

أخطار السقوط الصخري باستخدام النماذج الرياضية " دراسة حالة لمنطقة سدمنت الجبل ببنى سويف "

د. سيد محمود مرسى*

مقدمة :

السقوط الصخري هو أحد أنواع حركة المواد على المنحدرات، وهي عبارة عن عملية انهيار أرضى محدود نسبياً تقتصر على إزالة الصخور المنفردة والسطحية من واجهة الجروف (Selby, 1982). وهناك أدلة واضحة على السقوط الصخري تتمثل في رواسب المنحدرات التي تغطي حضيض واجهة الجروف شديدة الانحدار العارية من النباتات، بينما أثرها يكون أقل وضوحاً على المنحدرات التي تغطيها النباتات. والصخور المتساقطة يمكن أن تُشكل نطاق واسع من عمليات حركة الكتل الصخرية، وهذه العمليات تعرف باسم الانزلاقات الصخرية أو الانهيارات الصخرية (Abele, 1994; Cruden & Varnes, 1996).

* مدرس بقسم الجغرافيا - كلية الآداب (جامعة الفيوم).

تعتبر عملية السقوط الصخرى حدثاً يومياً متوقفاً تحدث بصورة فجائية فى المناطق الجبلية حيث يمكن أن تُعرض حياة البشر والبنية التحتية للخطر. وهناك أمثلة عديدة من البنية التحتية التي دُمرت أو القتلى بفعل السقوط الصخرى فى مصر مثل حادثة الدويقة الشهيرة فى ٩ يونيه ٢٠٠٨ والتي راح ضحيتها العشرات من القتلى والجرحى. ولحماية المناطق السكنية والبنية التحتية المعرضة للخطر بمنطقة سدمنت الجبل، فمن الضروري تتبُّع الخطر الناتج عن السقوط الصخرى. لذا ينبغي وضع نظام علمى بهدف تحليل ودراسة السقوط الصخرى واحتمال حدوثه وتحديد التدابير الوقائية للحد من تأثيراته المدمرة وحماية الإنسان.

وتعتبر النماذج الإحصائية أحد الأدوات التي تفيد فى تتبع وتوقع الأخطار عند تطبيقها لدراسة السقوط الصخرى فى منطقة سدمنت الجبل، ولذلك فإن الهدف من هذه الدراسة هو تطبيق النماذج الإحصائية للتنبؤ بمناطق السقوط الصخرى والخطر الذي يُمكن أن تحدثه.

ولتحقيق هذا الهدف ينبغي معالجة النقاط التالية:

أولاً: الوضع العام لمنطقة سدمنت الجبل:

ثانياً: ديناميكية السقوط الصخرى.

ثالثاً: تحليل بيانات النماذج الإحصائية للتنبؤ بمناطق السقوط الصخرى بمنطقة الدراسة.

ويمكن إتباع الخطوات التالية وذلك من حيث تحديد مناطق مصدر السقوط

الصخرى، ومسارات السقوط الصخرى Rock Fall Tracks، ثم حساب سرعه السقوط

الصخرى والتي تحدد على طول مناطق اندفاع السقوط run out.

رابعاً: تقييم خطر السقوط الصخرى بمنطقة الدراسة.

خامساً: الخاتمة.

أولاً : الوضع العام لمنطقة سدمنت الجبل :

تقع منطقة سدمنت الجبل غرب مدينة بنى سويف بحوالى ٢٣ كم وعلى الجانب الغربى لبحر يوسف، وتمتد المنطقة المعرضة لخطر السقوط الصخرى بين دائرتى عرض ٢٠° ٢٩' و ٤٧° ٠٩' شمالاً، وخطى طول ٢٥° ٥٤' و ٤٨° ٥٤' شرقاً (شكل أ١). وكلمة سدمنت كلمة فرعونية مصرية قديمة مركبة من صا - امننت بمعنى غرب.

وترجع التكوينات الجيولوجية بمنطقة سدمنت الجبل إلى عصر الإيوسين الأوسط وعصر البلايوسين (الزمن الثالث). وتتكون صخور جبل سدمنت من صخور الحجر الجيرى الذى يتميز بطباقيته، ومساميته العالية، ونفاذيته لكثرة الشقوق والفواصل وسطح التطبيق وترتكز على صخور الطين الكلسى (المارل) التى تتميز بلونها الأصفر والطفل المتعدد الألوان (الأخضر، الأحمر، الرمادى)، كما توجد فى بطون الأودية رواسب سطحية حديثة (الزمن الرابع) من الحصى والرمال والطين والغرين. ولدراسة التكوينات الصخرية السطحية لمنطقة الدراسة أهميتها فى تحديد مناطق الضعف الصخرى من تتابع صخور صلبة علوية وصخور لينة سفلية ومدى مقاومتها لعمليات التجوية والتعرية بصفة عامة وعملية السقوط الصخرى بصفة خاصة.

وبالنسبة لانحدار سطح المنطقة: فتتقسم قرية سدمنت الجبل بصفة عامة إلى نطاقين أولهما السهل الفيضى لنهر النيل وبحر يوسف ويتميز بالانحدار البسيط جداً وثانيهما المنطقة الجبلية (الظهير الصحراوى للقرية) وهو موضوع الدراسة الحالية، حيث يتميز الظهير بوجود منحدرات جرفية شديدة الانحدار فى بعض المواضع باتجاه الشرق والجنوب الشرقى نحو وادى النيل. ويقطع واجهة هذه المنحدرات العديد من المسيلات الجبلية شديدة الانحدار تنحدر نحو نهر النيل شرقاً، كما تكثر عليها الكتل الصخرية المتساقطة. وتتراوح الانحدارات فى منطقة الدراسة بين صفر و ٩٠ درجة (شكل اب).

وساعدت طبيعة السطح منطقة الدراسة والتي تتكون من السهل والجبل نحو قيام الأهالي بزراعة الأراضي الخصبة قليلة الارتفاع بسيطة الانحدار والتي تشرف على نهر النيل وبحر يوسف شرقاً، وبناء مساكنهم فوق وأسفل المنحدرات المرتفعة شديدة الانحدار في الظهير الصحراوي غرباً، ويبلغ الفارق التضاريسي العام بمنطقة الدراسة ٨٤ متراً ويتدرج الارتفاع من الشرق ١٩ متر إلى نطاق المرتفعات في الغرب ١٠٣ متر (شكل ١ ج)، حيث يبني الأهالي الوحدات السكنية بشكل عشوائي على الأسطح الجانبية وحضيض الحافات الصخرية. بينما تتعرض الوحدات السكنية الموجودة في حضيضها إلى مشكلات الصرف الصحي العشوائي، وارتفاع منسوب المياه الجوفية حيث يظهر نشع كميات كبيرة من المياه أسفل المنازل. الأمر الذي قد يترتب عليه توقع حدوث سقوط صخري فجائي وسقوط بعض الكتل الصخرية نتيجة لتسرب مياه الصرف الصحي العشوائي بين صخور طبقات الطفل مما يتسبب في زيادة حجمه وزيادة لزوجته وانسيابه مما يساعد على اختلال توازن صخور الحجر الجيري التي ترتكز عليها وتساقطها. ووجود مساكن القرية عند حضيض المنحدرات قد يؤدي إلى تعاضم حجم الكارثة وزيادة عدد الضحايا في حالة وقوع السقوط الصخري عليها. بالإضافة إلى أن زحف عشوائيات المساكن بمنطقة سدمنت الجبل باتجاه السفح الطيني بل وصعودها إلى أعلى متجاوزة أحيانا الصخور الطينية المارلية لتصل إلى طبقات الصخور الجيرية مما يؤدي إلى زيادة الضغط وحدث السقوط الصخري كما حدث في منطقة الدويقة بهضبة المقطم شرق مدينة القاهرة ويزداد ذلك من خطورة الأمر وتحويله لكارثة بشرية ولذا وجب دراستها بهدف حماية الأرواح البشرية (شكل ١ أ).

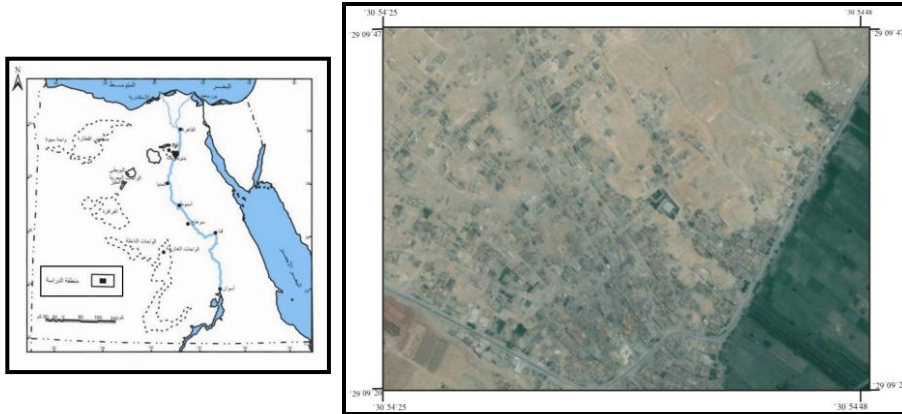
وتساهم الخصائص المناخية لمنطقة الدراسة في حدوث السقوط الصخري، حيث تتفاوت الحرارة في المنطقة الجبلية عن المنطقة السهلية وتتميز بمدى حراري كبير يبلغ حوالي ٣٥.٤ درجة مئوية حيث تبلغ أعلى درجة حرارة عظمى في محطة بني سويف ٣٧.٢ درجة في شهر يونيو وأقلها ١.٨ درجة في شهر يناير. هذا التفاوت

بين فصل الصيف والشتاء فى منطقة الظهر الصحراوى (سدمنت الجبل) يكون أكثر وضوحاً وتأثيره فى التجوية الميكانيكية مع توفر الرطوبة من مصادر مختلفة يساعد على حدوث التحلل الكيمايى.

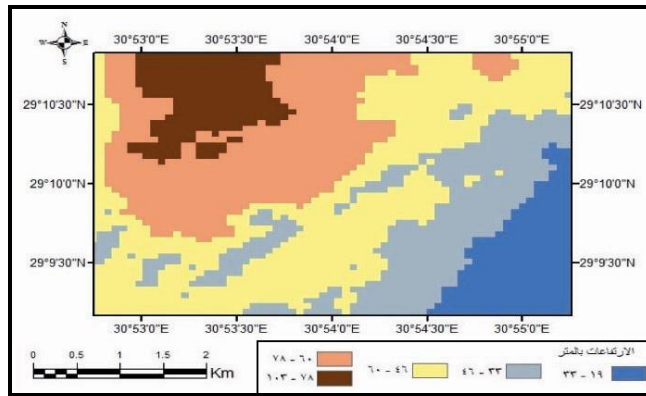
تساعد التغيرات اليومية والفصلية فى درجات الحرارة على حدوث اجهادات صخرية مختلفة ويظهر ذلك فى توسيع الفواصل وكثرة التشققات فى الاتجاهات المختلفة مما يؤدى إلى تكسر الصخر وتفتيته خاصة فى الطبقات الصخرية المنكشفة من صخور الحجر الجيرى. كما يؤدى تجمد المياه فى الشقوق والفواصل خلال فصل انخفاض درجة الحرارة (الشتاء) إلى توسيع الشقوق والفواصل وتهيئة الصخر للسقوط فيما بعد.

ويؤثر المطر على تقليل قوى التماسك والشد والاحتكاك للكتل الصخرية (حجر جيرى وطفل وصلصال)، ويبلغ متوسط سقوط المطر فى محطة بنى سويف حوالى ٦.٣ ملم/السنة وتتراوح القيم بين الصفر و ١٧.٧ ملم/السنة. حيث تتميز الطبقات الطينية والصلصالية والطفل بقابليتها الشديدة لامتصاص المياه والانتفاخ وزيادة حجمها وزيادة لزوجتها (عملية التشحيم) ثم تتعرض للجفاف فيقل حجمها وتتكمش مما يساعد فى حدوث السقوط الصخرى.

