جيومورفولوجية أرصفة الشاطئ بالساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر

د. سيد محمود مرسي سعيد

أستاذ مساعد ، قسم العلوم الإنسانية ، كلية الآداب والعلوم، جامعة قطر

ssaid@qu.edu.qa

تاريخ استلام البحث: ٢٥ / ٧/ ٢٠٢٠

تاريخ قبـول البحـث: ٨ / ٨/ ٢٠٢٠

جيومورفولوجية أرصفة الشاطئ بالساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر

د. سيد محمود مرسي سعيد
أستاذ مساعد ، قسم العلوم الإنسانية ،
كلية الآداب والعلوم، جامعة قطر
ssaid@qu.edu.qa

المستخلص:

تنتشر أرصفة الشاطئ على الساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر، فيما بين دائرتي عرض ٣١° ٢٥′ و ٢٥° ٥٩′شمالًا، وخطي طول ٤٧° ٥٠′ و ١° ٥١′شرقًا. تعد ظاهرة أرصفة الشواطئ البحرية من الظاهرات الجيومورفولوجية المهمة والتي لم تلق اهتماماً كبيراً من الباحثين، وذلك بسبب التركيز على دراسة وفهم الظاهرات الساحلية الأخرى بغرض إدارة وتخفيف حدة أخطارها.

تتميز مورفولوجية أرصفة الشاطئ بوجود نوعين من الأرصفة وهي الأرصفة المنحدرة A (رصيف نحت الأمواج) والأرصفة الأفقية B، وتتميز الأرصفة بصفة عامة بالانحدارات البسيطة والارتفاعات المنخفضة، ويزداد اتساعها بزيادة تراجع الجرف الساحلي، توجد بعض المقاييس الدقيقة لقياس معدلات النحت الصغيرة في صخور الأساس على أرصفة الشاطئ وتتمثل في مقياس النحت الدقيق (MEM)، وتختلف معدلات النحت عبر قطاعات أرصفة الشاطئ، حيث تزداد معدلات النحت على هوامش الأرصفة باتجاه كل من اليابس والبحر عن منتصف الأرصفة، وتظهر بعض الظاهرات الدقيقة فوق أرصفة الشاطئ، مثل حفر الإذابة، المتاريس الشاطئية، الحفر الوعائية الساحلية.

الكلمات المفتاحية: رصيف الشاطئ، الجروف، الأمواج، التجوية، برك الإذابة، الحفر الوعائية الساحلية.

GEOMORPHOLOGY OF SHORE PLATFORM ON THE NORTHWEST COAST OF QATAR PENINSULA

Dr.Sayed Mahmoud Moursi Said
ssaid@qu.edu.qa

Abstract

Shore Platforms spread on the northwest coast of Qatar Peninsula under study extends between Latitudes 25° 31′ - 25° 59′ North and Longitudes 50° 47′ - 51° 1′ East.

The phenomena of marine shore platforms is considered one important Geomorphological phenomena that researchers have not given due attention to because of the need to profoundly understand other marine phenomena to manage and reduce its hazards.

Marine Platform morphologies are characterized by the existence of two kinds of platforms: Type A: sloping platforms (Wave cut platform) and Type B: horizontal platforms. Generally, platforms are characterized by simple slopes and low heights.

Platform expansion is increased by the decrease of the marine cliff. There are accurate measurements to measure the rates of the micro erosions in the foundation rocks in marine platforms, which are micro – erosion meter (MEM).

Erosion rates differ throughout marine platforms sectors. Erosion increases in the margins of the platform to the direction of the land and sea more than it does in the middle of the platforms. Some micro phenomena appear on the shore platforms like solution pools, ramps, and coastal potholes on the platforms.

Keywords: shore platform, cliff, wave, weathering, solution pools, coastal potholes

مقدمة:

تنتشر أرصفة الشاطئ على الساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر، فيما بين دائرتي عرض ٣١° ٢٥′ و٢٥° ٥٩′ شمالًا، وخطي طول ٤٧° ٥٠′ و٥١° ١′ شرقًا. تتميز منطقة الدراسة بالنشأة الصدعية، كما يتميز خط الساحل بتعرجه نتيجة كثرة وجود الرؤوس والخلجان. شكل (١).

تهدف الدراسة الحالية إلى إلقاء الضوء على ظاهرة أرصفة الشاطئ كأحد ظاهرات النحت البحري، ووصف التوزيع المكاني لها واختلاف خصائصها الشكلية. ودراسة توزيع أرصفة الشاطئ وخصائصها وعلاقتها بالعوامل البيئية مثل حركة الأمواج من أجل فهم آلية تطورها.

ولتحقيق أهداف الدراسة، فقد تم الاعتماد على الدراسة الميدانية بصفة أساسية، وذلك من أجل أخذ بعض القياسات المورفومترية للأرصفة، والتقاط بعض الصور الفوتوغرافية. واستخدمت الدراسة نموذج الارتفاع الرقمي DEM لمنطقة الدراسة وتم استخدام برنامج Global Mapper وبرنامج ArcGIS لإنشاء الخرائط، وسيتم دراسة أرصفة الشاطئ من خلال النقاط التالية:

أولًا: جيولوجية منطقة الدراسة.

ثانيًا- التعريفات المختلفة لأرصفة الشاطئ.

ثالثًا: دور التجوية والعمليات البحرية في تطور أرصفة الشاطئ.

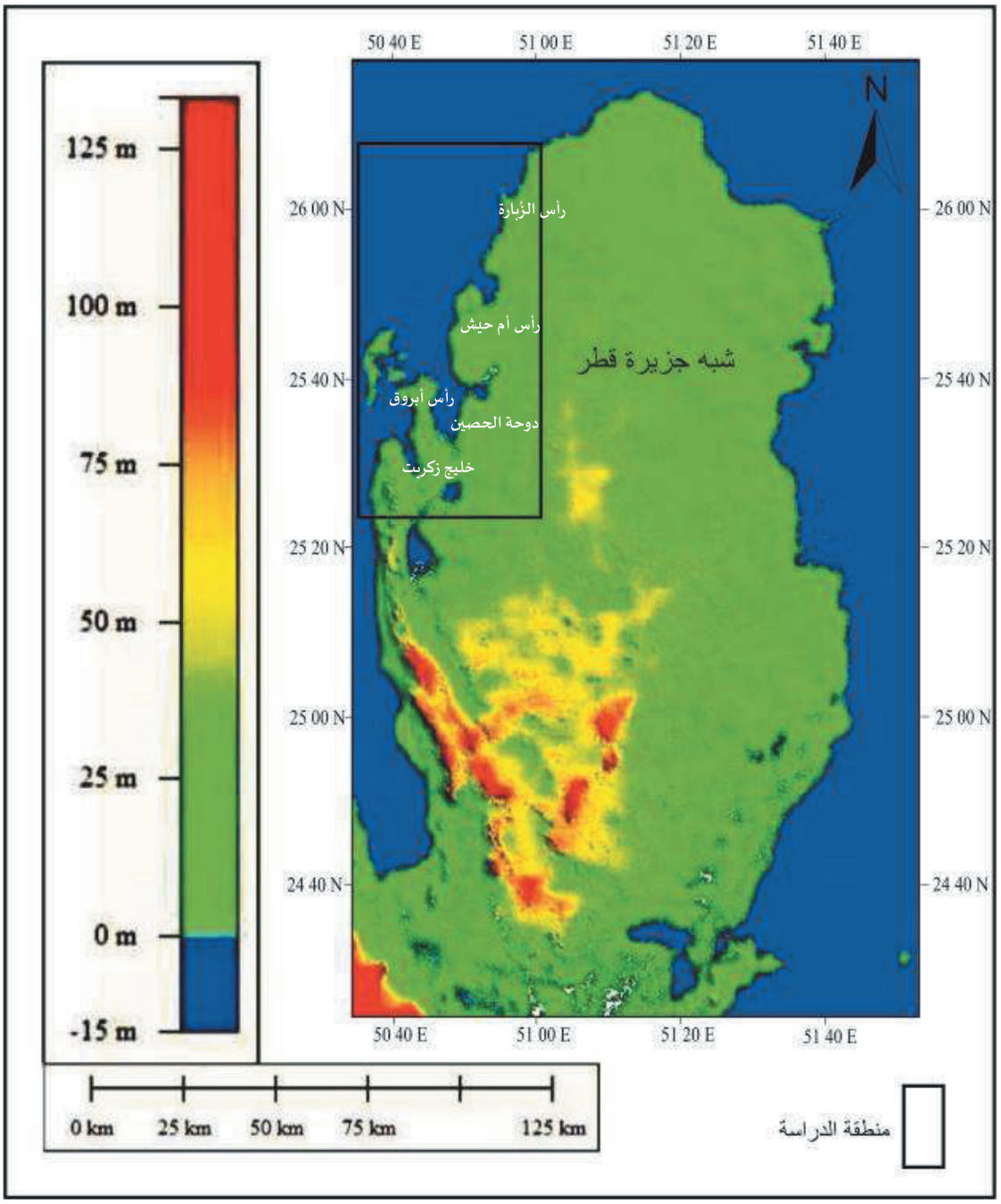
رابعًا: مورفولوجية أرصفة الشاطئ.

خامسًا: التطور الجيومورفولوجي لأرصفة الشاطئ ومراحل تطورها.

سادسًا: معدلات نحت أرصفة الشاطئ.

سابعًا: الظاهرات الدقيقة فوق سطح أرصفة الشاطئ.

ثامنًا: الخاتمة.



شكل (١) موقع منطقة الدراسة وارتفاعات سطح شبه جزيرة قطر

أولًا: جيولوجية منطقة الدراسة:

يتضح من الخريطة الجيولوجية (شكل: ٢) أن التكوينات الجيولوجية السطحية بمنطقة الدراسة تتألف من الصخور الجيرية والرواسب المفككة التي يتراوح عمرها بين الزمنين الثالث والرابع، كما يأتي:

١: تكوينات الزمن الثالث:

تنتشر تكوينات الزمن الثالث بمنطقة الدراسة في تكوين الرس، وتكوين الدمام الذي يُغطي معظم منطقة الدراسة، وفيما يلي عرض لهذه التكوينات.

أ- تكوين الرس (الإيوسيني الأسفل):

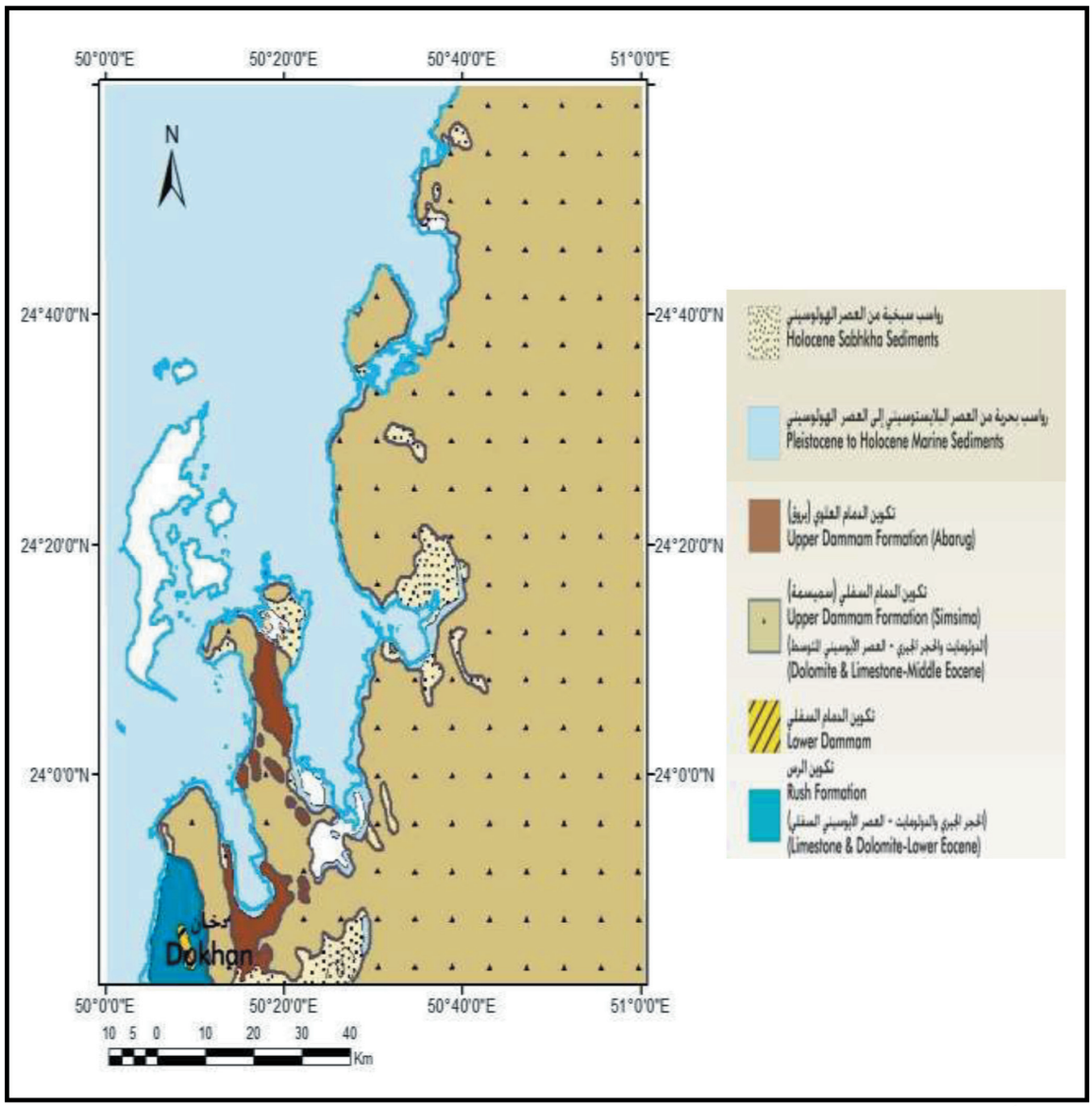
يتكون التتابع من صخور هشة من الطباشير والدولوميت والحجر الجيري الأبيض، والصلصال الأخضر، والجبس، والانهيدريت، وبعض العقد والحصى الكبير الحجم من الكوارتز والصوان التي تُمثل أحد المصادر محليًا لرواسب أرصفة الشاطئ (امبابي وعاشور، ١٩٨٣، ص ٣٦). وتظهر تكوينات الرس إلى الشرق من رأس دخان.

