽¹⁾:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

(1) <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index>



المصدر: اعتماد على Landsat 9 عام 2022م بدقة وضوح 15 متر.
شكل (20) مناطق تواجد الغطاء النباتي على منحدرات منطقة الدراسة.

يتضح من شكل (20) ان منحدرات المنطقة عارية من النبات الطبيعي التي ينحصر وجودها في مجاري الاودية وروافدها العليا وعليه فإن منحدرات المنطقة معرضه بشكل مباشر لأشعة الشمس ، حيث يؤدي وجود الغطاء النباتي بسطح المنحدر إلى تماسك سطح المنحدر وعرقلة حركة المواد، والعكس ، جدير بالذكر أن انعدام الغطاء النباتي على سطح منحدرات منطقة الدراسة من العوامل المسؤولة عن قلة تماسك أجزاء التربة على سطح المنحدرات الشديدة مما يؤدي إلى نشاط عمليات التجوية الميكانيكية ومن ثم الإسراع بعملية الانهيارات الصخرية، فهناك علاقة عكسية بين نوعية الغطاء النباتي (كثيف أم مبعثر) وبين حركة المواد الصخرية، فكلما ازدادت كثافة الغطاء النباتي كلما تعرقلت حركة المواد الصخرية على المنحدرات والعكس.

8- الجاذبية الأرضية (الجذب والتماسك):

تتأثر زاوية استقرار الكتل الصخرية الواقعة علي جوانب المنحدرات بقوتين في اتجاه عكسي تتمثلان في قوة الجذب (الممثلة في فعل الجاذبية الأرضية **Gravitation**) والتي تقوم بجذب الكتل الصخرية في اتجاه أسفل المنحدر متناسبة مع وزن الكتلة، وقوة التماسك التي تتمثل في الاتجاه العكسي باتجاه أعلى المنحدر والتي تعرف بقوة رد

الفعل باتجاه أعلى السف **upward – reaction force**، والتي تتمثل في وجود سطح احتكاك بين الكتلة الصخرية وسطح المنحدر والذي يتوقف على عدة عوامل منها حجم الكتلة الصخرية ودرجة خشونة سطح المنحدر **Roughness**، وايضاً تماسك الكتلة الصخرية **Cohesion** مع ما يعلوها من صخور. (محمد صبري محسوب، 2001، ص 110).

وتعد الجاذبية الأرضية من العوامل المحفزة للسقوط الصخري بمنطقة الدراسة، حيث تتناسب قوة الجاذبية الأرضية مع زيادة مقدار الكتلة الصخرية ذاتها ودرجة ميلها بالنسبة للمنحدر بشكل طردي، وكما زادت زاوية الانحدار زادت هذه القوة، ووفقاً لذلك نجد أن حركة السقوط الصخري تزداد بالمنحدرات الرأسية وشبه الرأسية (نصر الدين، 2008، ص 86). إلي جانب ما سبق توجد قوة أخرى تؤثر على شكل الكتلة الصخرية، ذلك من خلال وسائل نقل المفتتات على طول السف مثل السيول وتصادم قطرات المطر والرياح وقوة الدفع الناتجة عن اصطدام المفتتات الصخرية بعضها بعض عند تحركها باتجاه أسفل السف. لذلك فلكي تستقر الكتلة الصخرية فوق السف فيجب أن تتساوي قوة الجاذبية والقوة الناتجة عن عوامل التحرك باتجاه أسفل المنحدر مع قوة المقاومة (قوة رد الفعل باتجاه أعلى المنحدر).

وقد ذكر (Kishi et al , 2002) أن الكتل الصخرية الواقعة على جوانب المنحدرات تتأثر بقوتين في اتجاه عكسي تتمثلان في قوة الجذب والممثلة في الجاذبية الأرضية والتي تعمل على جذب الكتل الصخرية في اتجاه أسفل المنحدر متناسبة مع وزن الكتلة، وقوة التماسك التي تتمثل في الاتجاه العكسي باتجاه أعلى المنحدر، والتي تعرف بقوة رد الفعل باتجاه أعلى السف (**Upward reaction Force**) والتي تتمثل في وجود سطح احتكاك بين الكتلة الصخرية القابلة للسقوط وسطح المنحدر، حيث يؤدي إلى تماسك الكتلة الصخرية بسطح المنحدر، ويتوقف ذلك على عدة عوامل منها حجم الكتل الصخرية، ودرجة خشونة سطح المنحدر وتماسك الكتل الصخرية مع ما يعلوها من صخور.

كما تقوم الجاذبية الأرضية بدور كبير في عملية السقوط الصخري وتزداد قوة الجاذبية الأرضية بزيادة حجم الكتلة الصخرية ودرجة الميل فهي تتناسب تناسباً طردياً مع حجم الكتلة ودرجة الانحدار كما أنها تزيد بعد سقوط الأمطار وامتلاء الفواصل والشقوق بالمياه، وقد لوحظ من خلال المشاهدة الميدانية العديد من الكتل الصخرية المتساقطة والقابلة للسقوط، حيث يوجد في المنطقة العديد من الكتل الصخرية المعلقة والمتفاوتة الأحجام والتي تعمل الجاذبية الأرضية على جذبها إلى

أسفل وانهيأرها، كما أن وجود العديد من الفواصل والشقوق في الكتل الصخرية بالإضافة إلى التقويض السفلى ساعد الجاذبية الأرضية على جذبها إلى أسفل نتيجة لثقلها وامتلاء فراغات هذه الكتل بالمياه أثناء تساقط الأمطار وضعف قوى التماسك بين حبيباتها .

9- الزلازل:

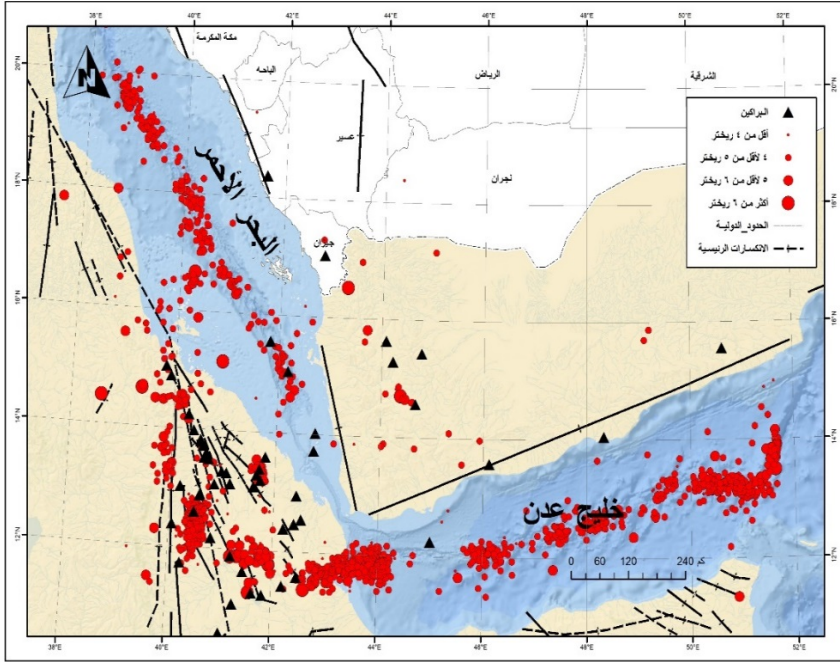
يتضح من تحليل شكل (32) أن منطقة الدراسة تعرضت للعديد من الهزات خلال القرن العشرين نتج عنها مجموعة من الشقوق والفواصل والصدوع التي أثرت على منطقة الدراسة خلال الفترة من 1913م وحتى 2022م، وقد كان أكثرها قوة زلزال 28 ديسمبر عام 1977م والذي يتزامن مع بدء العمل في انشاء "طريق عقبة ضلع" كما سبق وأن ذكرنا ، والذي كان مركزه على عمق 15 كم من وسط البحر الأحمر والذي تكرر بذات الشدة في 30 ديسمبر عام 2006م والتي بلغت قوته 6.6 درجة وكان مركزه جنوب الجزيرة العربية في بحر العرب علي عمق 33 كم تقريباً وقد كان نطاق تأثيره يغطي 600 كم في جميع الاتجاهات ، ويلاحظ من جدول (12) إن النطاق السابق ذكره يتأثر بـ 1540 بؤرة زلزالية تؤثر على كافة أنحاء المنطقة بشكل عام ومنطقة الدراسة بشكل خاص حيث تعرضت لعدة هزات زلزالية خلال الـ 26 عاماً الماضية تراوحت شدتها بين 3 إلى 6.6 درجة على مقياس ريختر، منها 256 هزة أرضية منها تزيد في قوتها عن 5 درجة.

جدول (11)

أنماط البؤر الزلزالية في الجزء الجنوبي من الجزيرة العربية

الفئة	اجمالي العدد	%
أقل من 4 درجة	89	5.7
4 لأقل من 5 درجة	1195	77.5
5 لأقل من 6 درجة	235	15.2
أكثر من 6 درجة	21	1.3
الاجمالي	1540	%100

المصدر: البيانات الرقمية لمواقع الزلازل من عام 1913م – 2022م، هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية USGS.



المصدر: البيانات الرقمية لمواقع الزلازل من عام 2013م – 2022م، هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية USGS.

شكل (21) مواقع الزلازل ودرجة قوتها

10- العامل البشري:

يمكن القول بأن العامل البشري عامل مؤثر ومُتأثر في ذات الوقت حيث يتركز دور العامل البشري في التأثير المتبادل بين المنحدرات من جانب والأنشطة البشرية ممثلة في القري والمشاريع السكنية والتنمية بالمنطقة وعلى جانبي الطريق، وعليه فإن دراسة هذا العامل سوف تركز على جانبيين على قدر كبير من الأهمية هما:

- العلاقة بين الأنشطة البشرية والجوانب التنموية من جانب والمنحدرات المجاورة لها والملاصقة لها من جانب آخر.
- العلاقة المكانية بين مسار الطريق في حد ذاته والمنحدرات التي تحف جانبيه في كثير من المواضع إضافة إلى ذلك كم الحركة اليومي على الطريق بما يتضمنه من سيارات نقل كثير تنقل المواد والمعدات والأفراد.

وحيث إن بعض السفوح أو المنحدرات الجبلية ذات قوة تماسك ضعيفة مما يؤدي إلى حدوث خلل في توازن بعض صخور منحدرات الطريق، إذ أن بعض هذه المنحدرات قام المختصين باتخاذ بعض الإجراءات الاحترازية لدرء خطر حركة المواد الصخرية صورة (2)، بينما البعض الآخر ترك بدون وسائل دعم ومساندة، مما يعرضها لخطر

السقوط الصخري ، وهي تحتاج إلى متابعة ومعالجة مما يزيد من تكاليف إنشاء الطرق وبالتالي تترك بدون معالجة واحتمال زيادة المشاكل وتعرض الطرق المارة إلى المخاطر كما هو الحال في طريق عقبة ضلع، حيث يمر بمحاذاة الحافات الصخرية والذي يتعرض باستمرار إلى عمليات التساقط الصخري نتيجة تقطيع أقدام المنحدرات وكذلك التفافات في صلابة صخور التكوينات الجيولوجية التي تتسبب في حدوث عمليات انهيار صخري تتفاوت في الحجم ليصل قطر الواحدة لما يزيد عن 3 أمتار كما هو موضـح بالصور (3) و (4).



