



جيو مورفولوجية المسلات البحرية
بساحل البحر الأحمر بين رأس الغردقة ورأس
أبوسومة، مصر باستخدام نماذج المحاكاة الرياضية

د. سيد محمود مرسى سعيد
أستاذ مساعد بقسم الجغرافيا،
كلية الآداب، جامعة الفيوم
smm11@fayoum.edu.eg



مقدمة:

تنتشر ظاهرة المسلات البحرية في القطاع الساحلي والجزر الشاطئية الممتدة أمامه من رأس الغردقة شمالاً حتى رأس أبو سومة جنوباً، ويبلغ طول هذا القطاع من الساحل نحو ٥٠ كم. تقع رأس الغردقة عند تقاطع دائرة عرض 48.75° " 14° ' 27° شمالاً وخط طول 33.36° " 50° ' 33° شرقاً، ورأس أبو سومة تقع عند تقاطع دائرة عرض 44.49° " 50° ' 26° شمالاً وخط طول 53.21° " 59° ' 33° شرقاً.

يتميز الساحل بالنشأة الصدمية وتسود عليه خطوط التصدع التي تشكل مضائق موازية ضيقة، مما أدى إلى فتح الممرات البحرية التي تكون محدودة بواسطة الجزر الصخرية الشاطئية الصغيرة التي تشكلت مثل جزيرتي الجفتون الكبير والصغير، جزيرة أبو رماثي، جزيرة أبو منقار، جزيرة سهل حشيش، جزيرة أم الجرصان. كما يتميز خط الساحل في هذا القطاع أيضاً بكثرة تداخل اليابس والماء، حيث تكثر فيه الرؤوس الأرضية مثل رأس الغردقة، ورأس أبو منقار، ورأس الضبعة، ورأس أبو حصيو، ورأس أبو سومة، والخلجان مثل خليج الغردقة، وخليج أبو منقار، وخليج الضبعة، وخليج الناقة. ويتبعثر العديد من المسلات البحرية على ساحل منطقة الدراسة وسواحل الجزر الشاطئية الممتدة أمامه (شكل: ١). تُعد المسلات البحرية من بين الظواهر الجيومورفولوجية الساحلية الأكثر تميزاً في العالم. بسبب جمال شكلها الصخري، وتعد المسلات البحرية مقصداً سياحياً.

تهدف الدراسة الحالية إلى تقديم وصف عام لديناميكيات تشكيل المسلات البحرية، وتقديم التعليقات الأساسية التي يمكن مقارنتها مع الطبيعة، ودراسة توزيع المسلات البحرية وخصائصها وعلاقتها بالعوامل البحرية مثل حركة الأمواج من أجل فهم ديناميكية حركتها وتطورها.

ولتحقيق أهداف الدراسة، فقد تم الاعتماد على الدراسة الميدانية بصفة أساسية وذلك من أجل أخذ القياسات المورفومترية المختلفة للمسلات



البحرية، واستخدام نماذج المحاكاة الرياضية حول الديناميكيات التي تتحكم في تشكيل المسلات البحرية والفترات الزمنية التي تحدث فيها.

وسيتتم دراسة المسلات البحرية من خلال النقاط التالية:

أولاً: التعريفات المختلفة للمسلات البحرية.

ثانياً: العوامل التي تسهم في تشكيل المسلات البحرية.

ثالثاً: ديناميكية تشكيل المسلات البحرية:

رابعاً: نموذج المحاكاة الرقمي.

خامساً: تشكيل المسلات البحرية من نموذج المحاكاة الرقمي:

سادساً: تشكيل المسلات البحرية بواسطة المعادلات الرياضية:

سابعاً: الملاحظات الميدانية على تشكيل المسلات البحرية ومراحل تطورها.

ثامناً: الخاتمة، وتتضمن النتائج وبعض التوصيات.

أولاً: التعريفات المختلفة للمسلات البحرية:

تُعرف الموسوعة الجيومورفولوجية المسلات البحرية على أنها أعمدة صخرية معزولة تتشكل عندما يتم فصل جزء من الساحل المتراجع عن اليابس الرئيسي، وعادة تكون على طول الشقوق والفواصل (Goudie, 2004). ويُعرف القاموس الجيولوجي المسلة البحرية على أنها عبارة عن كتلة قائمة من الصخور المنفصلة من الجروف البحرية بواسطة فعل الأمواج وتحيط بها المياه (Glossary of Geology, 1957). ويُعرف الباحث المسلات البحرية على أنها أشكال أرضية تتكون من كتلة صخرية شديدة الانحدار وغالباً تكون رأسية تقع في البحر بالقرب من الساحل وتشكلت بفعل نحت الأمواج، وتنفصل المسلات البحرية من الجانب شديد الانحدار من الرؤوس الأرضية. وتُعد المسلات البحرية بمثابة الأجزاء المتبقية فوق سطح رصيف الشاطئ التي تخلفت عن تراجع الجروف.

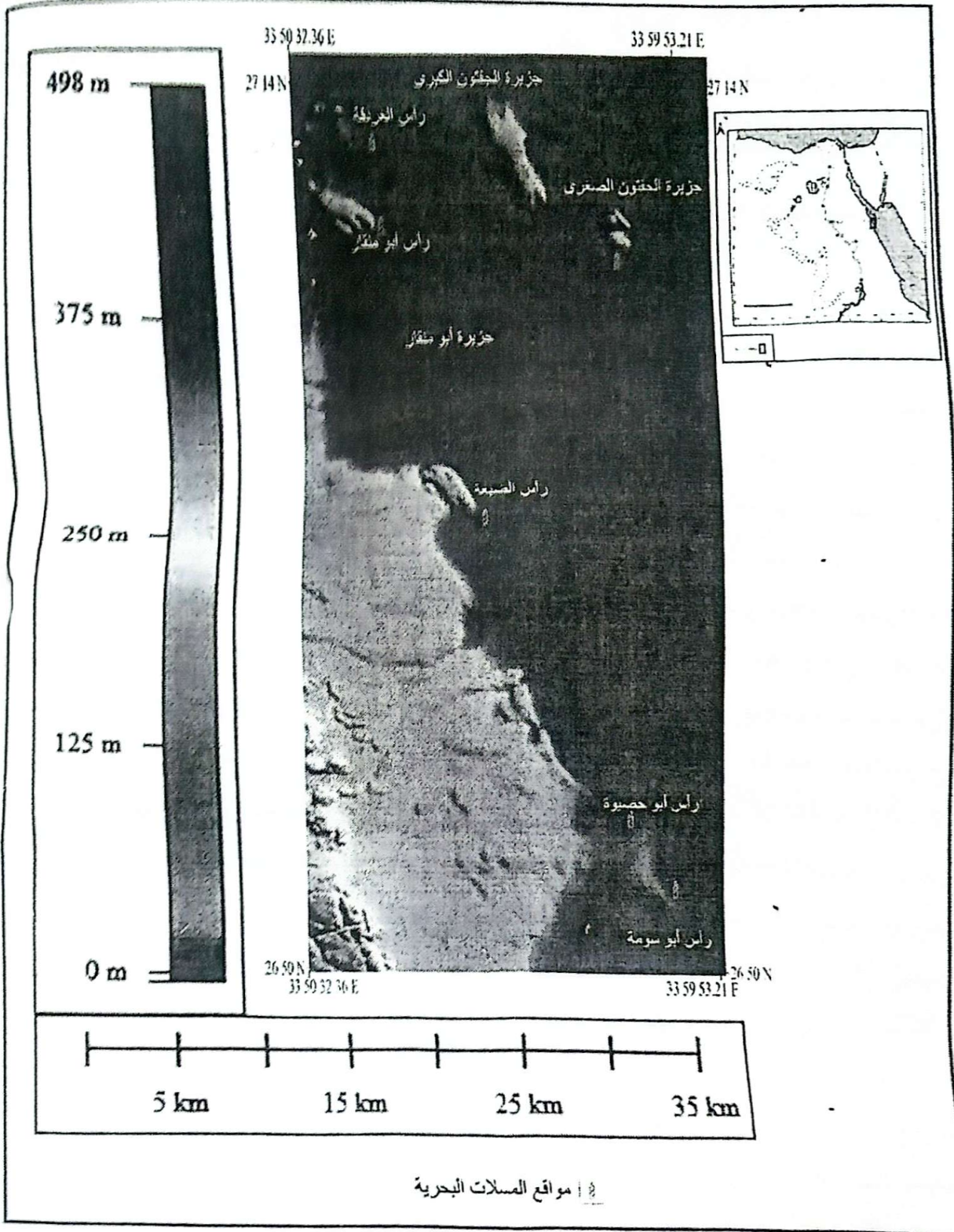


ثانياً: العوامل التي تسهم في تشكيل المسلات البحرية:

تتوفر بمنطقة الدراسة بعض العوامل التي تسهم في تشكيل المسلات البحرية وهي كما يأتي:

١- الأمواج:

تمتاز خصائص أمواج البحر الأحمر بسمات الرياح الهابة عليه، حيث تسود الرياح معظم فترات العام وتكاد تتفق مع الاتجاه العام للبحر الأحمر، وتتميز الأمواج بصفة عامة بانخفاض مستواها ولا يزيد ارتفاعها إلا أثناء هبوب العواصف في فصلي الشتاء والربيع (كمال البتانوني، ١٩٨٩، ص ٢٥٤)، ويتراوح ارتفاع الأمواج بمنطقة الدراسة حسب مقياس (بيفورت) بين الخفيفة والمتوسطة، حيث يتراوح متوسط ارتفاعها بين ٠.٦ - ١.٢ متر بالنسبة للأمواج الخفيفة، أما بالنسبة للأمواج المتوسطة فيتراوح ارتفاعها بين ١.٢ متر - ٢.٢ متر، وفي الحالات المضطربة وهي نادرة الحدوث يتراوح ارتفاع الأمواج بين ٢.٥ متر - ٤ متر ولا يحدث ذلك إلا في الأعماق البعيدة من البحر. وطبقاً لسرعة الرياح بالكم فالأمواج المرتبطة بها تتأثر بمدى سرعتها حيث تصل أقصاها في الغردقة إلى ٢١.١ كم/ساعة وتصل أدناها عند رأس أبو سومة إلى ١١.٥ كم/ساعة.



شكل (١) مواقع المسلات البحرية بساحل البحر الأحمر بين رأس الغردقة شمالاً ورأس أبو سومة جنوباً



وتؤثر الأمواج في تشكيل المسلات البحرية وخط الساحل، حيث تقوم كعامل نحت مُخلفة بصماتها في كثير من جهات الساحل، والدليل على ذلك تركيز الجزر المقطعة أمام الرؤوس الأرضية بصفة خاصة نتيجة لنشاط عوامل النحت الأكثر قوة خاصة الأمواج مثل جزر الجفتون أمام رأس الغردقة، وجزيرة أبو منقار أمام رأس أبو منقار، وجزيرة سهل حشيش جنوب رأس الضبعة، وجزيرة أم الجرصان جنوب رأس أبو سومة سفاجا. وتظهر آثار الأمواج كعامل نحت في الرؤوس الأرضية المنتشرة بساحل منطقة الدراسة في ظهور بعض الكهوف، والأقواس، والمسلات البحرية (سيد مرسى، ٢٠٠٢، ص ١٠٩)، وذلك عن طريق الفعل الهيدروليكي لكتل المياه ذاتها حيث له تأثير مباشر على تحطيم الصخور حينما تصطدم الأمواج بها وخصوصاً إذا كانت الصخور التي تتألف منها الرؤوس تكثر بها الشقوق والفواصل، بالإضافة إلى عملية تكسير وتفتيت صخور الرؤوس بواسطة الأمواج التي تحمل معاول الهدم من جلاميد وحصى ورمال خشنة وذلك بتكرار تقدم وتراجع الأمواج على طول شواطئ الرؤوس، ويؤدي النحت عند قواعد الرأس إلى تكوين بعض التجويفات **Notches** الصغيرة، وقد يزداد اتساع الشقوق والفواصل بواسطة الأمواج وتتحول إلى كهوف وتتطور إلى أقواس وأنفاق عبر الرؤوس الممتدة داخل البحر ثم تنهار الأقواس وتتشكل المسلات البحرية.

٢- المد والجزر:

يتميز المد والجزر في منطقة الدراسة بأنه محلي متذبذب، وهذا التذبذب يتمثل في ارتفاع المياه عند النهاية الجنوبية لرأس أبو سومة بينما تنخفض المياه في النهاية الشمالية عند رأس الغردقة. ويلاحظ أن ساحل منطقة الدراسة يعاني من مد عال يتراوح منسوبه عند رأسي الغردقة وأبو منقار بين ١٣٠ سم في الشتاء و ١٢٥ سم في الصيف، ويتراوح المد العالي عند رأس أبو سومة بين ١٣٥ سم في الشتاء و ١٠٨ سم في الصيف. ويصل أعلى مستوى للمد في العام عند رأس الغردقة إلى ٩٠ سم بينما يصل في رأس أبو سومة إلى ١١٥ سم.



ومما سبق يتضح أن ساحل منطقة الدراسة يدخل ضمن سواحل قليلة المد أقل من ٢ م وذلك طبقاً لتقسيم هيس Hayes حيث يتراوح المد بين منسوبي المد والجزر بين ١-٢ متر (الحسيني، ١٩٨٨، ص ٢٨) كما يتضح أن مستوى البحر الأحمر في الشتاء يبلغ أعلى حالاته عنه في الصيف لعظم البخر في فصل الصيف، ولكن الفرق بينهما لا يتجاوز نحو ٣٠ سم، وتسبب الأحوال المناخية أيضاً اختلافات محلية في مستوى سطح المد والجزر وتؤثر أيضاً في طول مدة ارتفاع وانخفاض المياه وبخاصة إذا استمر هبوبها فترات طويلة في اتجاه واحد. ويؤكد هذا سرعة التيارات المدية التي تتفاوت سرعتها بين ٣-٦ سم/ ثانية (Soluman & Gerges, 1983, P. 43) وتصل إلى ١٠٠ سم/ ثانية في صورة تيارات مد قوية في المضائق والممرات التي تفصل بين الساحل والجزر التي تمتد أمامه، ويقتصر تأثير حركة المد بساحل منطقة الدراسة عند حدوث المد العالي، حيث يغطي مياه المد العالي قواعد كل من جروف الرؤوس والمسلات البحرية. وتكمن أهمية المد والجزر نصف اليومي في أن الفترة الجافة دائماً أقل من ١٢ ساعة؛ لذلك فإنها تحدد الفترة التي يمكن لعمليات التجوية أن تؤدي أدوارها عندما تنكشف الشواطئ أثناء حدوث الجزر وانحسار مياه البحر، حيث تسهم التجوية على شواطئ الرؤوس بساحل منطقة الدراسة في تفكك الصخور مثل الأحجار الرملية والجيرية، ويساعدها في ذلك عمليات التفكك والتحلل الأخرى مثل الأكسدة والتميؤ والانكماش الحراري، وتسهم تيارات المد في نحت قواعد جروف الرؤوس والمسلات البحرية، فقد لوحظ ميدانياً حول رأسي الغردقة وأيو سومة في شهور الشتاء حيث يبلغ منسوب البحر أعلى حالته، أن مياه المد العالي تغطي مساحات كبيرة من قواعد المسلات البحرية (صور: ٧ - ١١)، وتنحصر عنها المياه أثناء الجزر تاركة مفتتات بحرية من القواقع والشعاب على السطح، وقشرة ملحية رقيقة بعد جفافها عندما يصل مستوى البحر إلى أدنى حالاته في الصيف.



٣- التيارات البحرية:

يخضع القطاع الساحلي الذي يمثل منطقة الدراسة من ساحل البحر الأحمر لتأثير الرياح الشمالية والشمالية الغربية السائدة طوال العام؛ لذا يتأثر التيار الساحلي الطولي بهذه الرياح السائدة، ويسير بموازاة الساحل وليس عمودياً عليه (Reid sea and Gulf Eden, 1967, P. 19)، وتقدر سرعته بنحو ١٨ سم/ ثانية. أما عن تأثير التيارات البحرية في تشكيل المسلات البحرية بمنطقة الدراسة فنصيبها محدود جداً، فالتيارات الساحلية لا يتعدى دورها عن حمل المواد الناعمة التي تُصادفها في طريقها بجوار المسلات البحرية، وتنقلها إلى حيث ترسبها في منطقة شاطئية أخرى، وتكمن أهمية هذه العملية في أنها تزيج نتاج تعرية الأمواج، وتكشف قواعد المسلات البحرية التي تتعرض من جديد لغزو الأمواج.

٤- خصائص الصخور:

تتشكل المسلات البحرية عندما تكون قطاعات الجروف الصخرية نشطة والنحت يكون ذو فاعلية كبيرة وتصبح الرؤوس الأرضية الصخرية مقطوعة ومنفصلة من اليابس الرئيسي، ومشكلة بذلك جزراً شاطئية صغيرة. تؤدي الصخور الضعيفة إلى تآكل انتقائي، ويتم شق الرأس الأرضية، ويترك بقايا الجرف البحري الأكثر مقاومة في الخلف في منطقة تكسر الأمواج surf zone، وتتطور شكلياً أحياناً من كهف إلى قوس، وفي النهاية إلى مسلة بحرية بعد انهيار القوس (Naylor et al., 2010).

تؤدي خصائص الصخور دوراً مهماً في تطور صخور الرؤوس التي تنفصل منها المسلات البحرية، فكلما كثرت مواطن الضعف من شقوق وفواصل وسطوح تطبق ومسامية عالية زادت فرصة انهيار وتفكك الصخور وتشكيل المسلات البحرية، وبما أن التكوينات الجيولوجية المكونة للرؤوس المتوغلة في البحر تتألف من الصخور الجيرية شديدة التأثير بعلميتي التجوية والانهيارات الأرضية؛ لذا فقد لوحظ تعرض معظم الرؤوس المنتشرة بمنطقة الدراسة للانهيارات الأرضية التي تتمثل في



تجوية وسقوط الكتل الصخرية والمفتتات الصخرية من الأجزاء العليا للرؤوس، ومما يعجل بسقوطها تأثير مياه الأمطار الضجائية التي قد تجرى كمسيالات دقيقة على سطح الرؤوس وتتخلل الشقوق (صورة: ٨).