ب- تكوين الدمام (الإيوسن الأسفل والأوسط):

تتألف تكوينات الدمام المنتشرة بمنطقة الدراسة من الحجر الجيري، والدولوميت، والمارل، والطباشير، والصلصال، والجبس، كما تنتشر به بعض الشروخ غير المنتظمة. وتتميز تكوينات الدمام بقلة مقاومتها لعمليات التعرية. تُغطي تكوينات الدمام نحو ٩٠٪ من منطقة الدراسة، ومن ثم أسهمت خصائص صخورها الجيرية قابلة الذوبان والنحت في تشكيل أرصفة الشاطئ والعديد من الظاهرات الجيومورفولوجية الدقيقة فوق أرصفة الشاطئ، مثل حفر الإذابة وغيرها، كما أدى تبادل الحجر الجيري والمارل إلى شيوع ظاهرة التقويض السفلي وتساقط الكتل الصخرية التي تؤدي إلى تراجع الجروف البحرية ومن ثم توفر الرواسب الشاطئية التي يجرفها تيار الأمواج المرتد نحو البحر حيث يُمثل أحد المصادر الأخرى لرواسب أرصفة الشاطئ.

٢: تكوينات الزمن الرابع (البلايستوسين والهولوسين):

تتألف تكوينات الزمن الرابع بمنطقة الدراسة من الرواسب البحرية التي تتمثل في الرواسب الشاطئية والرمال الكلسية ورواسب السبخات، وتتألف من الرمال المفككة وبقايا الأصداف وذرات الكوارتز، والرواسب القارية التي تشمل الرواسب الحصوية والرواسب الطينية السلتية والرواسب الرملية الهوائية ورواسب الأودية. وتتميز هذه رواسب الزمن الرابع بتفككها وقلة مقاومتها للتعرية وسهولة نقلها فوق أرصفة الشاطئ.



المصدر: أطلس قطر الوطني، ٢٠٠٦، ص ١٦

شكل (٢) الخريطة الجيولوجية لمنطقة الدراسة

البنية الجيولوجية:

توثر بنية منطقة الدراسة على أرصفة الشاطئ، حيث تتميز البنية ببساطتها بمنطقة الدراسة. فشبه جزيرة قطر عبارة عن طية محدبة يمتد محورها الطولي في اتجاه شمالي جنوبي (شكل: ٣). وتميل طبقاتها ميلًا خفيفًا نحو الشرق والغرب، ومن الطيات المحلية بمنطقة الدراسة طية زكريت المقعرة، ومحدب أبروق، ومقعر دوحة الحصين. ويرجع لهذه الأشكال البنيوية مسؤولية نشأة بعض الخلجان والرؤوس الأرضية التي ينتشر أمامها أرصفة الشاطئ مثل خليج زكريت، ودوحة الحصين، ورأس أبروق (محمود عاشور،١٩٨٩، ص١٢٩). وتوجد بعض الانكسارات والفواصل والشروخ التي تحف بجبل دخان وبجانبي خليج سلوى. حيث تزيد من نشاط عمليات النحت البحري التي تنشط بصورة كبيرة في منطقة الدراسة بسبب انتشار الالتواءات والانكسارات.

ثانيًا- التعريفات المختلفة لأرصفة الشاطئ:

تُعرف أرصفة الشاطئ shore platforms بمصطلحات عديدة منها؛ رصيف نحت الأمواج wave cut platform، ورصيف جرف نحت الأمواج wave-cut cliff والمائدة الساحلية coastal bench، وتعتمد الدراسة الحالية مصطلح رصيف الشاطئ shore platform. وعرف (López-Fernández, 2020) أرصفة الشاطئ بأنها عبارة عن منحدر هين الانحدار للغاية ينخفض باتجاه البحر وتكون درجة انحداره أقل من ٣° درجة. ووصف (مجدي تراب، ٢٠١١) أرصفة الشاطئ باستواء أسطحها وانحدارها بصفة عامة نحو البحر انحدارًا هينًا. وعرف(Rajarshi Dasgupta, 2010) رصيف الشاطئ على أنه عبارة عن سطح متسع منحدر هين الانحدار يوجد في قاعدة الجرف الساحلي ويمتد إلى البحر. كما وصفها (Goudie,2004) في موسوعته الجيومورفولوجية بأنها توضح أسطح صخرية تشكلت بواسطة نحت وتراجع الجروف الساحلية.

يُمكن تعريف رصيف الشاطئ في الدراسة الحالية بأنه المنطقة الضيقة المستوية نسبيًا التي غالبًا ما توجد في قاعدة الجرف الساحلي على طول ساحل البحر أو ساحل الرؤوس والخلجان أو ساحل الجزر وتتشكل بواسطة نحت الأمواج. تبدو أرصفة الشاطئ أكثر وضوحًا في أوقات حدوث الجزر، حيث يُمكن مشاهدتها كمساحات ضخمة من الصخور المسطحة المستوية. في بعض الأحيان يتم تغطية الجانب القريب من اليابس من أرصفة الشاطئ بالرمال، مما يشكل الشاطئ الرملي، ومن ثم لا يمكن تحديد رصيف الشاطئ إلا عند حدوث الجزر أو عندما يتم إزالة الرمال من فوق رصيف الشاطئ عن طريق العواصف.

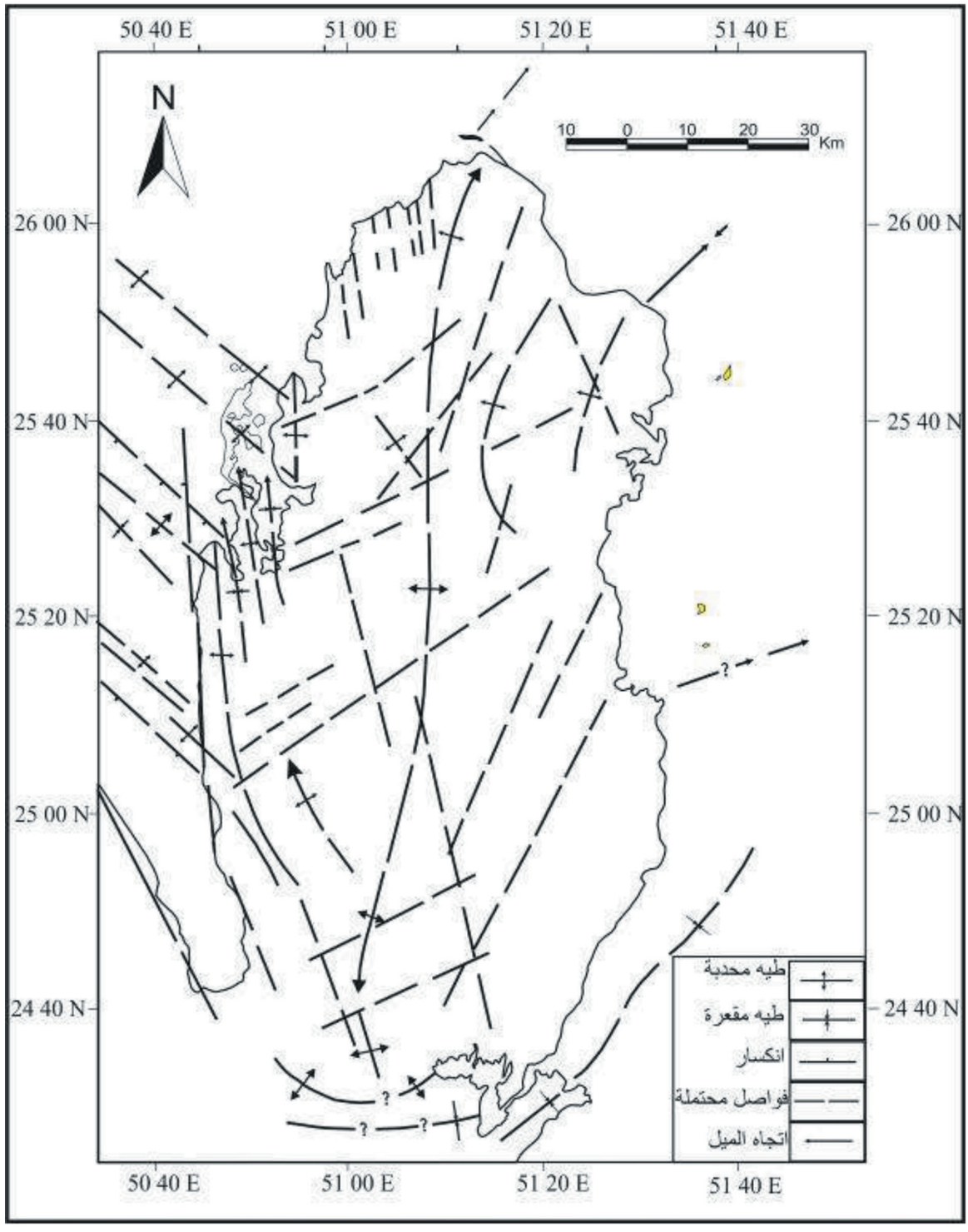
ثالثًا: دور التجوية والعمليات البحرية في تطور أرصفة الشاطئ:

الجروف وأرصفة الشاطئ (أرصفة نحت الأمواج) هي أشكال أرضية توجد عادة على طول الساحل بمنطقة الدراسة. وتُعد عمليات التعرية الساحلية وعوامل التجوية مسؤولة عن تشكيل الجروف. حيث تتآكل بسرعة الصخور الأقل مقاومة للتعرية لتشكل الجروف هينة الانحدار. بينما تشكل الصخور الأكثر مقاومة للتعرية الجروف شديدة الانحدار. وتتشكل أرصفة الشاطئ عندما تتألف الجروف من صخور أكثر مقاومة للتعرية.

تتألف الجروف بالساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر في معظمها من صخور الحجر الجيري الدولوميتي الذي يتميز بكثرة الشقوق والفواصل، والتتابع الطباقي حيث تتعاقب به الصخور الصلبة واللينة القابلة لعمليات النحت حيث لا تزال هذه الجروف تتعرض لعمليات النحت البحري والتقويض السفلي؛ لذا فهي جروف نشطة Active Cliffs تُشرف على رأس أبروق مباشرة، وخليج زكريت، ويتراوح ارتفاعها بين ٣ – ١٠ أمتار (سيد مرسي، ٢٠١٨، ص ٤٤٤). ويؤثر في تشكيل الجروف وتطويرها بمنطقة الدراسة عدة عوامل أهمها:

- **طبيعة الأمواج:** حيث تتوقف عملية التقويض السفلي التي تحدُث للأجزاء الدُنيا من الجروف على طاقة وقدرة الأمواج، بالإضافة إلى عمليات نقل الرواسب التي تتكون من المواد الصخرية المفككة الناتجة عن عمليات التجوية والانهيارات الأرضية أعلى الجرف.

- **خصائص الصخور:** حيث تؤدي خصائص الصخور دورًا مهمًا في تطور الجروف بمنطقة الدراسة، فكلما كثرت مواطن الضعف من شقوق وفواصل وسطوح تطبق ومسامية عالية، زادت فرصة انهيار وتفكك الصخور. وبما أن التكوينات الجيولوجية المكونة لجروف الساحل الشمالي الغربي من



المصدر: امبابي وعاشور، ١٩٨٣، ص ١٧٢

شكل (٣) البنية الجيولوجية لشبه جزيرة قطر

شبه جزيرة قطر تتألف من الصخور الجيرية شديدة التأثر بعمليتي التجوية والانهيارات الأرضية؛ لذا فإن معظم جروف منطقة الدراسة تتعرض للانهيارات الأرضية التي تتمثل في تجوية وسقوط الكتل الصخرية والمفتتات الصخرية من الأجزاء العليا للجروف.