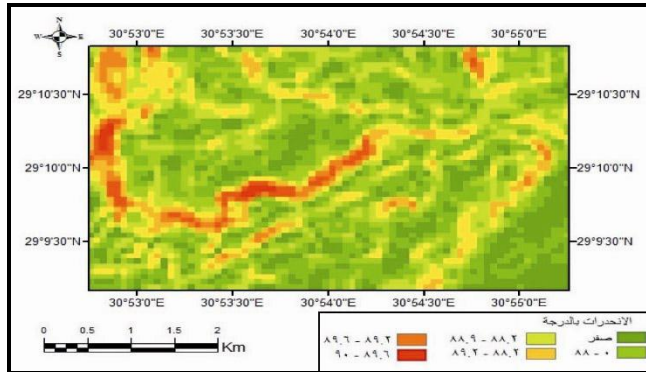
يبلغ المتوسط العام للرطوبة النسبية فى محطة بنى سويف عام ٢٠٠٨ حوالى ٤٩.٤% وتتراوح قيمها بين ٣٦.٥% فى شهر مايو و ٦٢% فى شهر ديسمبر. تؤدى المصادر المختلفة للرطوبة مثل ارتفاع مستوى الماء الجوفى وحدوث نشع المياه فى التربة وسوء الصرف الصحى إلى زيادة نسبة الرطوبة بمنطقة الدراسة التى تساعد على نقص فى مقدار تحمل الصخور لإجهاد القص shear stress مما يسبب فى حدوث السقوط الصخرى.



شكل (أ١) : موقع وصورة فضائية لمنطقة سدمنت الجبل.



شكل (ب١) : نموذج الارتفاع الرقمي لمنطقة الدراسة.



شكل (ج١) : الانحدارات بمنطقة الدراسة.

شكل (١) : موقع منطقة سدمنت الجبل وارتفاعاتها وانحداراتها.
تؤثر الرياح من حيث اتجاهها وسرعتها في حدوث السقوط الصخري، ويتراوح متوسط سرعة الرياح السنوية بمحطة بنى سويف بين ٣.٨ و ٩.٩ متر/الثانية، ويسود الاتجاه الشمالي بنسبة ٦٠% تقريباً.

ثانياً : ديناميكية (حركة) السقوط الصخر :

استعير مفهوم الديناميك Dynamique من المجال الفيزيائي، والذي يقصد به في مجال الميكانيكا مختلف العلاقات التي تكون بين القوى والحركات الناتجة عن هذه الأخيرة، ويدل المصطلح على القوة والحركة والحيوية ونقيضه الثبات والسكون، فهناك فرق بين الديناميكية والميكانيكية، فالديناميكية تعنى الحركة الطبيعية للصخور دون تدخل الإنسان، بينما الميكانيكية هي طبيعة الصخر بفعل التأثير البشرى. ويعني هذا أن ديناميكية السقوط الصخري عبارة عن قوى تفاعلية كيميائية تساهم في تحريك الصخور والتقليل من تماسكها وتغيير مسارات سقوطها. ومن هنا تأتي أهمية دراسة العوامل المؤثرة في ديناميكية السقوط الصخري وأنماط هذه الحركة كما يلي:

١. العوامل البيئية المؤثرة في ديناميكية السقوط الصخري (أسباب السقوط الصخري):

يبدأ السقوط الصخري بانفصال الصخور من صخور أساس المنحدرات، والتي تتمثل في واجهات الجروف في حالة كونها منطقة مصدر السقوط الصخري. وتتعرض كل صخور أساس المنحدرات لدرجات مختلفة من عمليات التجوية (الصورتان ١ و ٢)، مما قد يؤدي إلى المزيد من السقوط الصخري (Schumm and Chorley, 1964; Day, 1997). وزيادة درجة السقوط الصخري تتوقف على العوامل البيئية المسببة للتجوية الميكانيكية والكيميائية، وعلى نوع صخور الأساس.

وبغض النظر عن معدلات التجوية، فإن ديناميكية تحفيز حدوث السقوط الصخري هي التي تحدد ما إذا كانت عملية السقوط الصخري تحدث أم لا. وديناميكية تحفيز السقوط الصخري حقيقة يمكن أن تنقسم إلى الأسباب الممهدة للسقوط الصخري والأسباب الفعلية لبدء الحركة، وفي الواقع يصعب أن نميز بينهما، وفي اغلب الأحيان تمهد عملية التجوية وتسبب السقوط الصخري، مثل تكسر الصخر بفعل الصقيع. شكل المنحدر والمحيط المباشر بالصخر المحتمل سقوطه، هي من أهم العوامل التي تحدد إذا كان الصخر يمكن أن يسقط. كما تلعب الجاذبية الأرضية دوراً مهماً في حدوث السقوط الصخري ولكي يمارس عامل الجاذبية عمله في سقوط الصخور من أعلى السفوح إلى حضيضها لابد أن تسبقه عملية التجوية الممهدة لحركة السقوط الصخري، حيث تكون الصخور إما مفككة وجافة أو مشبعة بالمياه، أي أنها تتعرض للتجوية الميكانيكية أو الكيميائية.

ذكر Dogls (1980) أن الخصائص الطبيعية للصخر (الليثولوجية) لمواد صخور الأساس تلعب دوراً مهماً أيضاً في السقوط الصخري. متوافقة في ذلك مع نتائج Luckman (1976) الذي وضح أن عملية السقوط الصخري تتحكم فيها كل من الخصائص المورفولوجية والجيولوجية للجروف، وتغيرات درجة حرارة الصخور السطحية.

ونظراً لكون العوامل المسببة للسقوط الصخري عوامل مناخية في معظمها، إلا أن هناك سبب آخر للسقوط الصخري يتمثل في الزلازل حيث ينشط السقوط الصخري مع النشاط الزلزالي خاصة في حالة تعرض السفوح الجافة المكونة من صخور متماسكة إلى هزات أرضية قوية (Zellmer, 1987; Bull et al., 1994 and Vidrih et al.,) (2001).

كما أن عملية السقوط الصخري قد تسببها عوامل مختلفة، مثل الزلازل والعواصف المطيرة والذوبان السريع للثلوج، ودورة تجميد وذوبان المياه في الشقوق والفواصل، وجذور النباتات المتوغلة والمنبتة في التربة (Wieczorek et al. 1995,) (2000).

يؤدى تأثير الأنشطة المتعددة للإنسان مثل أعمال الحفر والتجوير والتعدين والبناء والزراعة وغيرها إلى تقليل استقرار منحدرات التلال في الصخور الصلبة مع أنها ما زالت عاملاً ثانوياً بالمقارنة بالعوامل الجيولوجية، ولكن محلياً يمكن أن تكون ذات أهمية كبيرة، على سبيل المثال عملية التقويض السفلى للمنحدرات أثناء عملية الحفر والتقيب لمشروعات البنية التحتية. كما تؤثر عملية الزراعة في حضيض الحافات على مورفولوجيتها، حيث تعمل مياه الري التي تروى بها تلك الأراضي على زيادة نشاط إذابة صخور الحجر الجيري المكونة لتلك الحافات والتي تتركز فوق صخور الطفلة اللينة التي سرعان ما تتعرض لنشاط نحت الرياح مما يزيد من عمليات التقويض السفلى بها الأمر الذى يؤدى إلى سقوط صخور الحجر الجيري التي تعلوها وبالتالي يساعد ذلك على سرعة تراجع الحافات، مما يسبب أخطار جسيمة تتعرض لها الأراضي الزراعية نتيجة لعمليات السقوط الصخري. وبالإضافة إلى ذلك، الحيوانات يمكن أن تسبب تساقط الصخور، على سبيل المثال حيوان الشمواه يتسلق واجهات منحدرات الجروف شديدة الانحدار. وهذه نظرة عامة توضح العوامل المختلفة المسببة لتساقط الصخور. ولكن في معظم الحالات مزيجاً من العوامل الطبوغرافية والجيولوجية والمناخية وتحديد الزمن هي التي تحدد امكانية حدوث تساقط الصخور.

تتميز السفوح بعدم الاستقرار بصفة عامة، حيث إنها دائماً ما تكون عرضة للتغير التدريجى أو التغير السريع نتيجة لتعدد الظروف التي تساعد على تحرك المواد فوقها، والتي تتمثل في تتابع التمدد والانكماش الحرارى الناجم عن التفاوت الحرارى

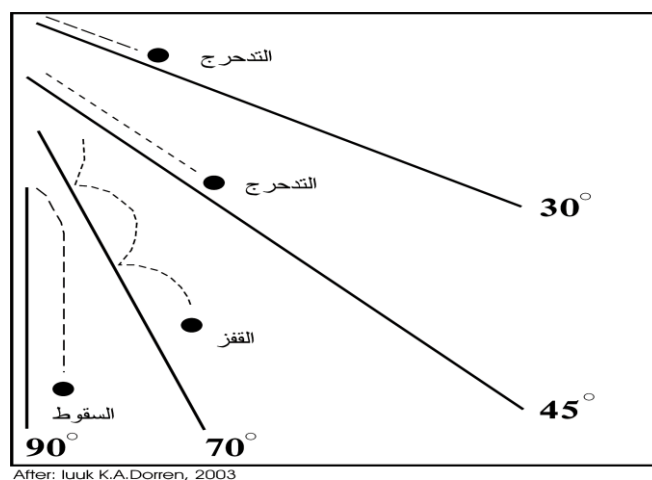
الكبير بمنطقة الدراسة مما يؤدي إلى إضعاف الصخر وتفككه وبالتالي يؤدي إلى حركة المواد تجاه أقدام السفوح، كذلك يؤدي ضغط الماء الناتج عن التشبع الدورى للمسامات الصخرية وتتابع البلل والتجفيف فى التربة الصلصالية على تعرض السفوح إلى الانهيارات والانزلاقات الصخرية.

وتتألف بنية السفوح بمنطقة الدراسة من تعاقب صخور الحجر الجيرى الصلبة التى ترتكز فوق صخور الطفلة اللينة، كما تتميز صخور الحجر الجيرى بكثرة الشقوق والفواصل وارتفاع درجة تأثرها بقطرات الندى والأمطار مما يزيد من نشاط عمليات التجوية الكيميائية وفعل الإذابة بها، مما يؤدي إلى نشاط تفكك الكتل الصخرية من واجهات الجروف وبالتالي زيادة توقع معدل السقوط الصخرى. كما تنشط قدرة الرياح المحملة بالرمال على النحت السفلى من السطح فى طبقات الطفلة اللينة تاركة الأجزاء العليا الصلبة بارزة والتى سرعان ما تتهار نحو أقدام السطح بفعل الجاذبية الأرضية مما قد يؤدي إلى حدوث أضرار وخسائر بالطرق والمنشآت والأراضى الزراعية التى تقع قريبة من تلك المنحدرات.

ويتضح من خلال الدراسة الميدانية لمنطقة الدراسة أن كثير من السفوح تتميز بالحوادث العالية والمنحدرات الشديدة وكثرة الشقوق والفواصل، حيث تساعد مياه الأمطار على زيادة انحداراتها مما يزيد من عملية السقوط الصخرى (صور ١، ٢، ٣، ٤).

٢) أنماط حركة السقوط الصخرى :

بعدما ينفصل الصخر ويبدأ في التحرك، يهبط من المنحدر متخذاً أنماطاً مختلفة تبعاً لآلية الحركة على المنحدر، وتعتمد هذه الأنماط من الحركة على متوسط ميل المنحدر، وهى ثلاثة أنماط (شكل ٢) ١- السقوط الحر خلال الهواء، ٢- القفز على سطح المنحدر، ٣- التدرج أو الدوران فوق سطح المنحدر.



شكل (٢) : الأنماط العامة لحركة السقوط الصخري على المنحدرات.