وتتألف معظم الرؤوس التي تنفصل منها المسلات البحرية بمنطقة الدراسة من الحجر الجيري والحجر الجيري المرجاني فهذه الرؤوس تبدو مقوضه تقويضاً سفلياً واضحاً على طول امتداد قواعدھا بحيث تكونت فجوات الأمواج Wave Notches التي يبدو أنها قد اتسعت جانبياً فالتحمت ببعضھا البعض لتكون توغلاً بحرياً واضحاً عند حضيض هذه الرؤوس المنخفضة التي لا تزيد في ارتفاعها عن عشرة أمتار، فتبدو في شكل شرفات Visors (صورة: ٢).

يؤدي تعاقب عمليتي الترتيب والتجفيف التي تتعرض لها المسلات البحرية إلى تجوية الصخور الجيرية ونمو وزيادة حجم البلورات الملحية في مناطق الشقوق والفواصل المنتشرة بها الأمر الذي يزيد من فعالية عمليات التجوية الميكانيكية عن طريق تمدد وانكماش هذه البلورات في الشقوق والمسام مما يزيد من تفتيت وإضعاف الصخر وتكسر المسلات البحرية إلى أجزاء صغيرة (صور: ٦، ٨، ١١، ١٨).

٥- العوامل البيولوجية:

للأحياء البحرية دور مهم في إضعاف وتفتيت الصخور التي تتألف منها الرؤوس التي تنفصل منها المسلات البحرية وذلك في مناطق الشقوق والفواصل وخاصة أنها تتكون من صخور الحجر الجيري، وتعدد وتتنوع أنواع الطحالب بمنطقة الدراسة وتعد الطحالب الخضراء الضاربة للزرقاء من أهم هذه الأنواع، حيث تقوم بتهيئة صخور الرؤوس لنحت الأمواج مما يسهم في انفصال أطراف الرؤوس المتعمقة في البحر على شكل مسلات بحرية.



ثالثاً: ديناميكية تشكيل المسلات البحرية:

يرجع تشكيل المسلات البحرية في معظم سواحل العالم إلى النحت الموجهي، حيث وصفا كل من (Shepard and Kuhn, 1983) نشأة المسلات البحرية خلال فترة ٢٣ عاماً على ساحل جزيرة Cape Breton بكندا، وذلك باستخدام سلسلة من الصور الفوتوغرافية، حيث تم حفر كهوف بحرية أفقياً أي في اتجاه طول الشاطئ بواسطة النحت الموجهي على طول كلا الجانبين من قاعدة الرأس الأرضية. وعندما التحمت الكهوف في عام ١٩٠٨ تشكل حينئذ قوس بحري، وبحلول عام ١٩٢١، انهار القوس البحري، تاركاً خلفه مسلتين بحريتين. كما لاحظ Sunamura (1992) سلسلة مشابهة من الأحداث على ساحل اليابان، حيث تآكل ٣٠ متر من عرض الرأس الأرضية التي تتألف من الحجر الطيني بسرعة لتشكيل مسلة بحرية صغيرة في غضون ست سنوات. وفي جزيرة Lord Howe بأستراليا أرجع تشكيل المسلات البحرية إلى التآكل الانتقائي في الشقوق والفواصل التي تنتشر بالصخور المحلية الأكثر ليونة بواسطة تأثير هيدروليكية الأمواج (Dickson and Woodroffe, 2005, p242).

وفي الدراسة الحالية سيتم توضيح دور الرواسب الشاطئية في تشكيل المسلات البحرية بمنطقة الدراسة. حيث تؤدي الرواسب الشاطئية إلى تآكل جروف الرؤوس المتوغلة في البحر، ورواسب الشاطئ يمكن أن تُعزز تآكل الجرف البحري من خلال البري في كميات صغيرة والعمل كغطاء واقٍ في كميات كبيرة من خلال تشتيت طاقة الأمواج المتجهة من البحر نحو قواعد الجرف البحري. عملية تآكل الجروف، والتجريف الميكانيكي لسطح الجرف البحري تتم بواسطة حبيبات الرمال العالقة والمحمولة مع الأمواج المندفعة نحو الشاطئ (Kline et al., 2014, p56)، وقد لوحظ تحت الجروف على طول كثير من جروف الرؤوس الصخرية بمنطقة الدراسة.

ولوحظ بسواحل الرؤوس الأرضية المنتشرة بمنطقة الدراسة وجزيرة الجفتون الصغرى الممتدة أمام رأس الغردقة تفاعلات رواسب المسلات

البحرية التي يحركها التآكل على طول سواحل الرؤوس المتوشلة في البحر. عندما شق الفاصل على طول أحد جوانب الرأس الصخرية البارز من جزيرة الجفتون الصفري في مياه البحر، ويبدأ تشكيل الكهف تعهياً لتشكيل المسلة البحرية لذا يمكن توفير مساحة صغيرة لتراكم الرواسب. يمكن لتراكمات الرواسب أن تصبح أداة لتعزيز النحت الهيدروليكي المباشر على طول شواطئ الرأس الأرضية مما يؤدي في النهاية إلى تشكيل المسلة البحرية (صور: ١ - ٤).

يمكن عن طريق استخدام النموذج الرقمي المقترح في الدراسة الحالية توضيح تأثير البري بواسطة الرواسب الشاطئية على تشكيل المسلات البحرية بمنطقة الدراسة. وينطبق هذا النمط من تشكيل المسلات البحرية بشكل خاص على طول السواحل الغنية بالرواسب حيث تكون المياه ضحلة عند قواعد الجروف البحرية وتتألف الجروف من مادة الشاطئ المناسبة الوفيرة التي تضيف الرمال إلى الشاطئ عندما تسقط (Walkden and Hall, 2011, p534).

رابعاً: نموذج المحاكاة الرقمي:

تعتمد منهجية النمذجة في الدراسة الحالية على الاستكشاف. حيث تهدف إلى عرض رؤية عامة لديناميكيات تشكيل المسلات البحرية بمنطقة الدراسة، وإعداد الأسانيد الأساسية التي يمكن مقارنتها مع الطبيعة. ولتحقيق هذه الأهداف، فقد تم التعامل مع العمليات الجيومورفولوجية الطارئة فقط. وعلى الرغم من أن النحت الموجي على وجه الجرف البحري يكون متغير مكانياً على فترات زمنية قصيرة، حيث يتركز النحت في قواعد الجرف البحري، مما يسبب في التقويض السفلي لقواعد الجروف وأنهيار الأسقف المعلقة لاحقاً (Young and Ashford, 2008, p1671). يتم التعامل مع تراجع الجرف البحري كعملية على مدى فترات زمنية طويلة، ومعدل التراجع الذي يحدث بالتساوي على كامل المظهر الجانبي ابتداء من عمق الشاطئ إلى قمة الجرف البحري الواقعة تحت تأثير نحت الرياح؛ لذا يحتفظ مظهر الجرف البحري على شكله عبر



الزمن (Sallenger et al., 2002, p283). ويمثل معدل تراجع الجرف البحري متوسط الفترة الزمنية ويشمل ضمناً تغييرات قصيرة الأجل مثل التآكل الناتج عن العواصف.

يفترض النموذج الرقمي المقترح في الدراسة الحالية أن البري هو مصدر التآكل الانتقائي الذي يمكن أن يسبب تشكيل المسلات البحرية من الرؤوس الأرضية المنتشرة بمنطقة الدراسة. لا يعتمد النموذج الرقمي الحالي على نقاط الضعف الصخري مثل الشقوق والفواصل، ولكن يعتمد على التفاعل الجيومورفولوجي بين تآكل الصخور، ونقل الرواسب، وظروف الأمواج المحلية. ويمكن عن طريق التحليلات والتحليلات التي سيتم استخراجها من النموذج الرقمي تعميم وتطبيق النتائج على السواحل الفقيرة بالرواسب التي يقل وجود الشواطئ بها، وتزداد أعماق المياه عند حضيض الجروف، والبري في هذه الحالة لا يكون عامل فعال في التآكل بالمقارنة بتأثير قوة الضغط الهيدروليكية للأمواج. (Porter et al., 2010a, p82). وسيكون التركيز الرئيسي للدراسة الحالية على مدى سرعة تطور المسلات البحرية التي تتحكم في حجم المسلات البحرية، وخصائص ظروف الأمواج، وشكل الساحل الصخري مثل ارتفاع الجرف البحري، وتكوين وشكل الرؤوس الأرضية التي توفر البيئة الأكثر ملاءمة للبري الذي يؤدي إلى تشكيل المسلات البحرية.

يفترض أن يتم توزيع أي فجوات بنيوية في الصخر مثل الشقوق والفواصل بالتساوي وتنعكس بواسطة متوسط معدل تراجع الجرف البحري طويل الأجل (Trenhaile et al., 1998, p978). مثل نموذج الجروف البحرية، وأبعاد الشاطئ، ومعدلات تغير خط الشاطئ الرملي التي يكون متوسطها أعلى من الأحداث قصيرة الأمد كالعواصف (Ashton and Murray, 2006a, p298)، ومثل تغييرات موقع الشاطئ، حيث تظل أبعاد الشاطئ ثابتة، وتنتشر الرواسب فوق كل قطاع الشاطئ.

النموذج الحالي الخاص بالمسلات البحرية عبارة عن مزيج من نماذج تطور خط الساحل التي قدمها كل من Ashton et al. (2001); Valvo

(et al. (2006), and Limber and Murray (2015). في النموذج الحالي، تتحرك الأمواج المندفعة نحو الجروف البحرية التي تألف منها سواحل الرؤوس المتوغلة في مياه البحر بمنطقة الدراسة، وتسبب الأمواج في تآكل الجروف وتنتج الرواسب الشاطئية التي يتم توزيعها بواسطة عملية نقل الرواسب على طول الشاطئ. يعتمد اتجاه وحجم نقل الرواسب على طول الشاطئ على زاوية الموجة القادمة بالنسبة لاتجاه خط الساحل. كما يتم اختيار زاوية موجة جديدة واتجاه الموجة كل يوم نموذج من دالة التوزيع الاحتمالي.

إذا كانت الموجة تقترب بشكل غير مباشر إلى خط الساحل من اتجاه اليسار مثلاً أي من الشاطئ البعيد ويبرز الساحل ويتعمق في البحر على شكل الرأس الأرضية الصخرية، ويمكن أن توجد منطقة الظل على الجانب المحمي من الأمواج من الرؤوس الأرضية الذي يمثله الجانب الأيمن (شكل ٢:٢). وفي هذه الحالة يكون نقل الرواسب قليلاً في اتجاه الموجة القادمة في منطقة الظل. لكن الرواسب يمكن أن تدخل منطقة الظل خلال أيام النموذج عندما تقترب الأمواج من الاتجاه المعاكس. وقد يسمح ذلك بتراكم رواسب الشاطئ على طول الجوانب المواجهة لليابس من الرؤوس الأرضية في الجانب المعاكس لاتجاه الرأس المواجه للبحر، وإعطاء الشواطئ شكل تجويف منحنى يشبه شكل الصدفة حيث يضيق عرض الشاطئ تدريجياً على طول جوانب الرأس الأرضية.

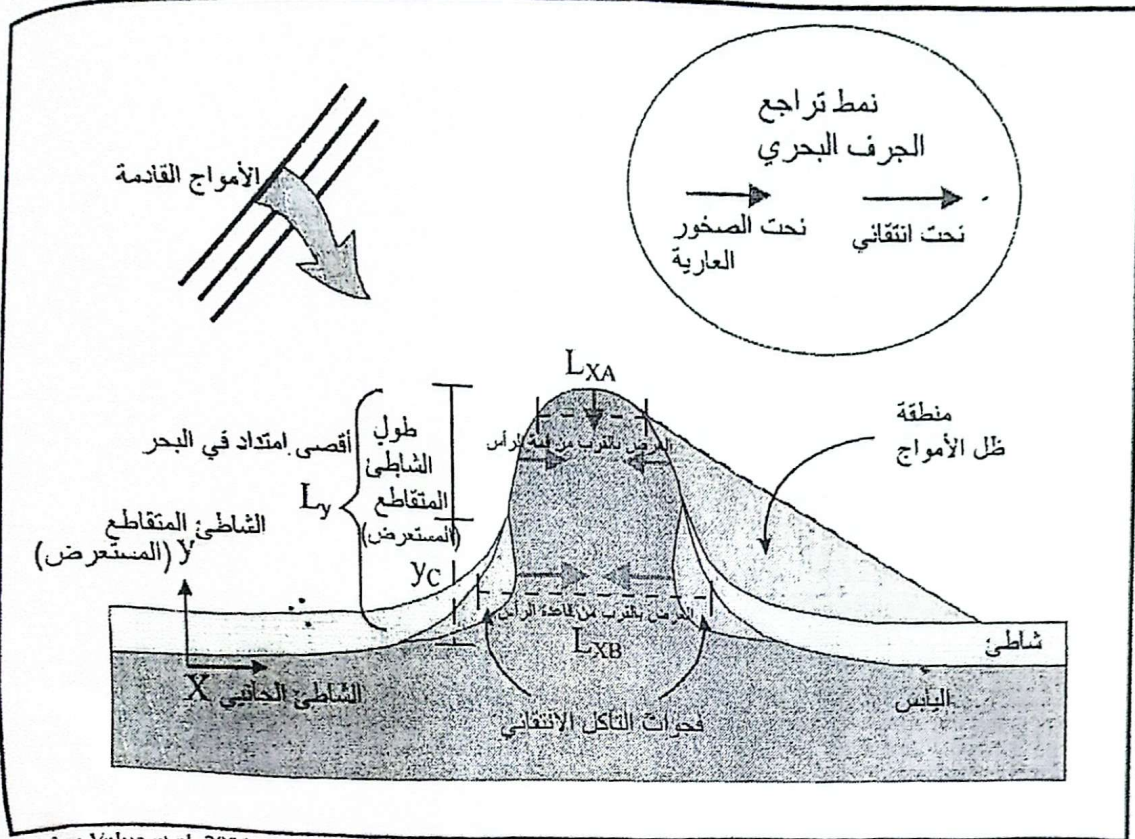
بالرغم من تراجع جروف الرؤوس إلا أنها تنتج الرواسب الشاطئية التي تتحكم في معدلات تراجع الجرف البحري في المستقبل. حيث يمكن للرواسب الشاطئية أن تدعم أو لا تدعم عملية تآكل الجرف البحري وذلك اعتماداً على عرض الشاطئ حيث تسبب مزيداً من التغيرات في عرض الشاطئ. تعمل الرواسب الشاطئية إما كأداة بري الجروف أو كغطاء واقى يحمي الجروف حيث تتبدد عليه طاقة الأمواج المتجهة من البحر نحو الجرف البحري، وذلك على طول جوانب الرؤوس الأرضية حيث يكون الشاطئ منحنى وضيق (Sunamura, 1982). البري يمكن أن



يزيد من التآكل الجانبي للجروف البحرية أي على طول وجه الشاطئ مباشرة. ومن خلال عملية النموذج هذه يمكن أن تنفصل الرأس الأرضية الصخرية من اليابس الرئيسي وتصبح مسلات بحرية.

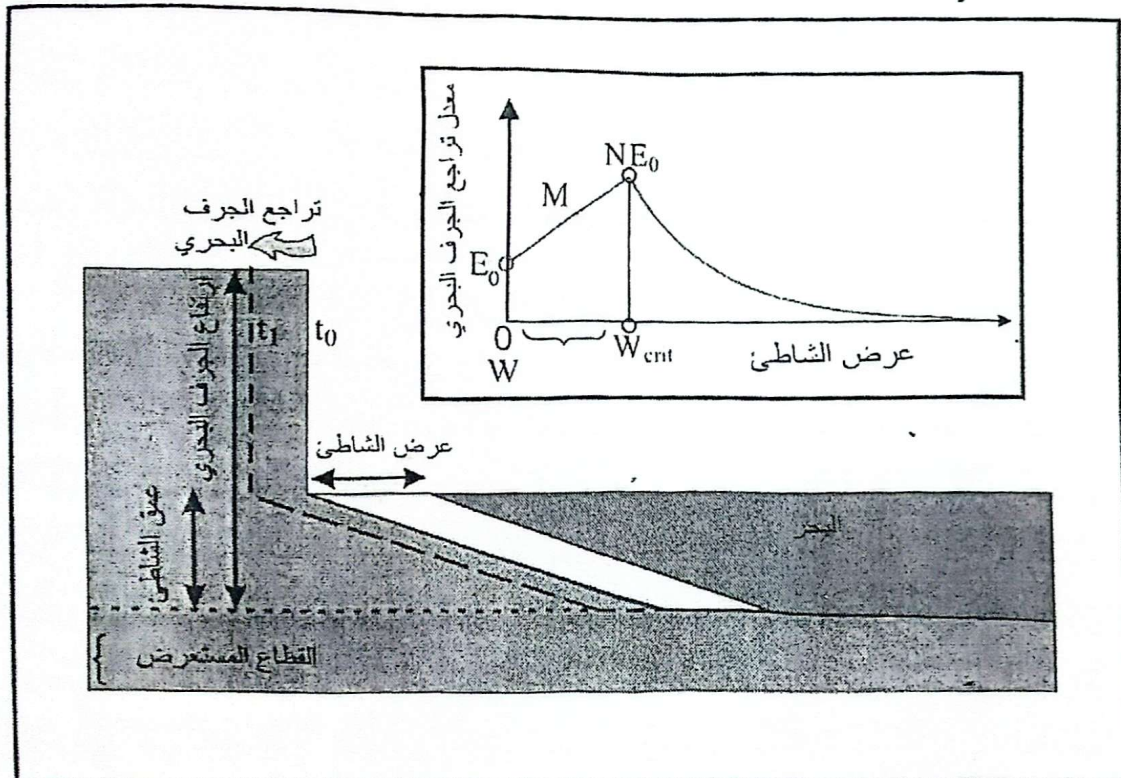
ويوضح (شكل ٢) النموذج التخطيطي لإعداد نموذج تشكيل المسلة البحرية على الرأس الأرضية الصخرية. حيث يرمز لاتجاه الشاطئ الجانبي بالحرف (X)، والحرف (Y) يرمز لاتجاه الشاطئ المستعرض أو المتقاطع. ويوضح (شكل ٢) أيضاً عدة مقاييس مهمة للطول، وتشمل مقاييس الشاطئ الجانبي مثل اتساع الرأس الأرضية حيث يرمز لعرض الرأس القريب من قمة الرأس (L_{XB})، والعرض عند قاعدة الرأس المتصلة باليابس (L_{XB})، وأقصى امتداد للرأس في البحر (L_Y) الذي يمثل أقصى طول للرأس الذي يُقاس ابتداءً من قاعدة الرأس الأرضية المتصلة باليابس أي من منطقة بداية المسلة البحرية حتى قمته المتعمقة في البحر، وتمثل (Y_C) طول الشاطئ المستعرض في منطقة بدء المسلة البحرية باتجاه قمة الرأس الأرضية. كما يوضح (شكل ٢) ظل الأمواج وتحديد الاتجاهات والتقدير النسبية لتراجع الجرف البحري. ظل الموجة يمثل زاوية اقتراب الموجة الواحدة من الجرف البحري؛ وفي أيام النموذج الأخرى فإن اقتراب الأمواج من اتجاهات أخرى يمكن أن تؤثر على نقل الرواسب وتآكل الجرف في منطقة ظل الأمواج.