- **المد العالي:** يقوم بدور مهم في عمليات التقويض السفلي عند قواعد الجروف، إذ يُقدر ارتفاع التقويض عند قواعد الجروف بنحو مترًا واحدًا، بينما يصل عمق التقويض في الجروف إلى نحو متر ونصف بمعظم الجروف، وهذا يعكس مستوى المد العالي الذي يصل ارتفاعه إلى نحو متر واحد،

ومن ثم يوجد ارتباط وثيق بين كل من مستوى التفويض بالجروف ومستوى المد العالي. كما أن عدم وجود قدر كبير من التعرية البحرية فوق مستوى التقويض في جروف منطقة الدراسة يؤكد ضعف الأمواج التي تصل إلى تلك الجروف؛ لذا فإن التعرية البحرية على مناسيب مرتفعة غير شائعة في جروف منطقة الدراسة.

كما أن الانحدار الهين لأرصفة الشاطئ الممتدة أسفل هذه الجروف لا يسمح للأمواج بتمشيطها، مما يُلقي العبء على المد والجزر من ناحية، والتيار الساحلي الطولي من ناحية أخرى في جرف المواد وتوزيعها على طول الشواطئ الممتدة أمام الجروف.

- **العوامل البيولوجية:** تؤدي الأحياء البحرية دورًا مُهمًا في تفتيت الصخور وتدميرها في سواحل الجروف بمنطقة الدراسة، وبخاصة أنها تتكون من صخور الحجر الجيري، إضافة إلى تميزها بأنها مناطق ذات طاقة منخفضة، وتتعدد وتتنوع أنواع الطحالب بسواحل الجروف وتُعد الطحالب الخضراء الضاربة للزرقة من أهم هذه الأنواع، حيث تنتشر أسفل الجروف وتقوم بتفتيت الصخور وتهيئتها للنقل بواسطة تيارات المد والتيار الساحلي الطولي وإعادة توزيعها على طول الساحل.

بالنسبة للعمليات المسؤولة عن تطور أرصفة الشاطئ، فتوجد مجموعة من الآراء حول كيفية تطور أرصفة الشاطئ، والرأي المهيمن يرى أن أرصفة الشاطئ يرجع تشكيلها في الأساس إلى قوة نحت الأمواج من مؤيدي هذا الرأي Sunamura (994)، و Aoki and Maekado (2006)، و(1978) Trenhaile ، بينما يري البعض أن عمليات التجوية هي العملية السائدة في تشكيل أرصفة الشاطئ مثل Healy (1968)، و Taylor (2003). وقد أدى هذا الاختلاف فى وجهات النظر إلى ما يسمى غالبًا بمناظرة (الموجه في مقابل تأثير التجوية). وقد تم التعرف على كل من التعرية بفعل الأمواج وبفعل تأثير التجوية لكونها مهمة في تطور أرصفة الشواطئ (شكل: ٤). ومن المقبول أن كل منهما يؤدي دورًا ما ويُساهم بنسب متفاوتة في تطور أرصفة الشاطئ. ومن الملاحظ على هذه الآراء أنها أكدت على هيمنة دور عملية واحدة على الأخر، حيث تُخصص للتجوية دورًا ثانويًا أو للأمواج الدور الثانوي، ويعتبر Kirk (1977)، و Stephenson and Kirk (2000a) هما فقط من أقرا بأن كل من التجوية وعمليات النحت البحرية لهما نفس القدر من الأهمية.

العملية الأولى: التجوية:

يصعب قياس التجوية مباشرة، لكن يُمكن قياس التغيرات المناخية التي تتحكم بها. إن عمليتي التجوية الأكثر شيوعًا على أرصفة الشاطئ هما في الواقع التجوية الملحية، وتجوية طبقة الماء (الترطيب والتجفيف) كما تُعرف باسم التجوية المائية (Stephenson et al., 2013, p. 293).

التجوية الملحية:

تتسبب التجوية الملحية في تآكل أرصفة الشاطئ بسبب تكوين بلورات الملح وتوسيعها. وحدد Cooke and Smalley (1968) ثلاث آليات للتجوية الملحية، هي: (١) نمو بلورات الملح من المحلول، (٢) التمدد الحراري، (٣) ضغوط الترطيب والتشبع بالماء (التميؤ). وتعتمد كفاءة التجوية الملحية في تآكل أرصفة الشاطئ بصورة كبيرة على درجة تشبع المحلول حيث لها أهمية كبيرة بالنسبة للتجوية الملحية. حيث تتأثر صخور الحجر الجيري التي تتألف منها أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة بسهولة بعملية التجوية الملحية. حيث يرجع التآكل في أرصفة الشاطئ خاصة في الجزء العلوي من منطقة المد والجزر (أي أعلى من أدنى مستوى للمد والجزر) بشكل كامل تقريبًا إلى التجوية الملحية.

تجوية طبقة المياه water layer weathering (الترطيب والتجفيف):

تؤدي عمليات الترطيب والتجفيف wetting and drying دورًا مهمًا في تآكل وتطور أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة، وهذه العملية ثابتة داخل منطقة المد والجزر بين أدنى مستويات المد والجزر وأعلى مستويات المد والجزر. وقد لوحظ ميدانيًا أن فعالية الترطيب والتجفيف تقل مع الارتفاع عبر منطقة المد والجزر. كما لوحظ أيضًا أن الترطيب والتجفيف ليس فعالًا في الجزء الأدنى من منطقة المد والجزر (أي أقل من أعلى انخفاض في مستوى المد والجزر)؛ بسبب عدم كفاية فترات التعرض للترطيب وفترات تجفيف أقصر (Rajarshi Dasgupta, 2010, p186).

يوجد بمنطقة الدراسة عدد من دورات الترطيب والتجفيف في السنة اعتمادًا على بيانات المد والجزر والمطر، كما يوجد تغير في عدد الدورات عبر الأرصفة المرتبطة بتغيرات المد والجزر ونمو الطحالب خلال شهور الشتاء. والعدد الأكبر من دورات الترطيب والتجفيف يحدث بالقرب من نقطة اتصال رصيف الشاطئ بالجرف الساحلي باتجاه اليابس حيث تكون أعلى معدلات النحت.

وللتحقق من أثر التجوية على أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة لتحديد مدى مقاومة الصخور لعمليات التجوية على أساس قيمة الارتداد بواسطة مطرقة شميدت؛ لذا فقد تم استخدام اختبار مطرقة شميدت (Stephenson and Kirk (2000b باستخدام مقياس النحت الدقيق، حيث وُجدَ أن صخور الحجر الجيري التي تتألف منها أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة تتميز بقلة صلابتها، ويبلغ متوسط رد الفعل من الصخور المجواه ١٣,٥، ومن الصخور غير المجواه ٢٩,٨، وبناء عليه يُمكن حساب مؤشر ضعف الصخر الذي يُعبر عن مدى صلابة الصخر بعد تعرضه لعمليات التجوية عن طريق المعادلة التالية: (متوسط متوسط رد الفعل من الصخور المجواه ١٣,٥ × ١٠٠ ÷ متوسط رد الفعل من الصخور غير المجواه ٢٩,٨) وبالتالي يبلغ المؤشر ٤٥,٣٪. مما يوضح التأثير الكبير لعمليات التجوية في إعادة تشكيل وتطور أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة.

وتتعرض صخور حضيض الجروف أثناء الجفاف إلى التجوية الميكانيكية من خلال عملية النمو البلوري للأملاح داخل الشقوق وبين المسامات الصخرية، بالإضافة إلى سيادة التجوية الكيماوية الناتجة عن التفاعل الذي يتم بين المعادن المكونة للصخر ومياه البحر التي تصل إلى الساحل بصورة دورية، ويمتد نطاق التجوية من الحد الأعلى لرذاذ الأمواج حتى المنطقة دائمة التشبع، وينتج عن هذه التجوية تنقير للصخر وتحززات مختلفة الأحجام تمتد على سطح الرصيف، وتتباين هذه الملامح المورفولوجية الدقيقة نتيجة الخصائص الليثولوجية، وينتج في النهاية رصيف شاطئ مرتفع نسبيًا يتميز بنعومة سطحه وافقيته وعادة ما يكون مستواه قريبًا من مستوى الماء عند علامة المد المرتفع ويمثل سطح الرصيف المنسوب الأعلى للصخور دائمة التشبع (صبري محسوب، ١٩٩١، ص ١٠٧-١٠٩).

وتتأثر عمليات التجوية المائية بنظم الأمواج السائدة على السواحل حيث تنشط كثيرًا مع الأمواج الضعيفة المنخفضة، بينما يقل نشاطها مع الأمواج القوية التي بدورها تقوى عملية التحجير والحت الموجي بدرجة يمكن أن تختفى معها التجوية الكيماوية. وبصفة عامة يظهر تأثير التجوية المائية في السواحل ذات المناخ الرطب المرتبط بمعدلات تبخر منخفضة ومد وجزر نصف يومي ولكنها تكون نشيطة ومؤثرة بدرجة كبيرة جدًا في السواحل ذات معدلات التبخر المرتفعة والمد والجزر اليومي والمختلط كما في الساحل الغربي من شبه جزيرة قطر، حيث يزداد معدل انخفاض سطح الأرصفة الشاطئية نتيجة لفعل التجوية المائية.

تؤثر عملية التجوية في درجة وعورة سطح أرصفة الشاطئ، والوعورة مؤشر مهم لدرجة التجوية والعمر النسبي للأجزاء المختلفة من أرصفة الشاطئ. ويُعرف Taylor AJ (2003) وعورة رصيف الشاطئ على أنها الدرجة التي يختلف بها سطح أرصفة الشاطئ عن متوسط الانحدار، واختيار مقياس الوعورة مهم جدًا، حيث يُمكن استخدام مقياس المليمتر والسنتيمتر. وتتراوح درجة وعورة سطح أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة بين ١٢ سم و٢١ سم. ويتضح من درجة الوعورة أن عمليات ومعدلات التجوية على أرصفة الشاطئ تزداد بالقرب من البحر نتيجة لتكرار عمليات الترطيب والتجفيف، كما يدل أيضًا على أن الأجزاء الوعرة من أرصفة الشاطئ هي أجزاء موروثة من مستويات سطح البحر الماضية (صورة:٣). \ وقد رصد الباحث بأرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة عملية مهمة تسمى Beach Etching " حفر الشواطئ " تؤدي دورًا مهمًا في تكوين ظاهرات ثانوية في صخور الحجر الجيري التي تتألف منها أرصفة الشاطئ بالساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر. وهذه العملية وصفت بأنها تجوية الصخر الرطب اللين أسفل الشاطئ (Twidale and Campbell,1999:1385). واعتمادًا على التفسير المورفولوجي في عمليات تشكيل أرصفة الشاطئ، فعملية حفر الشاطئ ربما تكون عملية تطويرية مسئولة عن تعرية الأسطح الناعمة جدًا لبعض الأرصفة الشاطئية. وقد سجل الباحث هذه العملية بأرصفة الشاطئ على الساحل الشرقي لخليج زكريت (صورة: ٤).