صورة (3) تساقط صخري على أحد الأجزاء في مسار الطريق



صورة (2) رش المنحدرات بسائل أسمنتي في أحد المواقع بالطريق



صورة (5) الانهيار الصخري على أحد الأجزاء في مسار الطريق



صورة (4) تساقط صخري على أحد الأجزاء في مسار الطريق

كما تؤدي حركة المركبات على الطريق خاصة مركبات النقل الثقيل إلى حدوث بعض الاهتزازات المتكررة التي تؤدي إلى عدم استقرار بعض الكتل الصخرية المعرضة للانهيار صورة (5)، وتؤدي زيادة كثافة عدد المركبات وسرعتها على الطرق إلى حدوث اهتزازات

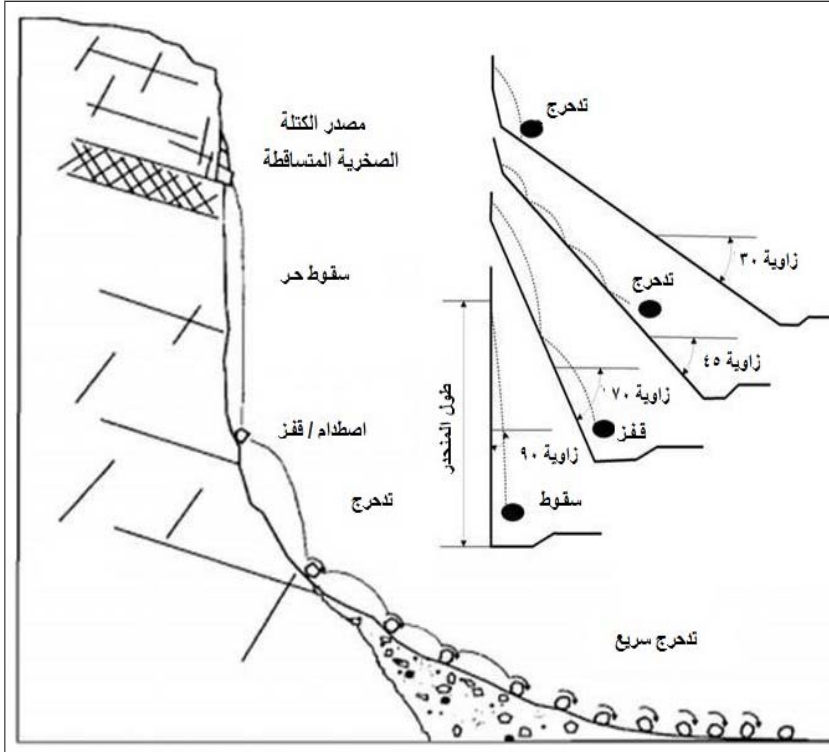
للمنحدرات على جانبي الطريق، والتي تؤدي بدورها لضعف مقاومة المنحدر ومن ثم امكانية حدوث انهيارات أرضية **Mass Wasting** على الطريق، وكلما زادت كثافة حركة المركبات على الطرق، وايضاً زيادة الحمولة ساعد ذلك على حدوث تلك الانهيارات الأرضية.

يُلاحظ أنه من أجل التخلص من بعض عوائق الوحدات الجيومورفولوجية يضطر مهندسو الطرق أحياناً إلى تدريج المنحدرات غير المستقرة بشكل غير علمي وبدون أي معالجة، مع الأخذ في الاعتبار أن هذه المنحدرات تزداد خطورتها بعد سقوط الأمطار، وذلك بسبب هشاشة التكوينات الجيولوجية المكونة للمنحدرات، كما يلاحظ بقايا بعض الصخور المنحدرات تترك بدون إزالة مما يزيد من تعرض الطرق المارة للخطر، حيث لوحظ أن بعض الواجهات أصابها التقطع في مناطق عديدة متصلة ومنفصلة بفعل الآلات الضخمة والتي يستخدمها الإنسان في شق الطريق وتوسعته الأمر الذي يساعد على تراجع الحافات وخاصة الأجزاء العليا منها إلى الداخل.

ثانياً: تحليل قطاعات منحدرات الطريق:

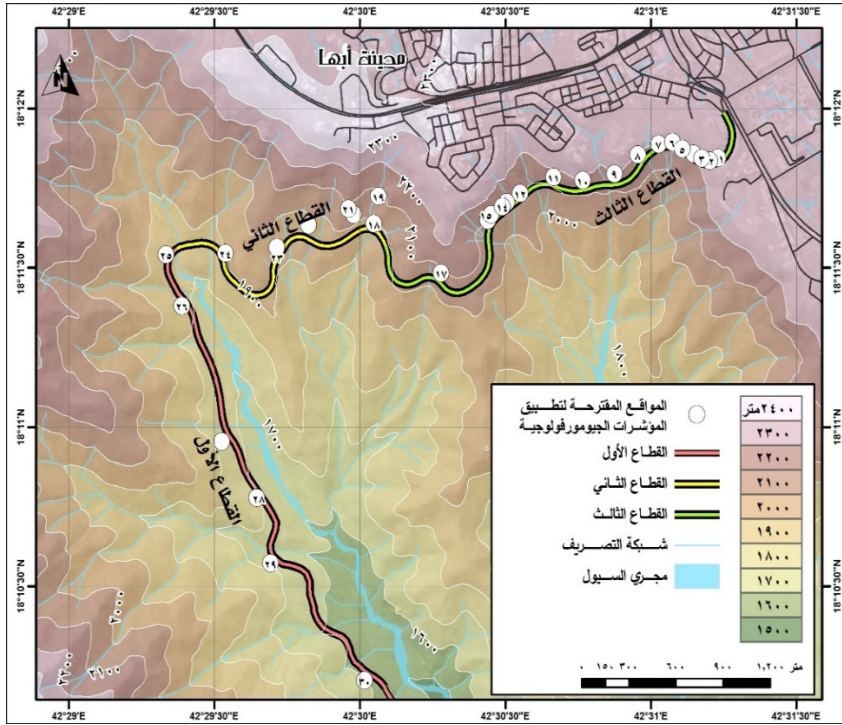
يلاحظ من شكل (22) اختلاف عمليات حركة المواد على طول القطاع العرضي للمنحدر الواحد نتيجة لاختلاف درجات الانحدار، حيث تتعرض أعالي المنحدرات لعمليات السقوط الصخري في المنحدرات التي تزيد درجة انحدارها عن 70 درجة وتصل الي 90° ثم عملية القفز عندما يقل الانحدار عن 70 درجة ثم عملية التدرج عند زاوية 35° و45°، ويشير (محمد صبري محسوب، 1996، ص 165) إلى أن طول المنحدر يلعب دوراً مهماً بجانب شدة الانحدار في درجة ثبات واستقرار المنحدر، حيث أن أي منحدر بزاوية ثابتة يصعب أقل استقراراً مع زيادة طوله وثبات زاوية انحداره. ويؤدي تدخل الإنسان لتعديل المنحدرات وتقطيعها لإنشاء الطرق والمنشآت إلى خلق منحدرات رأسية أشد انحداراً من المنحدرات الطبيعية المجاورة لها، والتي تتكون من نفس التكوينات لذلك تصيب معرضة للتساقط والانزلاق، وحيث تعتبر دراسة الخصائص الكمية لبعض قطاعات المنحدرات بالطريق أحد أهم الوسائل الضرورية للتعرف على درجات خطورة حركة المواد الصخرية على المنحدرات، ومدى احتمالية حدوث حركة ومدى تكراريتها، كذلك مدى حساسية المنحدر لحركة المواد الصخرية على سطحه وذلك في ضوء العديد من المؤثرات الطبيعية والبشرية، وبالتالي تحديد الأماكن المهددة بحركة المواد الصخرية على مسار الطريق، وفي ضوء ذلك تم دراسة بعض الخصائص الكمية لمنحدرات الطريق واتضح منها ما يلي:

- أ- بلغ إجمالي عدد القطاعات المدروسة 30 قطاعاً، تم تحديدها مكتيباً من خلال الاعتماد على برامج نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد والاعتماد في عملية الاختيار التركيز على المناطق التي تقترب فيها الحافات الرأسية وشبه الرأسية من الطريق موضع الدراسة كما هو موضحة شكل (23).
- ب- تتنوع أشكال المنحدرات بمنطقة الدراسة ما بين مقعر ومحدب بينهم الدرجة القصوى وان كان الشكل المقعر هو السائد وذلك دليل جيومورفولوجي على ان المياه الجارية قد قامت بدور هام في تشكيل سطح منطقة الدراسة إضافة لعمليات التجوية والتعرية المختلفة ولاسيما الريحية منها.
- ج- تغطي الصخور النارية والمتحولة ما نسبته 91%، بينما تغطي الرواسب المفككة 9% من جملة أطوال القطاعات المدروسة وهذه الرواسب عبارة عن مفتتات من البازلت والجرانيت.
- د- بلغ إجمالي أطوال القطاعات المنفذة 1.8 كم تتراوح أطوالها ما بين 60 متر للقطاع (5) و 201 متراً للقطاع (19).



المصدر: (Ritchie, 1963).

شكل (22) تباين حركة المواد على طول قطاع المنحدر مع اختلاف درجات الانحدار



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على برمجيات نظم المعلومات الجغرافية ArcGIS Pro ونموذج الارتفاعات الرقمي بدقة 5 متر.

شكل (23) المواقع المقترحة لتطبيق المؤشرات الجيومورفولوجية على طريق عقبة ضلع

ثالثاً: المؤشرات الجيومورفولوجية:

تم العمل على تحديد أكثر دقة لمجموعة من المواقع بهدف دراستها ميدانياً واستناداً للعوامل المؤثرة في حركة المواد الصخرية على المنحدرات كانت معايير اختيار هذه المواقع هي: زوايا الانحدار: حيث تم اختيار المواقع التي تندرج تحت تصنيف منحدرات رأسية وشديدة الانحدار جداً، إضافة إلى مدي القرب من الطريق: حيث إنه كلما كان المنحدر قريب من حافة الطريق كانت احتمالية الضرر مباشرة لرواده بحد أقصى 5 أمتار ، وحيث جاءت الغالبية العظمى من منحدرات الطريق تصنف على أنها مناطق شديدة الانحدار جدا وجروف رأسية ، وعليه فقد بلغ إجمالي عدد المواقع المقترحة 30 موقعاً شكل (23) وملحق (1) ، حيث تم تطبيق المؤشرات الجيومورفولوجية التالية عليهم:

- مؤشر الكتل الصخرية:

تعتبر الشقوق والفواصل عامل هدم من خلال حدوث الانهيارات الصخرية، مما يؤدي إلى تراجع الحافات الصدعية والصخرية وهي العملية الأولى التي تؤدي إلى امتلاء بطون مجارى الأودية بالرواسب

والمفتتات الصخرية الخشنة، بالإضافة إلى الكتل الصخرية الكبيرة الحجم التي تسقط من منحدرات الطريق ، لذا فقد تم القيام تطبيق مؤشر جودة الكتل الصخرية التي أشار إليها (Palmstrom , 1982,p.51) على بعض مواقع منحدرات الطريق ، والذي يعتمد في المقام الأول على قياس حجم الكتلة الصخرية وتحديد مدي انتشار وكثافة الشقوق والفواصل بها وفق المعادلة التي أشار إليها (Palmstrom , 1982) والتي تنص على:

$$RQD = 115 - 3.3 * (Jv)$$

حيث أن (Jv) يعبر عن إجمالي عدد الشقوق في المتر المكعب بينما الأرقام الأخرى تعتبر قيم ثابتة.