(أ) السقوط الحر للصخور :

يحدث السقوط الحر للصخور على المنحدرات شديدة الانحدار جداً. ووفقاً لريتشي Ritchie (١٩٦٣) فإن السقوط الحر يحدث إذا كانت درجة الانحدار للمنحدر أسفل الصخور المتساقطة المحتملة يتجاوز 76° ، ولكن تتفاوت هذه القيمة في بعض المواضع المختلفة، ويوضح الشكل السابق (٢) أن عند زاوية 70° تتحول حركة الصخور تدريجياً من القفز إلى السقوط. وقد يحدث نوعين مختلفين من الحركة أثناء السقوط الحر للصخر. الأولى حركة مركز الصخرة والثانية دوران الكتلة الصخرية حول مركزها (Azzoni et al., 1995) الحركة والدوران مهمين لأن الصخور المتساقطة تدور بصعوبة جداً أو نادراً ما تدور، فإذا ما حدث حركة دوران للصخرة في الهواء، فيمكن أن تقفز الصخرة في اتجاه مختلف بعد ارتطامها بالمقارنة بالاتجاهات السابقة. واحتكاك الهواء يؤثر على سرعة السقوط الحر للصخور، ولكن وفقاً (Pamini, 1986) وBozzolo and) احتكاك الهواء ليس له تأثير مهم أو كبير على حركة الصخر. وهناك تأثير عامل آخر على السقوط الحر للصخر ومسارات سقوطها الأخرى وهو

الاصطدام مع الصخور المتساقطة الأخرى (Azzoni et al., 1995)، ولكن هذه المؤثرات يصعب تحليلها أثناء عملية السقوط الصخري أو الملاحظات الميدانية.

(ب) الحركة على أو بالقرب من سطح المنحدر:

إذا كان متوسط درجة انحدار المنحدر تقل في القطاع السفلي من المنحدر، فإن الصخرة تصطدم على سطح المنحدر بعد السقوط الحر ويُعرف هذا بالقفز. وأثناء أول قفز تتعرض الصخور للكسر وخصوصاً الصخور الضعيفة (Bozzolo and Pamini, 1986). وسواء الصخرة انكسرت أو لم تنكسر فإن حوالي من ٧٥ - ٨٦% من الطاقة المكتسبة في السقوط الأولي تُفقد في ذلك التأثير الأول (Broilli, 1974; Evans and Hungr, 1993).

إذا كان متوسط درجة انحدار المنحدر أقل من ٤٥° تقريباً، فإن حركة الصخر تتحول تدريجياً من حركة القفز إلى التدرج لأن الصخرة تزداد تدويراً. والصخرة المتدرجة تتصل بشكل ثابت تقريباً بسطح المنحدر (Hungr and Evans, 1988). أثناء التحول من حركة القفز إلى التدرج، الصخرة تدور بسرعة كبيرة جداً وتظل فقط حواف الصخرة ونصف قطرها الأكبر متصلاً بالمنحدر. ومن ثم فإن مركز الثقل يتحرك على طول تقريباً في مسار مستقيم، وهو نمط فعال للحركة فيما يتعلق بفقد الطاقة. في الواقع، هذا الجمع بين عملية التدرج والقفزات القصيرة هي واحدة من أكثر الحركة الفعالة (Erismann, 1986).

وعملية الانزلاق الصخري: نمط آخر من الحركة على سطح المنحدر، لكن هذا يحدث عموماً فقط في المراحل الأولية والنهائية لعملية السقوط الصخري. فإذا زاد متوسط درجة انحدار المنحدر، فإن الصخور المنزلقة تبدأ في السقوط، أو القفز أو التدرج. أما إذا

كان متوسط درجة انحدار المنحدر لا تتغير أثناء الانزلاق، فإن الصخرة تتوقف غالباً بسبب فقدان الطاقة نتيجة الاحتكاك (Bozzolo and Pamini, 1986).

يتضح مما سبق أنه يمكن تقسيم حركة السقوط الصخري بمنحدرات منطقة سدمنت الجبل إلى ثلاثة أنماط حسب شكل المنحدر وسرعة السقوط الصخري كما يلي:

- * **النمط الأول :** سقوط صخري سريع جداً ويتركز على المنحدرات شديدة الانحدار جداً أكثر من 70° درجة حيث تسقط الكتل الصخرية كبيرة الحجم ويتكسر الكثير منها إلى أحجام أصغر، كما هو الحال في معظم منحدرات منطقة الدراسة وخصوصاً منحدرات عزبة خورشيد.
- * **النمط الثاني :** سقوط صخري شديد السرعة ويتركز على المنحدرات شديدة الانحدار يتراوح انحدارها بين 50° إلى 70° درجة كما هو الحال في المنحدرات الوسطى من منطقة سدمنت الجبل بالقرب من الطريق الرئيسي والمنشآت الخدمية مثل مركز الشباب والمدرسة الابتدائية.
- * **النمط الثالث :** سقوط صخري سريع ويتركز على المنحدرات ذات انحدار يساعد على سرعة المواد المنزلقة ويتراوح بين 40° إلى 50° درجة كما في منحدرات منطقة طما فيوم.

(ج) اعاقه حركة الصخور وابطاء سرعتها :

بعد أنماط الحركة العامة المختلفة السابقة تتوقف حركة الصخرة. فالسرعة وتوقف السقوط الصخري يعتمد بشكل رئيسي على متوسط درجة انحدار المنحدر، لأن السقوط الصخري عموماً يكون أسرع فوق المنحدرات الأشد انحداراً وأبطأ على المنحدرات الأكثر استواءً. ولكن إلى جانب متوسط انحدار المنحدر السرعة تعتمد أيضاً على حجم الصخر، وعلى المواد التي تغطي المنحدرات مثل التربة، والركام والغطاء النباتي.

وقد لوحظ أثناء الدراسات الميدانية لمنحدرات سدمنت الجبل أن الصخور الصغيرة يتم إعاقة حركتها وإبطاء سرعتها بسهولة أكبر من الصخور الكبيرة؛ ويرجع ذلك إلى الأسباب الرئيسية ذات التأثير الشديد على منحدرات الهشيم بمنطقة الدراسة والتي تتمثل فى: أولاً، إجمالى الطاقة الحركية للصخور الصغيرة أقل من الصخور الكبيرة أثناء السقوط الصخرى، وثانياً، العقبات الكبيرة مثل الأشجار يمكنها بسهولة أكبر وقف حركة الصخور الصغيرة، وثالثاً، الصخور الصغيرة تُعاق حركتها بسهولة أكبر في المنخفضات الواقعة بين الصخور الكبيرة على هشيم سفوح المنحدرات، حيث تعمل هذه المنخفضات كمصيدة تتوقف بداخلها الصخور (Kirkby & Statham, 1975;) (Statham, 1976; Statham & Francis, 1986).

كما لوحظ بمنحدرات منطقة الدراسة أن المواد الدقيقة وجدت بالقرب من قاعدة الوجه الحر للمنحدر وأما فى أسفل المنحدر فيزداد متوسط حجم الصخر. والصخور الأكبر حجماً توجد فى الغالب بالقرب من قاعدة منحدر الهشيم. وتأثير هذا التصنيف يُطبق فقط على الجزء الأعلى من منحدرات الهشيم. لأن الانهيارات الصخرية ترسب الجلاميد وأحجام مختلفة من الصخر بشكل رئيسي في قاعدة منحدرات الهشيم (Jomelli and Francou, 2000).

يتم توقف الصخور مفاجئة بدلاً من أن يكون عملية تدريجية. يحدث التوقف لأن الطاقة الحركية للصخر تُفقد نتيجة قوى التصادم والاحتكاك التى تتم على الصخرة أثناء عملية نقلها فوق أسطح المنحدرات. قوة احتكاك حركة الصخر لا تعتمد فقط على شكل الصخرة، ولكن أيضاً على خصائص سطح المنحدر (Statham and Francis, 1986).

خصائص سطح المنحدر يمكن أن تتفاوت كثيراً داخل مسافات قصيرة. لذا فإن قوة الاحتكاك بين الصخرة وسطح المنحدر يمكن أن تُميز أو تُعرف أفضل بواسطة

زاوية الاحتكاك الديناميكية (Kirkby and Statham, 1975). زاوية الاحتكاك الديناميكية ترتبط بوعورة السطح (Chang, 1998)، ويمكن تعريفها بأنها الاختلاف في الارتفاع العمودي أو الرأسى باتجاه المنحدر في مسافة معينة من المنحدر (Pfeiffer and Bowen, 1989). وقد عرف (Kirkby & Statham, 1975) زاوية الاحتكاك الديناميكية للسقوط الصخري كما يلي :

$$\tan f_{ud} = \tan f_0 + k * d / (2 * R)$$

حيث f_{ud} = زاوية الاحتكاك الديناميكية بالدرجات (°)

f_0 = زاوية الاحتكاك الداخلي (°) (بين ٢٠.٣ درجة و ٣٣.٨ درجة)

K = ثابت يتراوح بين (٠.١٧ و ٠.٢٦)

d = متوسط قطر الصخرة على سطح المنحدر بالمتر

R = نصف قطر الصخرة بالمتر

وللنبات الطبيعي فوق أسطح المنحدرات وفي حضيضها تأثيره على إعاقة حركة الصخور المتساقطة، فنجد أن L.K.A. Dorren (73) نشرت واحدة من الدراسات الكمية القليلة عن تأثير الغطاء النباتي على الصخور المتساقطة، وخلصت إلى أن ما بين ثلاثة وعشرة أضعاف من الصخور المتساقطة توقفت على المنحدرات المشجرة بالمقارنة بالمنحدرات المماثلة التي تكون بدون غطاء نباتي. وتحرت الدراسة أيضاً أهمية الأشجار في وقف السقوط الصخري وخلصت إلى أن التضاريس أو الطبوغرافيا لها نفس القدر من الأهمية؛ فالصخور المتساقطة تفقد طاقتها الحركية عن طريق الاصطدام بجذوع الشجر. والذي يؤدي في نهاية المطاف إلى إيقاف الصخرة على المناطق الأكثر استواءً في الأرض أو التضاريس.

كما لاحظ Hétu and Gray (2000) تأثير النبات على نقل الحصى أو الركام على

المنحدرات، أي أنها ذات صلة بزيادة تركيز الصخر على طول هامش النباتات على

منحدرات الهشيم ذات الكثافة النباتية المتزايدة. ووفقا لهم، هناك صراع مستمر بشكل ثابت بين تنمية منحدرات الهشيم النشطة ومستعمرات النبات. المنطقة الأمامية النشطة لمنحدر الهشيم تتحرك أسفل المنحدر إذا بُعثر أو دُمر النبات من قبل حركة كتل صخرية واسعة النطاق.

وبالنسبة لمنطقة سدمنت الجبل فقد لوحظ ميدانياً أن النباتات لا تستطيع إيقاف التأثير المُدمر للمقدار الكبير لأحداث السقوط الصخرى، ولكن فى حالة تدنى حجم الصخور المتساقطة - ارتفاع وتيرة أحداث تساقط الصخور كما فى المنحدرات الجنوبية لمنطقة الدراسة فقد توفر النباتات حماية فعالة. كما لوحظ خلو أسطح وحضيض معظم المنحدرات من النبات الطبيعى الأمر الذى قد يزيد من خطورة حركة السقوط الصخرى بها حيث لا تتوفر الحماية الطبيعية لإعاقة وبطء حركة الصخور المتساقطة وبالتالي يتوقع حدوث تأثير بالغ الخطورة على المناطق السكنية فى حضيض المنحدرات فى حالة حدوث أى سقوط صخرى.

ثالثاً : تحليل بيانات النماذج الاحصائية لقياس ديناميكية (حركة) السقوط الصخرى :

السقوط الصخرى هو عملية سفح يتم فيها فصل كتلة صخرية من الوجه الحر شديد الانحدار من الجرف الصخرى وتهبط بسرعة كبيرة للغاية بواسطة السقوط ثم التدحرج، الانزلاق وأخيراً التوقف (Cruden and Varnes, 1996). الكتلة الصخرية تتكسر عندما تصطدم بالأرض أثناء هبوطها، هذا التكسر للصخرة ينتج عنه كتلة صخرية مفردة، أو كتل مجزأة، التي تتحرك بشكل مستقل عندما يكون حجم الكتلة الصخرية المنفصلة أقل من ١٠٥ متر مكعب تقريباً (Evans and Hungr, 1993).

ومعظم دراسات التحليل الإحصائي التي تم الحصول عليها كانت كلها تكشف عن تعقب مسارات السقوط الصخرى كبيرة الحجم، لذلك السقوط الصخرى الصغير أصغر من ١٠٠ متر مكعب هي العملية الأكثر شيوعاً على الجروف الصخرية وخاصة من أجل الاستفادة بها لتحليل الأخطار وإدارتها (Brunetti et al., 2009).