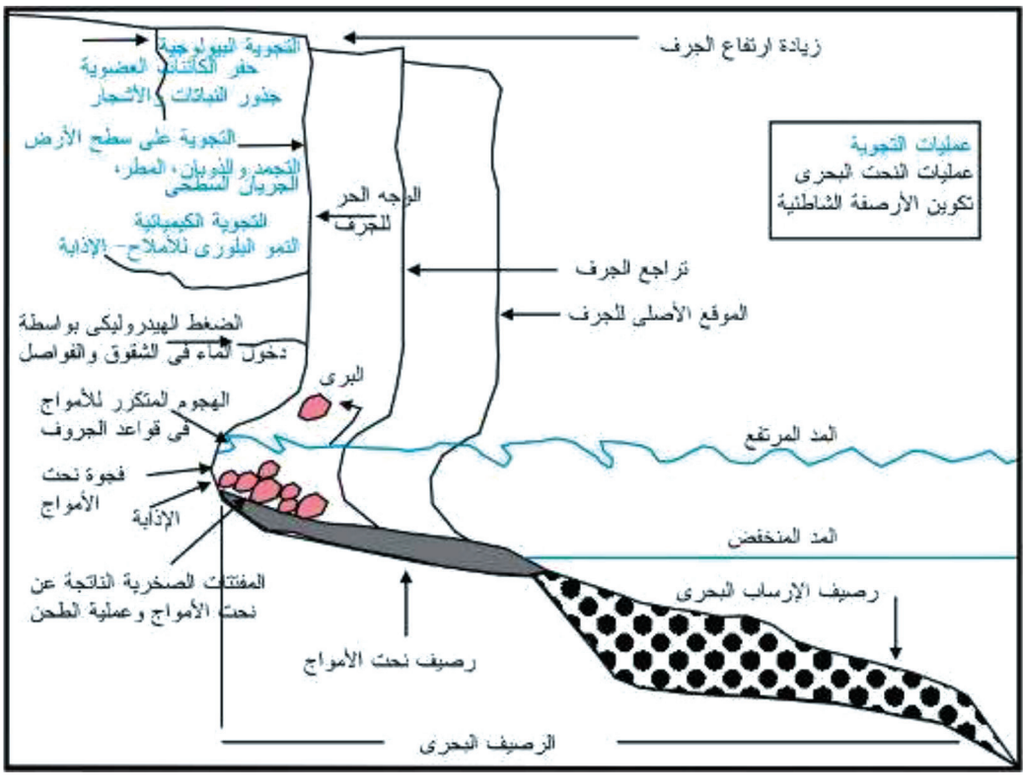
العملية الثانية: عملية النحت بفعل الأمواج:

يتضح من خلال الدراسة الميدانية لمواقع أرصفة الشاطئ على الساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر أثر كل من نحت الأمواج والتجوية في تطور أرصفة الشاطئ، حيث إن أرصفة الشاطئ في بيئات أمواج العواصف المندفعة تنتج من نحت الأمواج، وخاصة ضغط الهواء في الشقوق الصخرية والقوى التأثيرية للأمواج المنكسرة، حيث تكون قدرتها على النحت غير محددة. وتُعد التعرية بفعل الأمواج العملية المُشكلة للأرصفة بمنطقة الدراسة، اعتمادًا على مورفولوجية الأرصفة والملاحظات الميدانية للأمواج التي تصل إلى السواحل الصخرية بها.

تمتاز خصائص الأمواج بالساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر بأنها أمواج قصيرة وقليلة الانحدار وأكثر تكسرًا من أمواج البحار المفتوحة، ويتراوح ارتفاع الأمواج بين الهادئة ١,٢ متر والأمواج الهائجة ٢,٤ متر. يتضح من خلال الملاحظات الميدانية أن الأمواج المتكسرة بمنطقة الدراسة، والتي تدفعها الرياح صوب السواحل الصخرية هي العامل الرئيسي الذي يساعد على النحت البحري وتشكيل أرصفة الشاطئ.

يُمكن وضع تصور لتشكيل أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة بناءً على الملاحظات الميدانية لأرصفة الشاطئ والتي توضحها الصورة (١)، ومن خلال الشكل (٤)، كما يلي:

تهاجم أمواج البحر نقطة ضعف في قاعدة الجرف الساحلي. والتي يُمكن أن يكون هذا مفصلًا في صخور الحجر الجيري التي يتشكل منها ساحل منطقة الدراسة، حيث يتم إنشاء فجوة الأمواج Wave Notch من خلال عمليات التقويض السفلي لقواعد الجروف المنخفضة التي لا تزيد في ارتفاعها عن عشرة أمتار بفعل قوة الأمواج خاصة الفعل الهيدروليكي للأمواج، وعملية البري التي تقوم بها الأمواج الحاملة للمواد الصخرية التي تستخدمها كمعاول للنحت. وعندما تصبح فجوة الأمواج أكبر حجمًا، يصبح الجرف غير مستقر وينهار نتيجة للجاذبية الأرضية. ثم يتراجع الجرف باتجاه اليابس. ثم لا تلبث أن تتآكل المواد المنهارة من وجه الجرف وتُنقل بعيدًا بفعل الأمواج وبالتالي يتشكل رصيف الشاطئ (رصيف نحت الأمواج). ثم تتكرر العملية بمرور الوقت.



المصدر: سيد مرسي، ٢٠١٠، ص٢

شكل (٤) العمليات البحرية المسئولة عن تكون أرصفة الشاطئ

يؤدي الهواء المحتبس في الشقوق والفواصل المنتشرة بصخور الحجر الجيري التي تُشكل ساحل منطقة الدراسة نتيجة الفعل الهيدروليكي للأمواج الذي تمارسه على الصخر دورًا كبيرًا فى تفتيت الصخر، فعندما ترتطم مياه الأمواج بصخور الساحل ذات الشقوق والفواصل، ينضغط الهواء المحتبس فى تلك الفجوات انضغاطًا فجائيًا، فيتفسخ جسم الصخر، وعندما تتراجع مياه الأمواج صوب البحر، يندفع الهواء المحتبس خارجًا بقوة ويتمدد بصورة فجائية، فيحدث فراغًا، ويقتلع كتل الصخر ويكسره، صورة (٢)، ويلتقط الموج هذا الحطام الصخرى ويعركه جيئة وذهابًا، فتهذب حوافه، ويميل إلى التكور، وتصغر أحجامه بمرور الوقت، فتتكون من رواسبه الشواطئ الحصوية والرملية (صلاح الدين بحيرى، ١٩٧٩، ص٣١٠).

يُمكن تقسيم العمليات البحرية marine processes المتعلقة بقوة نحت الأمواج، والتي تُسهم في تطور الأرصفة الشاطئية إلى عمليتين أساسيتين هما:

١- عملية التحجير الموجي Wave Quarrying:

تقوم الأمواج من خلال عملية التحجير الموجي بحركة جذب وسحب للمواد والمفتتات الصخرية التي ساعدت على تفصلها وتكسرها وتفتتها عمليات التجوية في مرحلة سابقة من أوجه الجروف التي تواجهها وتلقيها بعيدًا عنها باتجاه الشاطئ القريب near shore، (صورة: ٣)، وينتج عن التحجير الموجي عادة رصيف شاطئ ينحدر نحو البحر ويتميز باستواء سطحه خصوصًا ما إذا كانت طبقاته تميل متطابقة مع سطح التحجير، وبصفة عامة الصخور المائلة والمنحدرة تكون أكثر قابلية للتحجير الموجي بسبب انكشاف سطوح الضعف الصخري أمام هجوم الأمواج على معظم أجزاء الرصيف (صبري محسوب، ١٩٩٨، ص٣١٩). وتتباين عملية التحجير الموجي من ساحل إلى آخر تبعًا لاختلاف نوع الصخور المكونة للجروف ودرجة تجويتها ومعدلات نشاط عمليات الانهيارات الأرضية بها بفعل الجاذبية وغيرها.

ولقد طبق الباحث المعادلة التي اقترحها Thornton and Guza (1982) لحساب عمق كسر الأمواج ذات الخصائص المتنوعة، وهي: $Yh\ (Hrms) =$ ، حيث Hrms هو الجذر التربيعي لمتوسط ارتفاع الموجة ، و h هو عمق كسر الموجة، Y هو بُعد ثابت بقيمة ٠,٤٢.

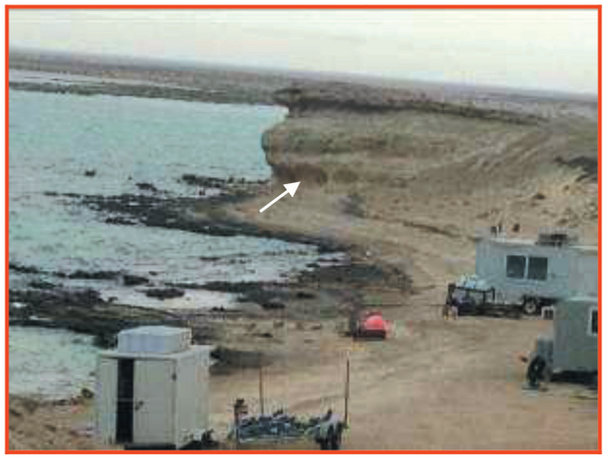
وبتطبيق المعادلة لقياس ضعف الموجة فوق أرصفة الشاطئ المنتشرة بالساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر وتحديدًا في نطاق المد والجزر، وُجدَ أن الأمواج تفقد معظم طاقتها عند وصولها إلى أرصفة الشاطئ بسبب ضحولة المياه وانكسار الأمواج، ولا يصل إلى الحافة البحرية من أرصفة الشاطئ في منطقة الشاطئ البعيد سوى ٩٪ فقط من طاقة الأمواج، حيث يبلغ مدى المد على الساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر ١,٨ متر (سيد مرسي، ٢٠١٧)، وبالتالي يُعد ساحل منطقة الدراسة ضمن السواحل قليلة المد أقل من ٢ متر. ومن ثم فإن الأمواج ليست فعالة بدرجة كبيرة فوق أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة نظرًا لأنها منطقة ساحلية ذات مد وجزر صغير، بينما تكون الأمواج فعالة بدرجة كبيرة للنحت في بيئات المد والجزر الكبيرة أكثر من ٢ متر.

يتضح مما سبق أن الأمواج المندفعة باتجاه أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة لم تكن قادرة على إحداث التعرية لأن الأمواج الأكبر تتكسر في مياه أعمق أبعد من الشاطئ وتحتاج لأن تتزاحم على مسافات أكبر قبل الوصول إلى حافة الجرف. ويرجع السبب في عدم قدرة الأمواج المقاسة على الأرصفة في إحداث التعرية إلى الفقدان الكبير لطاقة الأمواج خلال التزاحم، كما أن الأمواج التي تلتقي على أرصفة الشاطئ تقل بشكل كبير في الارتفاع والضغط وبالتالي تكون أقل من القوى الضاغطة للسطح الصخري. وتتفق هذه النتيجة مع توصل إليه كل من Stephenson and Kirk (2000a) فيما يتعلق بأن الأمواج المقاسة على أرصفة الشاطئ ليست فعالة بدرجة كبيرة للنحت مقارنة بموجات المياه العميقة المقاسة بشكل متوافق، حيث قدرا أن الطاقة المفقودة من المياه العميقة المنحدرة باتجاه أرصفة الشاطئ الواقعة أسفل الجروف البحرية تقدر بنحو من ٥ إلى ٦ درجات على رصيف الشاطئ.

٢- عملية الحت (البري) الموجي Wave Abrasion:

يُقصد بها تفتت وتكسر المواد الصخرية بفعل الأمواج المحملة بأدوات النحت Abrasion Tools من رمال خشنة وحصى وجلاميد، فهي عملية تكسير فزيائي للصخور وطحن للمفتتات debris attrition من خلال تكرار تقدم وتراجع الأمواج على طول الشاطئ. وتختلف قوة عملية الحت الموجي باختلاف طاقة الأمواج وكمية أدوات البري التي تتسلح بها

الموجة، فهي تزداد قوة مع توفر الحصى والجلاميد الصغيرة المتوفرة بساحل منطقة الدراسة، ويؤدي الحت الموجي إلى صقل رصيف الشاطئ بواسطة أدوات الحت ويُعرف حينئذ باسم رصيف نحت الأمواج (صورة:٢).



صورة (١) فجوات نحت الأمواج وأرصفة الشاطئ بالساحل الشمالي الشرقي لرأس أبروق، وتعبر الصورة عن الأرصفة الشاطئية في مرحلة الشباب.
التصوير: جهة الشرق.

صورة (٢) اقتلاع الكتل الصخرية بفعل الهواء المحتبس في الشقوق والفواصل المنتشرة بالجروف الواقعة إلى الجنوب الشرقي من رأس أبروق، كما يتضح من الصورة رصيف نحت الأمواج تكثر به تشققات التجوية، والحصى البحري.
التصوير جهة الجنوب الشرقي

صورة (٣) أحد أرصفة الشاطئ التي تتميز بشدة وعورتها نتيجة عمليات الترطيب والتجفيف بخليج زكريت، وتظهر برك الإذابة بعد جفاف المياه وتكون قشرة ملحية في قاعها.
التصوير: جهة الغرب.

صورة (٤) عملية التخفيض الرأسي لسطح أحد أرصفة الشاطئ على الساحل الشرقي لخليج زكريت، كما تنتشر فوقه بعض الحفر الصغيرة والتي قد تلتحم مكونة حفر أكثر اتساعًا فيما يعرف بعملية حفر الشاطئ.

يتضح من خلال العرض السابق لديناميكية حركة الأمواج على أرصفة الشاطئ أن الأمواج تكون فعالة للتآكل في بيئات المد والجزر الكبيرة، وليست فعالة جدًا في مناطق المد والجزر الصغيرة. ومع ذلك، فإن كفاءة بري الأمواج والتحجير الموجي لا تعتمد فقط على نطاق المد والجزر؛ بل تلعب خصائص الصخور أيضًا دورًا مهمًا. حيث إن الصخور الأقل صلابة التي تتألف منها بعض أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة تتعرض للتآكل بسهولة أكبر من الصخور الصلبة. (Moses et al, 2006, p 19-37).

كما أكد (Kennedy and Beban (2005 على حقيقة أن الأمواج في الصخور شديدة الفواصل مثل الساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر، تكون لديها إمكانات كبيرة لانتزاع الصخور بحجم اليد من أرصفة الشاطئ.