يلاحظ أن بعض المناطق على طول طريق عقبة ضلع والتي تم تحديدها بأنها مواقع: (منحدرات شديدة الانحدار جداً وجروف رأسية)، وتعتبر مصدر خطر مستمر لحركة الكتل الصخرية، وقد تم تدقيق النتائج ميدانياً من خلال الزيارة الميدانية لبعض المواقع على طول الطريق للحصول على تصور مبدئي لوضع المنحدرات منطقة الدراسة وكذلك تحليل وضع الكتل الصخرية بها حتى يمكن تصنيفها وفق جودة الكتل الصخرية ، حيث تم تطبيق أسلوب يعتمد على تحليل الصور الفوتوغرافية الملتقطة للمنحدرات الرأسية وشبه الرأسية الملاصقة للطريق موضوع الدراسة ودمج نتائجه مع أساليب التحليل المكاني المختلفة لتحليل اتجاهات الشقوق والمسافات البينية بين كل شق وآخر وكذلك مقدار اتساع الشق، حيث تم القيام بإجراء بعض التحليلات الكمية على الصور الفوتوغرافية وقياس اتجاهات الشقوق والفواصل لعدد 19 مواقع من أصل 30 موقعاً تعتبر جودة الكتل الصخرية بها على واجهة منحدرات الطريق ضعيفة كما هو مبين بالصور من رقم (6) وحتى رقم (24).

جدول (13) مؤشر جودة الكتل الصخرية نسبة لعدد الشقوق بالمتر المكعب

جودة الكتلة الصخرية	الدلالة الجيومورفولوجية	نتيجة المؤشر
جودة ممتازة	توجد شقوق ضعيف جداً	أقل من 25
	توجد شقوق ضعيف	من 25 لأقل من 50
جودة معتدلة (مقبولة)	توجد شقوق مقبول	من 50 لأقل من 75
	توجد شقوق كبير	من 75 لأقل من 90
جودة ضعيفة جداً	توجد شقوق كبير جداً	من 90 لأقل من 100
	توجد شقوق كثيف	أكثر من 100

المصدر: Palmstrom , 1982

حيث تعتبر المواقع السابقة مصدر تهديد لحركة المواد الصخرية لذلك تم استخدام برامج الاستشعار عن بعد، لإجراء بعض عمليات التحسين "Filter" لزيادة وضوح الصورة وإبراز ما بها من معلومات مكانية وإجراء قياسات، كما يلاحظ أن منحدرات الطريق بها شبكة كثيفة من الشقوق والفواصل وتراوح أطوالها ما بين أقل من 10 سنتيمترات إلى 60 سم وتراوحت أعداد الشقوق والفواصل داخل المتر المربع الواحد بين 90 و245 بينما تراوحت المسافات البينية لمدى اتساع الشق ما بين 6 سم و29 سم.

يتضح من تحليل الاتجاهات العامة للشقوق والفواصل أن أغلب اتجاهاتها تأخذ الاتجاه "شرق/ غرب" و"شمال شرق/ جنوب غرب" بنسبة بلغت 41.3% و39.7% على التوالي من إجمالي أعداد الشقوق والفواصل في المواقع التي تمت دراستها ميدانياً وذلك دليل قوي على مدي تأثير هذه الفواصل بالحركات الأرضية ولكن جاءت الفواصل التي تأخذ الاتجاه شرق/غرب الأغلب من حيث إجمالي الطول بنسبة 51.6%.



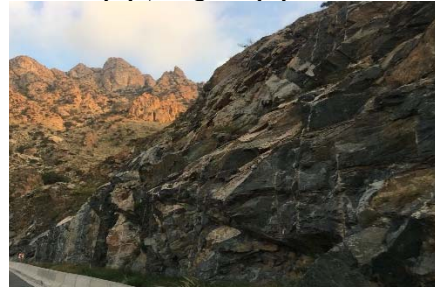
صورة (7) موقع رقم (2)



صورة (6) موقع رقم (1)



صورة (9) موقع رقم (4)



صورة (8) موقع رقم (3)



صورة (11) موقع رقم (6)



صورة (10) موقع رقم (5)



صورة (13) موقع رقم (8)



صورة (12) موقع رقم (7)



صورة (15) موقع رقم (10)



صورة (14) موقع رقم (9)



صورة (17) موقع رقم (12)



صورة (16) موقع رقم (11)



صورة (19) موقع رقم (14)



صورة (18) موقع رقم (13)



صورة (21) موقع رقم (16)



صورة (20) موقع رقم (15)



صورة (23) موقع رقم (18)



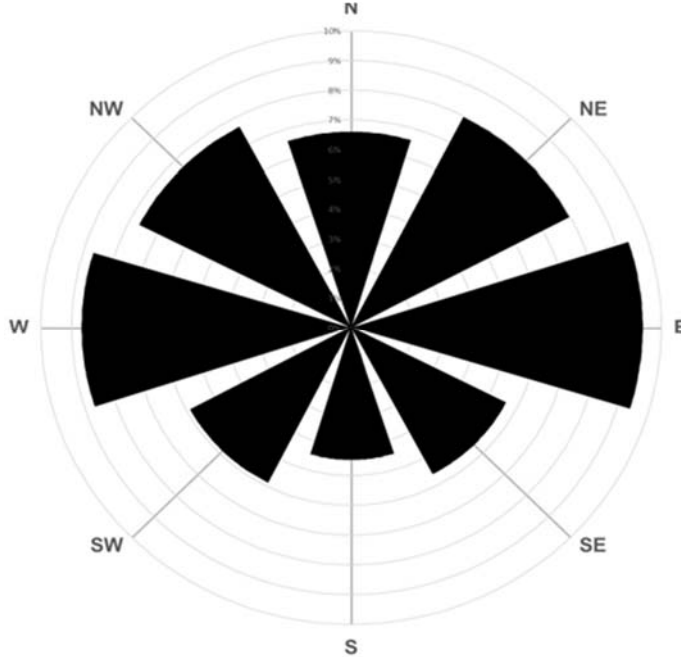
صورة (22) موقع رقم (17)



صورة (24) موقع رقم (19)

وبناء على ما سبق ومن تحليل شكل (24) وبشكل عام نجد أن كل ما سبق يمكن اعتباره مؤشراً يؤكد على مدى درجة خطورة منحدرات الطريق حالياً ومستقبلاً، وبناء على ما سبق يمكن تصنيف المنحدرات التي تعتبر مصدر تهديد لرواد طريق عقبة ضلع للفئات التالية:

- **منحدرات شديدة الخطورة جداً:** تكثر بها الفواصل وتختلف أبعادها الهندسية والمسافات البينية بين كل فاصل وآخر ويكون عمق الشقوق كبير بشكل نسبي مما يشكل تهديد بخطر سقوط الصخور على الطريق في أي لحظة بفعل أي عامل من العوامل المؤثرة ومنها الجاذبية الأرضية والاهتزازات الناتجة عن حركة النقل الثقيل على الطريق، وهي تتواجد بكثرة في منحدرات القطاع الثالث أكثر من باقي القطاعات



شكل (24) اتجاهات الشقوق والفواصل في منحدرات طريق عقبة ضلع

- **منحدرات شديدة الخطورة:** تنتشر بها الفواصل بمختلف الاتجاهات والأطوال ولكن ذات عمق متوسط في الكتلة الصخرية وعليه فإنها تعتبر مناطق مهددة بخطر السقوط الصخري إذا توافرت عوامل مساعدة سببت حدوث زيادة في عمق الشقوق وتمثل تهديد يمكن وصفه بالتهديد المستقبلي على الطريق بخطر السقوط الصخري، وهي تنتشر في منحدرات القطاع الثاني أكثر من باقي القطاعات.
- **منحدرات متوسطة الخطورة:** تنتشر بها الفواصل لكن أقل من الفئات السابقة ولا تشكل تهديد حالي ولكنها قد تشكل تهديد مستقبلي حال توافر عوامل مساعدة.

- مؤشر احتمالية حدوث حركة للمواد الصخرية LPI:

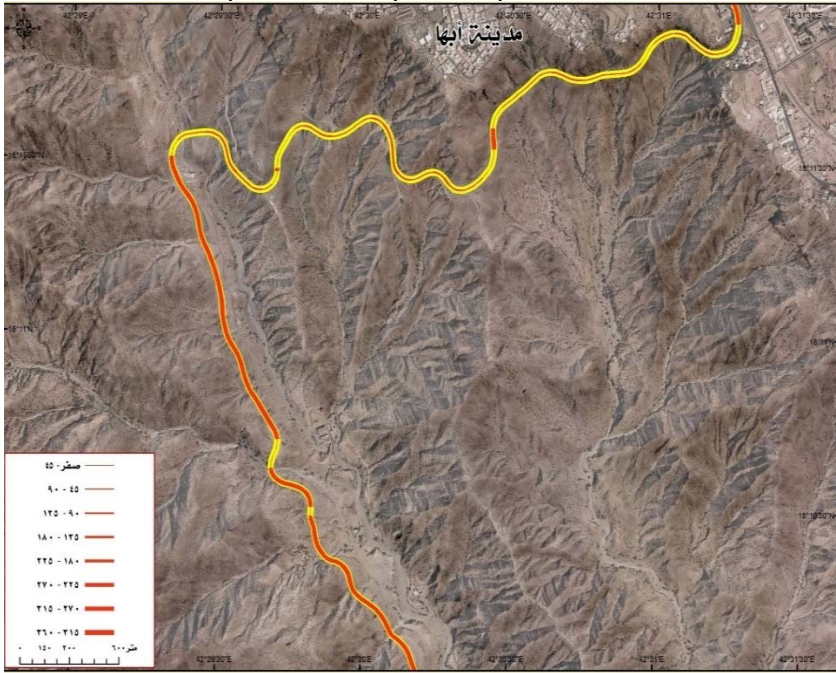
أشار (Pierson et al.1990,p:18) في كتاباته أن هذا المؤشر مُعد خصيصاً للمنحدرات بالمناطق الجبلية، حيث يعتمد نظام العمل فيه على بعض المتغيرات بلغ إجمالي عددها 10 ملحق (2) ، والتي تعبر عن وضخ وحالة لكل منحدر والموضحة نتائجها ملحق (3) ، حيث تم حساب قيمة دليل احتمالية حركة المواد الصخرية LPI عددياً ثم تصنيف القيمة إلى فئات ، ووفقاً لنتائج تحليل نتائج الدراسة الميدانية والموضحة بالشكل المجاور، وعبر هذا المؤشر اتضح أن كافة المواقع التي تم النزول عليها تعتبر مناطق عدم استقرار حيث تراوحت ما بين احتمالية متوسط لعدد (14) موقع بنسبة 46.7% من إجمالي عدد

المواقع يليها المناطق العالية بإجمالي عدد بلغ 11 موقع بنسبة 36.7% وجاء فقط (5) مواقع ذات احتمالية متوسطة في حدوث الانهيارات الصخرية من المواقع التي تم رصدها ميدانياً وجميعها تعتبر مناطق عدم استقرار نسبي.