شكل (٣) عبارة عن المقطع العرضي التخطيطي لطريقة النموذج التي توضح تراجع الجرف البحري وأبعاد الشاطئ. حيث توضح الخريطة الركنية العلاقة غير الخطية بين تراجع الجرف البحري وعرض الشاطئ. القيمة (E_0) عبارة عن معدل تراجع الجرف البحري الذي يتألف من صخر عاري غير مقيد بالرواسب أي تُعبر عن معدل تراجع الوجه الحر من الجرف البحري، والقيمة (N) هي الحد الأقصى لقوة البري، والقيمة (W_{crit}) تمثل عرض الشاطئ الذي يزيد مع تراجع الجرف البحري. ويرجع تراجع الجرف البحري في النموذج الحالي بسبب البري، ويكون بمثابة دالة غير الخطية لعرض الشاطئ. وفيما يلي عرض المعادلات الرياضية الخاصة بالنموذج الحالي لتوضيح العلاقة بين تراجع الجرف البحري وأبعاد الشاطئ:



After: Valvo et al, 2006

شكل (٢) نموذج تشكيل المسلة البحرية على الرأس الأرضية الصخرية



After: Ashton et al, 2001

شكل (٣) نموذج تراجع الجرف البحري

المعادلة (١):

$$\frac{d\eta_c}{dt} = \begin{cases} E_0 + mw(t), & w(t) \leq w_{crit} \\ NE_0 e^{-\frac{w(t) - w_{crit}}{w_{scale}}}, & w(t) > w_{crit} \end{cases}$$

After: Hapke and Reid, 2007

يُمثل الرمز (η_c) موقع الجرف البحري ويُقاس بالأمتار؛ ويُمثل الرمز (E_0) معدل تراجع الجرف البحري ذو الصخور العارية ويُقاس بالمتري/السنة؛ و (W) يُمثل عرض الشاطئ بالأمتار؛ ويُمثل الرمز (w_{crit}) عرض الشاطئ حيث يزيد التآكل من معدل تراجع الجرف البحري ويُقاس بالأمتار؛ وتُعبّر (N) عن الحد الأقصى لقوة التآكل بالنسبة إلى معدل تراجع الجرف البحري ذو الصخور العارية (E_0) حيث يكون الحد الأقصى لقوة التآكل أكبر من الواحد الصحيح ($N > 1$)؛ وهي كمية لا بُدعية؛ و (w_{scale}) عبارة عن مقياس طول ثابت بالأمتار ويعتمد على الحد الأقصى لقوة التآكل (N) بالإضافة إلى عرض الشاطئ الذي يوفر غطاءً كامل قريب من هجوم الموجة بحيث يُصبح تراجع الجرف البحري صغير جداً يصل إلى ١% تقريباً من الحد الأقصى المسموح به. المتغير (M) هو خط الانحدار في (شكل: ٣) الذي ينحصر بين (W) و (w_{crit}) حيث (W) تساوي صفر.

المعادلة (٢):

$$m = \frac{E_0(N - 1)}{w_{crit}}$$

After: Valvo et al., 2006

المعادلة (١) مشتقة إلى حد كبير من فعل الجرف البحري، ويُمكن تقدير معدلات تراجع الجرف البحري ذو الصخور العارية بمنطقة الدراسة



باستخدام معدلات التراجع التاريخية المرصودة من قبل (Hapke and Reid, 2007, p1133)، وتتراوح قوة البري (N) بين ١٣ و ١٧ على طول سواحل الرؤوس المتوغلة في البحر والمنتشرة بمنطقة الدراسة. ويمكن تعريف المتغير (N) على أنه الحد الأقصى لقوة البري في (المعادلة: ١، و ٢)، ويتميز الغطاء الرسوبي بتقطعه على طول جانبي الرأس الأرضية بسبب تقلب نطاق الموجة، وبالتالي التآكل يكون أيضاً على فترات متقطعة، كما أن قوة البري لا تعمل بصفة مستمرة عند أعلى مستوى لها ولكن متوسط الوقت تكون قوة البري أقل قوة. لأن قوة البري (N) من الصعب كبها (Limber and Murray, 2011, p 1150). ويستخدم في محاكاة النموذج مجموعة من القيم تتراوح ما بين ٢ و ١٠.

يمثل المتغير (W_{crit}) عرض الشاطئ ومن الصعب كبها أيضاً. تم اختبار القيم بين ١٠ و ٤٠ متر في نماذج المحاكاة، وكان هناك فارق صغير في النتائج: حيث تشكلت المسلة البحرية في كل مرة، وكانت مساحة المسلة البحرية النهائية منخفضة بالنسبة إلى قيمة عرض الشاطئ (W_{crit}). القيمة الأكبر من عرض الشاطئ (W_{crit}) تعني أن هناك المزيد من قيم عرض الشاطئ التي تعزز من معدلات تراجع الجرف البحري أعلى من معدل تراجع الصخور العارية ($E0$)، ومعدلات تراجع الجرف البحري تكون أقل عشوائية بالنسبة لعرض الشاطئ الناتجة عن تحرك الرواسب ذهاباً وإياباً في الخلجان المجاورة للرؤوس. ومع مرور الوقت يحدث تآكل أكثر تطابقاً والمسلة البحرية الناتجة تكون أكبر حجماً نتيجة لذلك. التغير في حجم المسلة البحرية مع عرض الشاطئ (W_{crit}) يكون أصغر من تلك التي يتسببها تعديل الحد الأقصى لقوة التآكل (N).

وبصفة عامة فإن تشكيل المسلة البحرية يكون مستقلاً إلى حد كبير عن القيمة المحددة لعرض الشاطئ (W_{crit})؛ طالما يوجد حد أقصى لمعدل تراجع الجرف البحري بالنسبة لعرض الشاطئ ويكون أعلى من الصفر، وحينئذ يمكن تشكيل وتكوين المسلة البحرية. وعندما يتساوى ارتفاع الشاطئ تقريباً في معدل الوقت مع منسوب المياه في الشاطئ القريب فإن



التآكل يزيد للحد الأقصى من معدل تراجع الجرف البحري (Sunamura, 1982, p341). ويصل البري إلى أقصى حد من الفعالية عند أكبر الارتفاعات القريبة من مستوى مياه المد العالي (Blanco-Chao et al., 2007, p138). معرفة الارتفاع التقريبي حيث يزيد البري من معدلات التآكل، والمتغير عرض الشاطئ (W_{crit}) يُمكن أن يكون متقارب جداً باستخدام متوسط انحدار الشاطئ، والشكل، والعمق (شكل: ٣).

يتضح من خلال الملاحظات الميدانية بمنطقة الدراسة أن عرض الشاطئ الذي يوفر حماية شبه كاملة للجروف البحرية من هجومات الأمواج تتراوح قيمه بين ٧٠ و ١٠٠ متر. وقد تم استخدام عرض الشاطئ في النموذج المقترح في الدراسة الحالية كمقياس لتحديد التفاعلات بين الشواطئ والجروف البحرية لتحديد العلاقة بين عرض الشاطئ وتراجع الجرف البحري بمنطقة الدراسة. ويتم التعبير رقمياً عن التغير في موقع خط الساحل الرملي (η_b) عبر مرور الزمن من خلال المعادلة (٣) التالية:

$$\frac{d\eta_b}{dt} = (HC - 1) \left| \frac{d\eta_c}{dt} \right| - S - \left(\frac{1}{D} \frac{\partial Q_s}{\partial x} \right)$$

After: Limber et al, 2014, p867

حيث (H) يمثل ارتفاع الجرف البحري مقسوماً على العمق الذي يُمَدد الشاطئ. و (C) نسبة رواسب الجرف البحري الذي يتكون من الرواسب الخشنة بما يكفي للمساهمة في عرض الشاطئ؛ ويشير (QS) إلى نقل الرواسب على طول الشاطئ الجانبي وتُحسب بالمتراً^٢ / السنة؛ ويُعبر (X) عن موقع الشاطئ الجانبي بالأمتار؛ ويمثل (S) معدل فقدان رواسب الشاطئ ويُحسب بالمتراً^٢ / السنة؛ ويمثل (η_b) موقع الشاطئ بالأمتار.

يتضح من شكل (٣) أنه بالرغم من تغيرات موقع خط الساحل الرملي إلا أن رواسب الشاطئ تنتشر بالتساوي فوق كل قطاع الشاطئ بأكمله. وتتميز حركة رواسب الشاطئ بأنها سلبية باتجاه اليابس، بينما تكون حركة الرواسب إيجابية باتجاه البحر. القسم الأول من المعادلة على



الجانب الأيمن يمثل كمية الرواسب الداخلة إلى نظام خط الساحل كنتيجة لتراجع الجروف البحرية. الجروف البحرية الأطول والأكثر وفرة في الرمال هي التي سوف تُنتج المزيد من الرواسب الشاطئية في وحدة طول تراجع الجرف البحري. يمكن اعتبار المتغير (H) والمتغير (C) الاثنين معاً بمثابة ارتفاع الجرف البحري الفعال غير البُعدي. القسم الثاني من المعادلة (S) عبارة عن ثابت يمثل معدل فقدان الرواسب الشاطئية؛ ويمكن تفسير ذلك على أنها عبارة عن منطقة الأمواج، واحتكاك وتآكل الرواسب بفعل عمليات البري والتآكل، وفقدان الرواسب من اليابس وتحركها ونقلها من الشاطئ أثناء مرحلة ارتفاع مستوى سطح البحر. أو بسبب التدخل البشري (Wolinsky and Murray, 2009, p347). القسم الثالث من المعادلة يمثل التغير في موقع الشاطئ (Qs) الذي يرجع إلى التدرج في نقل الرواسب على طول الشاطئ الجانبي. ويُعرف مصطلح التغير في موقع الشاطئ (Qs) بأنه معادلة نقل الرواسب المشتركة (Valvo et al., 2006).

يُعد حجم نقل الرواسب وظيفية مهمة جداً لزاوية الموجة القادمة بالنسبة إلى اتجاه خط الساحل، وتميل إلى الزيادة عند زيادة ارتفاع الأمواج وزيادة فترة قدوم الأمواج. الآثار التراكمية لنطاق الموجة يمكن اعتباره ظروف الموجة في متوسط الفترة الزمنية التي لديها خاصية الانتشارية وموجة عدم التماثل. ويمكن تعريف خاصية الانتشارية Diffusivity على أنها عبارة عن قدرة الأمواج على صقل موقع الشاطئ الذي يختلف مع زاوية الموجة القادمة، وعدم التماثل asymmetry يُقصد به نسبة تأثيرات الموجة على عملية نقل الرواسب على طول الشاطئ الجانبي والقادمة من الجهتين اليمنى واليسرى (Ashton and Murray, 2006a).

فعندما تقترب الأمواج من خطوط الأعماق الموازية للشاطئ بزاوية تقل عن ٤٥ درجة تقريباً فإن ذلك سوف يؤدي إلى قيام الانتشارية بصقل وإزالة النتوءات البارزة من موقع خط الشاطئ. وعندما تقترب الأمواج من



خط الشاطئ بزاوية أكبر من ٤٥ درجة فإن خط الشاطئ يُصبح غير مستقر ويمكن أن تنمو وتتطور البروزات الموجودة بخط الشاطئ إلى رؤوس أو السنة (Ashton et al., 2001, p296). ويمكن اعتبار الزاوية المنخفضة فقط الأقل من ٤٥ درجة هي بمثابة بيئات موجة الانتشار ولكنها نوع غير متماثل، وعندما تكون ظروف الموجة غير متماثلة فإن قيمة (A) تساوي صفر أو واحد صحيح، وتتحرك كل الأمواج من اليمين إلى اليسار أو من اليسار إلى اليمين وتكون على طول خط الساحل. وعندما تكون ظروف الموجة متماثلة حينئذ تكون قيمة (A) تساوي ٠.٥، وعندما يكون التأثير متساوي على طول الشاطئ الجانبي فإن نقل الرواسب يأتي من اليمين واليسار.

المعادلة (٣) منفصلة فوق نطاق النموذج الخلوي. كل خلية نموذج تمثل ٦٠ م، وتم وضع الصخور والرمال كنسبة من حجم الخلية. يمكن أن يكون نصف الخلية للصخور والنصف الآخر للرمال. معرفة أبعاد الجرف البحري والشاطئ هذا يمكن أن يفسر على أنه موقع الشاطئ والجرف البحري.

تشكل المسلة البحرية في النموذج الحالي عندما تصبح خلايا الصخرة منفصلة من اليابس الرئيسي بواسطة صف من الخلايا التي تكون فارغة تماماً من الصخور. وقبل تشكل المسلة البحرية فقط فإن المسلة البحرية برؤوس الغردقة، وأبو منقار، والضبعة يمكن في بعض الأحيان أن تنفصل من اليابس الرئيسي عن طريق صف من الخلايا التي تكون كاملة جزئياً من الصخور، وهذا الصف يمكن فقط أن يصل إلى خليتين طويلتين في اتجاه الشاطئ الجانبي. وبسبب الطريقة التي يعمل بها النموذج الحالي فإنه يُسمح للرواسب بالمرور عبر هذا الممر الواقع بين المسلات واليابس الرئيسي. لذلك يمكن أن يُفسر الممر على أنه قوس بحري أو قوس مُنهار تاركاً خلفه طريقاً يمكن أن يُطلق عليه ممر النقل حيث تنفذ من خلاله المياه المُحملة بالرواسب (صور: ٧، ٨، و ٩).

الحالية:

تشمل خط ساحل خالي من الرواسب مع اثنين من الرؤوس الصخرية البارزة في البحر. شكل الرؤوس تتراوح من الشكل القريب من المربع ولهذا السبب فإن (L_{XB}) تساوي تقريباً (L_{XA}) تساوي تقريباً (L_Y) (شكل ٢: إلى نسب الجوانب المرتفعة حيث (L_{XB}) أصغر من (L_Y) .

وتشمل مسارات النموذج مجموعة من جروف الشاطئ الجانبي الأولي واختلافات قوة الصخور، وبما في ذلك تداخلات خط الساحل (الخلجان) التي تقطع المشهد الطوبوغرافي المتغير التي تشكلت عن طريق ارتفاع مستوى سطح البحر؛ والرؤوس التي تتكون من الصخور الأكثر مقاومة للتآكل تكون قريبة إلى الخلجان المجاورة (Limber and Murray, 2014)؛ وخط الساحل البسيط يكون موحد ومنتظم من حيث ارتفاع الجرف البحري ونوع الصخور. شكل خط الساحل الأولي تأثيره ضعيف جداً على الديناميكيات المساهمة في تشكيل المسلة البحرية، ولكن في كل مراحل النموذج الحالي فإن التآكل الانتقائي في جوانب الرأس الأرضية ضروري ومهم جداً لتشكيل المسلة البحرية الذي يتم ويدعم بواسطة عملية البري فقط ولهذا السبب يمكن تقييم فعالية البري في تشكيل المسلات البحرية بشكل مستقل عن تآكل الرأس الانتقائي الناجم عن ضعف الصخور المحلية أو غيرها من آليات التشكيل.

خامساً: تشكيل المسلات البحرية من نموذج المحاكاة الرقمي:

يوضح شكل (٤) السلاسل الزمنية لمسارات نموذج المحاكاة الرقمي. حيث تتكون السلسلة الزمنية من ثلاثة نماذج محاكاة رقمية وتم تسميتها (A, B, C). وتُشير المناطق المخططة على الرؤوس إلى الارتفاعات الطبوغرافية. يظهر في نموذج المحاكاة (A) تشكيل المسلات البحرية من الرؤوس الأولية حيث تكون الخصائص الصخرية ثابتة على طول الشاطئ الجانبي. في نموذج المحاكاة (B) الخصائص الصخرية للرأس الأرضية تكون أكثر مقاومة للنحت والتآكل من تلك الصخور المحيطة



بالخلجان. ويزداد امتداد قمة الرأس الأرضية باتجاه البحر أثناء تشكيل المسلات البحرية، لذا فإن المسلات البحرية الناتجة تكون أكبر. في نموذج المحاكاة (C) تكون الخصائص الصخرية ثابتة على طول الشاطئ الجانبي كما في نموذج المحاكاة (A)، ولكن يزداد إنتاج الرواسب الشاطئية بينما تقل قوة البري والتآكل. ففي هذه الحالة لا تتشكل المسلة البحرية لأن الشاطئ يعمل بدرجة أكبر على أنه غطاء واقى يحمي الرؤوس من التآكل وليس مصدراً لأدوات البري. حيث إن نوع الصخور هو عنصر التحكم الأول في تشكيل المسلة البحرية ويتضح ذلك في (شكل: ٤)، ونموذج المحاكاة (C).