يُمكن القول مما سبق أن عملية النحت بفعل الأمواج ليس لها قيمة نحتية في تشكيل أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة إذا ما خلت هذه الأمواج من أدوات البري التي توفرها لها عمليات التجوية من واجهات الجروف وتستخدمها الأمواج في نحت وصقل أرصفة الشاطئ فيما بعد.

العملية الثالثة: العملية البيولوجية:

يُعد الفعل البيولوجي على أرصفة الشاطئ أحد العمليات المهمة في تطور أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة. وذكر (Trenhaile, 1987) عدد من العوامل التي تحكم العملية البيولوجية التي تتم على أسطح أرصفة الشاطئ منها: نوع الكائنات الحية، وتوافر الرطوبة، وخصائص المد والجزر، ودرجة الحرارة، ودرجة التعرض لأشعة الشمس، وملوحة الماء.

يتضح من خلال لدراسة الميدانية أن عملية التآكل ليست العملية الوحيدة التي تقوم بها الكائنات الحية على أرصفة الشاطئ بل تقوم بدور وقائي أيضًا،

واقترح (Naylor et al. (2002 أن هناك عملية ثالثة تقوم بها الكائنات الحية على أرصفة الشاطئ، والتي تُسمى البناء الحيوي bioconstruction، ويقصد بها تراكم رواسب الرسوبيات. وهذه العمليات الثلاث مترابطة، وتحدد معًا عمل الكائنات الحية على أرصفة الشاطئ.

إن العملية البيولوجية التي تتم على أرصفة الشاطئ لها أثرين: أولهما أثر نحتي حيث تسبب التعرية البيولوجية التي يمكن أن تكون منقسمة إلى المكونات البيوميكانيكية والبيوكيميائية، وثانيهما أثر وقائي حيث تؤخر أو تمنع عمليات التعرية الأخرى التي يُمكن أن تتم على أرصفة الشاطئ Miller and Mason (1994).

فبالنسبة لدور الكائنات البحرية في عملية النحت فهي تؤدي دورًا كبيرًا في تجوية وتفتيت الصخور الجيرية بأرصفة الشاطئ، وتزداد فعالية النحت البيولوجى فى نطاق المد والجزر. كما يرتبط ازدهارها بمنطقة الدراسة لأنها سواحل تتميز بأمواجها ذات طاقة منخفضة وخاصة أن صخورها تتكون من الجير أو تتلاحم بواسطته. ينتج عن النحت البيولوجى بواسطة الطحالب والفقاريات تفتيت السطح الصخري للرصيف وتشكيل العديد من الشقوق والحفر المنتشرة على الأرصفة خاصة فى قواعد الجروف عند مستوى المد المرتفع، ثم يلي ذلك عملية إزالة للمفتتات المجواه بفعل الأمواج من سطح الرصيف الذي تم إعداده وتجويته مسبقًا بفعل الطحالب، وبذلك تُعد عملية النحت البيولوجى عملية مؤثرة في تطور أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة (صورة ٥).

أما بالنسبة للدور الوقائي للكائنات الحية فيتمثل في نمو الحيوانات والنباتات البحرية بغزارة بالقدر الذي يشكل تقريبًا غطاءً متصل للأسطح الصخرية تحت مستوى سطح البحر، ونمو الكائنات الحية البحرية بمثل هذه الكثافة الغطائية قد تمنع عملية النحت والتحجير الموجي. وهناك أثر أخر وهو دور الزوائد البحرية المتكونة من عُشب البحر في حماية أرصفة الشاطئ، حيث تمنع أسطح أرصفة الشاطئ من التجفيف؛ لذا تحد من امتداد توسع تجوية الترطيب والتجفيف. وقد لوحظ ميدانيًا أن الطحالب البحرية تشكل غطاءً مكتملًا تقريبًا على أحد أرصفة الشاطئ على الساحل الشرقي لخليج زكريت، وهذا يشير إلى أن التحجير والحت الموجي يكون محدود عند تطور هذا الرصيف في ظل التواجد الكثيف لتلك الطحالب. وقد يرجع انخفاض معدلات النحت جزئيًا بأرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة في أشهر الشتاء إلى تأثير نمو الطحالب. حيث تؤثر فصلية نمو الطحالب في تقليل عدد دورات الترطيب والتجفيف على الأرصفة خلال فصل الشتاء عن طريق منع وإعاقة حدوث التجفيف.

يُلاحظ من الدراسة الميدانية لأحد أرصفة الشاطئ على الساحل الغربي لرأس أبروق أن رصيف الشاطئ المرتفع (فوق العادة) يتميز في الغالب بوجود مجموعة متنوعة من

النباتات، والتي تعمل كغطاء واقٍ، وبالتالي تعمل على الحد من تآكل الرصيف بفعل عمليات التجوية. من ناحية أخرى، رصيف الشاطئ الحديثة المعاصرة (المدي) الذي يقع مباشرة تحت الرصيف الأول، يتميز بغياب غطاء النباتات ووجود العديد من الكائنات الحية المسببة للتآكل الحيوي (صورة ٦).

يتضح مما سبق أن كل من عمليات نحت الأمواج والتجوية تكون مهمة لتطور أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة، حيث تؤدي كل منها دورًا في تطور الأرصفة. ولأن الأمواج ذات الطاقة العالية تكرار حدوثها قليل بمنطقة الدراسة؛ لذا فإن أمواج العواصف قد تحدث مزيد من النحت ولكنه نحت أقل من النحت الذي تحدثه عمليات التجوية؛ لذلك لا تستطيع الأمواج أن تنحت الأرصفة الشاطئية بدون مساعدة عمليات التجوية. فالأمواج ليست قادرة على الحد من قوة الضغط الناشئة على الصخور، ولكن التجوية تستطيع فعل ذلك، لذلك يمكن أن يرجع تطور أرصفة الشاطئ في منطقة الدراسة إلى عمليات التجوية. إلى أنه فى بعض الحالات تنحت الأمواج الصخور التى أضعفتها عمليات التجوية فى مرحلة سابقة. وهذا يعني، أن التجوية تقلل من قوة الضغط الناشئة على الصخور إلى النقطة التي يُمكن أن تستطيع معها الأمواج أن تسبب النحت. والخلاصة أنه بدون عمليات التجوية وإضعاف الصخر وتهيئته وإعداده للنحت مسبقًا لا يمكن تشكيل أرصفة شاطئية بمنطقة الدراسة. وعلى العكس، بدون الأمواج لا يمكن إزالة المواد المجواه بصفة مستمرة من الأرصفة الشاطئية، كما لا يمكن نحتها وصقلها.

صورة (٦) الدور الوقائي للطحالب البحرية التي تشكل غطاءً مكتملًا تقريبًا على أحد أرصفة الشاطئ على الساحل الشرقي لخليج زكريت، الأمر الذي يحد من دور عمليات الترطيب والتجفيف، والحت الموجي.
التصوير: الشمال الغربي

صورة (٥) تأثير النحت البيولوجي بواسطة الطحالب والفقاريات في تفتيت السطح الصخري للرصيف الواقع أسفل جروف الساحل الغربي لرأس أبروق، وتشكيل العديد من الشقوق والحفر المنتشرة على الرصيف
التصوير: الشمال الغربي.

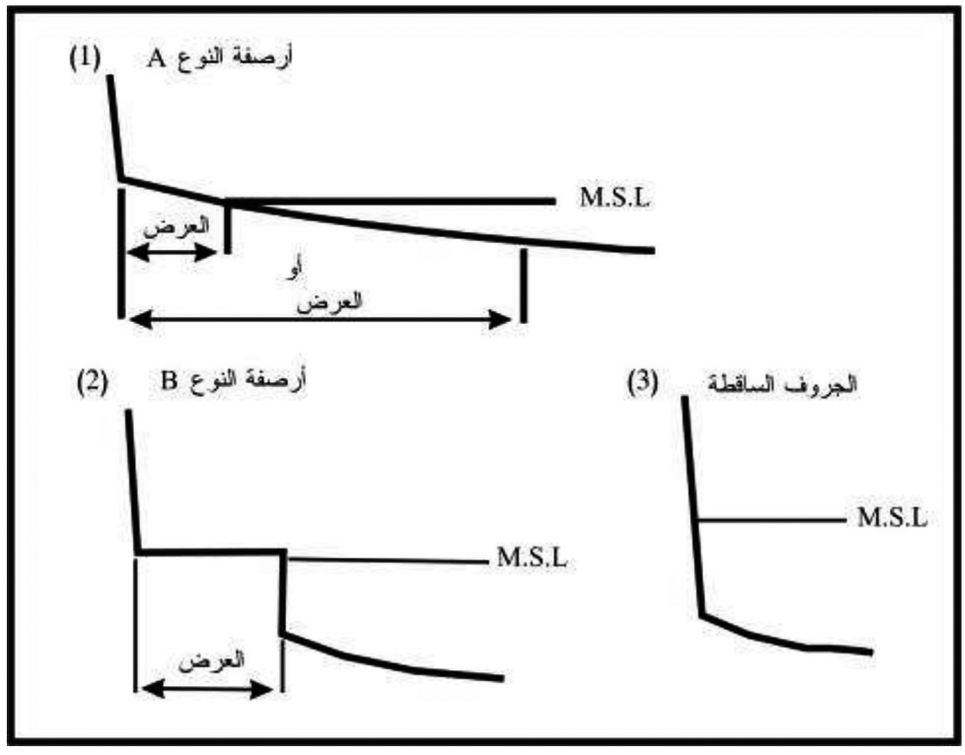
صورة (٧) رصيف النوع A على الساحل الشمالي الغربي من رأس أبروق. وتعبر الصورة عن مرحلة نضج أرصفة الشاطئ
التصوير: جهة الشرق.

صورة (٨) رصيف النوع B على الساحل الشرقي لحليج زكريت، حيث يمثل الأرصفة الشاطئية الأفقية تقريبًا، والتي تنتهى فجأة بجرف أو منحدر على الحافة البحرية.
التصوير: جهة الشمال الشرقي.

رابعًا: مورفولوجية أرصفة الشاطئ:

هناك ثلاث مورفولوجيات أساسية للسواحل الصخرية قد حدده Sunamura (1992) وهي الأرصفة الشاطئية المنحدرة التي تنحدر بلطف تجاه البحر، والأرصفة الأفقية تقريبًا وتنتهي فجأة بجرف أو منحدر على حافة البحر، والجروف الساقطة plunging cliffs أو المنحدرة انحدارًا مباشرًا عادة نحو المياه العميقة دون أى ظهور لرصيف الشاطئ حيث لم تتطور فيها أرصفة الشاطئ بعد. وقد ميز Sunamura (1992) بين شكلين من الأرصفة عن طريق نوع التسميات حيث A تُعبر عن الأرصفة الشاطئية المنحدرة، وB تُعبر عن الأرصفة الشاطئية الأفقية شكل (٥).

يُمثل النوع A الأرصفة المنحدرة بلطف تجاه البحر، وهذا النوع من الأرصفة هو الذي كان يعرف قديمًا باسم رصيف نحت الأمواج wave cut platform ويناظر هذا النوع رصيف التحجير والحت الموجي عند بيرد Bird (1978). ويرتبط هذا النوع من الأرصفة بالعوامل التي تؤثر بدورها على عمليتي التحجير والحت الموجي مثل الطاقة المرتفعة للأمواج التي تُسهل من عملية التحجير وتوفر كميات من المفتتات اللازمة لعملية الحت الموجي وهو يعكس بذلك العلاقة بين قوة الأمواج Fw ودرجة مقاومة صخور الشاطئ Fr حيث تتأثر الأخيرة بالتجوية وآثار الضعف الصخرى. وتمتد هذه الأرصفة على طول السواحل بالعروض المعتدلة ذات الأمواج القوية، ولكن تم رصد أرصفة النوع A بمنطقة الدراسة أمام رأس أبروق رغم ضعف الأمواج؛ لأن الأرصفة بمنطقة الدراسة تتكون من صخور جيرية ضعيفة تكثر بها الفواصل



Source: Sunamura (1992)

شكل (٥): ثلاث مورفولوجيات أساسية للسواحل الصخرية،
ونوعين لأرصفة الشاطئ (١) أرصفة النوع A (٢) أرصفة النوع B ، (٣) الجروف الساقطة

والشقوق، وتزداد اتساعًا مع زيادة معدلات تراجع الجروف، حيث يمثل عرض الرصيف في الواقع المسافة الأفقية بين قاعدة الجرف وواجهة الرصيف جهة البحر (صورة: ٧)، أما النوع B فتم تسجيلها على الساحل الشرقي لحليج زكريت، حيث يمثل الأرصفة الشاطئية الأفقية تقريبًا، والتي تنتهى فجأة بجرف أو منحدر على الحافة البحرية (صورة: ٨)، أما الجروف الساقطة فتُعبر عن عدم تطور أرصفة الشواطئ بعد. ويُمثل النوعين A و B مراحل مختلفة لتطور الأرصفة الشاطئية نحو تحقيق التوازن النهائي، كما أنهما لا يكونان شكلين مورفولوجين متميزين فقط، بل يمثلان بخلاف ذلك مرحلتين فى عملية تطورية واحدة.