• مؤشر معامل التعرج:

يلاحظ مدي تأثير طبوغرافية المنطقة على مسار الطريق حيث أجبر المخططين على رسم مسار محدد ليس له خيارات اخري مثل: ضيق الطريق ذاته في مناطق واقتراجه من الحافة الصخرية بشكل كبير في مناطق أخرى، وصعوبات ازدواجية هذا المسار في مناطق محددة لظروف الطبيعة الجبلية الصعبة، وعليه فقد تم تطبيق مؤشر دليل التعرج/الانعراج شكل (25)، والذي أشاره إليه (Brice,1964,p:19) الذي تنص معادلته علي:

مؤشر التعرج = (الطول الفعلي للطريق بين النقطتين / المسافة المستقيمة (المباشرة) بين النقطتين)



شكل (25) مستويات معامل التعرج لمسار طريق عقبة ضلع

جدير بالذكر أنه كلما قلت قيمة دليل الانعراج واقتربت من (1.5) دل ذلك على ميله للاستقامة أو على قصر طول الطريق إلى أقل ما يمكن بين موقعين، وإذا زادت قيمة دليل انعراج الطريق عن ذلك كثيراً دل ذلك على وجود منعطفات أو إنحناءات وبالتالي طول مسافة

الطريق وما يعقبه من مشكلات مرورية ترفع من مخاطرها، مما سبق يتضح أن معدل تعرج الطريق بلغت قيمته 2.01 وذلك يشير إلى مدي تعرج الطريق بالنسبة إلى طوله نسبة إلى الطول المستقيم ، ويعتبر دليل الانعراج على أن الطريق ليس مستقيماً، بل هناك الكثير من الانحناءات به والتي تمت بهدف التغلب على تضرس الطريق في بعض من أجزاءه ، مما يُشكل خطورة على الطريق ورواده ولا سيما أن بعض هذه الانحناءات بها منحدرات رأسية وشبه رأسية وتتواجد بها كتل صخرية متحفزة للسقوط حال توافر الظروف الملائمة ، كما يتضح من تحليل مسار الطريق وتطبيق معادلة معامل التعرج أن نوعية الانحراف بالطريق يمكن تصنيفه على أنه متعرج، حيث ينحرف الطريق عن مسارة (الخط المستقيم) لنفاذي العوائق والمحددات الطبيعية بالمناطق التي يمر بها مثل الحواف الصدعية ومسارات الأودية، ... الخ كما هو الحال في الطريق موضوع الدراسة.

مع مراعاة أن إجمالي عدد الانحناءات بالطريق بلغ 473 إنحناء تراوحت قيمة زواياها ما بين 1 و 359 وتعتبر الزوايا الأقل من 70 من أخطر الزوايا على الطريق وقد بلغ إجمالي عددها 374 موقعاً بنسبة بلغت 79% من إجمالي عدد الانحناءات بالطريق كما تتواجد بالطريق عديد من المناطق العمياء لا يمكن للسائق أن يلاحظ السيارات القادمة في الاتجاه الأخر، لذلك يحظر تماماً التجاوز في هذه الانحناءات لكن لا يلتزم به نهائياً مما سبب كثير من الحوادث ، وقد بلغت نسبة الحوادث في هذا الطريق ما يوازي 9% من إجمالي حوادث المملكة العربية السعودية وبلغ أقصى معدل تدفق مروري يومي للعقبة 25 ألف سيارة وفق بيانات إدارة مرور عسير.

- مؤشر سرعة حركة المواد الصخرية:

يهدف إلى توقع لمدي سرعة حركة المواد الصخرية على منحدرات الطريق شكل (26) ويعتبر العنصر الأساسي فيها هو العمل على نموذج الارتفاعات الرقمي DEM بعد تطبيق معادلة (Kirkby and Statham , 1975 , P.351) كالتالي:

$$X = 2\sqrt{2 * Ev * G}$$

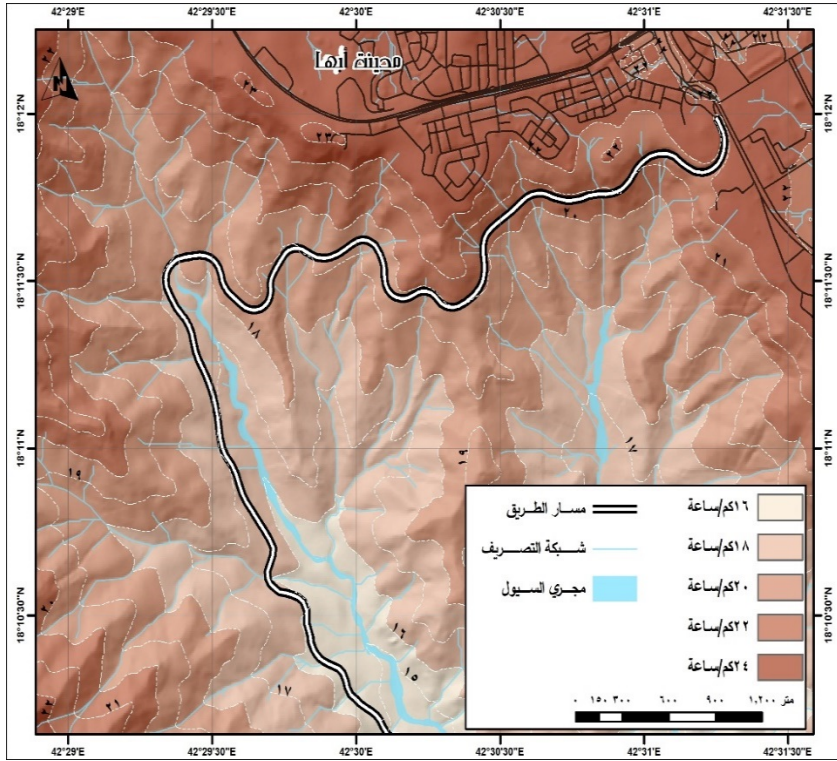
حيث أن:

X = مؤشر سرعة حركة المواد الصخرية / ثانية

EV = ارتفاع السطح المكشوف.

G = عجلة الجاذبية الأرضية وتساوي 9.81 متر/ثانية ، والتي

يتم تحويلها الي كم.



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على برمجيات نظم المعلومات الجغرافية ArcGIS Pro ونموذج الارتفاعات الرقمي بدقة 5 متر.

شكل (26) سرعة حركة المواد الصخرية على منحدرات طريق عقبة ضلع

يلاحظ من شكل (26) أن سرعة حركة المواد الصخرية بشكل عام في منطقة الدراسة تتراوح ما بين 16 كم الساعة إلى ما يزيد عن 24 كم/الساعة وذلك على الجانب الشرقي من الطريق، وقد تراوحت سرعة حركة المواد الصخرية المتوقعة في المواقع المقترحة لتطبيق المؤشرات الجيومورفولوجية ما بين 4 كم/ الساعة و 33.7 كم/ الساعة. رابعاً: أنماط حركة المواد الصخرية الأكثر احتمالية بالمنطقة:

• السقوط الصخري Rock Fall:

تحدث عملية السقوط الصخري في المنحدرات الرأسية وشديدة الانحدار وتعتبر من عمليات الحركة السريعة للمواد فوق المنحدرات الصخرية العارية شديدة الانحدار التي تتراوح زاوية انحدارها ما بين 70 الي 90 تقريباً وهي تعد من أكثر العمليات شيوعاً في منطقة الدراسة وهي تحدث فوق الانحدارات الشديدة ، وهي تنشأ في التكوينات الضعيفة التماسك حيث تتحرك الكتل الصخرية التي تنفصل عن واجهة منحدرات الطريق وتتحرك نحو الأسفل بفعل الجاذبية الأرضية إما بشكل مباشر دون أي احتكاك بالمنحدر مثلما في الجروف الرأسية أو يحدث لها تدرج

بسرعة كبيرة علي السفوح شديدة الانحدار حتي تستقر الكتل الصخرية أسفل المنحدر علي الطريق مباشرة او بالقرب منه ، وإن كانت تتعرض في أغلب الأحوال للتكسر نتيجة اصطدامها. وعادة ما يرتبط السقوط الصخري بحدوث تراجع واضحٍ للحوائط الصخرية المنحدرة، وكذلك يرتبط بتزايد كميات هشيم المنحدرات صورة (25)، وذلك نتيجة لما يضاف إليها من مفتتات قادمة من الأوجه الحرة **Free Face** والتي عادة ما يرتبط بها عمليات السقوط الصخري (محمد صبري محسوب، 2001، ص 117 - 118)، كما هو موضحة بصورة (26).



صورة (26) تساقط صخري في مسار الطريق



صورة (25) مخروط الهشيم علي جزء في مسار الطريق

ولقد ذكر (محمد صبري محسوب، 1998، ص 116 - 118) أن هذه العملية تحدث عندما تسقط الكتل الصخرية وتصطدم بالأرض دون تعرضها للتدحرج أو الانزلاق وإن كانت تتعرض في أغلب الأحوال للتكسر نتيجة اصطدامها، وعادةً ما يرتبط التساقط الصخري بحدوث تراجع واضحٍ للحوائط الصخرية المنحدرة، وتزايد كميات هشيم المنحدرات، ونتيجة لما يضاف إليها من مفتتات قادمة من الأوجه الحرة والتي عادةً ما يرتبط بها سقوط الكتل الصخرية.

• الانزلاق الصخري Rock Sliding:

تحدث هذه الظاهرة علي سفوح المنحدرات التي يقل زاوية انحدارها عن 80° وتؤثر هذه العملية على المواد الصخرية التي تحتفظ بتماسكها مع تحركها فوق أسطحٍ انزلاق **Slides Planes** واضحة

وجيدة التحديد. وتتأثر الانزلاقات الأرضية بمحتوي الصخر من الماء والذي يقلل من درجة مقاومتها من خلال زيادة ضغطه في المسامات والفواصل والعمل على تقليل قوة الروابط بين جزيئات الصخر، وفي نفس الوقت يزيد الماء من وزن المواد الصخرية بدرجة تؤدي إلى زيادة قوة التدفق إلى أسفل نحو أقدام السفق، كما هو موضـح بصورة (27) و(28) وتزداد فعالية الانزلاق الأرضي إذا ما سقط المطر الغزير بعد فترة جفاف طويلة تعرضت خلالها صخور السفق لتشققات كثيفة بدرجة تزيد من طاقة التسرب، وقد يحدث انزلاق لكتل منفصلة، وقد يكون في شكل حركة انزلاق لكمية ضخمة من المفتتات الصخرية **Rock Debris** تؤثر على أجزاء كبيرة من السفق (محمد صبري محسوب ، 2001، ص 119).