تبلغ ارتفاعات الجرف البحري الواقع تحت تأثير فعل الرياح في الخلجان والرؤوس ٠ و ٣٠ م على التوالي، ولهذا السبب فإن الرؤوس تكون نتيجة الارتفاعات الطبوغرافية على الرغم من أن الاختلافات في ارتفاع الجرف البحري على طول الشاطئ الجانبي ليست مطلوبة لإنتاج الرؤوس أو لإنشاء المسلات البحرية في النموذج الحالي كما سيتضح لاحقاً. وقيم المتغيرات الرئيسية هي: ($E0 = 0.2$ متر/السنة)، ($S = 0.5$ متر/السنة)، ($N = 6$)، ($w_{crit} = 10$ متر)، ($A = 0.5$)، ($C = 0.5$)

بدءً من نموذج المحاكاة (A)، وحسب مسارات النموذج فإن الجروف البحرية تتآكل ويتم نحتها وتنتج الرواسب الشاطئية التي تتراكم في الخلجان على شكل تجويفات من الشواطئ. تغير نطاق الموجة يدفع الرواسب جيئة وذهاباً في الخلجان، وظل الموجة يكون في الجانب المحمي من الرؤوس الأرضية حيث يسبب طبقة متقطعة من الرواسب التي تتراكم على جوانب الرأس. يتحكم البري في التآكل الانتقائي للجرف البحري ويبدأ البري في نحت فجوات في جوانب الرأس، ويزداد التآكل في الجرف البحري ذو الصخر العاري من الرواسب ويحدث النحت في الرأس في الشاطئ المواجهة للبحر. وفي النهاية تلتحم مناطق التآكل الانتقائي الجانبية على كلا جانبي الرأس الأرضية مع ممر نقل الرواسب المستمر، ويتم تشكيل المسلة البحرية على مدار ٥٧٣ سنة تقريباً.



في نموذج المحاكاة (B)، الظروف الأولية وقيم العامل المتغير هي نفسها كما في نموذج المحاكاة (A) إلا أن الصخور التي يتكون منها الرأس ($E0 = 0.2$ متر/السنة) تكون أكثر مقاومة للتآكل من الصخور التي تتكون منها الخلجان ($E0 = 0.4$ متر/السنة). الاختلافات في قوة وصلابة الصخور على طول الشواطئ الجانبية يكون تأثيرها ضعيف في تشكيل المسلة البحرية إلا أنها تُنتج مسلة بحرية أكبر حجماً، وذلك لأن الخليج ينقل مزيد من الرواسب باتجاه اليابس على طول الرأس بالمقارنة بنموذج المحاكاة (A)، وينمو ويزيد اتساع الشاطئ المستعرض للخلجان أي تزداد نسبة جانب الرأس الأرضية قبل تشكيل المسلة البحرية. يوضح نموذج المحاكاة (C) عملية زوال وتلاشي الرأس أيضاً وهو نفس نموذج المحاكاة (A) إلا أنه يتميز بزيادة إمدادات الرواسب ($C = 1.0$ و $S = 0.1$ متر/السنة) وينخفض الحد الأقصى لقوة البري (N) حيث يبلغ ($N = 2$). وبنهاية مسار النموذج تتلاشي الرؤوس بدون أن تنقسم إلى مسلات بحرية.

إذا كانت إمدادات رواسب الشاطئ مرتفعة جداً مثلاً تكون الجروف عالية أو وفيرة الرمال فإن الخلجان الجانبية تمتلئ بالرواسب الشاطئية ويعمل تجويف الشاطئ المتسع كغطاء واقٍ يمنع تآكل الخلجان والجرف البحري للخلجان. معدلات التراجع أسرع نسبياً على الرؤوس ذات الصخور العارية من الرواسب مما يتسبب في تقليص حجم الرؤوس وتلاشيها في النهاية. وتمنع تشكيل المسلات البحرية، وتتفاقم هذه العملية من زوال وتلاشي الرأس أيضاً عن طريق أضعف تآكل انتقائي.

- العلاقة بين تشكيل المسلة البحرية وإمدادات الشاطئ بالرواسب:

يوضح الشكل (٥) العلاقة بين تشكيل المسلة البحرية وإمدادات الشاطئ بالرواسب. مسارات النموذج الأحد عشر مع ارتفاع الجرف البحري الثابت على طول الشاطئ الجانبي وتظهر في العلاقة فعالية أبعاد ارتفاع الجرف البحري. ويزداد ارتفاع الجرف البحري (HC) تدريجياً من الصفر. المتغيرات الرئيسية الأخرى هي: ($N = 4$)؛ ($E0 = 0.2$ متر/السنة)، ($W_{crit} = 30$ متر). ($S = 0.5$ متر/السنة). كما توضح نتائج النموذج

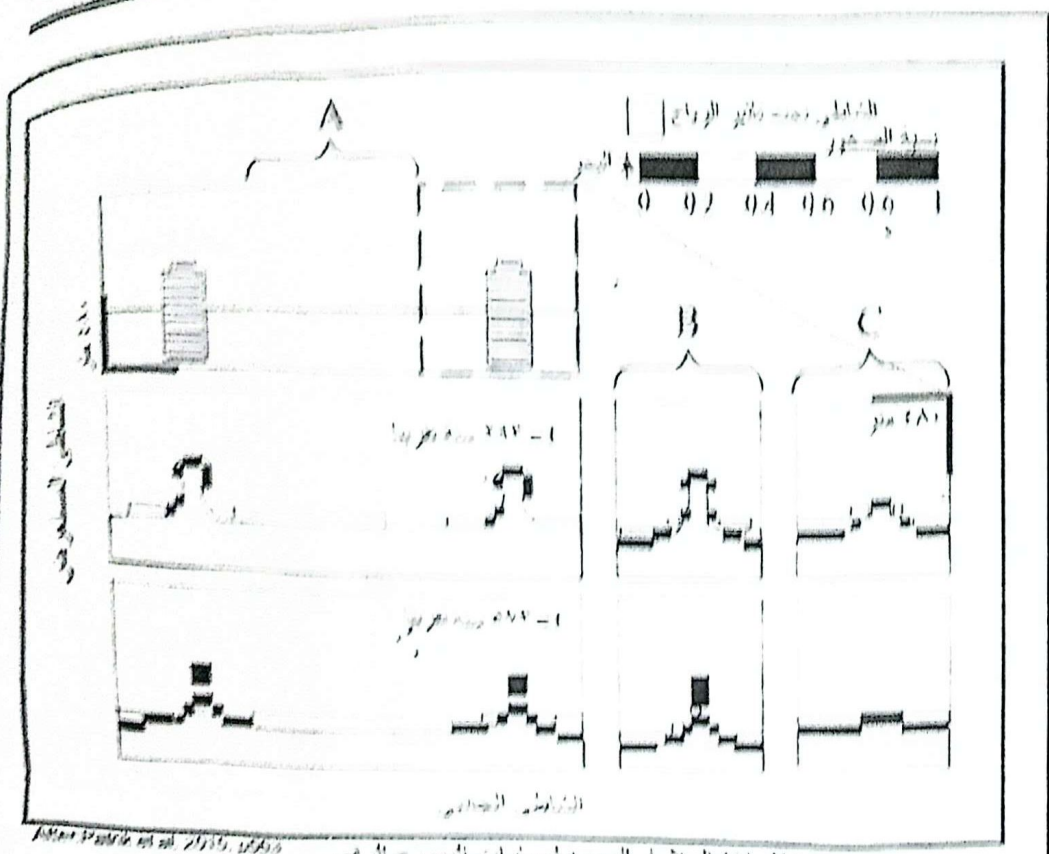


الرقمي (شكل: هـ) العلاقة بين ارتفاع الجرف البحري (HC) والمسافة الشاطئية للمسلة البحرية (y_c) وتقاس من بداية الرأس الأرضية التي تُعد بمثابة منطقة بداية المسلة البحرية باتجاه البحر حتي موقع المسلة البحرية، ومساحة المسلة البحرية. القيم الأعلى من ارتفاع الجرف البحري (HC) تُسبب زيادة إنتاج رواسب الشاطئ، والتي تؤدي إلى تحريك ونقل منطقة البري والتآكل حيث تدفع البري والتآكل الانتقائي في اتجاه البحر على طول الرأس. حيث يؤدي تحول عملية البري نحو البحر إلى تقليل مساحة المسلة البحرية.

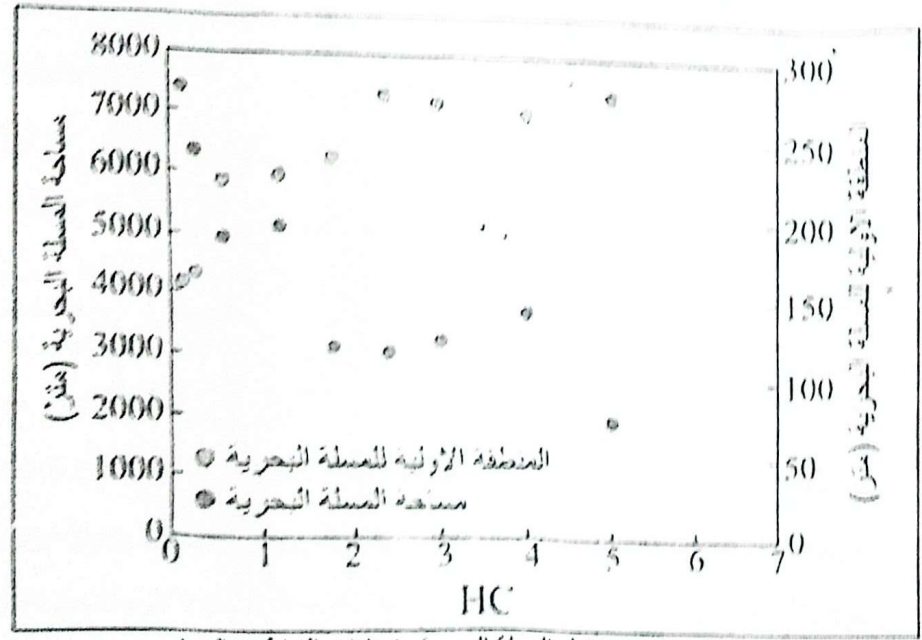
تؤدي الزيادة في ارتفاع الجرف البحري (HC) إلى زيادة إمدادات الشاطئ بالرواسب، وكما يزداد ارتفاع الجرف البحري (HC) فإن متوسط عرض الشاطئ يزداد أيضاً وتتحرك منطقة التآكل الانتقائية، وبالتالي تتحرك منطقة بدء المسلة البحرية حيث تزداد في اتجاه البحر من قاعدة الرأس وتوضحه النقاط الزرقاء في (شكل: هـ). إذا تشكلت المسلة البحرية فإنها تضم نسبة قليلة من مساحتي الرأس والمسلة البحرية الأولية وبناء على ذلك فإن ارتفاع الجرف البحري ينخفض مع زيادة إمداد الرواسب وتوضحه النقاط البنفسجية.

لا تتشكل المسلة البحرية وتكون مساحة المسلة البحرية تساوي (صفر) عندما يكون ارتفاع الجرف البحري (HC) كبير جداً، وفي هذه الحالة تبلغ قيمة ارتفاع الجرف البحري (٥.٧) بسبب فعل الرواسب حيث تكون الرواسب بمثابة غطاء واقٍ بدلاً من أن تكون أداة بري. ولا تتشكل المسلة البحرية أيضاً عندما يكون ارتفاع الجرف البحري (HC) يساوي (صفر) بسبب عدم وجود الرواسب التي تُستخدم في عمليات البري. هذا فيما يتعلق بالنموذج على الرغم من أن في الطبيعة يمكن للمسلة البحرية أن تظل تُشكل بدون الرواسب والبري أو تتشكل في نطاق الرواسب الوفيرة وذلك في حالة إذا كان هناك انقطاعات جيولوجية في الصخور.

يُشير شكل (هـ) إلى وجود علاقة عكسية بين إمداد رواسب الشاطئ وكثرة وجود المسلات البحرية بمعنى كلما زادت رواسب الشاطئ في السواحل الصخرية قل وجود المسلات البحرية بها. ويتم تزويد



شكل (4) المقاطع الجيولوجية للبحر الأحمر - سطح القاع



شكل (5) العلاقة بين تشكّل المسلة البحرية وإحداثيات الشاطئ بالرواسب

ساحل منطقة الدراسة بالكثير من الرواسب الشاطئية سنوياً من خلال
تصريف الأودية التي تصب في الساحل عقب سقوط الأمطار الغزيرة



وحدوث السيول الجارفة بالإضافة إلى الرواسب الناتجة من تآكل الجروف البحرية لذا يمكن القول باحتمالية وجود علاقة تربط كثرة وجود المسلات البحرية على نطاق واسع بشكل الساحل.

- تأثيرات عرض الرأس الأولي وقوة البري وظروف الموجة غير المتماثلة على تشكيل المسلة البحرية:

تتضح نتائج مسارات النموذج — ٣٢ الإضافية في (شكل: ٦) باستثناء قوة التآكل (N) وظروف الموجة غير المتماثلة (A) التي تكون متنوعة ومختلفة، وقيم المتغيرات الطبيعية الأساسية هي نفسها كما في (شكل: ٥) حيث ($H = 3$ و $C = 0.2$). وتشير الخطوط المتصلة إلى وجود ظروف الموجة المتماثلة وتشير الخطوط المتقطعة إلى وجود ظروف الموجة غير المتماثلة.

يوضح الشكل (٦ أ) تأثيرات عرض الرأس الأولي (L_{XB})، وقوة البري (N)، وظروف الموجة غير المتماثلة (A) على مدار المقياس الزمني لتشكيل المسلة البحرية. بالنسبة للموجة غير المتماثلة حوالي ٠.٥ المقياس الزمني يكون خاص بعرض الرأس ٢٤٠ متر وتمثله الدوائر في (شكل: ٦) وتكون أكبر من عرض الرأس الذي يبلغ ١٨٠ متر والذي يتمثل في المربعات لأن هناك تآكل انتقائي أكبر يشق طريقه على طول الشاطئ الجانبي. الحد الأقصى لقوة التآكل (N) يزيد من معدل التراجع الجانبي للجرف البحري، وذلك يزيد من قوة البري ويقلل من المقياس الزمني. عندما تبلغ ظروف الموجة غير المتماثلة (٠.١)، وهذا يعني أن ٩٠٪ من تأثير الموجة يقترب من الساحل من الجهة اليمنى و ١٠٪ تقترب من الجهة اليسرى، وكانت النتائج مختلفة جداً. وبصفة عامة يستغرق تشكيل المسلات البحرية وقتاً أطول إذا كان يتم تشكيلها بصورة كاملة. وهناك نقطة البيانات تقع عند الصفر على المحور الصادي في الشكل (٦) وتعني أن المسلة البحرية لم يتم تشكيلها.



المساحة النهائية للمسلة البحرية تحت ظروف الموجة المتماثلة وغير المتماثلة:

يوضح الشكل (٦ ب) تأثيرات الحد الأقصى لقوة البري (N) وحجم الرأس الأولي على المساحة النهائية للمسلة البحرية تحت ظروف الموجة المتماثلة وغير المتماثلة. بالنسبة لظروف الموجة المتماثلة، كلما ازدادت شدة وقوة البري ازداد حجم الرأس الأولي وازداد حجم المسلة البحرية. يزداد الحجم مع قوة البري لأن ارتفاع معدلات التآكل الانتقائي تقلل من الفترة الزمنية لتشكيل المسلة البحرية. يؤدي الوقت الأسرع إلى تشكيل المسلة البحرية بينما يؤدي الوقت الأقل إلى تراجع الجرف البحري ذو الصخور العارية مما يؤدي إلى تقليل حجم الرأس الأرضية والمسلة البحرية. ومع ذلك، فإنه عندما تكون ظروف الموجة غير المتناظرة وتبلغ قيمة $(A = 0.1)$ فتكون المسلات البحرية أصغر حجماً ولا تختلف أحجامها بشكل واضح مع الحد الأقصى لقوة البري (N). وكذلك الحال بالنسبة لحجم الرأس أيضاً ولنفس الأسباب التي تم ذكرها سابقاً. تشير هذه النتائج بصفة عامة إلى أن عملية البري ليست مصدراً فعالاً للتآكل الانتقائي للرأس في ظل ظروف الموجة غير المتماثلة.