يُمكن الفصل بين النوع A و B لأرصفة الشاطئ والجروف الساقطة على أساس العلاقة بين درجة مقاومة صخور الشاطئ (FR) وقوة نحت الأمواج (FW)، ولكون الأرصفة الشاطئية تتشكل عند حضيض الجروف فيمكن التعرف على حالة حرجة لشروعهما على أساس ما إذا سيحدث نحت أم لا. ويحدث تطور الأرصفة عندما تكون قوة نحت الأمواج أكبر من قوة مقاومة الصخر FW >FR. واقترح Tsujimoto (1987) بأن قوة نحت الأمواج FW أمام الجرف يُمكن أن تُمثل بواسطة أقصى ضغط موجى لأكبر موجة تحدث فى موقع ما. حيث FW= AP ، وتعبر A عن ثابت الأبعاد للنحت، وتعبر P عن ضغط الموجه.

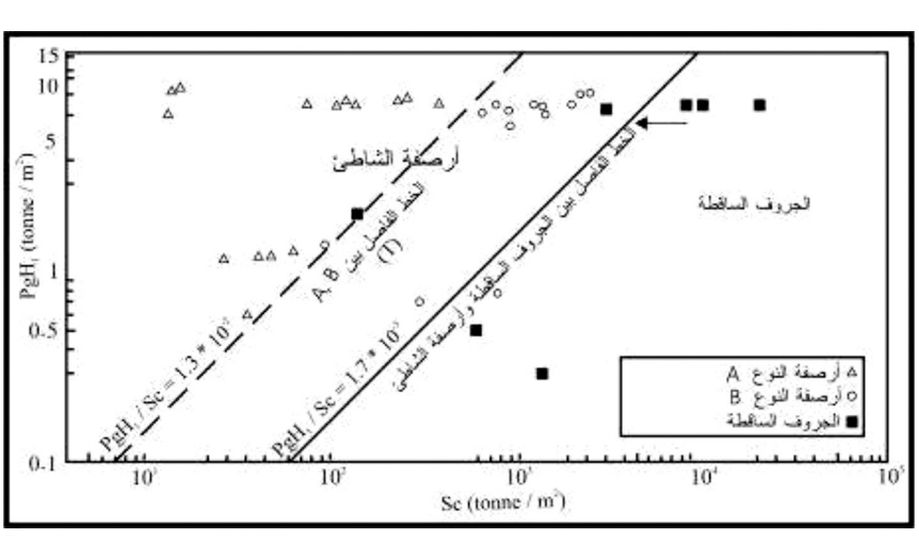
ويمكن أن تمثل درجة مقاومة صخر الشاطئ بواسطة المعادلة التالية FR=BS*c حيث B تعبر عن الأبعاد غير الثابتة التي تُمثل الانخفاض في قوة مقاومة الصخر بسبب التجوية.

و S*c = Sc (Vpf/Vpc)

حيث يعبر ناتج القسمة (Vpf/Vpc) عن مؤشر الانقطاع. و Vpf = سرعة الموجة الطولية وتقاس فى الموقع، و Vpc = سرعة الموجة الطولية وتقاس فى عينة صخر ليس بها شقوق واضحة. و Sc = القوة الضاغطة على الصخر. وقد جمع Tsujmoto (1987) بيانات حقلية من ٢٥ موقع فى اليابان من أجل حساب قيم p و S×c. ووجد أن قيمة p تتراوح بين ٥,٨ إلى ٢٢٠ طن/م٢ ، وقيمة S×c تتراوح بين أقل من ١٣ إلى ٥٦٠٠ طن/م٢. شكل (٦). وقد وجد أن الخط المائل ٤٥ ° درجة يفصل بوضوح الجروف الساقطة وأرصفة الشاطئ. وهناك استثناء واحد لهذا الذي فسره Tsjumoto (١٩٨٧) على أنه مشكلة فى زيادة تقدير أقصى ارتفاع موجي في موقع الدراسة. ومن خط فصل الأرصفة والجرف توجد حالة حرجة لتشكيل أرصفة الشاطئ بواسطة الآتي

P = 0 ,081 S*c

وعلى الجهة اليسرى للخط يتضح أن قوة نحت الأمواج Fw تكون أكبر من قوة مقاومة الصخر Fr وبالتالي تتشكل أرصفة الشواطئ. بينما فى الناحية اليمنى من الخط لا تتشكل أرصفة الشاطئ لأن Fr تكون أكبر من Fw. ولاحظ Sunamura (1994) أن تطور رصيف الشاطئ لو اعتمد على الخصائص الصخرية فقط فإن الخط في الشكل (٦) يجب أن يكون عمودى. وبالطبع إذا كان تطور الرصيف معتمد فقط على الأمواج فإن الخط يجب أن يكون أفقي.



Source: sunamura (1992)

شكل (٦) التمييز بين أنواع الأرصفة الشاطئية A،B، والجروف الساقطة

وبتطبيق هذه العلاقات على أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة يتضح أنها توفر أدلة قوية على أن الأمواج هى المسئولة عن البدء فى تطوير أرصفة الشاطئ. ولكن لا يجب أن تكون P تُعادل أو تتجاوز S*c كما وصفتها العلاقة Fw > Fr لبدء أرصفة الشاطئ. بينما يبدأ تطور أرصفة الشاطئ عندما تكون قيمة p = 8% من قيمة S×c ويُشير هذا إلى أن التجوية ونحت الأمواج مهمة للبدء في تشكيل أرصفة الشاطئ، في حين تكون التجوية مهمة جدًا في تشكيلها خاصة في حالة عدم توفر الرواسب التحاتية التي تستخدمها الأمواج كأدوات للبري.

يُمكن التمييز كميًا بين النوع A والنوع B من خلال تحليل الشكل (٦)، بحيث يُفترض بأن بعض الأوضاع الحرجة لتطور الرصيف اجتمعت ثم يتم تحديد الحد الفاصل بين رصيف النوع A والنوع B سواء بقى الجرف الصخري الذي تعرض للمد المنخفض الأولي أو تم تدميره. فإذا تحطم الجرف الصخري ينتج لنا رصيف النوع A ولكن إذا ظل باقيًا يتشكل رصيف النوع B.

وينتج تدمير الجرف الساحلي من انخفاض سطح الأرض عن المستوى الأولي الذي سببته ضغط الأمواج ويرمز له (t). وبالتالى تكون الحالة الحرجة المُشكلة بين النوع A والنوع B تعتمد على حدوث انخفاض السطح، وعندما تكون مقاومة الصخور (Fsr) لانخفاض السطح أقل من قوة النحت (Fws) المتسببة في انخفاض السطح فأنه ينتج رصيف النوع A. ولو أن قوة النحت (Fws) أقل من مقاومة الصخر (Fsr) حينئذ سيتطور رصيف النوع B. والخط الذي يكون في الجهة اليسرى يفصل أنواع الأرصفة. وعلى هذا فإنه يتحدد t = 0.005S*s وهذا يعني أنه عندما تكون قوة ضغط الموجة أكبر من ٠,٥ ٪ من القوة الضاغطة للصخر فسوف يتطور رصيف من النوع A. وعلى الجهة اليسرى للخط الأيسر فى الشكل (٣)، نجد أن قوة النحت (Fws) تكون أكبر من مقاومة الصخر (Fsr) لذا ينتج أرصفة النوع A، وفى الناحية اليمنى للخط تكون مقاومة الصخر (Fsr) أكبر من قوة النحت (Fws) لذلك لا تحدث أي انخفاضات سطحية وتتشكل أرصفة من النوع B.

ويتضح مما سبق أن عملية ترسيم حدود الرصيف تتطلب حدوث انخفاض للأرصفة ولكن بنسب متفاوتة، حيث أن انخفاض السطح بأرصفة النوع B يكون بمعدلات أبطأ من أرصفة النوع A وبالتالي يحتاج حدوث أرصفة النوع B إلى قوة ضاغطة أكبر على صخورها من صخور أرصفة النوع A. وهذا يوضح أن بعض الميكانيكيات الأخرى تكون مسئولة عن حفظ الجرف الساحلي الذي يمثل الوضع الأصلي للخط الساحلي الأولي، فالجرف الساحلي يحدد الوضع الأصلي لخط الشاطئ، والصخور الكبيرة الواقعة علي حافة الأرصفة البحرية يستشهد بها كدليل لتراجع الجرف كما يُعد الحطام الكبير علي الأرصفة دليل قاطع علي نقطة الأصل. وبناء على ذلك فإن الاختلاف بين النوعين من الأرصفة يرجع إلى الاختلاف النسبي في حجم العلاقة بين قوة الموجة المهاجمة وقوة مقاومة الصخر.

توجد بعض الملامح المورفولوجية الأخرى لأرصفة الشاطئ مثل الانحدار، والارتفاع، والاتساع، يتم التعرف عليها من خلال وجود علاقات بين الفارق المدي والتعرض لطاقة الأمواج والظروف الجيولوجية للأرصفة. وإلى جانب الأمواج القوية يلعب الفارق المدي المتسع tidal range دوره في تشكيل الأرصفة الشاطئية حيث توجد علاقة بين الأمواج القوية ومعدل ارتفاع الحافة الداخلية inner edge لرصيف الشاطئ التي تُعرف باسم ramp (صبري محسوب، ١٩٩٨، ص ٣٣٧).

يبلغ متوسط انحدار أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة ٣ْ درجة، كما يبلغ الفارق المدي بمنطقة الدراسة ١,٨ متر، وبربط القياسات المختلفة لانحدار أرصفة الشاطئ والفارق المدي المنخفض بمنطقة الدراسة، وُجدت علاقة بين انحدار أرصفة الشاطئ والفارق المدّي، حيث الاثنان مرتبطان ارتباطًا وثيقًا. فقد وجدت علاقة ارتباط طردية قوية جدًا تبلغ ٠,٩٢ بين درجة انحدار أرصفة الشاطئ والفارق المدي في منطقة الدراسة التي تُمثل بيئة للمد والجزر المنخفض، حيث يقل انحدار رصيف الشاطئ كلما انخفض الفارق المدي والعكس صحيح، ويرجع سبب ذلك إلى هجوم الأمواج بشكل مركز ومكثف على أسطح أفقية أكثر تجانسًا.

ومن خلال القياسات الميدانية فإن متوسط درجة انحدار أرصفة الشاطئ بالساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر يتراوح بين بين ١° و ٧° وهى انحدارات خفيفة، وتختلف على طول قطاع الرصيف من جزء لآخر، فتزيد على الأجزاء التي تُغمر بمياه البحر بصفة مستمرة، وتقل بالأجزاء المكشوفة، ويصل المتوسط العام لدرجة انحداره نحو٣ْ درجة،

وكلما ارتفعت درجة الانحدار، زاد عمق أرصفة الشاطئ، وبصفة عامة تتميز أرصفة الشاطئ بانحداراتها الخفيفة ولكنها تنتهى بواجهات أكثر انحدارًا تجاه البحر، وتظهر على سطوحها أحيانًا بعض المفتتات الناتجة عن تراجع الجروف (سيد مرسى، ٢٠٠٢، ص ١٨٦).

وتوجد خاصية مورفولوجية مهمة لأرصفة الشاطئ وهي الارتفاع، حيث توجد علاقة بينه وبين نوع الصخر أو التعرض لطاقة الأمواج، وأرجع (López-Fernández, 2020) الارتفاعات المتغيرة لأرصفة الشاطئ إلى الاختلافات الليثولوجية، والتكتونية المحلية، ودرجات متفاوتة من الوقاية. وتم تحديد ارتفاع الأرصفة عن طريق درجة مقاومة الصخر وقوة طاقة الموجة. والأرصفة في الصخر الأكثر صلابة كانت أعلى في الارتفاع من الأرصفة في الصخر الأقل صلابة عندما تظل العوامل الأخرى كالأمواج كما هي بدون تغيير.