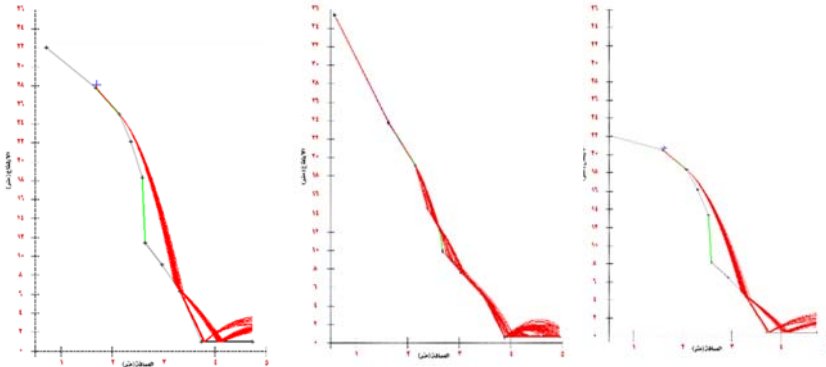
صورة (27) أحد المناطق التي حدث لها تساقط صخري سابقاً
صورة (28) الانزلاق الصخري على جزء في مسار الطريق

خامساً: نماذج محاكاة حركة المواد الصخرية:

تم القيام بعمل نمذجة مكانية لكل جزء على حدة لافتراض عدد مسارات السقوط الصخري المحتملة من واجهة المنحدر، بناء على عديد من المعايير منها : معاملات رد الفعل والاحتكاك بسطح المنحدر أن وجد وقد بلغ عدد المسارات المحتملة لسقوط الكتل الصخرية من واجهة منحدرات هذا النموذج للمناطق الأربعة حوالي 8542 مسار محتمل لأجزاء من منحدرات الطريق موزعة على 19 موقع بمتوسط عدد مسارات محتملة بلغ 449 مسار للموقع الواحد تقريباً ، وقد لوحظ أن بعضها توقف أسفل المنحدر وقبل بلوغ الكتلة الصخرية للطريق بينما البعض الآخر تعدي مسار الطرق مما يُشكل تهديداً على الطريق ورواده، ومن تحليل سرعة سقوط الكتل الصخرية المحتمل سقوطها من واجهة هذه المنطقة التجريبية اتضح أن سرعة السقوط الكتلة الصخرية وصلت إلى ما يزيد عن 33كم/ثانية.

جدير بالذكر أن هناك مجموعة من الخصائص التي تخص درجة انحدار المنحدرات والتي لها تأثير قوي على مسار سقوط الكتلة الصخرية وهي : درجة الانحدار وقد تم الحديث عنها فيما سبق، إضافة إلى خشونة سطح المنحدر حيث تتباين من منحدر لآخر وفقاً لتكوينه وفعل عوامل وعمليات التجوية والتعرية عليه من مفتتات وخلافة إضافة إلى أن زاوية استقرار الكتل الصخرية على المنحدر ذاته له تأثير حيث إن أي تغير في زاوية الانحدار يؤثر على ثبات الكتلة الصخرية والعكس صحيح، كذلك معامل الاحتكاك بين الكتلة ذاتها والمنحدر المستقرة عليه كلما زاد معامل الاحتكاك كان أكثر دلالة على الاستقرار النسبي والعكس صحيح حيث إنه كلما قل المعامل كان ذلك دليلاً قوياً على احتمالية الحركة.

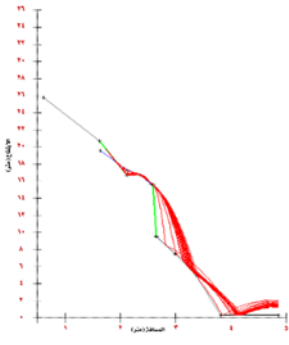
تم استخدام برنامج **Rockfall Ver.4.0** لإنتاج نماذج المحاكاة لعدد 30 موقعاً على الطريق مباشرة وهي تلك المواقع التي تعتبر ذات احتمالية عالية وعالية جداً لحدوث حركة للمواد والكتل الصخرية من أجل تحديد النطاق الجغرافي التقريبي للأضرار الناتجة عنها، والأشكال التالية بدء من شكل (27) وحتى شكل (56) توضح الوضع الراهن للمواقع التي تم العمل عليها وهي عبارة عن نماذج محاكاة لطبيعة حركة الكتل الصخرية المحتملة على الطريق، حيث يمكن ملاحظة أن سرعة سقوط الكتل الصخرية مرتفعة واحتمالات مسارها المحدد باللون الأحمر في عديد من المناطق داخل كل قطاع تنتشر بكثافة وذلك دليل على أن هناك سرعة في سقوط الكتلة الصخرية بسبب ارتفاع المنحدرات وكون أغلبها منحدرات رأسية أو شبة رأسية وشديدة الانحدار جداً.



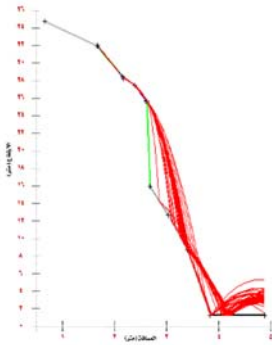
شكل (29) موقع (3)

شكل (28) موقع (2)

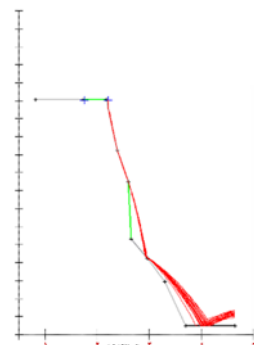
شكل (27) موقع (1)



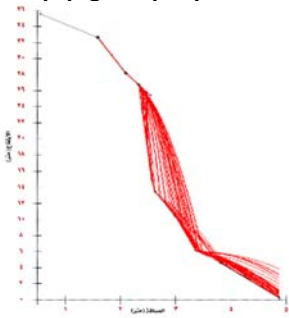
شكل (32) موقع (6)



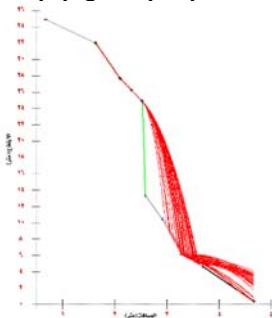
شكل (31) موقع (5)



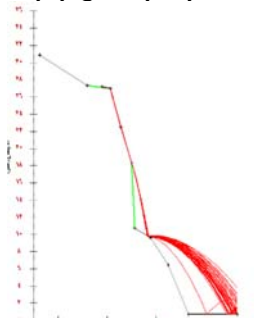
شكل (30) موقع (4)



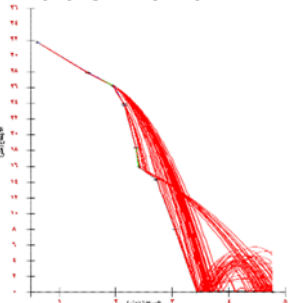
شكل (35) موقع (9)



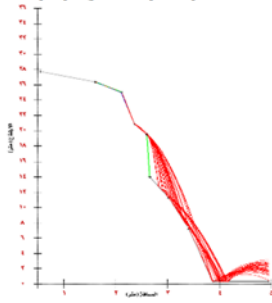
شكل (34) موقع (8)



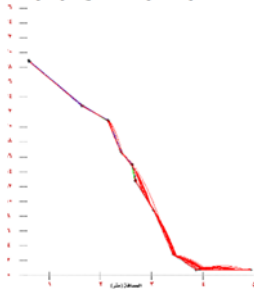
شكل (33) موقع (7)



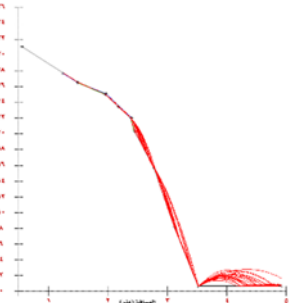
شكل (38) موقع (12)



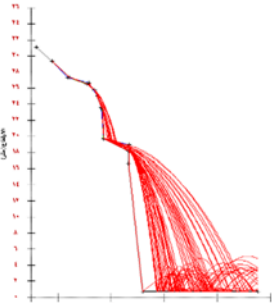
شكل (37) موقع (11)



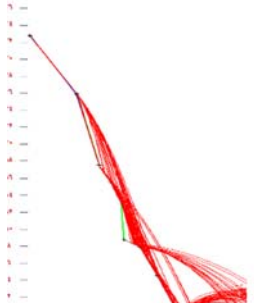
شكل (36) موقع (10)



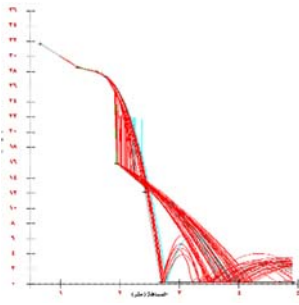
شكل (41) موقع (15)



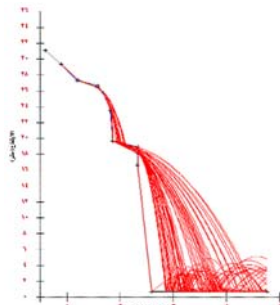
شكل (40) موقع (14)



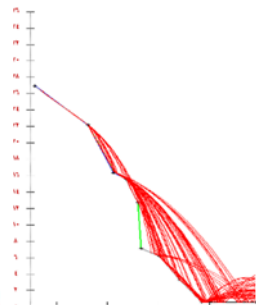
شكل (39) موقع (13)



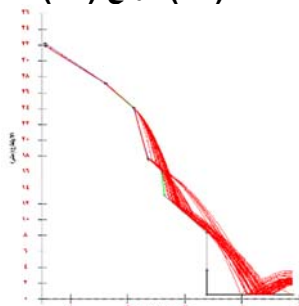
شكل (44) موقع (18)



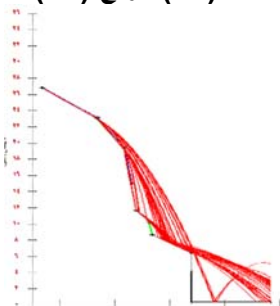
شكل (43) موقع (17)



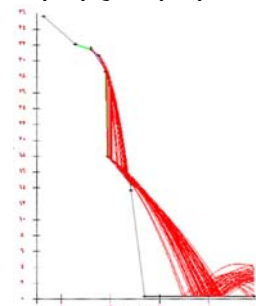
شكل (42) موقع (16)



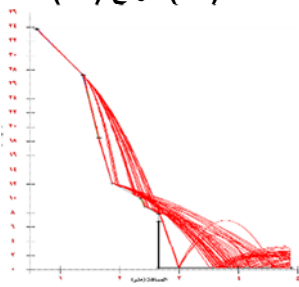
شكل (47) موقع (21)



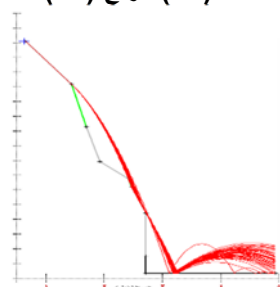
شكل (46) موقع (20)



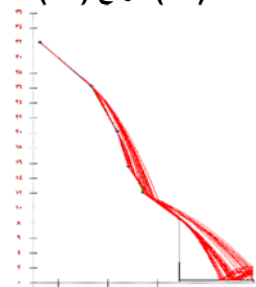
شكل (45) موقع (19)



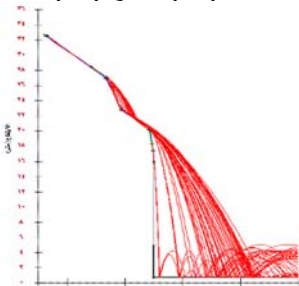
شكل (50) موقع (24)