وهناك خطوة ضرورية لتحليل أخطار السقوط الصخري هي رسم الحدود في المنطقة المعرضة للخطر الموجودة أسفل الجروف الصخرية بمنطقة الدراسة، العناصر المعرضة للخطر مثل المناطق السكنية والبنية التحتية، لذا فمن الضروري التحديد الدقيق لأقصى مسافة ستقطعها الصخور المتساقطة. ويمكن إنشاء هذه الحدود المنخفضة بطريقة جيومورفولوجية تعتمد على أبعد الصخور المتساقطة من السقوط الصخرى السابق للتنبؤ بأقصى مسافة سقوط صخرى مقطوعة بالنسبة للسقوط الصخرى المتوقع حدوثه في المستقبل باستخدام النماذج التجريبية المعروفة بالنماذج الإحصائية (Copons and Vilaplana, 2008).

وتعتمد الدراسة الحالية على اثنين من النماذج الرياضية النموذج الأول: نموذج زاوية الوصول والنموذج الثاني: نموذج زاوية الظل (Evans and Hungr, 1993). حيث أن تطبيق النماذج الرياضية أسهل للتنبؤ بمسافات السقوط الصخرى المقطوعة لأحجام الصخور الأصغر من ١٠٠ متر مكعب (Soeters and Van Westen, 1996). وإذا فُرض أن حجم السقوط الصخري وخصائص المنحدر ثابتة على مر الزمن، فالنماذج الإحصائية يمكن أن تتوقع بالمسافة التي تقطعها الصخور المتساقطة في المستقبل من البيانات التي تم الحصول عليها من القياسات الميدانية. وفيما يلي عرض لكلا النموذجيين:

(١) نموذج زاوية الوصول Reach Angle :

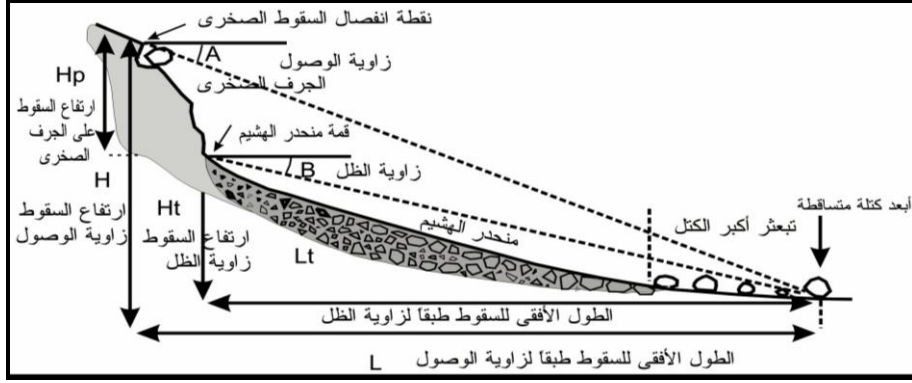
يقوم هذا النموذج على حساب الزاوية المحصور بين المستوى الأفقى والخط الواصل من قمة المصدر المأخوذ منه الصخرة المتساقطة إلى نقطة التوقف بالنسبة لأي صخرة متساقطة (شكل ٣) ومن المهم أن يتبع الخط مسار السقوط للصخرة. أى ابتداء من الوجه الحر من الجرف الصخرى إلى أبعد كتلة صخرية متساقطة من السقوط الصخرى. ويتم حساب هذه الزاوية عن طريق مؤشر الحركة (H/L) the mobility index نسبة الارتفاع إلى المسافة والذي اقترحه كل من (Shreve (1968)، Hsu (1973)، Scheidegger (1975) حيث H يمثل ارتفاع السقوط و L طول المسافة لسقوط الصخرة (شكل ٣). وهذا السقوط يعرف بأسماء كثيرة منها: زاوية السقوط travel angle (Cruden and Varnes, 1996)، وزاوية المسافة المقطوعة travel distant angle (Hunter and Fell, 2003).

ويستند تفسير زاوية الوصول (شكل ٣) على خط الطاقة الذى يمتد من قمة مصدر السقوط الصخرى والسقوط إلى أسفل المنحدر. والكتلة الصخرية المنفصلة من الجرف الصخرى تسير أسفل المنحدر بما يعادل الطاقة الحركية المساوية للارتفاع بين سطح المنحدر وخط الطاقة (Vaunat and Leroueil, 2002; Jaboyedoff and Labiouse, 2003).

وتتوقف الكتلة الصخرية عند نقطة تقاطع خط الطاقة مع سطح الأرض حيث تبلغ قيمة الطاقة صفر. وقيمة ظل زاوية الوصول تساوى معامل احتكاك سطح الأرض حيث ينزلق السقوط الصخرى (Shreve, 1968 and Scheidegger, 1973).

وتعرف زاوية الوصول على إنها العلاقة بين السقوط الرأسى H وطول المسافة الأفقية للسقوط (L) (شكل ٣). وطبقاً لهذه العلاقة، نجد أن أطول مسافة سقوط صخرى، ستكون هى أدنى قيمة لزاوية الوصول (H/L) . وطريقة زاوية الوصول

تستخدم على نطاق واسع لحساب السقوط الصخري (Corominas, 1996; Petje et al., 2005).



After: Evans & Hungr (1993)

شكل (٣) : رسم تفصيلي لمنحدر موضحاً عليه الجرف الصخري ومنحدر الهشيم، ويشير حرف A إلى زاوية الوصول، بينما يشير حرف B إلى زاوية الظل

(٢) نموذج زاوية الظل (B) :

يقوم هذا النموذج على حساب زاوية الخط المستقيم الواصل من قمة منحدر الهشيم إلى أبعد نقطة توقف لأي صخرة متساقطة، وهو الحد الأدنى لظل الزاوية، مصطلح أدنى زاوية ظل يُعرف على أنه تقدير زاوية الظل في منطقة الدراسة والتي عادة تقابل أبعد صخرة متساقطة.

وتُعرف زاوية الظل بأنها انحدار خط الطاقة الذي يربط بين أقصى صخرة سقطت وقمة منحدر الهشيم (Lied, 1977; Evans and Hungr, 1993). ويتم حساب زاوية الظل هندسياً عن طريق ظل العلاقة بين (Ht/Lt) (شكل ٣)، حيث تمثل ارتفاع السقوط الصخري من قمة منحدر الهشيم (الارتفاع ممكن يختلف بين قمة منحدر الهشيم وموقع أبعد كتلة صخرية متساقطة) و Lt تمثل مسافة السقوط على منحدر

الهشيم (أى تمثل طول المسافة الأفقية بين قمة منحدر الهشيم وموقع أبعد كتلة صخرية منفردة ساقطة من السقوط الصخري).

ويعتبر كل من (Evans and Hungr 1993) أن الطاقة الحركية التى اكتسبتها الكتل الصخرية فُقدت إلى حد كبير أثناء سقوطها على طول الجرف الصخري حتى منحدر الهشيم. وتعتمد مسافة السقوط الصخري التالية على طول بدء منحدر الهشيم على قوة الدفع الأفقية والدورانية فوق زاوية ميل منحدر الهشيم. ففي هذه الحالة، خط الطاقة يجب أن يبدأ من قمة منحدر الهشيم ويكون انحدار هذا الخط هو خط زاوية الاحتكاك بالنسبة للصخرة الكبيرة عند نهاية منحدر الهشيم. ويمكن لهذا الافتراض أن يكون مؤكد فقط بالنسبة لحجم سقوط الكتل الصخرية الأصغر من ١٠٥ متر مكعب حيث تسقط الكتل الصخرية المنفردة بشكل مستقل.

وتطبيق زاوية الظل لا يتطلب تحديد أو تعريف لمنطقة انفصال الكتل الصخرية ونقطة توقفها لكل حدث من أحداث السقوط الصخري لكنه يحتاج إلى تحديد أبعد الصخور سقطت في الماضي.

* العوامل التي تؤثر على مسافات السقوط الصخري :

تؤثر على مسافة السقوط الصخري عوامل كثيرة مثل حجم الكتل الصخرية المنفصلة، خصائص المنحدر حيث توجد الصخور الخشنة أو الكبيرة الحجم عند قاعدة منحدر الهشيم، الغطاء النباتي، والشكل المضطرب لمسار السقوط الصخري (Dorren, 2003). وتعتمد قيمة زاوية الوصول للسقوط الصخري الكبير بقوة على حجم الانفصال (متر) (Erismann and Abele, 2001). حيث يتضح من الكتل الصخرية الكبيرة المنفصلة أن الحجم يُسهم في مسافة السقوط الأكبر، لذلك يمثل الحد الأقصى لزاوية الوصول بحجم السقوط الصخري، والحد الأدنى يمثل قيمة زاوية الوصول (Okura et al., 2000).

تم التحليل الاحصائي لكلا النموذجين الرياضيين، نموذج زاوية الوصول ونموذج زاوية الظل، وقد تم تطبيق استخدام النماذج الرياضية فى تحليل القياسات الحقلية للسقوط الصخري التى اخذت فى منطقة الدراسة وذلك باستخدام متوسط العلاقات بين المتغيرات الطبوغرافية البسيطة، والارتفاع الرأسى والطول الأفقى.

يتضح من الشكل (٤أ) وجود علاقة ارتباط طردية قوية جداً بين اجمالى الارتفاع (H) وإجمالى طول مسافة السقوط (L) التى تمثل زاوية الوصول. والشكل (٤ب) يوضح العلاقة بين العوامل المستخدمة بواسطة مفهوم زاوية الظل: الارتفاع على منحدر الهشيم (Ht) ومسافة السقوط على منحدر الهشيم (Lt). ومعادلة الانحدار أسفل الشكل البياني توضح وجود علاقة ارتباط طردية قوية جداً أيضاً تبلغ ٠.٩٩٥.

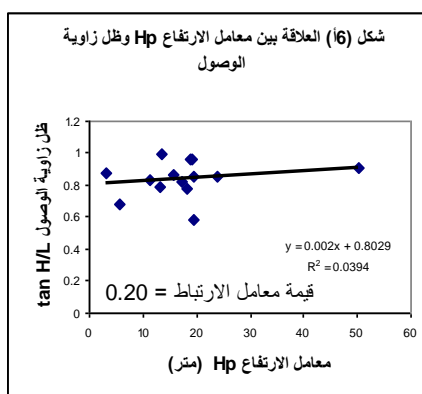
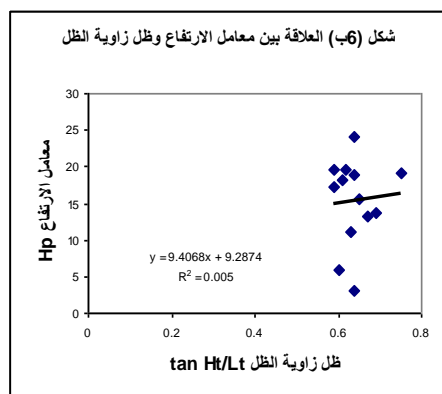
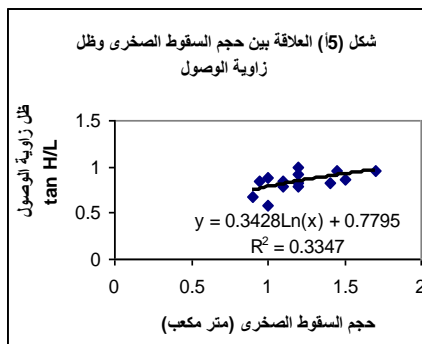
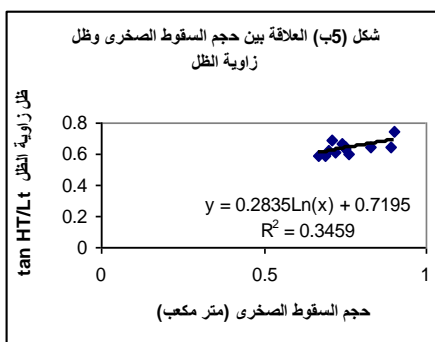
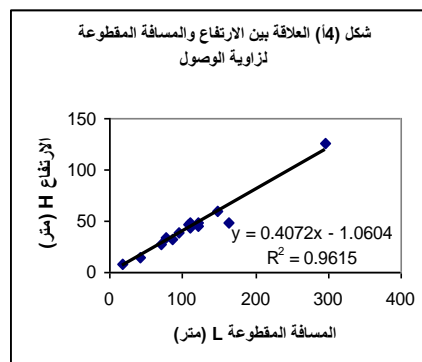
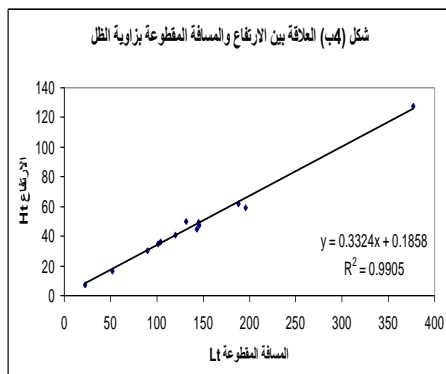
يتضح من الشكل (٥ أ، ب) وجود علاقة واضحة بين الأحجام الصغيرة للسقوط الصخري ومسافات السقوط، على الرغم من أن البيانات تبدو مبعثرة إلى حد ما، حيث توجد علاقة لوغاريتمية بين حجم السقوط الصخري وظل زاوية الوصول (HL).