يتراوح ارتفاع أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة بين ٢٥ و٨٠ سم فوق منسوب البحر وغالبًا لا يزيد ارتفاعها عن المتر الواحد، حيث يبلغ متوسط ارتفاع أرصفة الشاطئ برأس أبروق نحو ٥٥ سم، و٧٤ سم بأرصفة خليج زكريت. وتُعد هذه الأرصفة منخفضة المنسوب بسبب نشاط الأمواج والعمليات البحرية الأخرى التي تزداد قدرتها على النحت بصخورها وخاصة أن معظم الأرصفة تتكون من صخور الحجر الجيري المرجاني القابلة للإذابة. وقد لوحظ أن الاتجاه السائد عبر أرصفة الشاطئ هو تقليل الصلابة في اتجاه البحر، وفرضه على هذا الاتجاه هو زيادة الصلابة مع انخفاض الارتفاع بمعنى أن الصلابة تزداد مع انخفاض ارتفاع رصيف الشاطئ (Knight, et al, 2020)

وهناك متغيرات أخرى ارتبطت بالارتفاع مثل عمق الماء أمام الرصيف الذي يسيطر على نوع الأمواج التي تصل إلى الرصيف. وارتفاع الرصيف يساعد في فهم أفضل لعمليات تطور الشاطئ، حيث إن أرصفة الشاطئ قد تتطور على ارتفاع واحد فيما يتعلق بمستوي واحد للبحر، كما توجد أرصفة فوق مستويات المدّ العالي (صورة:٩)، واستخدام الرصيف لمستوى البحر يعمل على إعادة بناء الرصيف، واستخدم الكثير من عمليات رفع الأرصفة الشاطئية بعد ذلك لإعادة بناء البيئة البحرية فيكون عندها طور كامل قبل أن يُرفع ويترك بجانب البحر ويصبح شاطئ مرفوع، فتلك الأرصفة تتطور كنتيجة لمستوي بحر واحد أسفل الجزر (Stephenson (2000.

وفيما يتعلق باتساع أرصفة الشاطئ فتوجد علاقة طردية بين اتساع الأرصفة وتراجع الجرف تبلغ ٠,٩٣ حيث يزداد اتساع الأرصفة الشاطئية بزيادة تراجع الجرف، ويتراوح اتساع الأرصفة الشاطئية بين بضعة أمتار ونحو ٦٠ مترًا بالساحل الجنوبي الشرقي لخليج زكريت، كما بلغ متوسط عرض رصيف الشاطئ الممتد أسفل الجروف الممتدة إلى الشرق من رأس أبروق نحو ٨ أمتار، بينما وصل اتساعه إلى ٩ أمتار إلى الشمال الشرقي من رأس أبروق، كما بلغ اتساعها ٣٥ مترًا أسفل الجروف التي تقع إلى الجنوب الشرقي من رأس أبروق، ونحو ٥٠ مترًا أسفل الجروف التي تحيط بخليج زكريت من الجنوب الشرقي. (الصور: ١٠، ١١، ١٢).

يتضح مما سبق أن أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة تكون في حالة من التوازن الديناميكي، وتتراجع بكاملها باتجاه اليابس. كما أنها تميل إلى حالة الثبات أو الاستقرار من خلال اتساعها إلى النقطة التي لم تعد معها الأمواج قادرة على نحت قاعدة الجرف الساحلي، ويحدث هذا بسبب الجزر الذي لا يُحدث تراجع للجرف. ويُعد الفارق المدي هو المُتحكم فى اتساع ودرجة انحدار رصيف الشاطئ، إضافة إلى ارتفاع الموجة، وعمق الماء أمامه، ومدى صلابة صخوره.

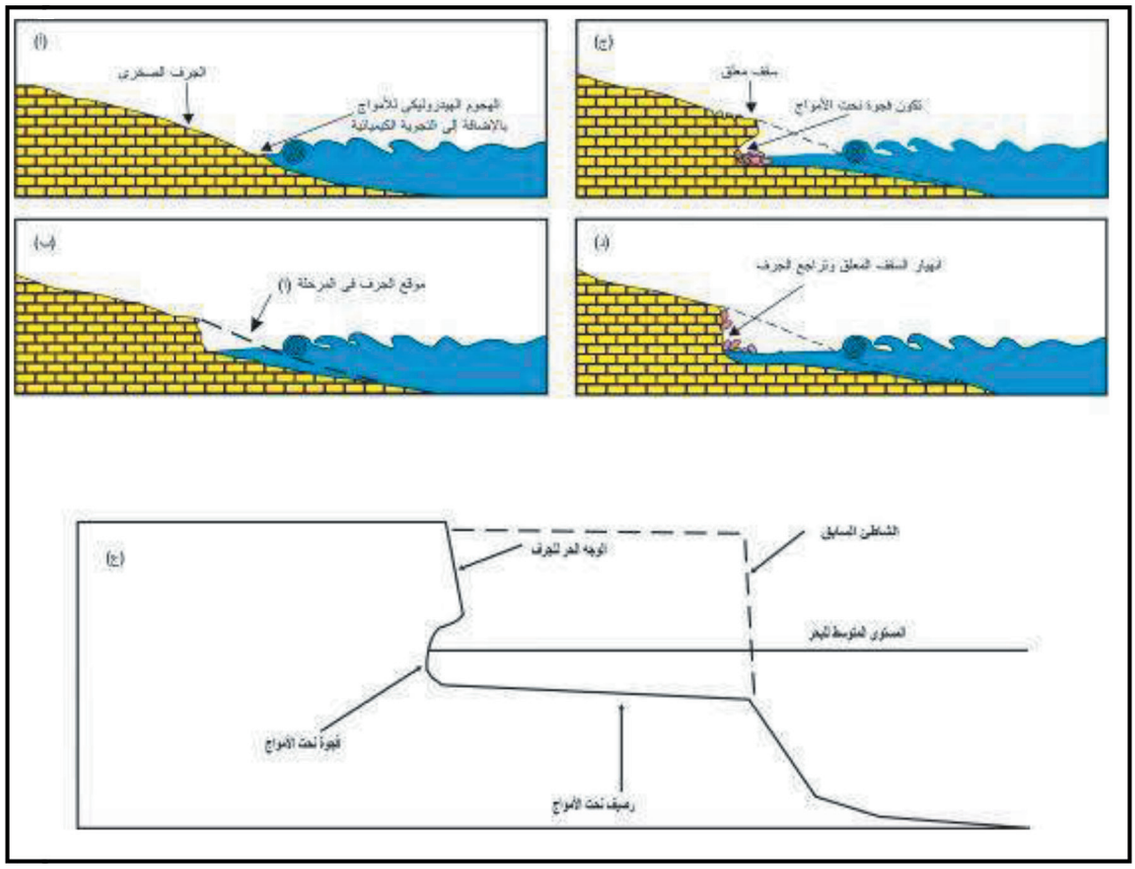
خامسًا: التطور الجيومورفولوجي لأرصفة الشاطئ ومراحل تطورها:

تؤدي عمليات النحت إلى تراجع الجروف على مراحل وبالتالي ظهور وتطور الأرصفة الشاطئية كما يوضحها الشكل (٧):

تمر الأرصفة الشاطئية بمراحل تطورية مختلفة هي:

مرحلة شباب أرصفة الشاطئ:

يظهر الانحدار الأصلي الأولي للساحل في شكل معتدل، ويتركز فعل مياه البحر على طول نطاق محصور بين حدي المياه المدية العليا والجزرية الدنيا. وتبدأ الأمواج بالنحت ومهاجمة قواعد الجروف الصخرية بقوة وبصفة مستمرة، حيث تنحت الأمواج الصخور الضعيفة وتتكون ثقوب صغيرة يزداد اتساعها إلى أن تلتحم مع بعضها بالتدريج مكونة حفرة عميقة Notch متوغلة فى أسفل الجرف على شكل فجوة كبيرة شكل (٧). بينما تبرز الأجزاء الأكثر صلابة من الجرف فوق هذه الفجوة على شكل شرفة بارزة Visor صورة (١)، يمتد تحتها خط محفور مجوف يعرف باسم (النحر) نتج عن النحت السفلى لمياه البحر (عادل عبد السلام، ٢٠٠٠، ص ٣٨١).



شكل (٧) تراجع الجرف وتكون فجوة نحت الأمواج وأرصفة الشاطئ

وباستمرار النحت السفلى للجرف يتراجع الجرف نتيجة سقوط الشرفة البارزة فوق البحر ويتكون الحائط الصخري الساحلي، كما يؤدي تراجعها إلى نشأة رصيف نحت بحري مستو ضيق عند قواعدها، تغطيه مياه البحر، وينحدر انحدارًا خفيفًا تجاه البحر، أما المواد الناتجة عن تأكل الجرف وتساقط الشرفة من حصى وأحجار ورمال، فتنقلها الأمواج العنيفة وترسبها على شكل رصيف إرساب بحري عند أقدام رصيف النحت البحري وعلى امتداد مستواه وانحداره، مما يزيد فى طول المسافة الفاصلة بين المياه العميقة من جهة البحر ومنطقة النحر وقاعدة الجدار الساحلى من جهة اليابس، ويؤدي ذلك إلى تشكيل ما يعرف بالرصيف البحري الذي يشمل رصيف نحت الأمواج البحري ورصيف الإرساب البحري.

مرحلة نضج أرصفة الشاطئ:

بتوالي اصطدام ونحت الأمواج للحائط الصخري الساحلي، يزداد تراجع الجرف ويصبح أقل انحدارًا من المرحلة السابقة، ويتسع الرصيف البحري فى هذه المرحلة، ويتميز سطح الرصيف البحري بارتفاع الجزء الملامس منه لليابس بدرجة أكبر من الجزء البعيد عنه باتجاه البحر، مما يضعف أثر وصول مياه البحر إلى قواعد الجرف الصخري الساحلي، ولا تصل إليها المياه إلا فى حالات المد أو عند هبوب العواصف، كما يؤدي إلى تكسر الأمواج بعيدًا عن أقدام الجرف وخاصة مع امتصاص جزء كبير من طاقتها فى منطقة تراكم الرواسب الناتجة عن نحت الجرف (رصيف الإرساب البحري) وتقل بالتالي قدرتها على النحت، وقد يرجع تكسر الأمواج إلى وجود حواجز مغمورة أمام أرصفة الشاطئ (مجدي تراب، ٢٠١٥، ص ٩٢). ومعنى قلة مقدرة مياه الأمواج على النحت أن هذه المياه قد وصلت إلى مرحلة التعادل (صفى الدين أبو العز، ١٩٧٦، ص ٢٨٠). وبذلك تكون الأرصفة الشاطئية وصلت إلى مرحلة نضجها.

صورة (٩) أحد الأرصفة الشاطئية فوق مستويات المدّ العالي على الساحل الغربي من رأس أبروق.
التصوير: جهة الشمال الشرقي.

صورة (١٠) أحد الأرصفة الشاطئية المتسعة بالساحل الجنوبي الشرقي لخليج زكريت.
التصوير: جهة الجنوب.

صورة (١١) أحد الأرصفة الشاطئية المتسعة بالساحل الجنوبي الشرقي لرأس أبروق.
التصوير: جهة الجنوب الشمال الشرقي.

صورة (١٢) أحد الأرصفة الشاطئية الضيقة بالساحل الشمالي الشرقي لرأس أبروق..
التصوير: جهة الشرق.

وتتميز مرحلة نضج الأرصفة الشاطئية بمجموعة من الخصائص منها قلة درجة انحدار أسطحها، وتكون الشواطئ على الحافة الداخلية المتعمقة فى مياه البحر من رصيف النحت، والتي تتألف من الرمال والمفتتات الصخرية، وتساعد قلة عمق مياه البحر فى المنطقة الساحلية هذه الرواسب على التراكم والإرساب وبقائها على شكل شواطئ في تلك المنطقة وتستمر هذه الشواطئ لفترة مؤقتة قبل أن تُجرف الرواسب مرة أخرى صوب مياه البحر العميقة. صورة (٧).

يتضح مما سبق أن زيادة اتساع الرصيف البحري وتراجع الجرف الساحلي يؤديان إلى ضعف النحت الموجي تدريجيًا، ولكن بشرط بقاء الأوضاع البنائية أو المناخية على حالها دون تغير. فإذا طرأ ارتفاع على مستوى مياه البحر، نتيجة انخفاض اليابس أو ارتفاع البحر، فهذا يؤدي إلى وصول المياه والأمواج القوية إلى الجرف الساحلي من جديد وتتكرر عملية النحت وتكون الأرصفة البحرية مرة أخرى. أما فى حالة ارتفاع اليابس أو انخفاض مياه البحر فان النحت السفلي يبدأ دوره من جديد ولكن على مستوى وارتفاع اخفض من مستوى الرصيف البحري السابق، وهكذا ينتج ساحل مرفوع ومصطفة بحرية مرفوعة (عادل عبد السلام، ٢٠٠٠، ص ٣٨٤).

مرحلة نضج أرصفة الشاطئ:

يصل إليها رصيف الشاطئ نتيجة لزيادة نشاط عمليات التجوية والتعرية القارية فى تخفيض منسوب الجرف الساحلي، حيث تتعرض الجروف إلى التآكل والانزلاقات

الصخرية بصفة مستمرة، مما يؤدي إلى وصول رصيف النحت إلى أقصى اتساع له الأمر الذي يُضعف من أثر الأمواج البحرية كعامل نحت وتقويض بسبب ضحولة المياه أمام الساحل بل تتحول الأمواج إلى عامل بناء تجلب معها الرواسب الرملية وتفرشها على حافته العليا جهة البحر، ويصبح الشكل العام على شكل شاطئ رملي (بلاج) يحده البحر من أمامه (واجهة الشاطئ)، وجرف منخفض خفيف الانحدار من خلفه جهة اليابس (صورة: ١٣).