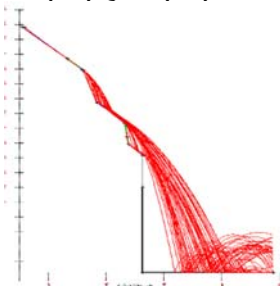
شكل (49) موقع (23)



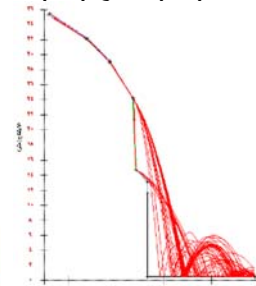
شكل (48) موقع (22)



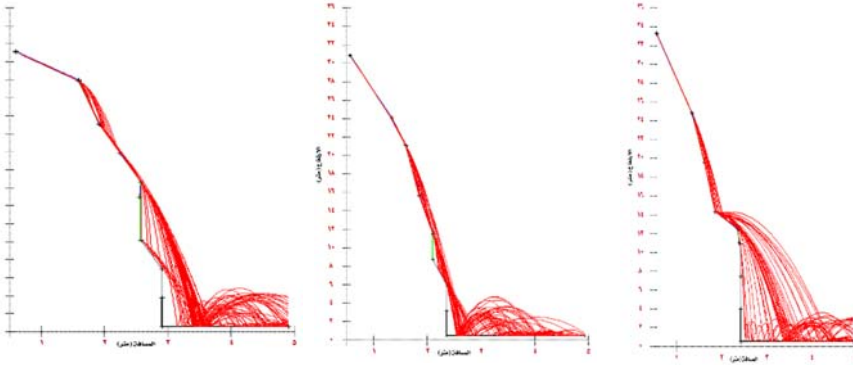
شكل (53) موقع (27)



شكل (52) موقع (26)



شكل (51) موقع (25)



شكل (54) موقع (28) شكل (55) موقع (29) شكل (56) موقع (30)

يلاحظ من كافة نماذج المحاكاة أن أغلب الكتل الصخرية المتساقطة بالمواقع التي تم دراستها ميدانياً نمط حركة السقوط الصخري فيها تتم على مرحلة واحدة أو مرحلتين وبعضها يتم على ثلاث مراحل وكلاهما يتم فيهم اصطدام الكتلة الصخرية بجسم بارز من المنحدر ومن ثم تنكسر وتتفتت لتقفز مرة أخرى لكن بعد أن تتطاير وتنقسم لأجزاء مختلفة ومتفاوتة وهي كلها كما هو ملاحظ تعتبر مصدر تهديد للطريق موضع الدراسة، حيث إن هذه الكتل الصخرية التي تسقط عن واجهات هذه المنحدرات الرأسية والشديدة الانحدار بفعل الجاذبية إلى أسفل المنحدر وبتأثير قوة ارتطامها تنكسر لأجزاء وتتناثر مما يشكل خطراً كبيراً على المنشآت والطرق التي تقابلها بسبب سقوطها الحر وعدم وجود أيه معوقات لها قد تقلل من سرعة اندفاعها، وذلك في المنحدرات ذات الأجزاء المحدبة، بينما في المنحدرات التي بها أجزاء مقعرة فإن الكتلة الصخرية المتساقطة من اعلي المنحدر تصطم بالجزء المقعر من المنحدر وتتدرج وقد تتعرض للتشظي والتكسر وتقل سرعتها بسبب عامل الاحتكاك ويقل حجمها، وبالتالي معدل خطورتها، لذا يجب على متخذي القرار أخذ هذه الأخطار في الحسبان عند تطوير الطريق وتوسعته مستقبلاً.

سادساً: خريطة المناطق المهتدة بحركة المواد الصخرية على منحدرات الطريق:

تم العمل على استخدام نموذج التحليل المكاني الجيوإحصائية **Geostatic Analysis** والذي تم تطبيقه من خلال (**Van Western,2005,p:205**) والذي يعتبر من أحدث النماذج المستخدمة في تحديد وتقييم أخطار حركة المواد الصخرية نظراً لاعتمادها على العديد من العوامل المترابطة والعمل وفق أسوب الوزن النسبي في الأخير للحصول على تقييم محدد لوضع منحدرات طريق

عقبة ضلع وذلك من خلال تطبيق المعادلة التالية (Van
:(Western,2005,p:206

$$Wi = \text{Log} \left(\frac{Na1}{(Na1+Na2)} \right) / \left(\frac{Na3}{(Na3+Na4)} \right)$$

حيث أن:

Wi = الوزن النسبي للعوامل المساعدة علي حركة المواد الصخرية.
Na1 = عدد **Pixels** التي تمثل تهديد في حال توافر العامل المساعد.
Na2 = عدد **Pixels** التي لا تمثل تهديد في حال عدم توافر العامل
المساعد.

Na3 = عدد **Pixels** التي لا تمثل تهديد لحركة المواد الصخرية وفق
نسبة العامل.

Na4 = عدد **Pixels** التي تمثل تهديد لحركة المواد الصخرية وفق
نسبة العامل.

من خلال تحليل شكل (57) أمكن تصنيف المواقع المدروسة
والتي بلغ عددها 257 موقعاً إلى أربع فئات تصنيفية وهي:

• **مواقع لا تشكل أي تهديد في الوقت الحالي (مناطق استقرار
نسبي):** بلغ عددها 155 بنسبة بلغت 60.3% من إجمالي عدد
المواقع.

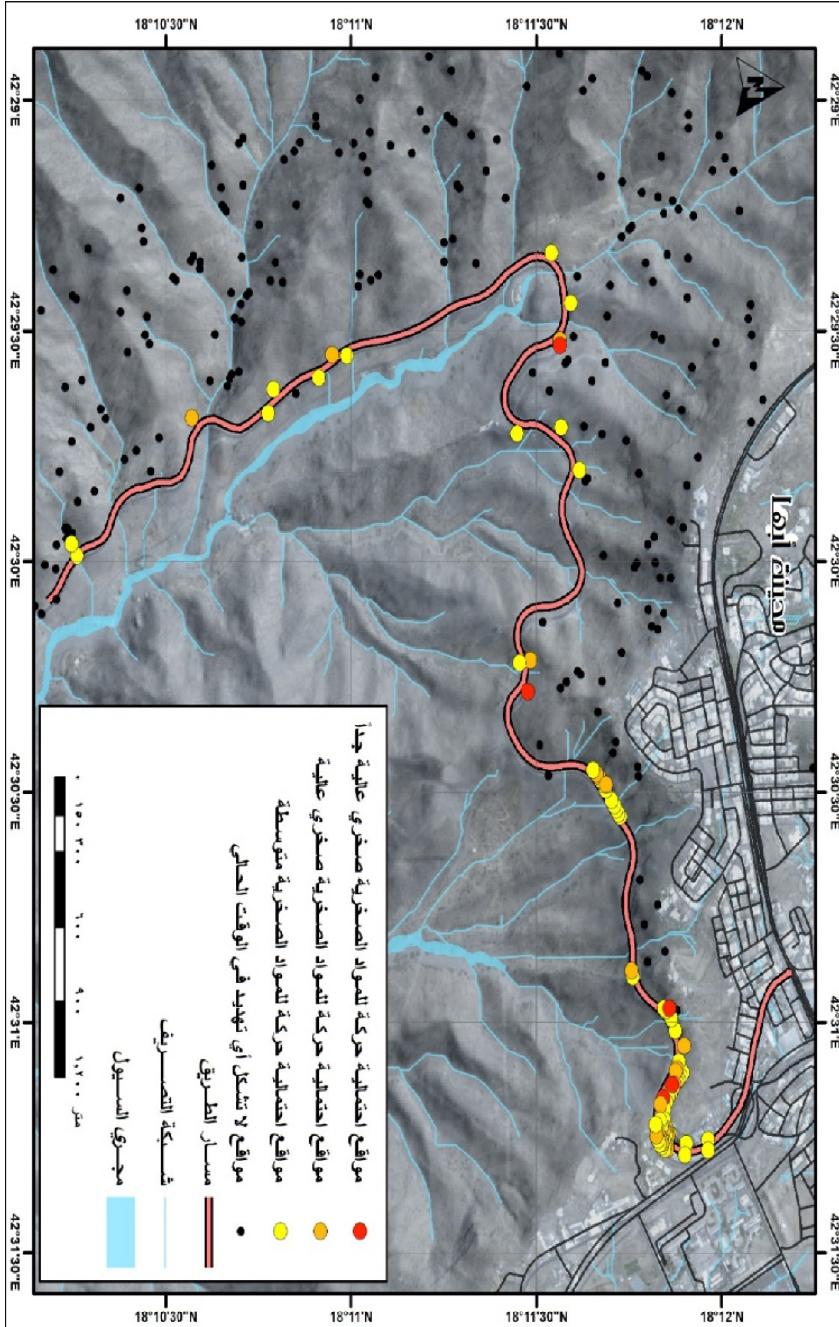
• **مواقع احتمالية حركة للمواد الصخرية متوسطة:** وهي تشكل
تهديد تقريبي في الوقت الحالي وبلغ عددها 50 موقعاً بنسبة
بلغت 19.4% من إجمالي عدد المواقع.

• **مواقع احتمالية حركة للمواد الصخرية صخري عالية:** وهي
تشكل تهديد قوي في الوقت الحالي وبلغ عددها 23 موقعاً بنسبة
بلغت 8.9% من إجمالي عدد المواقع.

• **مواقع احتمالية حركة للمواد الصخرية صخري عالية جداً:** وهي
تشكل تهديد خطير للغاية في الوقت الحالي وبلغ عددها 29 مواقع
فقط بنسبة بلغت 11.2% من إجمالي عدد المواقع.

يلاحظ انه بتطبيق المعادلة السابقة التي تعبر عن مدي تكرارية
حدوث حركة المواد الصخري على منحدرات الطريق، بهدف عمل تحديد
لأولويات العمل في مجابهة خطر السقوط الصخري حيث أن المناطق
التي تأخذ قيم مرتفعة هي المناطق ذات الخطورة الأعلى عن المناطق
الأخرى التي تمت دراستها والعكس صحيح. ووفقاً لنتائج استمارة
الاستبيان اتضح للباحث أن معظم المواقع التي تم دراستها تقع في نطاق
تكراري متوسط بالنسبة لتكرارية حدوث السقوط الصخري على
منحدرات المنطقة شكل (57)، مما سبق يمكن لنا ملاحظة أن نسبة
المواقع المهددة بخطر السقوط الصخري بدرجة عالية وعالية جداً شغلت

20.2% من بعدد بلغ 52 موقعاً إجمالي عدد المواقع المدروسة تركزت أغلبها في أول 3 كيلومترات من بداية طريق عقبة ضلع من جهة مدينة ألبها.