تطور المسلة البحرية في ظل ظروف الموجة غير المتماثلة:

يوضح (شكل: ٧) السلاسل الزمنية لمسارات النموذج الرقمي مع ظروف الموجة غير المتماثلة بشكل كبير حيث قيمة $(A = 0.1)$. يتضح أن اتجاه صافي نقل الرواسب إلى اليسار. تحولت منطقة البري في ظل ظروف الموجة غير المتماثلة حيث تحفز على التآكل الانتقائي والبري في اتجاه البحر بواسطة طول المسافة الشاطئية للمسلة البحرية (y_c) . بحيث تصبح المسلة البحرية في النهاية أصغر حجماً من الحجم الذي سوف تكون عليه في ظل ظروف الموجة المتماثلة. ويتضح أيضاً السلسلة الزمنية من تطور المسلة البحرية في ظل ظروف الموجة غير المتماثلة. حيث يستغرق تشكيل المسلة البحرية بفعل البري وقتاً أطول في ظل ظروف الموجة غير المتماثلة ويرجع ذلك إلى أن رواسب الشاطئ

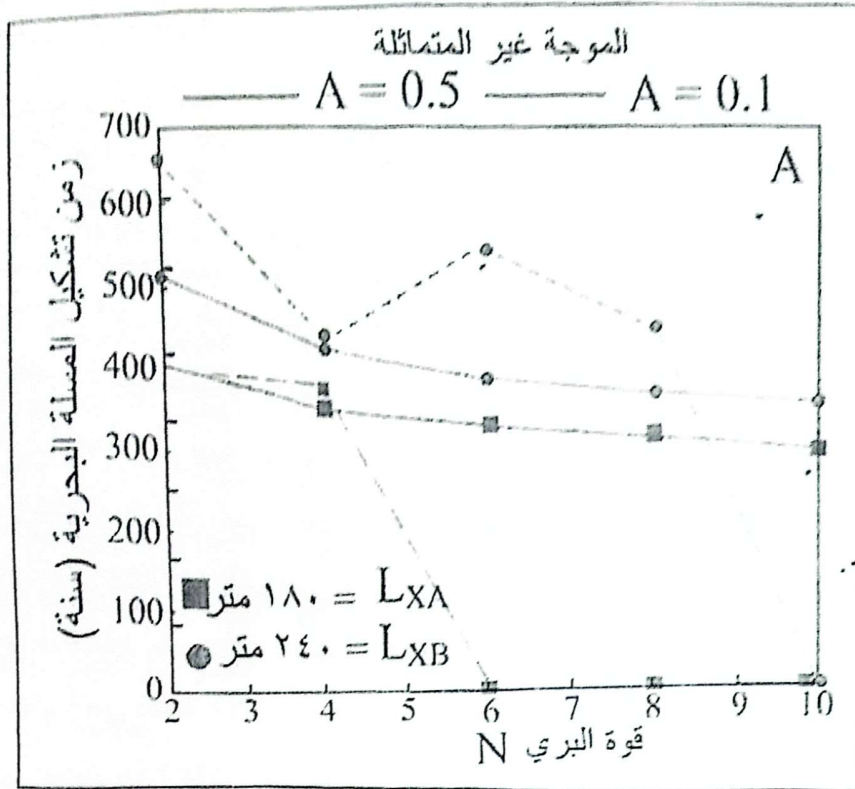


تتراكم على طول الجانب الأيمن من الرأس ونادراً ما تتراكم على الجانب الأيسر من الرأس الذي يكون خلف الانجراف مما تسبب في مناطق تحرك البري والتآكل الجانبي للجرف البحري على كل جانب من جانبي الرأس على أن تنتهي الرأس أكثر على الجانب الأيمن باتجاه البحر، ويكون هناك مزيد من اليابس على اليسار.

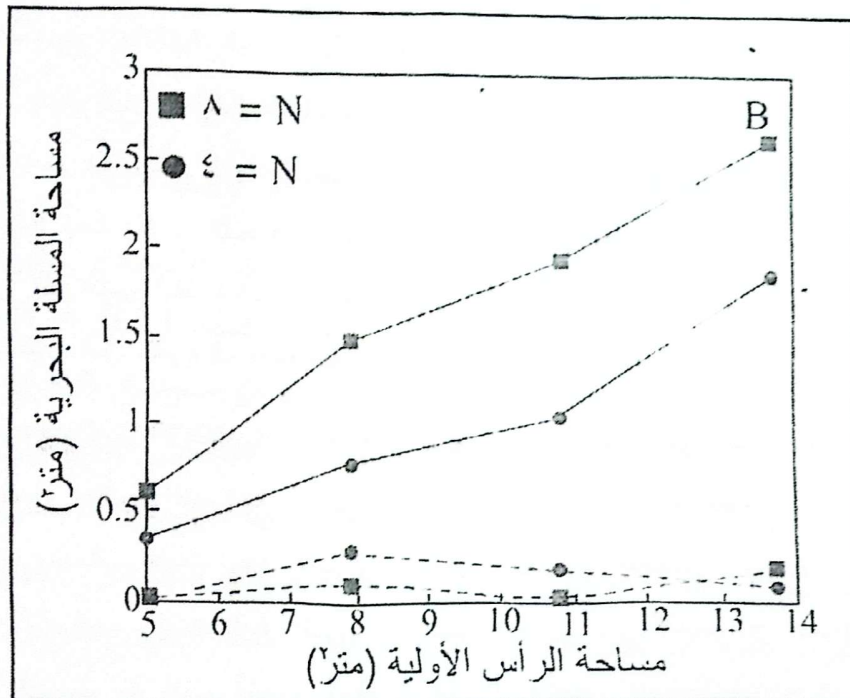
تقع مناطق البري في نفس الموقع على جانبي الرأس الأرضية في ظل ظروف الموجة المتماثلة، ويمكن أن تعمل جنباً إلى جنب للقيام بالتقويض السفلي في قاعدة الرأس الأرضية. في الحالات التي لا تتشكل فيها المسلات البحرية ويكون ذلك بسبب اصطدام الرواسب بالرأس الأرضية في الجانب المواجهة لحركة الانجراف من الرأس؛ لذا تتعرض الرأس للتفتت ويتناقص حجمها بسرعة. ويحدث هذا في كثير من الأحيان بالنسبة لقيم قوة التآكل المرتفعة (N) ويرجع السبب في ذلك إلى ما يلي:

١- تكتسح الموجة غير المتماثلة باستمرار رواسب الشاطئ إلى الجانب الأيسر من الخلجان الجانبية، وترك طبقة رقيقة من الرواسب على الجانب الأيمن للخليج (شكل: ٧). ٢- تشتت القشرة الرقيقة من الرواسب على الجانب الأيمن مع القيمة الكبيرة من قوة البري (N) مما يسبب في إنتاج الرواسب بسرعة التي تم اكتساحها إلى اليسار حتى ينمو الشاطئ باتجاه البحر بعيداً بما يكفي لتجاوز الرأس الأرضية. بالنسبة لكل عرض الرأس، والمقياس الزمني لظروف الموجة غير المتماثلة يكون غير منتظم أيضاً بدرجة أكبر من ظروف الموجة المتماثلة.

تنطبق العديد من الأفكار التي قدمها النموذج الرقمي في الدراسة الحالية بشكل أفضل على السواحل الغنية بالرواسب الشاطئية كما في ساحل منطقة الدراسة. حيث يعد البري عامل التآكل الفعال. ويمكن تعميم النتائج والأسانيد التحليلية التي تم استخلاصها من النموذج الحالي في السواحل الصخرية التي تتميز بقلّة توفر الرواسب الشاطئية. حيث ينشط ويهيمن التآكل بفعل قوة الضغط الهيدروليكية للأمواج.



شكل (١٦) نتائج لقياس الزمنى للقيم المختلفة للحد الأقصى لقوة البري و عرض الرأس



شكل (١٧) نتائج حجم المسلة البحرية بالنسبة للقيم المختلفة للحد الأقصى لقوة البري ومساحة الرأس الأرضية



سادساً: تشكيل المسلات البحرية بواسطة المعادلات الرياضية:

من خلال النظر في المنافسة بين معدلات واتجاهات تآكل الجرف البحري المختلفة التي تتم على الرأس الأرضية وأبعادها الأولية والموضحة في (شكل: ٢) يُمكن التوصل إلى ما يأتي:

يُرمز لتآكل الرأس الانتقائي بحرف (N)، ويمكن إعادة تسميتها بقوة التآكل الانتقائية العامة التي يُمكن أن تُسببها العديد من العوامل وتشمل البري، والتحجير الموجي على طول الشقوق والفواصل في الصخور المحلية (Trenhaile et al., 1998, p618)، أو يُمكن تسميتها باسم التأثيرات الهيدروليكية أو التأثيرات البحرية مثل تركيز طاقة الأمواج (Emery and Kuhn, 1982, p652).

يتضح من الجدول الزمني التحليلي وحجم المسلة البحرية في شكل (٦ أ و ب) أن تراجع الجرف البحري الانتقائي على وجه الشاطئ الجانبي يحدث عند معدل متوسط الفترة الزمنية على كلا الجانبين من الرأس الأرضية، والزمن (t_0) الذي يستغرقه التآكل الانتقائي للشق عبر عرض الشاطئ الجانبي للرأس الأرضية يُرمز له (L_{XB}) (شكل: ٢) ويمكن التعبير عنه بالمعادلة (٤) التالية:

$$t_0 = L_{XB} / 2 N_g \times E_0$$

After: Patrick W. Limber and A. Brad Murray. 2015

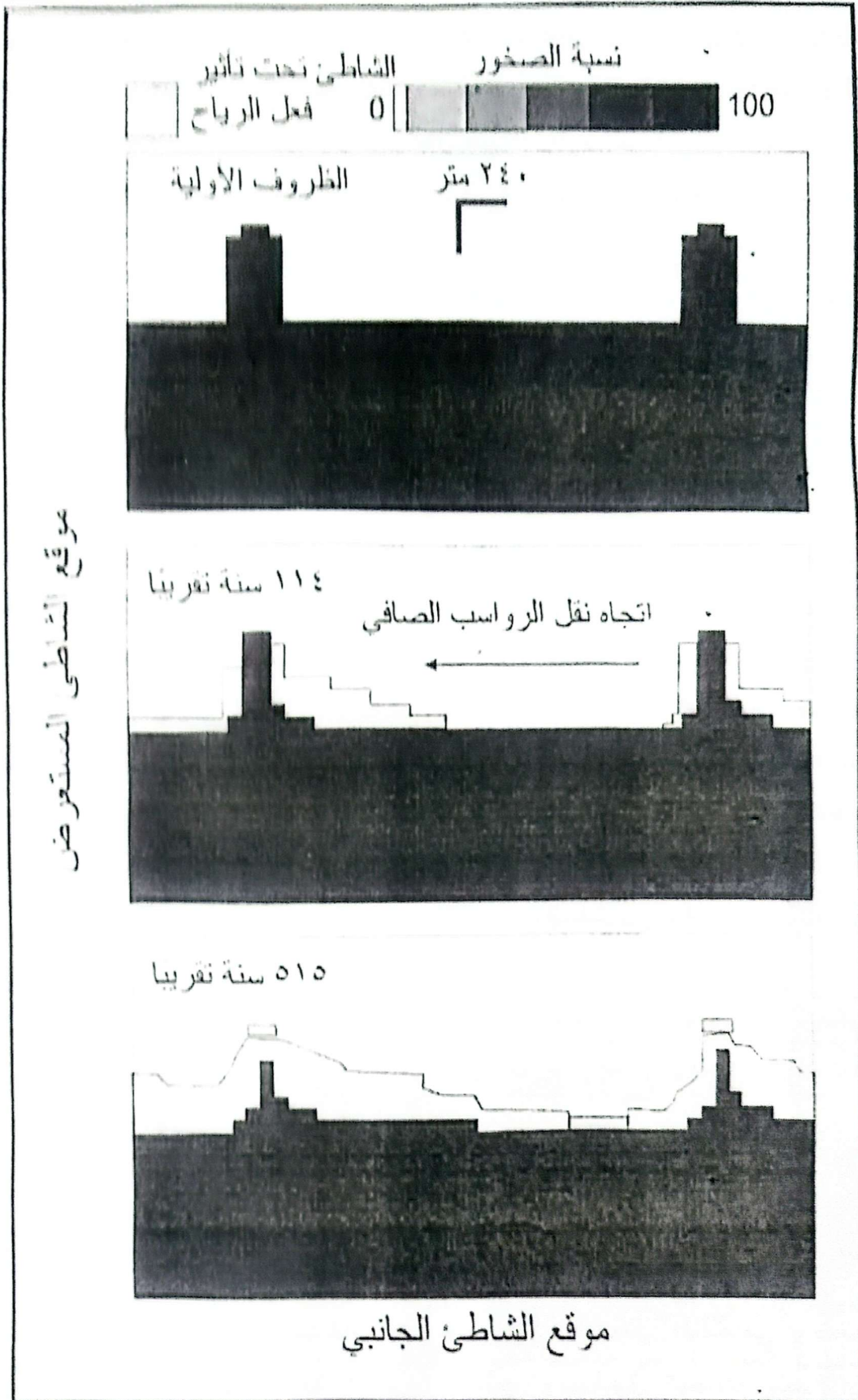
حيث تُمثل (N_g) متوسط الزمن بالنسبة لقوة التآكل الانتقائية. ففي (شكل: ٦ أ) يبلغ زمن التشكيل بالنسبة للمسلة البحرية ابتداءً من عرض الرأس الأرضية الأولي ٢٤٠ متر عندما تبلغ قيمة الحد الأقصى لقوة البري ($N = 6$) في حوالي ٣٩٠ سنة. ويرجع ذلك إلى تقطع الغطاء الرسوبي على طول جانبي الرأس بسبب تغير نطاق الموجة، والبري يكون متقطع



أيضاً ولا يستمر في النحت بأقصى قوته التي تبلغ نحو (6). وبدلاً من ذلك، هناك معدل متوسط لمعدل التآكل الانتقائي ويشمل المعدلات الناتجة عن التآكل السريع والبطيء في الصخور العارية من الرواسب.

ومن خلال تطبيق المعادلة (٤) يتضح أن متوسط الزمن بالنسبة لقوة التآكل الانتقائية $(N_g) = (1,55)$ ؛ لذا يُمكن توقع تشكيل المسلات البحرية بشكل أسرع عندما يكون متوسط معدل التآكل الانتقائي مرتفع أو عندما يكون عرض الرأس على طول الشاطئ الجانبي صغير. ويتفق هذا مع نتائج النموذج الرقمي في (شكل: ٦ أ و ب).

يُمكن تقدير عرض الشاطئ المستعرض، وتقدير عرض المسلة البحرية عن طريق معرفة جدول الزمن التقريبي وأبعاد الرأس الأولية. حيث ينتج عرض المسلة البحرية على طول الشاطئ من خلال المنافسة بين التآكل الجانبي للصخور العارية في قمة الرأس والتراجع الجانبي الانتقائي للجرف البحري عند أقصى نقطة باتجاه اليابس على طول الرأس، أو في قاعدة الرأس الأرضية (شكل: ٢).



شكل (٧) السلاسل الزمنية لمسارات النموذج الرقمي في ظل ظروف الموجة غير المتماثلة

سيؤدي معدل التآكل الانتقائي الأسرع إلى تشكيل أسرع للمسلة البحرية، والوقت الأقل للتراجع الجانبي للجرف البحري ذو الصخور العارية سوف يقلل حجم قمة الرأس التي سوف تُشكل في النهاية المسلة البحرية. يُقدر العرض الجانبي للمسلة البحرية ($L_{x \text{ Stack}}$) من خلال طرح كمية الصخور العارية التي فقدتها الشاطئ الجانبي من الرأس الأرضية أثناء الوقت الذي يستغرقه تشكيل المسلة البحرية (t_0) من عرض الرأس الأولي باتجاه البحر (L_{XA}). ويتضح ذلك من خلال المعادلة (٥) التالية:

$$\dot{L}_{x \text{ Stack}} = L_{XA} - (2 E_0 t_0) = L_{XA} - (L_{XB} / N_g)$$

After: Limber et al, 2014

يُمكن تقدير طول الشاطئ المستعرض النهائي للمسلة البحرية L_y (Stack) عن طريق طرح الطول المفقود من الشاطئ المستعرض للرأس الذي نُقص بفعل تآكل الجرف البحري أمام اليابس عند قمة الرأس من طول الرأس الأولي عبر الشاطئ المستعرض بين موقع بدء المسلة البحرية وقمة الرأس الأرضية (L_{ys}) أثناء الوقت الذي يستغرقه تشكيل المسلة البحرية (شكل: ٢)، وتوضحه المعادلة (٦) التالية:

$$L_{y \text{ Stack}} = L_{ys} - (E_0 t_0) = L_{ys} - (L_{XB} / N_g)$$

After: Limber et al, 2014

ويلاحظ أن (L_{ys}) تساوي (L_y) تساوي (y_c) كما في (شكل: ٢). ويُمكن استخراج مساحة المسلة البحرية بوصفها نتيجة قوة التآكل الانتقائية وشكل الرأس الأولي من المعادلة (٧) التالية:

$$\text{Area}_{\text{Stack}} = (L_{XB} - L_{XA} N_g) (L_{XB} - 2 N_g L_{ys}) / (2 N_g^2)$$

After: Limber et al, 2014

توضح المعادلة (٧) العلاقات النوعية بين التآكل الانتقائي وحجم الرأس الأولي، وحجم المسلة البحرية الناتج. وبتطبيق المعادلة يتضح أن هناك قابلية لتشكيل المسلة البحرية من خلال الرأس. حيث إن بعض



أشكال الرأس ونسب الانحدار قد تكون أكثر ملاءمة لتشكيل المسلة البحرية من غيرها، لذا ينبغي دراسة تأثير شكل الرأس على تشكيل المسلة البحرية.

١- تأثير شكل الرأس على تشكيل المسلة البحرية:

تم دراسة الأشكال المختلفة للرؤوس المتعمقة في مياه البحر بمنطقة الدراسة ميدانياً، ومن خلال نماذج المحاكاة الرقمية بالدراسة الحالية، والمعادلات الرياضية المختلفة بهدف التحقق من مدى تأثير شكل الرأس على تشكيل المسلة البحرية، كما يأتي:

يفترض النموذج الرقمي الحالي أن الشكل الأولي للرأس كان على شكل مستطيل أي أن عرض الرأس الأولي باتجاه البحر (L_{xA}) يساوي تقريباً عرض الشاطئ الجانبي للرأس الأرضية (L_{xB}) وذلك لبساطة وسهولة التفسير. ولكن يمكن دراسة أشكال مختلفة للرأس في الدراسة الحالية وذلك من واقع الأشكال المختلفة للرؤوس التي تم رصدها ميدانياً بمنطقة الدراسة. فإذا كانت المسلة البحرية تتشكل على أي رأس، وكان النحت الجانبي للجرف البحري أسرع في الجزء المواجه لليابس من الرأس بالمقارنة بالجزء الواقع في اتجاه البحر؛ لذا فإن الرأس سوف تنفصل من اليابس الرئيسي.