وهناك فرضيتان ربما اقترحا من التبعية لظل زاوية الظل على حجم السقوط الصخري موضحة فى الشكل (٥ب): **الفرضية الأولى:** هى تأثير حجم السقوط الصخري على قوة الدفع الأفقية للطاقة الحركية ربما يرجع الى انزلاق الصخور المنفصلة والكتل الصخرية فوق اوجه المفاصل غير المستقر، **والفرضية الثانية:** هى أن الطاقة الحركية التى تمت على الصخور المنفصلة الأولى ليست مفقودة تماماً عند أول اصطدام لها على منحدرات الهشيم. ولذلك، فإن تأثير حجم السقوط الصخري على المسافة المقطوعة تأثيراً قوياً ومستمرًا.

جدول (١) : البيانات التفصيلية لزاويتي الوصول و الظل للسقوط الصخري.

L قيمة مسافة السقوط (متر)	Hp معامل الارتفاع (متر)	زاوية الظل للكتل الصخرية المنفردة (درجة)			زاوية الوصول للكتل الصخرية المنفردة (درجة)			حجم الكتل الصخرية (متر مكعب)	Lt (متر)	الرمز
		Max حجم الكتل الصخرية (م ^٣)	Min. tan(Ht/Lt) ظل زاوية الظل	قيمة زاوية الظل درجة	Max. حجم الكتل الصخرية (م ^٣)	Min. tan(H/L) ظل زاوية الوصول	قيمة زاوية الوصول درجة			
٢٤١	١٨,٢	0.72	0.64	٣٢,٦	1	0.82	٣٩,٤	٢٠	١٠١,٣	١
٢١٩	١٩,٢	0.86	0.78	٣٧,٩٥	1.25	1.02	٤٥,٦	٥	٩١,١	٢
١٩١	١٥,٦	0.71	0.68	٣٤,٢	1.3	0.93	٤٢,٩	٥	٨٢,٢	٣
١٥٢,٥	١٣,٦	0.69	0.69	٣٤,٦	1.08	1.08	٤٧,٢	٥	٦٩,٠	٤
٢٩٧,٦	٢٤	0.7	0.65	٣٣	1.01	0.89	٤١,٧	١٠	٢٦٩,٦	٥
٥٩٤,٤	٣	0.89	0.67	٣٣,٨	1.16	0.93	٤٢,٩	١٠	١٦,٣	٦
٣٦,٣	١١,٢	0.75	0.67	٣٣,٨	1	0.88	٤١,٣	٥	٦٠,٥	٧
١٤٠,٨	١٩,٦	0.77	0.66	٣٣,٤	1.41	0.92	٤٢,٦	١٠	١١٨,٢	٨
٢٧٣	٥,٨	0.69	0.58	٣٠,١	1.34	0.94	٤٣,٢	٣٠	٣٣,١	٩
٨٤,٦	١٨,٨	0.78	0.62	٣١,٧٩	0.9	0.81	٣٩	٣٠٠	١٠١,٢	١٠
٢١٤,٤	١٣,٢	0.83	0.67	٣٣,٨	1.76	1.02	٤٥,٦	١٠	٦٨,٥	١١
١٧٢	١٧,٢	0.74	0.69	٣٤,٦	1.06	0.86	٤٠,٧	٢٥	٩٨,٧	١٢

المصدر: من إعداد الباحث اعتمادا على الدراسة الميدانية والعمليات الإحصائية.



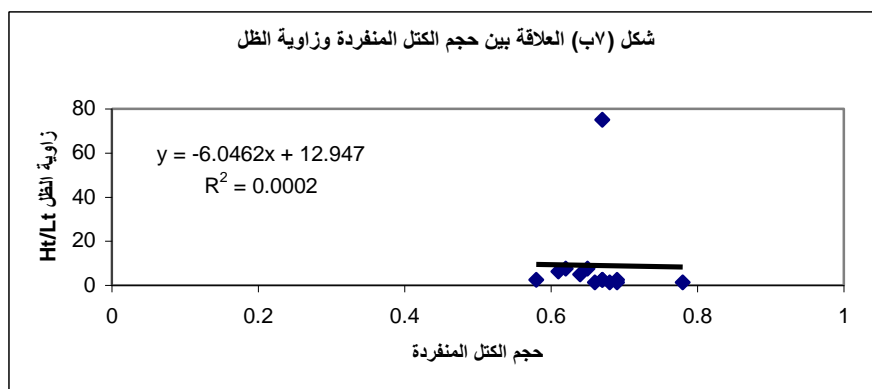
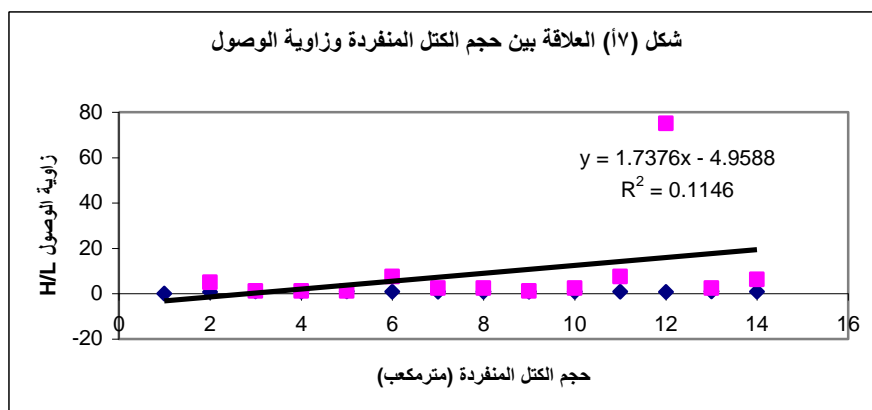
تم تحليل العلاقة بين تأثير معامل ارتفاع السقوط (Hp) (شكل ٣) على طول جرف الصخر وبيوضها الشكل (٦أ، ب) مع الأخذ في الاعتبار حساب تأثير حجم السقوط الصخري على مسافات السقوط المقطوعة العلاقات في الشكل (٦) تمثل أربع مجموعات من حجم السقوط الصخري (٠-٩ ، ١٠-٤٩ ، ٤٠-٩٩ ، و ١٠٠-٣٠٠ متر مكعب).

والعلاقات المبعثرة توضح وجود علاقة طردية ضعيفة جداً بين معامل ارتفاع السقوط الصخري ومسافة السقوط المقطوعة وذلك إذا أخذنا بعين الاعتبار كل أحجام الكتل الصخرية المنفردة والمجمعة التي توجد داخل الأربع مجموعات السابقة. وهذا يثبت أن الطاقة الحركية المكتسبة على طول جرف الصخر فُقدت إلى حد كبير على قمة منحدر الهشيم ولكن ربما ليس كلياً (Evans and Hungr, 1993). ولم يتم الحصول على علاقة بين حجم الصخور المنفردة وظل زاوية الوصول (شكل ٧أ). والتبعثر في الشكل (٧ ب) يشير إلى أحجام الكتل الصخرية ومسافة السقوط المقطوعة بواسطة طريقة زاوية الظل. والبيانات التي أُضيفت كانت من أبعد الكتل الصخرية التي وجدت بمنطقة الدراسة لأنها تمثل أكبر أحجام وأكبر مسافات مقطوعة للسقوط الصخري القديم.

تتميز جميع البيانات الممثلة بيانياً بدرجة مرتفعة من التبعثر، ولكن لوحظ وجود علاقة سلبية في الشكل (٧ ب) بين حجم الكتلة الصخرية وقيمة نسبة زاوية الظل (H/Lt). وتوجد معادلة الانحدار إلى الأسفل من الرسم البياني والتي تمثل تقدير أقصى مسافة سقوط مقطوعة للكتل الصخرية مع مراعاة حجمها.

يُمكن لخصائص المنحدرات أن تؤثر على مسافات السقوط الصخري المقطوعة وخاصة بالنسبة للسقوط الصخري الصغير مثل خشونة المنحدر، مرونة الأرض وكثافة النبات الطبيعي (Corominas et al., 1990; Krummenacher & Keusen, 1997;)

(Dorren, 2003) وكلها سمات يُمكن اعتبارها لكل خصائص المنحدر. كما توجد أربع خصائص مرتبطة بمرونة الأرض بالنسبة للنماذج العددية وهي: الصخور الناتئة، التربة الرقيقة، التربة السمكية، وركام الصخور (Krummenacher and Keusen, 1997). ومع ذلك، كمية البيانات المتاحة في منطقة الدراسة جنباً إلى جنب مع الكتابات الموجودة ليست كبيرة بما فيه الكفاية حتى الآن لتحليل تأثير خصائص المنحدر على مسافات السقوط.



شكل (ب)

* التنبؤ بمسافات السقوط الصخرى :

تم استخدام مفهوم "احتمال الوصول" للتوقع بمسافة السقوط الصخرى، ويقصد بمفهوم احتمال الوصول هو التردد (ويُعبّر عنه بمصطلح النسبة المئوية أو احتمال) أى احتمال سقوط الكتل الصخرية التي يُمكن أن تصل إلى نقطة ما فى المنطقة المعرضة للخطر التي تقع أسفل الجرف الصخرى (Rouiller et al., 1998). كما تم تحديد "حد الوصول" وهو الخط الذى يتم الحصول عليه من خلال ربط النقاط التي لها نفس قيمة احتمال الوصول. أو ربط النقاط بنفس قيمة احتمال الوصول. مع الأخذ في الاعتبار حساب تبعثر الصخور على مسافات السقوط، وحساب زاويتي الوصول والظل من السقوط التي تم حسابها ميدانياً بمنطقة الدراسة. وحدود الوصول: عبارة عن أسلوب كمي لحساب مسافات السقوط الصخرى وتكون مفيدة للتوقع بأخطار السقوط الصخرى وتقييمها (Copons, 2007; Copons and Vilaplana, 2008).

تتراوح قيمة احتمال الوصول بين (صفر - ١). وطبقاً لهذا الأسلوب الاحتمالي، أقرب نقطة لمنحدر الهشيم هو الجرف الصخرى، وأعلى نقطة هي قيمة احتمال الوصول. والقيمة ١ تمثل النقاط التي تُعبر عن وصول كل الكتل الصخرية المنفردة بالفعل والتي عادة ما تقع عند حضيض الجرف الصخرى. بينما القيمة صفر تُعبر عن أى كتلة صخرية منفردة مُحتمل أن تصل إلى النقاط المعرضة للخطر ولم تصل بالفعل.