شكل (57) المواقع ذات احتمالية حركة المواد الصخرية على الطريق عقبة ضلع

النتائج

- أعلى منسوب للطريق يقع على ارتفاع 2238 متراً فوق منسوب سطح البحر، بلغت أقصى زاوية انحدار لسطح الطريق 63.6° بمتوسط زاوية انحدار سطح الطريق 9.5°.
- بلغ إجمالي نسبة المنحدرات الشديدة والجروف الرأسية 62.6% من منحدرات طريق عقبة ضلع واغلب واجهات منحدرات الطريق ذات تقوس مقعر بنسبة 68.5%.
- 91% من صخور المنطقة صخور نارية بينما الصخور الرسوبية تشغل 9% فقط وفي مناطق محدودة الانتشار.
- بلغت قيم درجات الحرارة 40° م في فصل الصيف بشهر أغسطس بينما سجلت أدنى قيم لدرجات الحرارة في شهر ديسمبر حيث بلغت 6° م، وبلغ متوسط الرطوبة النسبية في المنطقة 46% بينما بلغ التساقط المطري أقصى قيمه له 280 ملم عام 1996م.
- مؤشر الكتل الصخرية يُشير الي أن صخور المنطقة تتراوح ما بين (مقبولة بشكل تقريبي إلى ضعيفة) مما يشكل تهديد دائم للطريق وأن الكتل الصخرية على واجهات منحدرات الطريق مهينة للحركة حال توافر الظروف الملائمة لذلك.
- يشير مؤشر حركة المواد الصخرية LPI إلى أن 83.3% من منحدرات الطريق ذات معدل خطر (عالي/ عالي جداً) لاحتمالية حركة الكتل الصخرية.
- مؤشر سرعة حركة المواد الصخرية المتوقعة وصلت إلى ما يزيد عن 33 كم/ساعة.

التوصيات

- الدمج بين دور البحث العلمي والدراسات الجيومورفولوجية المتخصصة في إعداد الدراسات والمشروعات التنموية وخاصة تلك التي تهتم بدرء خطر حركة المواد الصخرية في المناطق التي يتم تطويرها وتنميتها بما يتوافق مع خطط الدولة 2030م.
- تحديد وتقييد اتجاهات التوسع والتنمية المستقبلية بعيداً عن سفوح منحدرات الطريق وبما لا يشكل مناطق ضغط وإجهاد على صخور هذه المنحدرات.
- تقليل كمية الرطوبة في الكتل الصخرية لمنحدرات الطريق من خلال مد أنابيب لنقل المياه من أعلى السفوح لأسفلها أو حفر آبار المياه العميقة لتجميع المياه وضخها بعيداً عن منحدرات واجهة الطريق.

- تغطية المواقع التي انتهت إليها الدراسة كمصدر بمواد غير منفذة للماء مثل الرش بالأسمت أو أي مادة تزيد من قوة تماسك واجهة منحدرات الطريق وتدعيم ذلك بالشبك المعدني لحجز الكتل والمفتتات أو استخدام ما يطلق عليه مسامير تثبيت الكتل الصخرية الضخمة والمنفذة في بعض المناطق من الطريق، حيث تعتبر مصدر تهديد لحركة المواد الصخرية.
- إقامة الجدران الاستنادية في مواقع محددة بالطريق وليست بشكل عشوائي مع الأخذ في الاعتبار طاقة الكتل الصخرية المتساقطة وسرعتها وسمك الحائط وطوله.
- القيام بتدقيق أعمال المسح باستخدام وسائل أكثر دقة ومرونة وهي استخدام تقنية الـ **Lidar** أو المسح بالليزر باستخدام طائرات الـ **Drone** لتحديد أكثر دقة لمناطق الضعف الصخري في واجهات منحدرات الطريق.
- ضرورة الاعتماد على الدمج بين التقنيات الجغرافية والمتمثلة في نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار من البعد من ناحية وبين الدراسة الميدانية المدققة من ناحية أخرى وتوظيف صور الأقمار الصناعية متوسطة وعالية الدقة إضافة للبيانات الرادارية ونماذج الارتفاعات الرقمية، والتي تم توظيفها لخدمة أهداف الدراسة التطبيقية، والخروج بمجموعة من المرئيات الواضحة والتي تشير إلى دلالات جيومورفولوجية عديدة تعبر عن درجات للخطورة تتفاوت من منطقة لأخرى.
- إجراء الدراسات التطبيقية في مجال النمذجة الرقمية لمحاكاة حركة المواد الصخرية والتوسع في طرق تصميمها وأساليب إدارتها وسبل توظيفها في الدراسات الجيومورفولوجية.
- توفير وتأهيل الكوادر الفنية للعمل على معالجة وتفسير البيانات الرقمية وتصميم قواعد البيانات الجغرافية المتخصصة لدعم المشروعات التنموية ودعم متخذ القرار في أولوياته التنموية وفق الخطط المستقبلية والمخططات الاستراتيجية والتفصيلية.
- تصميم قاعدة بيانات جغرافية مركزية موحدة **UDM** شاملة للمنطقة بشكل خاص خطوة بسيطة ومن ثم تعميمها عبر أدوات تصميم واستخدام النماذج في غرف خاصة للعمليات لمجابهة الكوارث والأزمات على كافة المستويات الإدارية والتخطيطية ولتوفير معلومات محدثة لمتخذي القرار.
- تشكيل لجان من الجغرافيين والجيولوجيين والمهندسين لفقد المنحدرات الواقعة على الطرق الرئيسية أو القريبة من المناطق

العمرانية وتحديد أنسب طرق الحماية والحلول المناسبة لحماية هذه المناطق بما يتماشى مع ظروفها الطبيعية.

- تحديد نطاق أمان وعمل نطاق حماية لا يقل عن 20 متر بين الطريق والحافات الصخرية المجاورة لحجز هذه الصخور من الانزلاق للطرق وحصرها في أسفل المنحدر وفي نطاق الشباك المعدنية لدرء خطر حركة المواد الصخرية على المنحدرات شديدة الانحدار والجروف الرأسية.

المراجع والمصادر:

- 1- أبو راضي، فتحى عبد العزيز، (1998م): مورفولوجية سطح الأرض، دار المعرفة الجامعية، الإسكندرية.
- 2- الأخضر، أبو القاسم عبد الفتاح وعلي منصور. (2018م): تقييم استقراره الكتل الصخرية على المنحدرات المتاخمة للطريق الجبلي الزنتان (شمالي غربي ليبيا) مج. 17، ع. 1، جامعة سبها، ليبيا.
- 3- الخالدي، نيران محمود سلمان (2021م): تصنيف المنحدرات وانعكاساتها على تحرك المواد في طية حرير. مجلة الآداب، مج. 2021، ع. 137.
- 4- خميس، طارق كامل فرج (2012): التساقط الصخري والتراجع الساحلي في منطقة عجبية السياحية (1995-2010م)، سلسلة بحوث جغرافية، العدد 49، الجمعية الجغرافية المصرية.
- 5- سلامة، حسن رمضان، (1983): مظاهر الضعف الصخري وآثارها الجيومورفولوجية، نشرة قسم الجغرافيا بجامعة الكويت والجمعية الجغرافية الكويتية، العدد 53.
- 6- سلامة، حسن رمضان، (2007): أصول الجيومورفولوجيا، ط2، دار المسيرة للنشر والتوزيع والطباعة، عمان..
- 7- الشنطي، أحمد محمود (1993م): جيولوجية الدرع العربي، مركز النشر العلمي، جامعة الملك عبد العزيز، جدة.
- 8- عبد الجواد، صبحي عبد الحميد (2018): أخطار السقوط الصخري للمنحدرات على الطريق الساحلي في منطقة العين السخنة باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد "دراسة في الجيومورفولوجيا التطبيقية"، رسالة دكتوراه غير منشورة، كلية الآداب، جامعة حلوان.
- 9- العجيلي، عبد الله صبار عبود (2014م): منحدرات سلسلة جبال برانان: دراسة جيومورفولوجية. مجلة كلية التربية، ع. 15.

- 10- **علام، عبد الله (1997):** الأخطار الجيومورفولوجية على الطرق الجبلية لبعض الدول العربية، مجلة كلية الآداب، جامعة الإسكندرية.
- 11- **محسوب، محمد صبري، (1996)**، البيئة الطبيعية خصائصها، وتفاعل الإنسان معها، دار الفكر العربي، القاهرة.
- 12- **_____، (1998)**، جيومورفولوجية الأشكال الأرضية، دار الفكر العربي، القاهرة.
- 13- **_____، (2001)**، الأطلس الجيومورفولوجي، معالجة تحليلية للشكل والعملية، دار الفكر العربي، القاهرة.
- 14- **محمد، إسلام سلامة (2004م):** الاخطار الجيومورفولوجية في منطقة أسبوط، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب، جامعة بنها "الزقازيق سابقاً".
- 15- **مرسي، سيد محمود (2010):** أخطار السقوط الصخري باستخدام النماذج الرياضية، المجمع العلمي المصري، المجلد الخامس والثمانون.
- 16- **معتوق، أحمد السيد (2001):** الملامح الجيومورفولوجية للانزلاقات الأرضية بوادي ضلع: دراسة حالة. مجلة جامعة الإمام محمد بن سعود الإسلامية، ع 32.
- 17- Ahnert ,F.,(1998) : introduction to Geomorphology , London: Arnoldm 352PP , P.,132
- 18- Arthur I. Mears, P.E., Inc. Gunnison, (2009): rockfall hazard and risk study town of telluride and highway 145 spurs, Wilbur Engineering, Inc. Durango, Colorado
- 19- Ayala-Carcedo, F.J., Cubillo-Nielsen, S., Alvarez, A., Domínguez, M., Laín, L., Laín, R., and Ortiz, G (2003): Large Scale Rockfall Reach Susceptibility Maps in La Cabrera Sierra (Madrid) performed with GIS and Dynamic Analysis at 1:5000, Nat. Hazards, 30(3), 325-340.
- 20- Brice, J., 1964, Channel Patterns and Terraces of the Loup River in Nebraska, W.S. Geol. Survey, prof. Paper, No. 422-D
- 21- Chung C. F. and Fabbri, A. G.: 1999, Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping,

- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 65-12, 1389–1399.
- 22–Cliff Ollier,(1981) , Tectonics and landforms m longman Group LTD , USA.
- 23–Cooke, R. U. & Doornkamp.J.C (1982): Urban Geomorphology in Dry Land. Oxford Univ. press, New York.
- 24–Das, R., and Wegmann, K.W., 2022, Evaluation of machine learning-based algorithms for landslide detection across satellite sensors for the 2019 Cyclone Idai event, Chimanimani District, Zimbabwe: Landslides.
- 25–Greenwood, W. (1985) Geologic Map of the Abha Quadrangle, Sheet 18F. Deputy Minister for Mineral Resources, Jeddah, Scale 1:250,000.
- 26–Huang, H., Song, K., Yi, W., Long, J., Liu, Q., & Zhang, G. (2019). Use of multi-source remote sensing images to describe the sudden Shanshucao landslide in the Three Gorges Reservoir, China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78, 2591-2610
- 27–Kirkby, M. J., & Statham, I. (1975). Surface stone movement and scree formation. The Journal of Geology, 83(3), 349-362.
- 28–Kishi, N., Konno, H., and Ikeda, K.(2002) : Prototype impact tests on ultimate impact resistance of PC rock-sheds, Int. J. Impact Eng., 27, 969–985.
- 29–Leopold, L.B., Wolman, M.G., and Miller, J.P., 1964, Fluvial processes in geomorphology: San Francisco, W.H. Freeman, 522 p.
- 30–Palmstrom A., 1982. The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. IAEG Congress, New Delhi, 1982. pp. V.221 – V.228..
- 31–Pierson, L. A., Davis, S. A., and Van Vickle, R. (1990): RocFall Hazard Rating System Implementation Manual, Federal Highway Administration (FHWA), Report FHWA-OR-EG-90–01, FHWA, U.S. Dep. of Transp.