إذا كانت الرأس الأرضية أقرب للاستدارة بدلاً من الشكل المستطيل، وينتشر التآكل الجانبي على طول قاعدة الرأس بشكل أكبر خلال المسافة الجانبية (L_{xB}) بالمقارنة إلى التآكل الجانبي على طول الجزء من الرأس في اتجاه البحر (L_{xA}) كما في (شكل: ٢). وهذا يكون أقرب إلى إعطاء السبق للتآكل الجانبي باتجاه البحر حيث يكون السبق للتآكل في الجانب المواجهة للبحر من الرأس: يجب أن يحدث البري والتآكل في قاعدة الرأس الأرضية المتصلة باليابس بشكل أسرع حتى أثناء تشكيل المسلة البحرية. من ناحية أخرى، فإن الجزء البارز من الرأس في البحر سوف يتآكل بعيداً قبل ما تستطيع المسلة البحرية أن تتطور. لذلك فإن

قوة التآكل الانتقائية تُصبح أساسية في تشكيل المسلة البحرية مثل شكل الرأس وتغير نسبة جانب الرأس الأرضية.

يتضح من خلال ناتج (معادلة: ٧) أن قيمة مساحة المسلة البحرية تساوي صفر، ويعني هذا أن المسلة البحرية لا تتشكل، ويمكن اكتشاف أي من أشكال الرأس ونسب جوانب الرأس سوف تكون أكثر ملاءمة لتشكيل المسلة البحرية. حيث تُعطي نتائج المعادلة (٧) اثنين من الحلول الممكنة كما توضحها المعادلة (٨):

$$N_g = R^* (1 / 2 A^*)$$

After: Patrick W. et al, 2015

تُمثل (R^*) أبعاد الرأس المستديرة حيث (R^*) تساوي عرض الشاطئ الجانبي للرأس الأرضية (L_{xB}) / عرض الرأس الأولي باتجاه البحر (L_{xA}) أي $(R^* = L_{xB} / L_{xA})$ و (A^*) تُمثل نسبة الجانب من الرأس المتوغل في مياه البحر ويُقاس من موقع بدء المسلة البحرية أي المسافة الشاطئية بدء من أقصى بروز من الرأس الأرضية في البحر حتي بداية المسلة البحرية حيث $(A^* = L_{ys} / L_{xB})$.

الرأس المستديرة تساوي واحد صحيح حيث تتميز أبعاد الرأس بكبر اتساعها عند قاعدتها المتصلة باليابس، ويضيق اتساعها عند قمة الرأس المتعمقة في اتجاه البحر أي تكون أكثر اتساعاً عند قاعدتها وأضيق عند قممتها. أعلى قيمة من (R^*) تُعني أن الرأس الأرضية أكثر استدارة أو أن الرأس مستديرة. وبالتالي سوف تتشكل أصغر مسلة بحرية. وأن أكبر نسبة لجوانب الرأس الأرضية يُعني أن أكبر مسلة بحرية سوف تتشكل. كما يتضح ذلك في نموذج المحاكاة (C) في (شكل: ٤). وعندما يتم تجاوز كل من درجات (معادلة: ٨) حينئذ تكون الرأس أكثر ملاءمة لتشكيل المسلة البحرية. وفي حالة عدم استيفاء واحد أو كلا الدرجات فإن شكل الرأس حينئذ لا يكون ملائماً لتشكيل المسلة البحرية.

نلاحظ مما تقدم ذكره في هذه الدراسة أن قوة التآكل الانقشائية (N_p)
تزداد مع الزيادة في عمق البحر، فانه ليس من المرجح أن تتشكل
المسلة البحرية عند أعماق كبيرة من الرأس الأرضية، حيث يقتصر الحمل الأول بالنسبة
للرأس المسطحة على أن القصي اتساع للرأس يوجد عند قاعدة الرأس
المستوية وبالتالي فإن شدة الرأس المتعمقة في البحر، ويجب أن
يحدث التسرع لتراجع انقشائي للبحر في التشكيل المسلة البحرية،
بالإضافة إلى زيادة قوة التآكل (N_p) بحيث تكون أكثر شدة من درجة
استدارة الرأس الأخرى سيؤدي إلى تشكيل أكبر مسلة بحرية. وعندما
تكون الرأس الأولية أكثر استدارة من قوة التآكل (N_p) فإنه ليس من
المنطقي أن تتشكل المسلة البحرية.

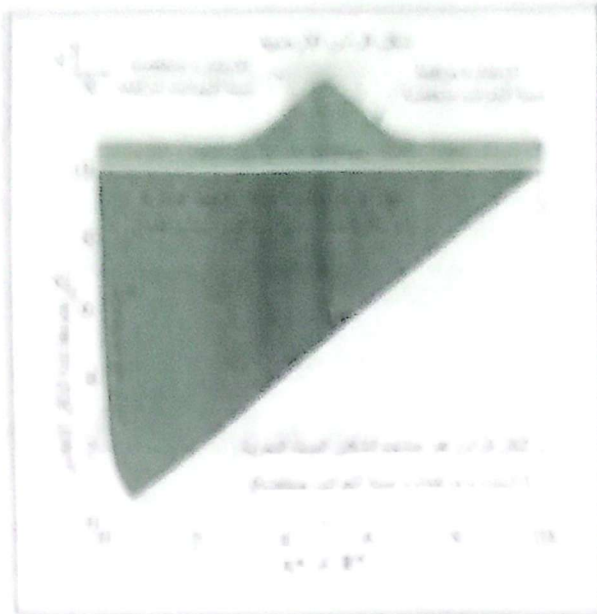
ويستخرج المحلل المتناهي أن شدة وقوة التآكل الانتقائية (N_{eq}) يجب أن تكون عرصة مما يمكن تدفع تراجع الجرف البحري الجانبي خلال عرض الشراس بالتآكل قليل أن يقلل التآكل الموجه نحو اليابس من اتساع الرأس في التناقص المستعرض ويوصل الاتساع إلى صفر. لذلك يجب أن تزداد شدة وقوة التآكل الانتقائي مع تقليل نسبة جوانب الرأس لتدعيم تشكيل المعلة البحرية (Patrick W. et al, 2015, p565).

قيمة شدة التآكل (N_g) مطلوبة لتدعيم تشكيل المسلة البحرية باستخدام التدرجات في المعادلة (٨). ويمكن من خلال الرأس الأولية تحديد ومعرفة نسبة جانب الرأس واستدارة الرأس (شكل: ٨). عندما تكون نسبة جانب الرأس صغيرة أو تكون الرأس أكثر استدارة فيجب أن تكون شدة التآكل (N_g) كبيرة. بصفة عامة الرؤوس التي تكون قاعدتها أضيق من قممها. ويكون الناطئ المستعرض أكثر اتساعاً تصبح تلك الرؤوس أكثر ميلاً إلى تشكيل المسلة البحرية. وتم رصد ذلك ميدانياً (صورة: ١٨).

هناك منطقة صغيرة من الرسم البياني في (شكل: ٨) حيث يكون شكل الرأس مناسب للتشكيل العسلية البحرية على الرغم من أن متوسط قيمة قوة التآكل (N_{a}) أقل من واحد صحيح. عندما يكون متوسط قيمة قوة



التآكل (N_g) أقل من أو يساوي واحد صحيح، ولا يوجد هناك تآكل انتقائي، ويكون التآكل على طول الأجزاء اليابسة المواجهة لليابس من الرأس أبطأ من معدل التآكل في الصخور العارية (E_0) التي يمكن أن تسببها الكثير من طاقة الرواسب الشاطئية كما في (شكل: ٤، ٥)، وفي هذه الحالة الخاصة يجب أن يكون شكل الرأس الأولي مثل شكل صخور المشروم، حيث تكون قيمة أبعاد الرأس أقل من واحد صحيح ($R^* < 1$), ويكون عرض الرأس الجانبي المتصل باليابس أقل من عرض الرأس الجانبي المواجه للبحر. ويتضح ذلك نموذج الرؤوس التي تم رصدها ميدانياً بمنطقة الدراسة، حيث يوضح (شكل ٩ أ) أن شكل الرأس غير مناسب لتشكيل المسلة البحرية؛ لأن استدارة الرأس مرتفعة ونسبة الجوانب منخفضة، في حين يتضح من (شكل ٩ ب) أن شكل الرأس يشبه صخور المشروم وبالتالي يكون شكل الرأس مناسب لتشكيل المسلة (صورة: ١٨). حيث استدارة الرأس منخفضة ونسبة الجوانب مرتفعة، والرأس تكون أكثر توغلاً في مياه البحر وقاعدة الرأس المتصلة باليابس ضيقة جداً وتتعرض للتآكل السريع.



شكل (٥) العلاقة بين شكل وحولاب
الرأس وقوة التآكل التفاضلي للتشكل
المسالك البحرية





ويتضح من الشروط السابقة لتشكيل المسلة البحرية، وشكل (٨، ٩) أنها تتعلق بالأبعاد المورفومترية الأولية للرأس الأرضية فقط. فمثلاً ظروف الموجة غير المتماثلة لا يمكن أن تدعم في النهاية تشكيل المسلة البحرية حتى لو كانت قيم قوة التآكل، ونسبة جوانب الرأس، وشكل الرأس تدعم تشكيل المسلة البحرية، لذا فقط تم أخذ الأبعاد المورفومترية للمسلات ميدانياً كما يلي:

سابعاً: الملاحظات الميدانية على تشكيل المسلات البحرية ومراحل تطورها:

تم رصد العديد من المسلات البحرية خلال الدراسات الميدانية لمواقع الرؤوس بمنطقة الدراسة، حيث توجد ١٧ مسلة بحرية على طول الساحل الممتد من رأس الغردقة حتى رأس أبو سومة الذي يبلغ نحو ٥٠ كم، ٣ منها حول رأسي الغردقة وأبو منقار، و ٧ مسلات بحرية برأس الضبعة، ومسلتان برأس أبو حصيو، و ٥ مسلات برأس أبو سومة، بمتوسط كثافة ٠.٣٤ مسلة بحرية/كم، في حين تم رصد ١٣ مسلة بحرية بالساحل الجنوبي لجزيرة الجفتون الصغرى الذي يبلغ طوله نحو ١.٥ كم بكثافة تبلغ ٨.٧ مسلة بحرية/كم. ويرجع السبب في ارتفاع عدد المسلات البحرية بالساحل الجنوبي لجزيرة الجفتون الصغرى إلى كثرة تداخل اليابس والماء. حيث يكثر عدد الرؤوس الأرضية المتممة في مياه البحر وبالتالي تكون أكثر تعرضاً لنحت الأمواج المحملة بالرواسب الأمر الذي يزيد من فرصة انفصال العديد من المسلات البحرية. ويصل عدد الرؤوس البارزة في البحر إلى نحو ٢٧ رأس أرضية في قطاع ساحلي لا يزيد على ١.٥ كم بكثافة ١٨ رأس/كم. وتكثر الأودية المنحدرة فوق سطح الجزيرة التي تُلقي برواسبها في مياه البحر وتُقطع خط الساحل الجنوبي للجزيرة عند مصبات الأودية ذات الرواسب الضعيفة التي يسهل النحت فيها مما يؤدي إلى تراجع خط الساحل نحو يابس الجزيرة في تلك المواضع مشكلاً الشروم البحرية التي تنحصر بين الرؤوس الأرضية البارزة في مياه البحر.



لتميز المسلات البحرية بتباين أحجامها وارتفاعاتها، حيث يتراوح طولها بين ٧٠ سم و ٢.٥ متر، وعرضها بين ٤٠ سم و ١ متر، وارتفاعها بين ٣٠ سم و ١.٥ سم على الجانب الشرقي والجانب الشرقي من رأس الضبعة. ويتراوح طولها بين ٨٠ سم و ٢.٥ متر، وعرضها بين ٥٠ سم و ١.٥ متر، وارتفاعها بين ٨٠ سم و ١.٥ متر على الجانب الشمالي الشرقي والجنوبي الغربي من رأس أبو حصيوقة. ويتراوح طولها بين ١ م و ٣ متر، وعرضها بين ٠.٥ متر، و ١.٥ متر، وارتفاعها بين ٠.٥ متر و ١.٥ متر على الجانب الشرقي من رأس أبو سومة، كما يتراوح طولها بين ٩٠ سم و ٢.٢٥ متر، وعرضها بين ٥٠ سم و ١ متر، وارتفاعها بين ١ - ١.٥ متر على الجانب الشرقي لرأس الغردقة وأبو منقار. في حين تميزت المسلات المنتشرة أمام الرؤوس البارزة من الساحل الجنوبي لجزيرة الجفتون الصغرى بضخامتها النسبية عن مسلات الرؤوس الأخرى، حيث يتراوح طولها بين ٢ متر - ٣ متر، وعرضها بين ١ متر - ١.٨ متر، وارتفاعها بين ١ متر - ٢ متر.

يلاحظ على بعض المسلات أن هناك خط أكثر قتامة حول قاعدة بعض المسلات البحرية، ويفصل الجزء السفلي ذو اللون الأسود عن المنطقة الرمادية الداكنة العليا. ويمثل هذا الخط علامة المد العالي ويشير إلى الحد العام الذي يفصل بين المناطق الخاضعة لتأثير مياه البحر وعمليات التجوية (صور: ٧ - ١١). تظهر على المسلات البحرية آثار التجوية من حفر إذابة واثر تمدد وانكماش وتوسيع للشقوق الموجودة بها، كما يظهر عند أجزائها السفلى آثار التقويض السفلى وعمليات الأكسدة، كما تملأ بلورات الملح بعض الحفر والشقوق المنتشرة بها بعد تبخر المياه منها، ويوجد بها أيضاً بقايا أصداف وحيوانات بحرية متحجرة، وتبعد هذه المسلات عن الجروف بمسافات تتراوح بين ٠.٥ متر و ٥ أمتار.

يلاحظ بالساحل الجنوبي من جزيرة الجفتون الصغرى وجود ثلاث مسلات بحرية على استقامة واحدة بالقرب من البحر، مما يدل على أنها



بشأن خط الجرف القديم، بينما يتراجع خط الجرف الجديد إلى الخلف منها (صورة: ١٥). يلاحظ أن المسلات الثلاثة الآن أقرب إلى البحر من الجروف الحالية، وغالباً ما تكون أكثر نقوضاً في قواعدها من تلك المسلات الأقرب إلى الشاطئ لأنها تكون أقدم في العمر الزمني. تكثر مظاهر الضعف الصخري بالجروف حيث تكثر بها الشقوق والفواصل مما جعل الجروف أكثر عرضة للتآكل من المسلات البحرية المتبقية التي يقل بها الشقوق والفواصل. ويلاحظ أيضاً أن هناك خطوط بيضاء تنزل من المنحدرات العليا للمسلات البحرية بمنطقة الدراسة، حيث تمثل فضلات طيور النورس وغيرها من الطيور البحرية الأخرى.

- مراحل تشكيل وتطور المسلات البحرية ميدانياً:

تم ميدانياً تحديد مراحل تشكيل وتطور المسلات البحرية بمنطقة الدراسة، حيث تتشكل المسلات البحرية عادة في الصخور الرسوبية الطبقيّة الأفقية ولا سيما على الجروف الجيرية. تتألف المسلات البحرية من الصخور الجيرية الأقل مقاومة لعمليات البري والتآكل، وهناك طبقة أكثر مقاومة قد تُشكل قمة المسلة البحرية. ويقترح الباحث مراحل تطورية لتشكيل المسلة البحرية من خلال الملاحظات الميدانية والصور الفوتوغرافية للمسلات البحرية بمنطقة الدراسة وشكل (١٠) كما يلي:

مرحلة الرأس الأرضية: تبدأ عملية تشكيل المسلات البحرية عادة عندما توجد رأس أرضية متعمقة في مياه البحر، وتتألف تلك الرأس من صخور تكثر بها عوامل الضعف الصخري مثل الشقوق والفواصل مما يزيد من قابليتها للبري والتآكل، وعندما تهاجم مياه البحر الشقوق الصغيرة الموجودة في الرأس الأرضية وتقوم بتوسيعها الأمر الذي يؤدي إلى تشكيل فتحات في الرأس (صورة: ١، و ٢).

مرحلة الكهف البحري: تتسع الشقوق تدريجياً نتيجة استمرار مهاجمة الأمواج للرأس وزيادة نشاط عملية بري الأمواج المحملة بالرواسب خلال الشقوق والفواصل المنتشرة بالرأس حتى تصبح أكثر اتساعاً وعمقاً وتتحول إلى كهف صغير في أحد جانبي الرأس الأرضية. تحدث الكهوف

عندما تشق الأمواج إلى داخل الشقوق الموجودة في وجه الجرف البحري، تحتوي المياه على الرمال وغيرها من المواد التي تستخدمها كعادات للنحت الجانبي في الصخر حتى تصبح الشقوق إلى كهوف. الضلع الهيدروليكي للماء هو العملية السائدة (صورة: ٣).