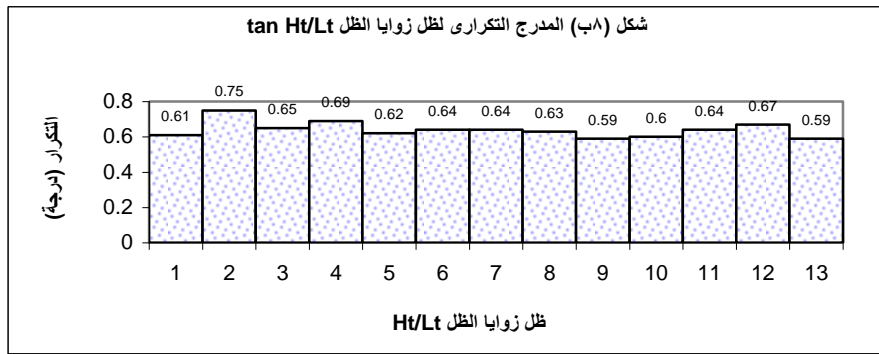
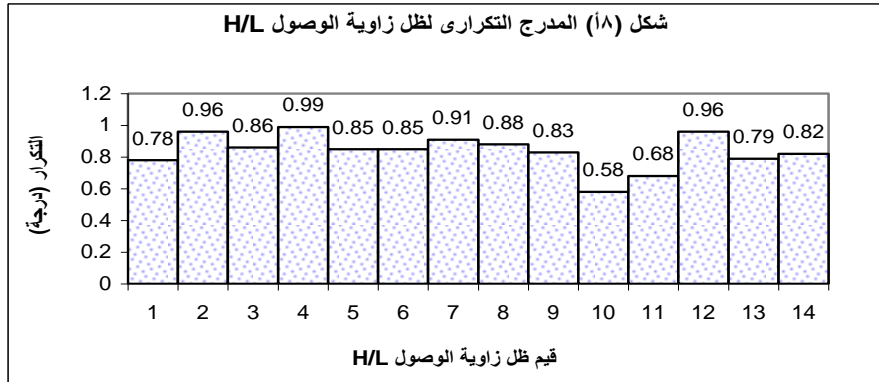
للتوقع بمسافات السقوط الصخرى المقطوعة تم استخدام حدود الوصول ٠.١، ٠.٠١، و ٠.٠٠١ التي تصف وصول ١٠٪، ١٪، و ٠.١٪ من الكتل الصخرية المنفردة، على التوالي. والقيمة الأخيرة ٠.١٪، وهي القيمة الأدنى، ربما تقابل تقريباً أقصى مسافة مقطوعة للسقوط الصخرى.

* التقدير الاحصائي لاحتمال الوصول :

تم الاستفادة من التحليل الاحصائي للكتل الصخرية المنفردة التي تم تحديدها ميدانياً بمنطقة الدراسة في الحصول على زوايا احصائية لكل حد وصول. هذا التحليل الإحصائي تطلب حساب ظل زاوية الوصول وظل زاوية الظل لكل كتلة صخرية منفردة. كل البيانات جُمعت لحساب القيم المئوية. والقيم ٩٠%، ٩٩%، ٩٩.٩% تتوافق مع النسبة المئوية للكتل الصخرية المتوقفة قبل الوصول إلى حدود الوصول ٠.١، ٠.٠١، ٠.٠٠١، على التوالي.

تم استخدام إجمالي حساب ١١٠ كتلة صخرية منفردة في التحليل الإحصائي لزاوية الوصول (شكل أ٨). قيمة ظل زاوية الوصول تتراوح بين ٠.٨١ (٣٩ درجة) - ١.٠٨ (٤٧.٢ درجة)، بمتوسط ٠.٩٥ (٤٢.٢ درجة). والنسب المئوية ٩٠، ٩٩، ٩٩.٩ وقعت في القيم ٠.٨٨ (٤١.٣ درجة)، ٠.٨٢ (٣٩.٤ درجة)، و ٠.٧٨ (٣٧.٩ درجة). ولما كان عدد البيانات أعلى قليلاً من ١٠٠، فإن القيم ٩٩.٩ يجب تقريبها باعتبارها تقدير تقريبي.

تم حساب عدد ١٠٣ كتلة صخرية منفردة توقفت على منحدرات الهشيم. وتم تحليل البيانات لزاوية الظل (شكل ب٨). تتراوح القيم بين ٠.٥٨ (٣٠.١ درجة) - ٠.٨٦ (٣٧.٩ درجة) بمتوسط قيمة ٠.٦٧ (٣٣.٦ درجة). والنسب المئوية ٩٠ و ٩٩ و ٩٩.٩ تقع في القيم ٠.٦٢ (٣١.٦ درجة) و ٠.٥٨ (٣٠.١ درجة) و (٢٧ درجة) وقد استخدمت قيمة زاوية الظل ٢٧ درجة لتمثل القيمة المعتادة للحد الأدنى لزوايا الظل من أبعد الكتل الصخرية المنفردة التي تم تحديدها عند قاعدة منحدر الهشيم. بما أن مسافة السقوط المقطوعة تعتمد على حجم السقوط الصخري، فقيم هذه الزاوية تكون مناسبة تقريباً لأحجام السقوط الصخري التي تم قياسها ميدانياً بمنطقة الدراسة والتي تتراوح بين (٥ إلى ١٥٠ متر مكعب). في الوقت الحاضر، فإن كمية البيانات المتاحة غير كافية لتحليل المسافات المقطوعة في فترات صغيرة داخل النطاق المحدد.



شكل (أ)

* رسم خرائط مسافة السقوط الصخرى :

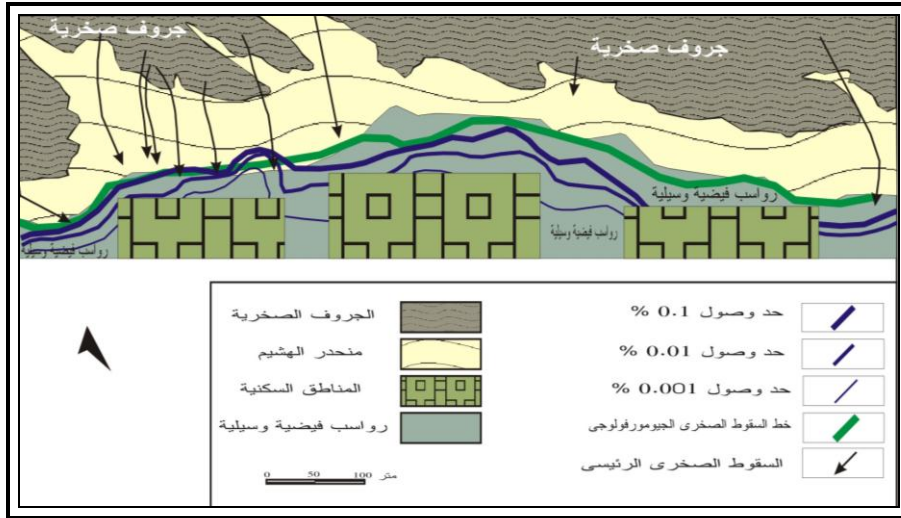
يتطلب التنبؤ بمسافة السقوط الصخرى المقطوعة باستخدام مفهوم زاوية الوصول تحديد ورسم خرائط للسقوط الصخرى المُحتمل فوق المنحدرات. الخرائط الأصغر من > ١ : ٥٠٠٠، والتحليل البنيوي، ونوعية الكتل الصخرية وخصائص الشقوق والفواصل، تعطي نتائج مناسبة (Coe and Harp, 2007).

والخرائط متوسطة المقاييس عادة ما تغطي مساحات واسعة مما يجعل غير مُجدٍ استخدام التحليل البنيوي. بينما يتطلب التحليل الجيومورفولوجي رسم خرائط لكل المصادر المُحتملة والتي تتطلب خرائط كبيرة المقياس $> 1 : 5000$ لتمثيل أنواع الصخور، والكتل الصخرية المنفصلة والتي لم تسقط بعد، واتساع الفواصل الصخرية (Copons, 2004). ويُمكن رسم مصادر السقوط الصخري المُحتملة على مستوى الخرائط متوسطة المقياس (شكل ٩ أ، ب)، والتي تتوافق تقريباً مع قمة جرف الصخر حيث تم ربط خطوط الطاقة بزوايا سقوط 41.3 درجة، 39.4 درجة، و 37.9 درجة، كما توضحها الخريطة الأولى (شكل ٩أ).

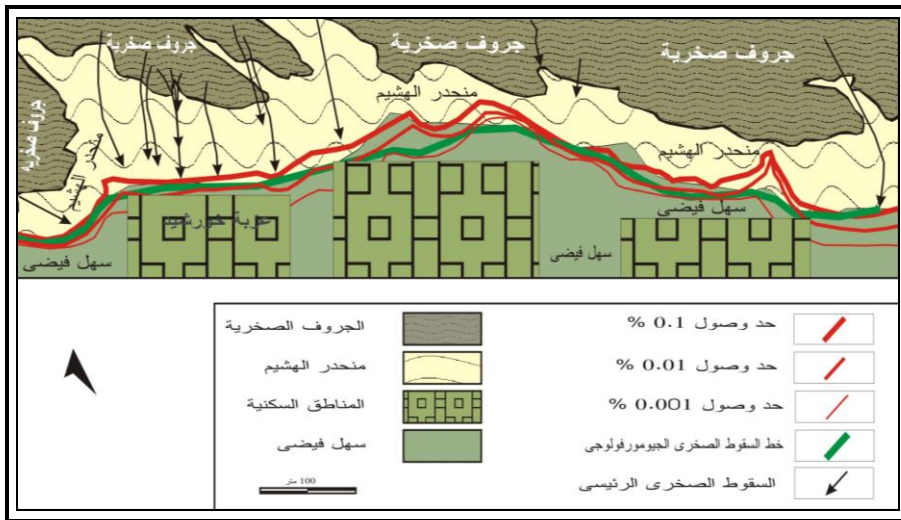
وترمز الخريطة شكل (٩أ) إلى "التوقع الأسوأ" لحدوث السقوط الصخري حيث يتوقع بأطول مسافة يُمكن أن تقطعها الصخرة المتساقطة.

تطبيق زاوية الظل أسهل لأن خطوط الطاقة 31.6 درجة، 3.1 درجة، و 27 درجة رُسمت ببساطة من قمم منحدرات الهشيم المختلفة. حيث تم رفض بعض أجزاء القمة التي قد تكون شبه متآكله بفعل ديناميكيات السيول وذلك لتطبيق خطوط الطاقة (شكل ٩ب).

الشكل (٩) يوضح احتمالات الوصول 0.1 ، 0.01 ، و 0.001 باستخدام مفاهيم كل من زاوية الوصول (شكل ٩أ)، وزاوية الظل (شكل ٩ب). وعند مقارنة كل من الشكلين نجد أن المسافات المقطوعة المُحتملة باستخدام زاوية الوصول أطول من المسافات المقطوعة المُحتملة باستخدام زاوية الظل. حدود الوصول رُسمت باستخدام زاوية الظل والتي نادراً ما تمثل أطول مسافة مقطوعة. ولكن تم استخدامها نظراً لأنها تكون قريبة وتقع أقرب لمنحدر الهشيم وهذا من ناحية، ومن ناحية أخرى، حدود الوصول رُسمت بواسطة زاوية الوصول المنتشرة فوق السهل النهري أو السهل الفيضي.



شكل (أ٩) : مسافة السقوط الصخرى المقطوعة باستخدام حدود الوصول المحتملة طبقاً لزاوية الوصول.



شكل (ب٩) : مسافة السقوط الصخرى المقطوعة باستخدام حدود الوصول المحتملة طبقاً لزاوية الظل.

* دقة حدود الوصول المتوقعة :

خط السقوط الصخري الجيومورفولوجي هو الخط الذي يتبع كل الكتل الصخرية الأكثر ابتعاداً وحضيض منحدر الهشيم (Copons, 2004). وذلك لو فرض أن الظروف التي تؤثر على منطقة اندفاع السقوط الصخري run out تكون ثابتة مع مرور الوقت (مثل حجم السقوط الصخري، أحجام الكتل الصخرية المنفردة، خشونة المنحدر والغطاء النباتي)، يمكن اعتبار خط السقوط الصخري الجيومورفولوجي الحد المتوقع لأقصى مسافات يُمكن أن تقطعها الصخور المتساقطة، لذلك تم استخدام خط السقوط الجيومورفولوجي للتحقق من دقة حدود الوصول المُحتملة التي رُسمت بواسطة كل من النموذجين (زاوية الوصول وزاوية الظل).