- 32-Ritchie, A. M., (1963): "Evaluation of Rockfall and Its Control." Highway Research Record, No. 17, pp. 13-28
- 33-Said, R., (1962) : The Geology of Egypt, Elsevier Publishing Co. Amsterdam.
- 34-Schumm, S. A. (1956) : Evaluations of Drainage Systems and Slopes In Bad Lands at Perth Amboy, New Jersey. Geol. Soc., America Bull. 67, pp . 597- 464.
- 35-Van Wasten, C. (2005), Landslide Hazard and Risk Assessment, ITC, Enschede, The Netherlands From: <http://www.ITC.nl>.
- 36-Young, A., (1972): Slope Profile analysis the system of the best unit in slope form and process, Special. Publ. 3, Inst.Br.Geogr., PP:1-13.

ملحق (1) بيانات مورفو وجية لمواقع مقترحة تطبيق مؤشرات جيومورفو وجية على طريق عقبة ضلع

م	دائرة العرض	خط الطول	طول المنحدر (م)	أدنى ارتفاع (م)	أقصى ارتفاع (م)	فارق المنسوب (م)	زاوية الانحدار	سرعة السقوط م/ثانية	نوعية المنحدر
1	872462.4	2015603.1	22	2254.1	2285	30.9	47.8	302	الحافات الرأسية
2	872413.4	2015586.4	29.7	2217.9	2238.8	20.9	54.1	204	الحافات الرأسية
3	872365	2015599.7	32.1	2199.3	2212.5	13.2	46.8	129	الحافات الرأسية
4	872313.3	2015623.8	26.3	2187.2	2198.4	11.2	46.9	110	الحافات الرأسية
5	872245.6	2015651.5	35.1	2193.9	2198.6	4.7	56.7	46	الحافات الرأسية
6	872184.4	2015689	26.3	2225.1	2233.6	8.5	51.9	83	الحافات الرأسية
7	872101.9	2015676.5	31.4	2210.7	2230	19.3	44.5	189	أراضي شديدة الانحدار جدا
8	871975.4	2015612.9	34.9	2233.3	2289	55.7	51.8	545	الحافات الرأسية
9	871835.6	2015499.7	35.4	2154.9	2178.8	23.9	51.7	234	الحافات الرأسية

تابع ملحق (1) بيانات مورفولوجية لمواقع مقترحة تطبيق مؤشرات جيومورفولوجية على طريق عقبة ضلع

م	دائرة العرض	خط الطول	طول المنحدر (م)	أدني ارتفاع (م)	أقصى ارتفاع (م)	فارق المنسوب (م)	زاوية الانحدار	سرعة السقوط م/ثانية	نوعية المنحدر
10	871644.7	2015458	36.3	2158.8	2205.5	46.7	37.2	457	أراضي شديدة الانحدار جدا
11	871466	2015472.2	29.5	2111.9	2174.3	62.4	48.8	610	الحافات الرأسية
12	871265.8	2015374.6	28.6	2162.6	2177.8	15.2	53.6	149	الحافات الرأسية
13	871185.4	2015321.2	32.7	2147.9	2188.1	40.2	50.5	393	الحافات الرأسية
14	871159.6	2015296.4	33.1	2136.2	2179.6	43.4	52.8	424	الحافات الرأسية
15	871093.7	2015247.9	32.5	2145.3	2170.9	25.6	30.3	250	أراضي شديدة الانحدار جدا
16	871073.5	2015213.7	36.1	2139.3	2160.1	20.8	38.5	203	أراضي شديدة الانحدار جدا
17	870796.6	2014904.5	27.2	2038.3	2068.3	30	24.5	293	أراضي شديدة الانحدار
18	870382.9	2015182.6	31.4	1989.4	2008.3	18.9	49.0	185	الحافات الرأسية

تابع ملحق (1) بيانات مورفولوجية لمواقع مقترحة تطبيق مؤشرات جيومورفولوجية على طريق عقبة ضلع

م	دائرة العرض	خط الطول	طول المنحدر (م)	أدني ارتفاع (م)	أقصى ارتفاع (م)	فارق المنسوب (م)	زاوية الانحدار	سرعة السقوط م/ثانية	نوعية المنحدر
19	870407.8	2015341.6	32.8	2013.6	2104.3	90.7	48.7	887	الحافات الرأسية
20	870258.6	2015232.3	22.7	2024.3	2076.2	51.9	28.6	508	أراضي شديدة الانحدار
21	870227.1	2015266.2	28.5	1999	2068.6	69.6	49.2	681	الحافات الرأسية
22	869987.1	2015166	32.5	1945.3	1979.1	33.8	36.8	331	أراضي شديدة الانحدار جدا
23	869798.1	2015033.1	32.7	1924.8	1945.5	20.7	55.7	202	الحافات الرأسية
24	869486.2	2014994.1	32.8	1867.2	1898	30.8	50.5	301	الحافات الرأسية
25	869127.4	2014978.6	34.6	1835.8	1848.1	12.3	33.8	120	أراضي شديدة الانحدار جدا
26	869227.2	2014683.9	35.4	1807	1821.3	14.3	35.3	140	أراضي شديدة الانحدار جدا
27	869484.2	2013902.7	31.5	1730.2	1770.5	40.3	35.3	394	أراضي شديدة الانحدار جدا
28	869702.3	2013579.7	33.5	1691.1	1707.8	16.7	48.4	163	الحافات الرأسية
29	869794.3	2013202.3	31.4	1641.8	1666.8	25	46.9	245	الحافات الرأسية
30	870376.7	2012533.7	31.5	1576.3	1611.2	34.9	48.1	341	الحافات الرأسية

مصدر: من عمل باحث بالاعتماد على برمجيات نظم معلومات جغرافية ArcGIS Pro ونموذج الارتفاعات رقمي بدقة 5 متر.

ملحق (2) استمارة مؤشر ميل احتمالية الانهيارات الصخرية LPI

خط الطول:

دائرة العرض:

الاحداثيات الجغرافية للموقع:

تقييم	وجود شقوق وفواصل	تقييم	زاوية ميل منحدر (درجة)	تقييم	ارتفاع منحدر (م)
صفر	سليم	صفر	أقل من 15°	(1)	أقل من 9 متر
(1)	معتدل	(1)	من 15° لأقل من 30°	(2)	9 متر لأقل من 16 متر
(2)	عالي	(2)	من 30° لأقل من 45°	(3)	من 16 متر لأقل من 26 متر
(3)	كثيف	(3)	من 45° لأقل من 60°	(4)	من 26 متر لأقل من 35 متر
		(4)	60° فأكثر	(5)	أكثر من 35 متر
تقييم	توجيه شقوق	تقييم	زوايا شقوق	تقييم	نشاط تجوية
صفر	إيجابي	صفر	أقل من 15°	صفر	نشط
(4)	سلبي	(1)	من 15° لأقل من 30°	(1)	ضعيف
		(2)	من 30° لأقل من 45°	(2)	متوسط
		(3)	من 45° لأقل من 60°	(3)	عالي
		(4)	60° فأكثر	(4)	عالي جداً
				(5)	ترربة مترسبة

تابع ملحق (2) استمارة مؤشر دليل احتمالية الانهيارات الصخرية LPI

تقييم	تكرارية حركة مواد صخرية	تقييم	فعل مياه جارية	تقييم	غطاء نباتي
صفر	غير مسجل	صفر	غير موجودة	صفر	أقل من 20% (فقير)
(1)	بسيط	(1)	نادرة	(1)	من 20% لأقل من 60% (قليل)
(2)	عالي	(2)	دائمة	(2)	أكثر من 60% (كثيف)
		(3)	موسمية		
		(4)	غزيرة		

دلالة مؤشر	تقييم	مسافات شقوق
لا يوجد خطر	أقل من 6	أقل من 0.05 ملم (4)
	6 لأقل من 11	من 0.05 لأقل من 0.3 ملم (3)
خطر متوسط	11 لأقل من 16	من 0.3 لأقل من 0.1 ملم (2)
	16 لأقل من 21	من 0.1 لأقل من 3 ملم (1)
خطر عالي	21 لأقل من 25	3 ملم فأكثر صفر
	25 فأكثر	

ملحق (3) نتائج مؤشر LPI مؤشر ليل الانهيارات الصخرية

م	ارتفاع منحدر	زاوية ميل منحدر	وجود شقوق	نشاط تجووية	زوايا شقوق	توجيه شقوق	مسافات شقوق	وجود نباتي	فعل مياه جارية	تكرار سقوط صخر	مجموع	مستوي خطر
1	2	4	3	0	4	0	4	1	3	2	23	عالي
2	3	3	3	4	2	4	3	1	3	1	27	عالي جداً
3	4	3	3	3	3	4	2	1	3	2	28	عالي جداً
4	5	3	3	4	3	0	3	0	3	2	26	عالي جداً
5	3	2	3	1	2	4	3	0	3	2	23	عالي
6	3	3	3	0	4	0	4	1	3	1	22	عالي
7	5	4	3	3	2	0	3	0	3	1	24	عالي
8	5	4	3	4	3	4	3	1	3	1	31	عالي جداً
9	5	2	3	3	3	0	3	1	3	1	24	عالي
10	4	2	3	4	4	4	3	0	3	2	29	عالي جداً
11	5	1	3	2	2	0	4	0	3	2	22	عالي
12	5	4	3	3	4	4	4	1	3	1	32	عالي جداً
13	5	2	3	3	3	0	1	1	3	2	23	عالي
14	3	4	3	3	3	0	1	1	3	1	22	عالي
15	3	0	3	1	4	0	2	1	3	1	18	متوسط
16	4	0	3	1	2	0	3	1	3	1	18	متوسط

تابع ملحق (3) نتائج مؤشر LPI مؤشر ديل الانهيارات صخرية

م	ارتفاع منحدر	زاوية ميل منحدر	وجود شقوق	نشاط تجووية	زوايا شقوق	توجيه شقوق	مسافات شقوق	وجود نباتي غطاء	فعل مياه جارية	تكرار سقوط صخر	مجموع مخاطر	مستوي خطر
17	1	2	3	1	3	0	2	1	3	17	متوسط	
18	2	4	3	3	4	0	3	1	3	24	متوسط	
19	5	3	3	4	4	0	2	0	3	25	عالي جداً	
20	5	3	3	3	3	4	0	3	2	27	عالي جداً	
21	3	2	3	3	4	0	4	3	1	23	عالي	
22	3	3	3	3	2	4	0	4	2	24	عالي	
23	5	4	3	3	3	4	4	1	2	32	عالي جداً	
24	5	2	3	3	4	4	0	1	1	26	عالي جداً	
25	3	4	3	3	4	4	4	0	3	30	عالي جداً	
26	3	0	3	1	3	4	0	3	2	20	متوسط	
27	4	0	3	1	4	4	4	1	1	25	عالي جداً	
28	5	3	3	2	2	0	0	3	2	23	عالي	
29	3	2	3	3	3	0	4	3	2	26	عالي جداً	
30	3	3	3	3	4	4	0	3	1	25	عالي جداً	

مصدر: دراسة ميدانية، سبتمبر 2020م