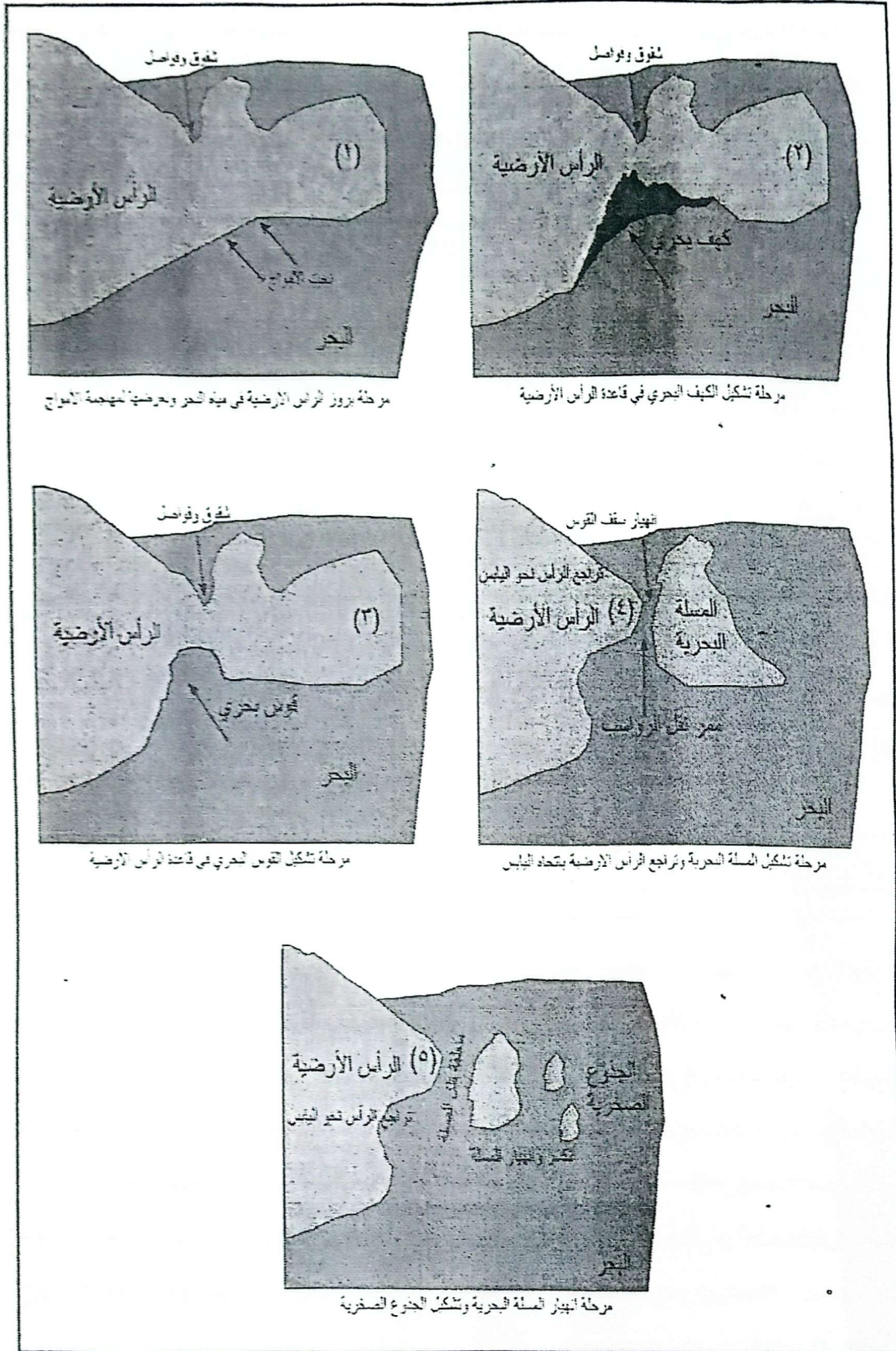
مرحلة القوس البحري: إذا تم تشكيل الكهف في الرأس فإن زيادة نحت الأمواج في الكهف سوف يؤدي إلى زيادة تآكل الكهف ويزداد عمقه من خلال الرأس، وفي النهاية تُثقب الرأس على شكل نفق ويتشكل ممر تنفذ من خلاله مياه البحر إلى الجانب الآخر من الرأس، ويتصل الكهف عبر الرأس إلى الجانب الآخر من الرأس ويتشكل بذلك القوس البحري (صورة: ٤).

مرحلة المسلة البحرية: بسبب استمرار نحت الأمواج في القوس البحري يتسع القوس تدريجياً ويصبح أكبر حجماً واتساعاً لدرجة أن القوس لم يعد قادراً على دعم سقف القوس الذي تكثر به الشقوق والفواصل وبالتالي ينهار سقف القوس بفعل الجاذبية الأرضية. وعندما ينهار القوس فإنه يترك الرأس الأرضية على الجانب المواجه لليباس والمسلة البحرية فوق مياه البحر باتجاه البحر على شكل عمود صخري قائم فوق مياه البحر بعيداً عن الساحل وبذلك يكون قد تم تشكيل المسلة البحرية. بعض المسلات البحرية تستمر قائمة لفترة طويلة جداً من الزمن ربما لأنها لم تتعرض للغمر البحري بسهولة (صورة: ٥).

مرحلة الجذوع الصخرية: تتعرض قواعد المسلات البحرية لهجوم الأمواج والبري والتآكل حيث يؤدي النحت الموجي في قواعد المسلات إلى إضعاف بنية المسلات البحرية مما يساعد على تشكيل فجوات الأمواج في قواعد المسلات البحرية حيث تتطور تلك الفجوات إلى كهوف ثم أقواس بحرية في قواعد المسلة البحرية الأمر الذي سيؤدي في النهاية إلى انهيار المسلة البحرية تاركة الجزء المتبقي من المسلة على شكل أعمدة صخرية قصيرة الذي يطلق عليها جذع المسلة أو الجذوع الصخرية stumps. هذا الجزء المتبقي من المسلة عادة ما يشكل جزيرة صخرية

صغيرة منخفضة بما فيه الكفاية مما يؤدي إلى غمرها واختفاؤها تحت مياه المد العالي بينما تظهر فقط أثناء الجزر (صورة: ٦).

ومن خلال مراحل تشكيل وتطور المسلة البحرية ميدانياً يمكن تعريف تشكيل المسلة البحرية على أنها عبارة عن عملية تتم بواسطة خط الساحل الصخري الذي يمكن أن يستقيم ويظل أكثر استمرارية، وكفاءة ممرات نقل الرواسب. يتم إنشاء ممرات نقل الرواسب، وتترك المسلات البحرية التي أقتطعت وانفصلت من الرؤوس في الشاطئ القريب. هذه العملية تُشبه عملية قطع المنعطفات النهرية وتشكيل قناة مستقيمة، وترك بحيرة هلائية مقتطعة خلفها. تظل المسلات البحرية تُمارس التحكم على الساحل حتى بعد تشكيلها، وذلك عن طريق ظل المسلات حيث تعمل المسلات على حماية الساحل خلفها من الأمواج المقترنة من الساحل، ويمكن للمسلات البحرية أن تنشأ نقطة تجمع محلية لنقل الرواسب على طول الشاطئ الجانبي. ونتيجة لذلك قد يتشكل التومبولو ويتطور ويعيد اتصال المسلة البحرية باليابس الرئيسي، كما تقوم المسلات البحرية بحماية الجروف البحرية التي تقع خلفها من تأثيرات الأمواج القادمة. وفي النهاية سوف تتآكل المسلة البحرية وتختفي منطقة الظل مما يتسبب في تعديل وضبط مسار خط الساحل مرة أخرى.



شكل (١٠) مراحل تشكيل وتطور المسلة البحرية بمنطقة

الخلاصة:

تُقدم الدراسة الحالية نموذج رقمي وتقييم كمي لتشكيل المسلة البحرية بواسطة البري، فضلاً عن نتائج وتعميمات النموذج التي يمكن تطبيقها على السواحل الفقيرة بالرواسب. تقترح النمذجة الرقمية والتحليلية الفترة الزمنية لتشكيل المسلة البحرية (معادلة: ٤). يوفر البري مصدر لتآكل جوانب الرأس التي تقع في مواجهة البري على طول الساحل الممتد من رأس الغردقة حتى رأس أبو سومة وهو ساحل غني بالرواسب الشاطئية. لوحظ أن العديد من المسلات قد تتشكل بسبب تآكل الرأس في كلا جانبيها، وتقترح الدراسة الحالية آلية البري كآلية ممكنة لتشكيل المسلات بمنطقة الدراسة. تسمح نتائج النموذج الرقمي بتفسير معدل التآكل الانتقائي (N) باعتباره معدل التآكل الانتقائي للجرف البحري الذي لا يحدث بالضرورة نتيجة البري. تطابق هذه العمليات يساعد على اختصار زمن تشكيل المسلة البحرية، وتجعل الرأس أكثر ميلاً لتشكيل المسلة البحرية. ويُفسر هذا إمكانية تطور المسلات البحرية بسرعة جداً خلال عقود أو أقل من الرأس الموجودة، ويُفسر أيضاً انتشار المسلات في بعض السواحل وعدم انتشارها في البعض الآخر.

تنفصل الرؤوس الصخرية عن بعضها بواسطة تجويفات الشواطئ أو بالشروم والخلجان البحرية وهي السمة المشتركة الشائعة بمنطقة الدراسة، ويرجع ذلك إلى انخفاض إمدادات الرواسب المستمرة، وتكون الشواطئ الرملية قليلة الوجود. الشواطئ طويلة ومستمرة ولكن في كثير من الأحيان ضيقة، والرؤوس الصخرية العارية من الرواسب نادرة. على الرغم من أن كثافة المسلات البحرية تتناسب عكسياً مع إمداد الرواسب في هذه المقارنات الأولية، فإنه من الصعب فصل تأثيرات ظروف الموجة، وإمدادات الرواسب، ونوع الصخور من حيث كثافة الشقوق والفواصل لما لها من تأثير مهم في تشكيل المسلات البحرية.



تقترب الأمواج بوضوح من الشاطئ من اتجاهات وزوايا مختلفة، ووفقاً لذلك فإن الشاطئ يظل قريب من الاستقامة بدلاً من الشكل الصدفي الذي يتميز بكثرة النتوءات المدورة، وتراجع الشاطئ الجانبي للرأس ضئيل جداً لذا فإن المسلات البحرية لا يمكن أن تتطور.

يتضح من خلال النموذج الرقمي أنه إذا كان تراجع الجرف ضئيل جداً ولا يذكر بالمقارنة إلى تراجع الجانب المواجه لليابس، وكانت الخصائص الليثولوجية للجرف البحري متماثلة على طول الشاطئ الجانبي فإن تراجع الرأس باتجاه اليابس سوف يتساوى تدريجياً مع تراجع الخليج باتجاه اليابس، والرؤوس سوف تصمد أمام البري لذا لن تتطور المسلات. بالإضافة إلى الشاطئ المستقيم، والعوامل الطبيعية التي يمكن أن تسبب التراجع الجانبي للجرف البحري حيث يكون تأثير تلك العوامل بطيء على الرؤوس لذا يمكن أن يعتمد تآكل الجرف على زاوية الموجة القادمة مما قد يؤدي إلى إبطاء التآكل على جانبي الرأس؛ أو أن الرأس تحمي خط الساحل المحيط من طاقة الأمواج القادمة بما في ذلك جوانب الرأس.

تتميز سواحل الرؤوس المنتشرة بمنطقة الدراسة بالشروط الملائمة لتشكيل المسلات البحرية وهي:

- ١ - ظروف الموجة غير المتماثلة، ٢- الحد الأقصى لقوة البري أو شدة التآكل الانتقائي تكون عالية، ٣- مساحة الرأس الأولية تكون كبيرة، ٤- تتميز أبعاد الرأس الأولية بأن قاعدتها المتصلة باليابس ضيقة نسبة إلى قمة الرأس المتعمقة في مياد البحر، وكبر اتساع الشاطئ المستعرض. وتقتراح المقارنات الأولية لدراسة مواقع المسلات بمنطقة الدراسة أن كثافة المسلة البحرية تتناسب عكسياً مع إمدادات الساحل بالرواسب، على الرغم من العديد من العوامل الأخرى مثل نوع الصخور التي تؤثر على تشكيل المسلة.

శ్రీశ్రీ

تتمتع الرواسب الشاطئية على سواحل الرواس الصخرية الغنية بالرواسب
تسبب تآكل الحروف البحرية وتراجعها، ويتم توزيع الرواسب بواسطة
وسائل نقل الرواسب على طول الشاطئ حيث تسيطر على معدلات تراجع
الحرف البحري هي المستقبل. يمكن للشواطئ أن تدعم أو لا تدعم تآكل
الحرف البحري اعتماداً على تعرض الشواطئ من خلال العمل بإحدى
الطريقتين إما بأداة البري أو بحماية الحروف عن طريق توفير الغطاء
الواقى الذي يبدد طاقة أمواج البحر المتجهة نحو الحرف البحري.

تنتشر تجويفات السواطىء على طول جوانب الرؤوس التي غالباً تكون منحنية وضيقة لتعبر نطاق الموجة لذا فإن البري يمكن أن يُعجل من تآكل وجه الجرف على طول الساطىء. يسبب البري في النهاية التآكل الانتقائي الذي يمكن أن يشق فتاة عبر الرأس، ويفصلها عن اليابس الرئيسي كمسلة وذلك في وجود أمواج متماثلة، حيث يكون تأثير الأمواج المقترنة من خط الساحل متساو من اليمين ومن اليسار.

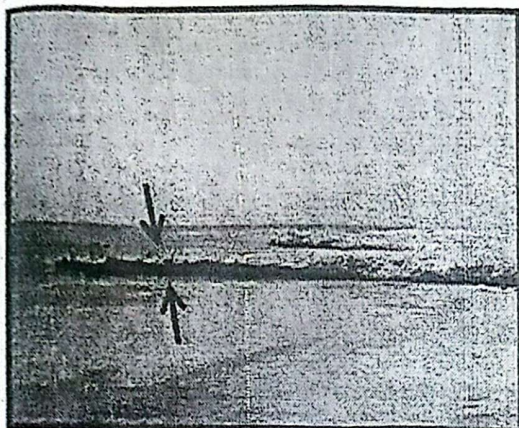
تشير نتائج النموذج الرقمي والتحليلي أن زمن تشكيل المسلة البحرية وحجم الشكل يكون متناسب مع كثافة التآكل الانتقائي التي تسببها الضوابط الجيومورفولوجية والشكلية مثل البري، وضعف الصخور التي تتألف منها الرؤوس حيث تكثر بها الشقوق والفواصل، ونسبة بروز واجهة الرأس الأولية. يضاف إلى هذه الضوابط الجيومورفولوجية والشكلية ظروف الأمواج غير المتماثلة للغاية التي تقلل من حجم المسلة البحرية وتعوق تشكيل المسلة البحرية من خلال تفاعلات رواسب الصخور.

يؤدي التراجع السريع للجرف البحري إلى توفر كميات كبيرة من الرمال والرواسب الشاطئية مما يعوق عملية تشكيل المسلات البحرية. وعندما تكون نسبة بروز واجهة الرأس الأولية في مياه البحر صغيرة جداً، وتكون الرأس مستديرة حيث تكون قاعدتها المتصلة باليابس أكثر اتساعاً في اتجاه الشاطئ الجانبي من قممها المتعمقة في اتجاه البحر؛ لذا يكون شكل الرأس أقل مساهمة في تشكيل المسلة البحرية. وتتم المسلات



البحرية بخمسة مراحل تطورية وهي: مرحلة الرأس الأرضية البارزة في مياه البحر، ومرحلة الكهف البحري، ومرحلة القوس البحري، ومرحلة المسلة البحرية، ومرحلة الجذوع الصخرية.

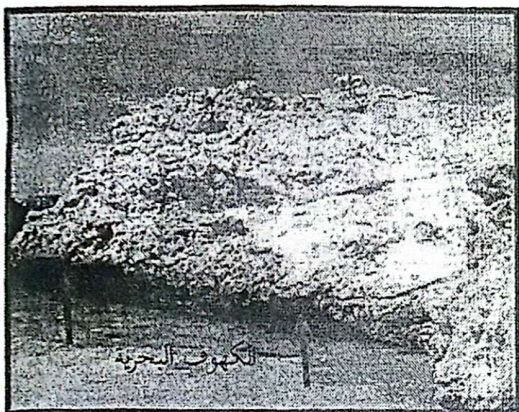
تصلح المسلات البحرية غالباً كمواقع لتعشيش الطيور بسبب عزلتها، وعدم وجود الحيوانات المفترسة وسهولة الوصول إلى المواد الغذائية. أصبحت العديد من المسلات مواقع لتربية الطيور البحرية المهمة مثل النورس وغيرها، حيث يُمكن للمسلات البحرية أن توفر مواقع تعشيش مهمة لتلك الطيور البحرية، والعديد من المسلات يكون محبب لدى راغبي تسلق الصخور وأخذ الصور التذكارية؛ لذا توصي الدراسة بجعل المسلات البحرية بمنطقة الدراسة كمحميات طبيعية. حيث تم رصد تعديات كبيرة على مواقع المسلات البحرية برؤوس الغردقة، وأبو منقار، والضبعة، وأبو سومة من أجل تسوية السواحل لإقامة المنتجعات السياحية.