وتتميز منطقة سدمنت الجبل ببعض الخصائص وهي: منحدر هشيم متسع يقع أسفل الجرف الصخري أو الوجه الحر للسفح، ومساحة كبيرة توجد عليها الكتل الصخرية المبعثرة فوق السهل الفيضي الواقع خلف قاعدة منحدر الهشيم، ثم وجود سهل فيضي بدون أي دلائل جيومورفولوجية للسقوط الصخري. إلا أن جزء من حضيض سفح منحدر الهشيم قد تم تعديله من قبل المحاجر القديمة حيث نجد معظم الوحدات السكنية بمنطقة الدراسة بُنيت في المنطقة التي عليها أكبر الكتل الصخرية المبعثرة. لذلك، حركة التنمية محت أكبر جزء من رواسب أبعد السقوط الصخري وبعض المقاطع فقط من السقوط الصخري قادرة على رسم خط السقوط الجيومورفولوجي (شكل ٩ب).



صورة (١) : عمليات السقوط الصخرى من الوجه الحر Free Face لإحدى الحافات بمنطقة سدمنت الجبل. لاحظ تنوع أحجام الصخور المتساقطة ابتداء من قمة الجرف إلى حضيضه. وتوقف حركة الصخور. ناظراً اتجاه الغرب



صورة (٢) : انفصال إحدى الكتل الصخرية كبيرة الحجم من الوجه الحر لإحدى الحافات بمنطقة سدمنت الجبل. ناظراً اتجاه الشمال الغربي



صورة (٣) : تأثير الفواصل الرأسية بالوجه الحر على زيادة عملية السقوط الصخرى في منطقة سدمنت الجبل. لاحظ مسار السقوط الصخرى عند حضيض الجرف. ناظراً اتجاه الجنوب الغربي



صورة (٤) : بناء الوحدات السكنية عند حضيض المنحدرات، وعلى سطح الحافات بمنطقة سدمنت الجبل. ناظراً اتجاه الجنوب الغربي

حدود الوصول التي رُسمت بواسطة زاوية الظل تقع على مقربة من خط السقوط الصخري الجيومورفولوجي، في حين حدود الوصول التي رُسمت بواسطة زاوية الوصول تقع بعيدة عن خط السقوط الجيومورفولوجي بالإضافة إلى أنها عادة تقع فوق السهل الفيضي بدون دلائل للسقوط الصخري. ولذلك، فإن نموذج زاوية الوصول، طبق على قمة جرف الصخر، وبالتالي ربما يتوقع بمسافة السقوط المفرطة، في حين نموذج زاوية الظل يكون أكثر ملاءمة ويعرض نتائج أكثر قبولاً. وتم حساب سرعة السقوط الصخري بمنطقة سدمنت الجبل من خلال معادلة (Kirkby and Statham 1975) التالية:

$$V = \sqrt{2 * g * H}$$

V = سرعة السقوط الصخري (متر/ ثانية)
g = الجاذبية الأرضية ثابت (٩.٨١)
H = الارتفاع (متر)

وتم حساب سرعة السقوط الصخري طبقاً لمتوسط ارتفاع السقوط الصخري من النموذجين الرياضيين زاوية الوصول وزاوية الظل كما تم حساب متوسط الارتفاع فوق الوجه الحر للجرف الصخري، ومن خلال الجدول (١) يتضح الآتي:

يبلغ متوسط ارتفاع السقوط ٤٠.٧ متر طبقاً لزاوية الوصول وبناء عليه تبلغ قيمة سرعة السقوط الصخري ٢٨.٣ متر/ ثانية، يبلغ متوسط ارتفاع السقوط طبقاً لزاوية الظل ٣١ متر، بسرعة سقوط ٢٤.٧ متر/ ثانية ويبلغ متوسط ارتفاع السقوط فوق الوجه الحر من الجرف الصخري ١٥.٣ متر بسرعة سقوط ١٧.٣ متر/ ثانية.

ويتطبيق حساب سرعة السقوط مع مسافات السقوط المستخرجة طبقاً لزاويتي الوصول والظل وُجد أن أطول مسافة سقوط ٢٩٧.٢ متر و ٢٦٩.٦ متر ستقطعها

الصخرة فى ١٠.٥ ثانية تقريباً فى حين أقصر مسافة سقوط ١٨.٢ متر و ١٦.٣ متر ستقطعها الصخرة فى ٠.٦ ثانية فقط بينما متوسط مسافة السقوط ١١٢ متر و ٩٥.٥ متر ستقطعها الصخرة فى ٤ ثوانى تقريباً وهذا يوضح مدى سرعة وخطورة السقوط الصخرى بمنطقة الدراسة.

وبناء على سرعة السقوط الصخرى والتوقع بالأخطار التى قد تسببها فقد أمكن تقسيم منطقة الدراسة من حيث درجة خطورة السقوط الصخرى إلى ما يلى:

١- مناطق ذات كثافة عمرانية مرتفعة وخطر سقوط صخرى وشيك : وهى أكثر المناطق المعرضة للخطر وتتمثل فى المناطق العمرانية المبنية فى حضيض المنحدرات الأكثر ارتفاعاً مباشرة وخاصة فى القطاع الأوسط من الكتلة السكنية بمنطقة سدمنت الجبل. حيث لوحظ ميدانياً أن زيادة ارتفاع منسوب الماء الجوفى فى تلك المناطق وارتفاع كثافة الشقوق والفواصل على واجهة الجرف الصخرى أدى إلى انفصال واضح لبعض الكتل الصخرية الكبيرة، بالإضافة إلى أن الجرف الصخرى عار تماماً من النبات الطبيعى مع شدة انحداره حيث يبدو فى شكل حوائط رأسية مع زيادة نشاط عمليات التجوية به مما يُنذر بحدوث خطر وشيك باحتمال سقوط الكتل الصخرية كبيرة الحجم المنفصلة من واجهة الجرف فوق الوحدات السكنية فى ذلك القطاع. كما حدث فى عزبة خورشيد بمنطقة الدراسة عام ٢٠٠٨ حيث سقطت إحدى الكتل الصخرية على بعض المنازل والطريق الرئيسى مما أدى إلى بعض الخسائر فى البنية التحتية بالمنطقة (صور ٩، ١٠، ١١، ١٢).

٢- مناطق ذات كثافة عمرانية متوسطة وخطر سقوط صخرى مُحتمل الحدوث : وهى من أكثر المناطق المعرضة لخطر السقوط الصخرى أيضاً وتتمثل فى كل الوحدات السكنية المبنية فى حضيض المنحدرات التى تُمثل البروزات Spurs الفاصلة بين النُظم النهريّة والمنتشرة شمال القطاع الأوسط من منطقة الدراسة وهى من أكثر المواضع التى تتأثر بنشع المياه الجوفية، كما أنها تقع فى مسار

السقوط الصخرى مباشرة حيث يوجد العديد من الكتل الصخرية كبيرة ومتوسطة الحجم على وشك الانفصال من واجهة الجرف الصخرى وعدم وجود النباتات الطبيعي، بالإضافة إلى الأنشطة البشرية في تلك المنطقة والمتمثلة في عمليات الحفر عند رؤوس الأودية أو من خلال مد الطرق مما يؤدي إلى تقليل الضغط الرأسى على السفوح وزيادة إجهادات الشد والقص shear and stress فى الجزء غير المدعم من السفوح مما يُنذر أيضاً باحتمال سقوط صخرى بهذه المنطقة، ووما يزيد من خطورة السقوط الصخرى فى هذا القطاع عند حدوثه هو قرب تلك المنحدرات من الطريق الرئيسى لقرية سدمنت الجبل ووجود بعض المنشآت مثل مركز الشباب والمدارس الواقعة على جانبي الطريق حيث لا يتعدى عرض الطريق ستة أمتار يليها مباشرة تلك المنشآت والمسافة بينها وبين المنحدرات لا تزيد على ٢٠ متر فقط، وطبقاً لسرعة السقوط الصخرى ومسافة السقوط الصخرى فإن أى احتمال لسقوط صخرى فى ذلك القطاع قد يتسبب فى وجود أخطار جسيمة على الطريق وعلى الأرواح البشرية فى تلك المنشآت الخدمية خلال ٤ ثوانى فقط فور حدوث السقوط الصخرى (صور ٥، ٦، ٧، ٨).

٣- مناطق ذات كثافة عمرانية منخفضة وخطر سقوط صخرى مُحتمل الحدوث : وتتمثل فى الوحدات السكنية العشوائية المبعثرة والمبنية فوق وأسفل المنحدرات المرتفعة وتلك المناطق معرضة لسقوط صخرى مُحتمل نتيجة لسوء الصرف الصحى مما يزيد من ارتفاع مستوى الماء الجوفى بالإضافة إلى نشاط عملية التحجير بالمنطقة وحرق القمامة المستمر عند حضيض السفوح مما يؤدي إلى سرعة التحلل الكيميائى للصخور.

٤- مناطق ذات كثافة عمرانية منخفضة وخطورة سقوط منخفضة : وتتمثل فى الوحدات السكنية المبعثرة المبنية فوق السهل الفيضى الذى لم تظهر عليه أى دلائل للسقوط الصخرى المُحتمل حيث إنها تكون فى منأى عن السقوط الصخرى نظراً لابتعادها عن المنحدرات المرتفعة ومسارات السقوط الصخرى.



صورة (٥) : أحد مخزات السيول بمنطقة
سدمنت الجبل.
ناظراً اتجاه الغرب



صورة (٦) : خطورة بناء الوحدات السكنية
فى مناطق ما بين الأودية. وتمثل منطقة
خطر سقوط صخرى وشبك.
ناظراً اتجاه الغرب



صورة (٧) : خطورة احتمالية تعرض
بناء الوحدات السكنية فى حضبيض
المنحدرات بمنطقة سدمنت الجبل لسقوط
صخرى محتمل.
ناظراً اتجاه الجنوب الغرب



صورة (٨) : اقتراب حافات منطقة
سدمنت الجبل من الطريق الرئيسى
بالمطقة. وتمثل منطقة خطر سقوط
صخرى محتمل الحدوث.
ناظراً اتجاه الجنوب الغرب



صورة (٩) : تدمير أحد المنازل نتيجة عملية سقوط صخري لإحدى الكتل الصخرية كبيرة الحجم بمنطقة سدمنت الجبل عام ٢٠٠٨. كما يلاحظ وقوف صاحبة المنزل فوق إحدى الكتل الصخرية الساقطة المندثرة تحت الرواسب على نفس المنطقة عام ٢٠٠٥. ناظراً اتجاه الشمال الغربي



صورة (١٠) : أخطار السقوط الصخري على الوحدات السكنية المبنية فى حضيض المنحدرات بمنطقة سدمنت الجبل. وتمثل منطقة خطر سقوط صخري شديد جداً. ناظراً اتجاه الغرب



صورة (١١) : أخطار السقوط الصخري على الوحدات السكنية المبنية فى حضيض المنحدرات بمنطقة سدمنت الجبل، كما يلاحظ وصول الكتل المتساقطة حتى مدخل المنزل. وتمثل منطقة خطر سقوط صخري شديد جداً. ناظراً اتجاه الجنوب الغربي



صورة (١٢) : أخطار السقوط الصخري على الوحدات السكنية والطريق الرئيسى بمنطقة سدمنت الجبل، كما يلاحظ وصول الكتل المتساقطة حتى الطريق. وتمثل منطقة خطر سقوط صخري وشيك. ناظراً اتجاه الجنوب الغربي

* مواجهة خطر السقوط الصخري بمنطقة سدمنت الجبل :

للتقليل من مخاطر السقوط الصخري بمنطقة الدراسة يجب إتباع الأساليب العلمية التي تضمن الحد أو التخفيف المسبق من فعل حدوث الكارثة ومن ذلك تصريف المياه بعيداً عن المنحدرات المهيأة للسقوط، وعدم قطع أقدام المنحدرات لغرض شق الطرق أو أي أعمال إنشائية أخرى بدون الأخذ بعين الاعتبار مخاطر السقوط الصخري المُحتملة، وعدم توسع البناء أسفل المنحدرات والكتل الآيلة للسقوط ولا فوق المنحدرات الضعيفة ولا في مجاري السيول. ويجب عند تنفيذ الإجراءات أو المعالجات المشار إليها الاستعانة بالخبرات الجيولوجية لتقييم استقرارية المنحدرات واقتراح المعالجات المناسبة ليسهم بتخفيف المخاطر.