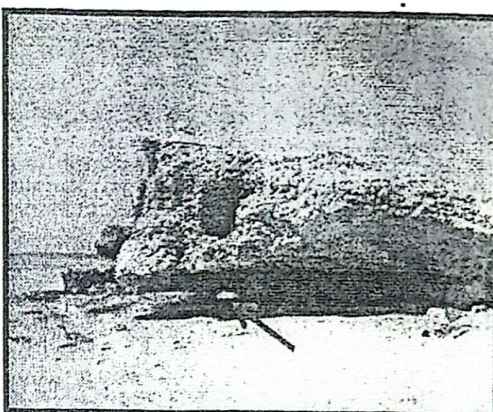
صورة (١) الرؤوس المتممة في البحر وتعرضها لهجمة الأمواج بجزيرة الجفتون الصغرى. وتمثل المرحلة (١) لتشكل المسلة البحرية. الصورة جهة الشمال



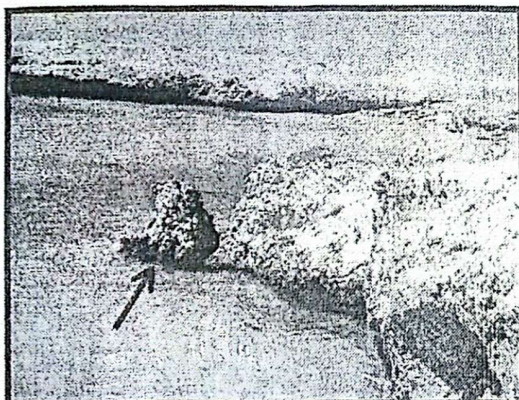
صورة (٢) التحت السطحي في قواعد الرؤوس المتممة في البحر بجزيرة الجفتون الصغرى. الصورة جهة الشمال



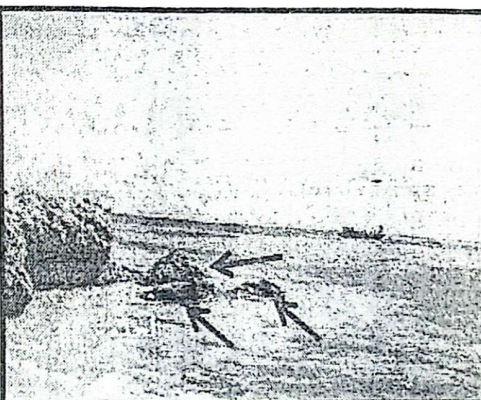
صورة (٣) مرحلة (٢) تشكيل الكهوف البحرية في قواعد الرؤوس بجزيرة الجفتون الصغرى. الصورة جهة الشمال



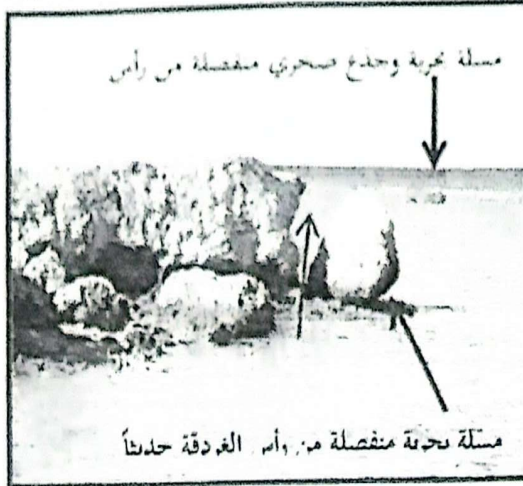
صورة (٤) مرحلة (٣) تطور الكهوف وتشكيل الأقواس البحرية بجزيرة الجفتون الصغرى. الصورة جهة الشمال



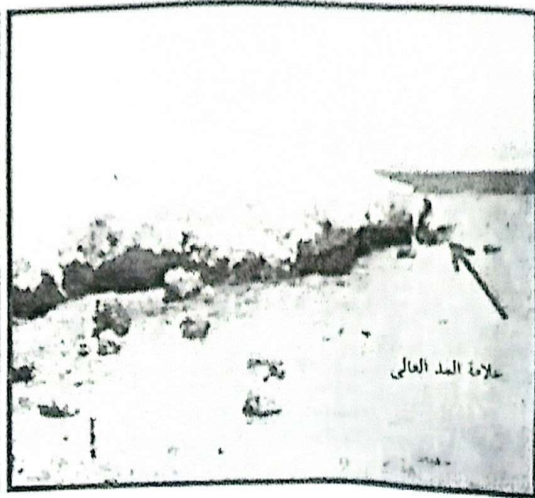
صورة (٥) مرحلة (٤) انهيار القوس البحري وتشكيل المسلة البحرية بجزيرة الجفتون الصغرى. الصورة جهة الشمال



صورة (٦) مرحلة (٥) انهيار وتكسر المسلة البحرية وتشكيل الجنود الصغرى بجزيرة الجفتون الصغرى. الصورة جهة الشمال



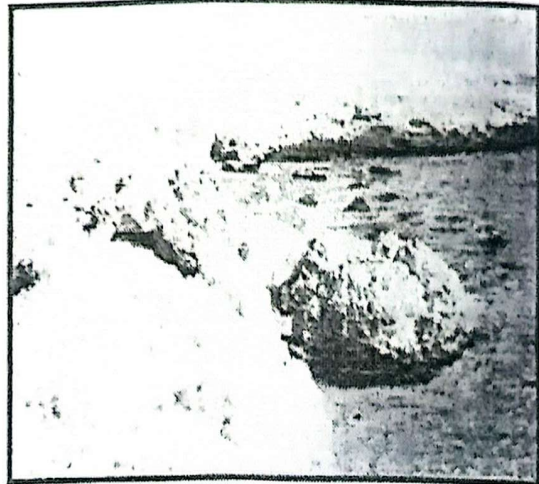
صورة (٧) المسلات البحرية القديمة والحديثة برأس الغردقة
الصدء حنة الشدة



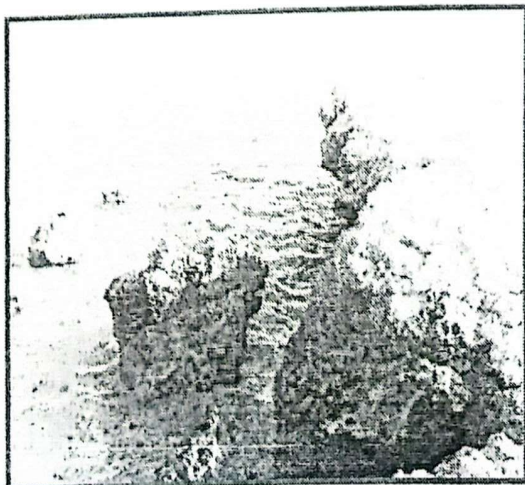
صورة (٨) المسلات البحرية برأس أبو منقار وتظهر عليها علامات
المد العالي أثناء السحمة الصدء حنة الشدة



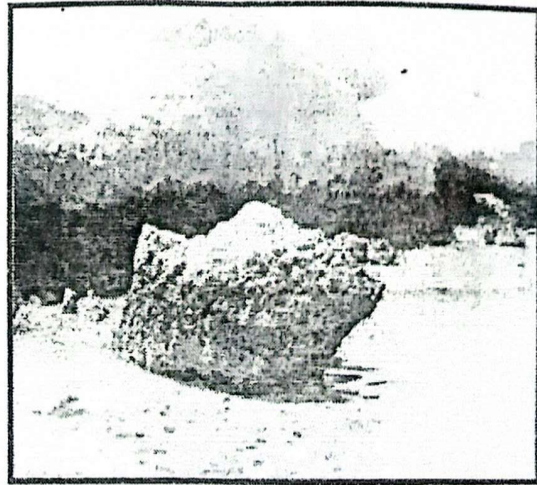
صورة (٩) المسلات البحرية المنتشرة أمام رأس الضبعة، وممر
نقا الداسب الصدء حنة الشدة



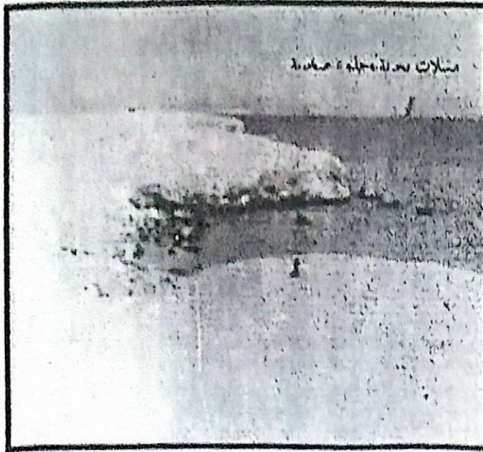
صورة (١٠) المسلات البحرية المنتشرة أمام رأس الضبعة ويظهر
تأرجح الرأس نحو اليمين الصدء حنة الشدة



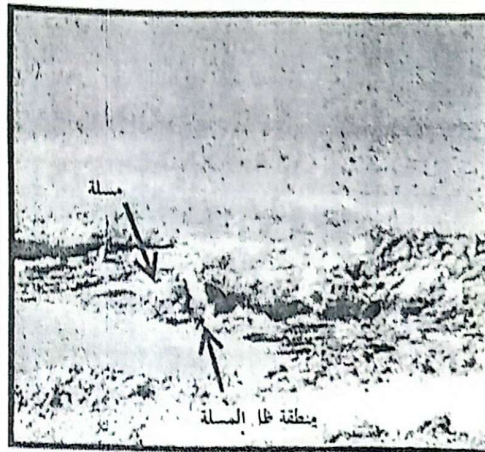
صورة (١١) المسلات البحرية والحذو الصخري المنتشرة أمام رأس أبو
سومة. الصورة جهة الجنوب



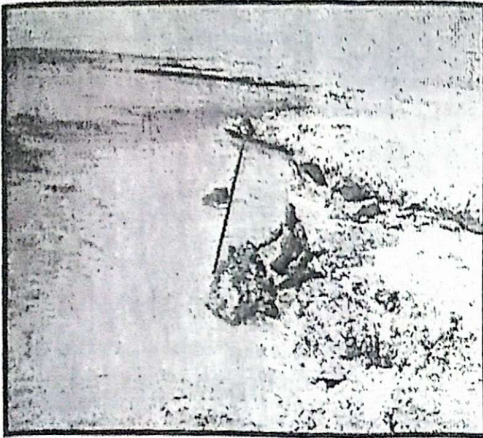
صورة (١٢) المسلات البحرية المنتشرة أمام رأس أبو سومة
منظرة أثناء السحمة علما الصدء حنة الغرب



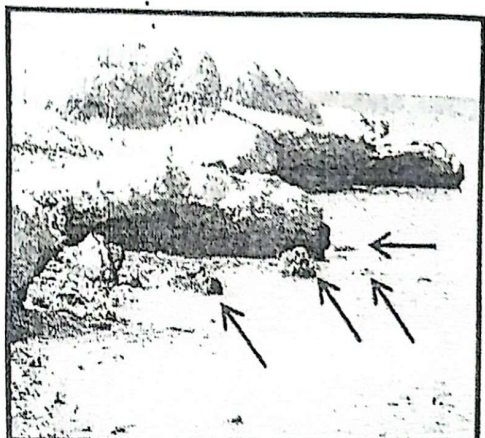
صورة (١٣) المسلات البحرية والجزء الصخرية المنتشرة أمام رأس أم حصاة الصخرة حيد الشدة.



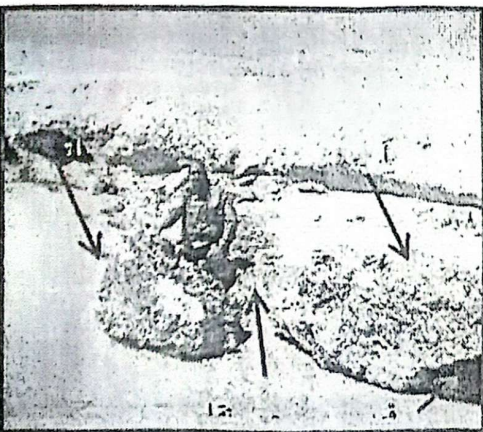
صورة (١٤) مسلة بحرية بجزيرة الجفنون الصغرى، وتظهر منطقة ظا المسلات الرأس والمسلة الصخرة حيد الشدة.



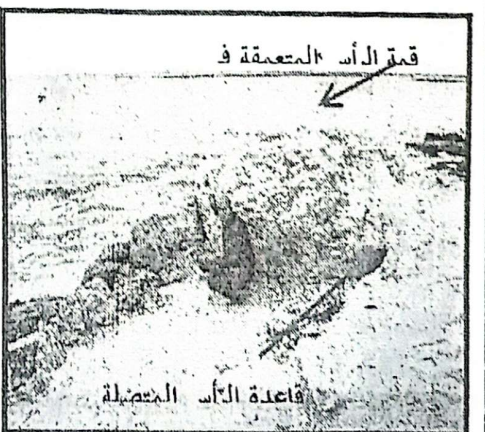
صورة (١٥) ثلاث مسلات بحرية على استقامة واحدة متعمقة في مياه البحر، وتوضح سوي الجرف القديم بجزيرة الجفنون الصغرى. الصورة جهة الشمال



صورة (١٦) الجزء الصخرية المنتشرة برأس أبو حصوة، ويظهر عليها علامات المد العالي الصخرة حيد الشدة.



صورة (١٧) مسلة بحرية، ويظهر ممر نفل الرواسب، ويظهر فوس بحري أسفل الرأس بين الصورة بجزيرة الجفنون الصغرى. الصورة جهة الشمال



صورة (١٨) رأس أرضية على شكل المشروم مما يسهم في تشكيل مسلة بحرية مستقلة الصورة جهة الشمال الشدة



المراجع العربية:

- السيد السيد الحسيني (١٩٨٨): الجزر النيلية بين نجع حمادي وأسيوط (مصر العليا)، رسائل جغرافية، نشرة دورية يصدرها قسم الجغرافيا بجامعة الكويت والجمعية الجغرافية الكويتية، العدد ١١٤، الكويت.
- سيد محمود مرسى (٢٠٠٢): جيومورفولوجية الرؤوس بساحل البحر الأحمر بين رأس جمسة ورأس بناس، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب، جامعة القاهرة.
- كمال الدين حسن البتاتوني (١٩٨٩): الأوضاع البيئية لجزر البحر الأحمر (جزر البحر الأحمر- الملف العلمي) معهد البحوث والدراسات العربية.

المراجع الأجنبية:

- Andrew S. Goudie (2004): Encyclopedia of Geomorphology, Routledge, London, Volume 2.
- Ashton A, Murray AB, Arnoult O. (2001): Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high-angle waves. Nature 414.
- Ashton A, Murray AB. (2006a): High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits, and capes. Journal of Geophysical Research 111.
- at a cliff base. Earth Surface Processes and Landforms 7.
- Beltagy, A.I, (1983): Hydrography of the Red Sea Water Near Al. Hardava, Bull. Inst. Oceanog. And Fish, Cairo, Vol. 9, PP 69-77.
- Blanco-Chao R, Perez Alberti A, Trenhaile AS, Costa Casais A, Valcarcel-Diaz M. (2007): Shore platform abrasion in a paraperiglacial environment, Galicia, northwestern Spain. Geomorphology 83.



- British Admiralty, (1967): Red Sea and Gulf of Aden pilot, London.
 - Dickson ME, Woodroffe CD. (2005): Rock coast morphology in relation to lithology and wave exposure, Lord Howe Island, southwest Pacific. NF 49(2).
 - Emery KO, Kuhn GG. (1982): Sea cliffs: Their processes, profiles, and classification. Geological Society of America Bulletin 93.
 - Glossary of Geology and Related Sciences (1957): The American Geological Institute, USA.
 - Hapke C, Reid D. (2007): National Assessment of Shoreline Change, Part 4: Historical Coastal Cliff Retreat along the California Coast, US Geological Survey Open-file Report 2007. US Geological Survey: Reston, VA; 51.
 - Kline SW, Adams PN, Limber PW. (2014): The unsteady nature of sea cliff retreat due to mechanical abrasion, failure and communication feedbacks. Geomorphology 219.
 - Limber PW, Murray AB, Adams P, Goldstein E. (2014): Unraveling the dynamics that scale cross-shore headland relief on rocky coastlines: 1. Model development. Journal of Geophysical Research - Earth Surface 119.
 - Limber PW, Murray AB. (2011): Beach and sea cliff dynamics as a driver of rocky coastline evolution and stability. Geology 39(12).
 - Naylor LA, Stephenson WJ, Trenhaile AS. (2010): Rock coast geomorphology: recent advances and future research directions. Geomorphology 114.
- of La Jolla, California, and their bearing on similar features elsewhere. Marine Geology 51(1-2).
- Patrick W. Limber and A. Brad Murray. (2015): Sea stack formation and the role of abrasion on beach-mantled headlands, Earth Surface Processes and Landforms 40.



- Porter NJ, Trenhaile AS, Prestanski KJ, Kanyaya JI. (2010a): Shore platform downwearing in eastern Canada: micro-tidal Gaspé, Quebec. *Geomorphology* 116.
- Sallenger AH, Krabill W, Brock J, Swift R, Manizade S, Stockdon H. (2002): Sea cliff erosion as a function of beach changes and extreme wave runup during the 1997–1998 El Nino. *Marine Geology* 187.
- Shepard FP, Kuhn GG. (1983): History of sea arches and remnant stacks
- Soliman, G.F. & Gegres, M., (1983): Effect of Bottom Topography on the tide in the Red Sea. *Bull. Instit. Oceanog. & Fish., Cairo*, Vol. 9, PP. 42-47.
- Sunamura T. (1982): A wave tank experiment on the erosional mechanism
- Sunamura T. (1992): *Geomorphology of Rocky Coasts*. John Wiley & Sons: Singapore.
- Trenhaile AS, Pepper DA, Trenhaile RW, Dalimonte M. (1998): Stacks and notches at Hopewell Rocks, New Brunswick, Canada. *Earth Surface Processes Landforms* 23.
- Trenhaile AS. (2005): Modelling the effect of waves, weathering and beach development on shore platform development. *Earth Surface Processes and Landforms* 30.
- Valvo L, Murray AB, Ashton A. (2006): How does underlying geology affect coastline change? An initial modeling investigation. *Journal of Geophysical Research* 111.
- Walkden MJA, Hall JW. (2011): A mesoscale predictive model of the evolution and management of a soft-rock coast. *Journal of Coastal Research* 27(3).
- Wolinsky MA, Murray AB. (2009): A unifying framework for shoreline migration: 2. Application to wave-dominated coasts. *Journal of Geophysical Research* 114.
- Young AP, Ashford SA. (2008): Instability investigation of cantilevered Sea cliffs. *Earth Surface Processes and Landforms* 33.