الخاتمة :

مسافة السقوط المقطوعة للسقوط الصخري الصغير أصغر من ١٠٠ متر مكعب تم تحليلها باستخدام النماذج الرياضية الرئيسية الموجودة في البحث: نماذج زاوية الوصول وزاوية الظل. سبب تطبيق هذه النماذج لأنها أسهل في التعامل في تطبيق خطوط الطاقة "" للنتبؤ بمسافات السقوط المقطوعة على الرغم من نتائجها الخام. وبالتالي، النماذج الرياضية تعتبر أدوات مناسبة للنتبؤ بمسافات السقوط المقطوعة في مناطق واسعة على الخرائط متوسطة المقاييس (من ١/١٠٠٠٠٠٠ إلى ١/٢٥٠٠٠).

* توصى الدراسة بضرورة عمل قاعدة بيانات للسقوط الصخري بمنطقة الدراسة يتم فيها حساب أحجام الصخور المتساقطة شهرياً، وتتضمن عدد كبير من البيانات التي لا غنى عنها للتحليل الإحصائي سواء في منطقة الدراسة أو في المناطق الأخرى المعرضة لأخطار السقوط الصخري.

* تتبع خطر السقوط الصخرى: يشمل معلومات كمية ونوعية تفصيلية عن السقوط الصخرى، مع إدراك الآثار التي قد تنجم عنه وتأثير ذلك على الإنسان والبيئة المحيطة. ويشمل ذلك الاستخدام المستمر للمعلومات لتحديد احتمال حدوث السقوط الصخرى وتقدير مدى جسامته نتائجه المحتملة. وقد يشتمل ذلك على الأنشطة التالية :

- تحديد طبيعة الخطر المحتمل ومكانه واحتمالاته ومدى جسامته.
- تحديد درجة التعرض لهذا الخطر المحتمل.
- معرفة القدرات المؤسسية والموارد المتوافرة لتحمل النتائج المحتملة للخطر.
- يمكن اعتبار النموذج الرياضى المقدم فى هذه الدراسة بمثابة إنذار مبكر للنتيئة بحدوث خطر أو كارثة السقوط الصخرى بمنطقة قرية سدمنت الجبل التابعة لمركز إهناسيا بمحافظة بنى سويف: فهو نموذج لإعطاء معلومات مسبقة حول احتمال حدوث كارثة متوقعة فى هذه المنطقة.

الإقتراحات والتوصيات :

- ١- نشر الوعي البيئى فى أوساط المجتمع من خلال وسائل الإعلام من أجل توعية الناس بمخاطر السقوط الصخرى والبناء العشوائى لتفادي أضرار وخسائر مادية وبشرية مما يؤدي إلى صعوبة مواجهة الدولة لمثل هذه الكوارث لعدم توفر الإمكانيات المناسبة لذلك.
- ٢- عند تنفيذ أي مشاريع إنشائية يجب الرجوع إلى جهة الاختصاص من أجل عمل دراسات جيولوجية تكتونية وزلزالية بالإضافة إلى دراسة ميكانيكية التربة والصخور للمواقع المراد استخدامها.
- ٣- تصميم وتنفيذ قنوات تصريف لمياه الأمطار لمنعها من التغلغل ووصولها إلى الكتل الصخرية الآيلة للسقوط.

- ٤- زراعة سياج من النباتات والأشجار على سفوح المنحدرات وعند حضيضها فى محاولة لإعاقة حركة الصخور المتساقطة وإبطاء سرعتها من أجل توفير حماية فعالة للوحدات السكنية المنتشرة فى حضيض المنحدرات وذلك فى حالة تدنى حجم الصخور المتساقطة.
- ٥- عمل جدران وحواجز إسمنتية تمنع من تساقط الكتل الصخرية وتعبئة الفواصل والشقوق بالمواد الإسمنتية وذلك لمنع وصول مياه الأمطار وتخللها فيها.
- ٦- عدم بناء المساكن أو استحداث أي مباني أو أدوار إضافية على المنحدرات كونها تشكل حمل إضافي على المنحدر.
- ٧- يجب إخلاء المنازل التي تعرضت للشقوق تحسباً لسقوط مفاجئ للكتل الصخرية.
- ٨- يجب عدم الاقتراب من أماكن تساقط الكتل الصخرية خلال سقوط الأمطار لأن مياه الأمطار الآتية من قبل المنحدرات المرتفعة تمر عبر مناطق الانهيار حيث تعمل المياه على تعرية وإذابة وجرف المواد المساندة لهذه الصخور.
- ٩- يجب مراقبة الشقوق والفواصل الموجودة ومعرفة مدى اتساعها خلال موسم سقوط الأمطار.
- ١٠- إعداد خرائط جيوبئية ويحدد عليها مواقع الانهيارات الأرضية ومدى درجة خطورتها.

المراجع

1. Abele, G. 1994: Large rockslides: their causes and movement on internal sliding planes. *Mountain Research and Development* 14(4), 315-20.
2. Azzoni, A., Barbera, G.L. and Zaninetti, A. 1995: Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 32, 709-24.
3. Bozzolo, D. and Pamini, R. 1986: Simulation of rock falls down a valley side. *Acta Mechanica* 63, 113-30.
4. Broilli, L. 1974: Ein Felssturz in Großversuch. *Rock Mechanics Suppl.* 3, 69-78.
5. Brunetti, M. T., Guzzetti, F., and Rossi, M. 2009: Probability distributions of landslide volumes, *Nonlin. Processes Geophys.*, 16, 179-188.
6. Bull, W.B., King, J., Kong, F.C., Moutoux, T. and Phillips, W.M. 1994: Lichen dating of coseismic landslide hazards in alpine mountains. *Geomorphology* 10(1), 64-253.
7. Chang, W.R. 1998: The effect of surface roughness on dynamic friction between neolite and quarry tile. *Safety Science* 29(2), 89-108.
8. Coe, J. A. and Harp, E. L. 2007: Influence of tectonic folding on rockfall susceptibility, American Fork Canyon, Utah, USA, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 1-14.
9. Copons, R. 2004: Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs a Andorra la Vella (Principat d'Andorra). Department of Geodinamics and Geophysics, University of Barcelona, Ph.D. thesis, 244 pp., 12 plates, (in Catalan).
10. Copons, R. 2007: Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs rocosos al Solà d'Andorra la Vella, Andorra Research Institute, St. Julià de Lòria, Principality of Andorra, 214 p, (in Catalan).
11. Copons, R. and Vilaplana, J. M. 2008: Rockfall susceptibility zoning at a large scale: From geomorphological inventory to preliminary land use planning, *Eng. Geol.*, 102, 142-151.
12. Corominas, J; Esgleas, J., and Baeza, C. 1990: Risk mapping in the Pyrenees area: a case Study, in: *Hidrology in mountains regions, II IAHS*, 194, 425-428.
13. Corominas, J. 1996: The angle of reach as a mobility index for small and large landslides, *Can. Geotech. J.*, 33, 260-271.
14. Cruden, M.D. and Varnes, J.D. 1996: Landslide types and processes. In Turner, A.K. and Schuster, R.L., editors, *Landslides: investigation and mitigation*. Washington DC: Transport Research Board, 36-75.
15. Day, R.W. 1997: Case studies of rockfall in soft versus hard rock. *Environmental and Engineering Geoscience* 3(1): 133-40.
16. Dorren, L.: 2003: A review of rockfall mechanics and modelling approaches, *Prog. Phys. Geog.*, 27(1), 69-87.
17. Douglas, G.R. 1980: Magnitude frequency study of rockfall in Co. Antrim, North Ireland. *Earth Surface Processes and Landforms* 5, 123-29.

18. Erismann, T.H. 1986: Flowing, rolling, bouncing, sliding, synopsis of basic mechanisms. *Acta Mechanica* 64, 101-10.
19. Erismann, T. and Abele, G. 2001: *Dynamics of Rockslides and Rockfalls*, Springer, Berlin, 316 p.
20. Evans, S.G. and Hungr, O. 1993: The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal* 30, 620-36.
21. Hunter, G. and Fell, R.: 2003: Travel distance angle for "rapid" landslides in constructed and natural soil slopes, *Can. Geotech. J.*, 40, 1123-1141,
22. Héту, B. and Gray, J.T. 2000: Effects of environmental change on scree slope development throughout the postglacial period in the Chic- Choc Mountains in the northern Gaspé Peninsula, Québec. *Geomorphology* 32(3), 335-55.
23. Hungr, O. and Evans, S.G. 1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne*. Rotterdam: Balkema, 685-90.
24. Hsü, K.J. 1975: Catastrophic debris streams (Sturzstroms) generated by rockfalls. *Geological Society of America Bulletin* 86, 129-40.
25. Jaboyedoff, M. and Labiouse, V. 2003: Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data, *ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy, 1, 575-578.
26. Jomelli, V. and Francou, B. 2000: Comparing the characteristics of rockfall talus and snow avalanche landforms in an Alpine environment using a new methodological approach: Massif des Ecrins, French Alps. *Geomorphology* 35(3), 181-92.
27. Kirkby, M.J. and Statham, I. 1975: Surface stone movement and scree formation. *Journal of Geology* 83, 349-62.
28. Lied, K.: Rockfall problems in Norway, in: 1977: *Rockfall dynamics and protective work effectiveness*, Instituto Sperimentale Modelli e Structure (ISMES), Bergamo, Italy, 90, 51-53221.
29. Luckman, B.H. 1976: Rockfalls and rockfall inventory data, some observations from Surprise valley, Jasper national park, Canada. *Earth Surface Processes* 1, 287-98.
30. Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T., and Kawanami, A. 2000: The effects of rockfall volume on runout distance, *Eng. Geol.*, 58, 109-124.
31. Petje, U., Ribicic, M., and Mikos, M. 2005: Computer simulation of stone falls and rockfalls, *Acta Geogr. Slov.*, 45(2), 93-120.
32. Pfeiffer, T.J. and Bowen, T.D. 1989: Computer simulation of rockfalls. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* XXVI(1), 135-46.
33. Ritchie, A.M. 1963: Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Record* 17, 13-28. Washington, DC: Highway Research Board, National Research Council.
34. Schumm, S.A. and Chorley, R.J. 1964: The fall of endangering rock. *American Journal of Science* 262, 1041-54.
35. Selby, M.J. 1982: *Hillslope materials and processes*. New York: Oxford University Press.

36. Statham, I. 1976: A scree slope rockfall model. *Earth Surface Processes* 1, 43-62.
37. Statham, I. and Francis, S.C. 1986: Influence of scree accumulation and weathering on the development of steep mountain slopes. In Abrahams, A.D., editor, *Hillslope processes*. Winchester: Allen and Unwin Inc., 245-67.
38. Scheidegger, A. E. 1973: On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides, *Rock Mech.*, 5, 231-236.
39. Shreve, R. L. 1968: The Blackhawk landslide, *Geol. Soc. Am. S.*, 108 p.
40. Soeters, R. and van Westen, C. J. 1996: Slope instability recognition, analysis and zonation, in: *Landslides. Investigation and Mitigation*, edited by: Turner, A. K. and Schuster, R. L., Transportation Research Board, National Research Council, Washington, special report 247, pp. 129-177.
41. Vaunat, J. and Leroueil, S. 2002: Analysis of Post-Failure Slope Movements within the Framework of Hazard and Risk Analysis, *Nat. Hazards*, 26, 83-109.
42. Vidrih, R., Ribicv icv , M. and Suhadolc, P. 2001: Seismogeological effects on rocks during the 12 April 1998 upper Socva Territory earthquake (NW Slovenia). *Tectonophysics* 330(3), 153-75.
43. Wiczorek, G.F., Nishenkod, S.P. and Varnes, D.J. 1995: Analysis of rockfalls in the Yosemite Valley, California. In Daemen, J.J.K. and Schultz, R.A., editors, *Rock mechanics: proceedings of the 35th US symposium*. Rotterdam: Balkema, 85-89.
44. Wiczorek, G.F., Snyder, J.B., Waitt, R.B., Morrissey, M.M., Uhrhammer, R.A., Harp, E.L., Norris, R.D., Bursik, M.I. and Finewood, L.G. 2000: Unusual July 10, 1996, rock fall at Happy Isles, Yosemite National Park, California, *Geological Society of America Bulletin* 112(1), 75-85.

* * *