ويبلغ تراجع الجروف بالساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر نحو ١,٥م منذ استقرار البحر عند مستواه الحالي، ويقدر معدل الإذابة بالحجر الجيري المرجاني بنحو ١ مم في السنة، بينما يشير اتساع بعض أرصفة الشاطئ على الساحل الشمالي لخليج زكريت والساحل الجنوبي الشرق لرأس أبروق إلى زيادة تراجع الجروف. (سمير سامي، ١٩٩٣، ص ١٤٠).

سادسًا معدلات نحت أرصفة الشاطئ:

ينبغي أن يتوفر على الأقل عنصران مختلفان عند دراسة معدلات النحت على أرصفة الشاطئ وهما، التراجع الأفقي للجرف الذي يدعم الرصيف، والتخفيض الرأسي لسطح الرصيف. (صورة: ١٣، ١٤).

صورة (١٣) مرحلة الشيخوخة من تطور الأرصفة الشاطئية حيث يظهر الجرف الساحلي في صورة منخفضة متآكلة ومتراجعة نحو اليابس مع تغطية رصيف الشاطئ الممتد أمامه بالرواسب الرملية وبعض المفتتات الصخرية الناتجة عن تفتت صخور الجرف، جنوب شرق رأس أبروق.
التصوير: جهة الشرق.

صورة (١٤) التخفيض الرأسي لسطح أحد أرصفة الشاطئ على الساحل الشمالي الشرقي لخليج زكريت.
التصوير: جهة الغرب.

صورة (١٥) بركة إذابة قديمة مرتفعة عن رصيف الشاطئ الواقع أسفل منها أحد الأرصفة الشاطئية المتسعة بالساحل الجنوبي الشرقي لرأس أبروق.

صورة (١٦) برك إذابة صخرية، وفواصل بنيوية على أحد أرصفة الشاطئ على الساحل الشرقي لرأس أبروق. ويلاحظ امتلاء البرك بمياه الأمواج.
التصوير: جهة الشرق.

تم استخدام جهاز قياس النحت الدقيق micro-erosion meter (MEM) لقياس معدلات النحت والتخفيض الرأسي التي يتعرض لها سطح الأرصفة الشاطئية بمنطقة الدراسة خلال سنتين، كما يُستخدم للتحقق من العمليات التي تتم على أرصفة الشاطئ؛ لقدرته على تحديد المساهمات النسبية للنحت الحيوي، والنحت البحري وعمليات التجوية لنحت الحجر الجيري. Trudgill (1976a,b) ووجد اختلاف في معدلات النحت عبر قطاعات أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة، حيث تزداد معدلات النحت على هوامش الأرصفة باتجاه كل من اليابس والبحر عن منتصف الأرصفة. ويعزى ذلك إلى هيمنة عمليات التعرية الهوائية على الجانب البري، وهيمنة العمليات البحرية على الجانب البحري.

يبلغ متوسط معدل النحت والتخفيض الرأسي بأرصفة منطقة الدراسة ١,٤٢ مليمتر/السنة بأرصفة خليج زكريت ورأس أبروق، وكشفت اختبارات t-tests بأن متوسط معدلات النحت السنوي كانت متساوية. كما تم حساب قيمة التخفيض الرأسي بأرصفة منطقة الدراسة عن طريق حساب فرق المنسوب بين أحد برك الإذابة المرتفعة فوق منسوب سطح رصيف الشاطئ على الساحل الشرقي لخليج زكريت ومنسوب رصيف الشاطئ الواقع أسفل منها (صورة: ١٤)، حيث بلغت قيمة التخفيض الرأسي نحو ٧٥ سم. وقد ذكر Stephenson (2009) أن المتوسط العالمي لمعدل التخفيض الرأسي لأرصفة الشاطئ التي تتكون من الحجر الجيري يبلغ ١,٤٨ مليمتر/السنة، وبناء عليه يُمكن تقدير مدة التخفيض الرأسي لرصيف الشاطئ بخليج زكريت عن طريق اقتراح معادلة بسيطة وهي (قيمة فرق المنسوب على سطح رصيف الشاطئ ٧٥ سم ÷ المتوسط العالمي لمعدل التخفيض الرأسي ١,٤٨ مليمتر/السنة × ١٠) حيث بلغت ٧٥ سم خلال ٥٠٦ سنة تقريبًا. ويمكن أن يحدث تآكل أرصفة الشاطئ عن طريق الانخفاض التدريجي لسطح الرصيف بسبب تآكل الصخور وعملية البري.

وبناءً على معدلات نحت أرصفة الشاطئ التي تم قياسها، ومورفولوجية الأرصفة يتضح أن النحت كان سببه عمليات التجوية والتحجير الموجي، والأخيرة هي المسئولة عن ارتفاع معدلات النحت بأرصفة الشاطئ. كما يتضح أن معدلات النحت تكون أعلى بكثير في حالة توفر الرواسب التي تعمل بمثابة المواد التحاتية أو كأدوات للنحت. بالإضافة إلى تأثر النحت بعمليتي الترطيب والتجفيف، والتآكل على التوالي التي تتم على سطح الأرصفة. حيث إن عمليات تفتت الصخور التي تعمل على مقياس صغير جدًا (مم - سم) مثل التجوية الملحية، والتآكل البيولوجي تُسهل الخفض التدريجي لسطح أرصفة الشاطئ على نطاق صغير جدًا. لكن هذه العمليات الدقيقة هي أيضًا بمثابة آليات تحضيرية مهمة تُمكن من حدوث تآكل على مقياس متوسط سنتيمتر، خاصة عند التركيز على مواقع الضعف مثل المفاصل أو خطوط التطبق، مما يساعد على إعداد الصخور للانفصال اللاحق(Danielle H., et al, 2020, p 129).

وقد لوحظ أن معدلات النحت تزيد من أسطح أرصفة الشاطئ باتجاه اليابس، بما يتفق مع زيادة اليابس في صلابة الصخور في مواقع أرصفة الشاطئ التي تم دراستها بمنطقة الدراسة، ولكن هذا يعكس مزيجًا من عمليات النحت والتجوية التي تتحد معًا لزيادة التآكل. بالنسبة لجعل هذه الأسطح أكثر صلابة، يجب أن يرتبط هذا أيضًا بالإزالة الفعالة للمواد المجواه والمتآكلة، وفي بيئات التضاريس المنخفضة مثل أرصفة الشاطئ، ويتطلب ذلك إلى الأمواج. وهذا يعني أنه كلما تم إزالة المواد المجواه بفعل الأمواج وظهر سطح رصيف الشاطئ خالي من الرواسب زادت صلابة رصيف الشاطئ (Trenhaile, 2019). حيث تزداد حركة الأمواج العكسية نحو البحر (الغسيل العكسي) عند قاعدة رصيف الشاطئ فتكون أكثر فعالية في إزالة المواد المجواه والمتآكلة، مما يؤدي إلى زيادة صلابة رصيف الشاطئ؛ لآن السطح بيكون أملس صلب خالي من الرواسب المفككة السطحية.

ولوحظ ميدانيًا أن هناك تغيرات موسمية في معدلات النحت بأرصفة الساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر. حيث كان مقدار النحت أثناء شهور الصيف أكبر بكثير في بعض الحالات بالمقارنة بشهور الشتاء. ويُعد هذا دليلًا على تأثير عمليات التجوية؛ لأن الصيف يوفر ظروف أفضل لعمليات الترطيب والتجفيف، والتجوية الملحية، كما وجد انه ليس هناك موسمية في حدوث العاصفة.

ويقاس تراجع الجرف بصفة عامة على فترات زمنية تتراوح من ٢٠ إلى ٣٠ سنة. فى حين أن تخفيض أرصفة الشاطئ في معظم الأحيان يتم قياسه على فترات زمنية تبلغ حوالي سنتان Stephenson & Kirk (1996) . ويهدد تراجع الجروف باتجاه اليابس من خلال سقوط أعالي الجرف حيث يشكل خطرًا على حياة البشر، والذي قد يتفاقم بسبب ارتفاع مستويات البحار في المستقبل وتغير شدة العاصفة وتواترها.

غالبًا ما تكون السواحل المنحدرة في مقدمة الأرصفة الشاطئية قليلة الانحدار التي تُعدل توصيل طاقة الأمواج إلى الجروف مما يؤدي إلى ارتدادات مورفوديناميكية بين تآكل رصيف الشاطئ وتراجع (Stephenson et al., 2018) .

ويعتقد أن تطور أرصفة الشاطئ يحدث على مدى آلاف السنين، ولمعدلات تطور أرصفة الشاطئ أهمية كبيرة لأن هناك تكهنات بأن البعض منها قد يكون بمثابة أرصفة موروثة من فترات ماضية تم تعديلها، بعد أن طورت في مستوى واحد أو أكثر من مستوى سطح البحر (Phillips,1970a; 1970b; Trenhaile, 1971)، ومن الملائم أن تطور أرصفة الشاطئ تم خلال العصور الجليدية الأخيرة عندما كان ارتفاع مستوى سطح البحر مماثل لارتفاعه اليوم وكان من الممكن إعادة تنشيط تطورها بواسطة ارتفاع مستوى سطح البحر خلال عصر الهولوسين.

سابعًا: الظاهرات الدقيقة فوق سطح أرصفة الشاطئ:

تنتشر فوق سطح الأرصفة الشاطئية بالساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر العديد من الظاهرات المورفولوجية الدقيقة، وقد سجلها الباحث من خلال دراسته الميدانية.

تظهر برك الإذابة Solution Pools فوق أسطح أرصفة الشاطئ بالصخور الكلسية، وقد تطورت هذه الحفر عن نقر وفتحات صغيرة لا تزيد أقطارها على عدة ملليمترات، وتتميز بإذابة المواد الكلسية اللاحمة لصخور الأساس بواسطة مياه البحر ثم إزالة المفتتات ميكانيكيًا بفعل الأمواج والحيوانات الحفارة. وقد تتسع البرك اتساعًا جانبيًا في كل الاتجاهات متخذه شكلاً أقرب للاستدارة تتميز بجوانبها المنحدرة بشدة نحو قاعها الصخرى. (صورة: ١٦، ١٧).

ويبلغ قطر هذه الحفر حوالي ٥ سم، وعمقها حوالي ٣ سم، وقد تلتحم الحفر الصغيرة مع بعضها وتزداد بذلك أبعادها حيث يصل طولها إلى ٩٠ سم وعرضها ٣٥ سم وعمقها ١٠ سم، كما تتميز جوانب هذه الحفر بالانحدار الشديد الذي قد يصل إلى ٥٥ – درجة، وربما يرجع ذلك إلى زيادة عمليات الحفر والإذابة لهذه الحفر، وتمتلئ هذه الحفر بالمياه بصفة مستمرة حتى أثناء فترات الجزر نظرًا لانخفاض منسوبها عن منسوب رصيف الشاطئ المحفورة فوقه، وغالبًا ما تتخذها الأحياء البحرية مثل نجم البحر وقنافذ البحر وسرطانات البحر كمخابئ لها، كما تنتشر فوقها العديد من الشقوق والفواصل التي تتخذ اتجاهات عمودية على البحر واتجاهات موازية له، ويتراوح طول هذه الشقوق سواء العمودية على البحر أو الموازية له بين ٥ و ١٠ أمتار ، وعرضها بين ٨ و ١٠ سم حيث يزداد اتساعها في المنطقة التي تتصل فيها الشقوق العمودية مع الشقوق الموازية للبحر، ويزداد انحدار جوانبها حيث يتراوح بين ٥٠ و ٥٥ درجة، كما يتراوح عمقها بين ٦ و ٨ سم، كما تتخللها مياه المد وتكون بذلك قناة مد تتميز بالضيق والعمق وشدة انحدار جوانبها وكثرة منعطفاتها ، وغالبًا ما تنتشر الرواسب الرملية في باطن الحفر والشقوق أثناء فترات الجزر، كما تنتشر أنواع مختلفة من الطحالب فوق سطح رصيف الشاطئ ومنها الطحالب الخضراء والصفراء وغيرها (صورة: ٢٠). ومن المحتمل أن تتأثر البرك المملوءة بالماء على سطح رصيف الشاطئ، والتي يتم توفيرها برذاذ الموجة، بالتآكل الحيوي بواسطة الرخويات والبطنيات حيث يوجد توفر مفضل للمياه أثناء المد المنخفض (Pappalardo et al., 2018). فنجد أن منخفضات كبيرة تشكلت على أسطح أرصفة الشاطئ نتيجة اقتلاع الأمواج للجلاميد الصخرية المزواة من سطح الصخور، ووجود حفر التاقوني (سيد مرسي، ٢٠٢٠، ص ٤٤٤)، ويمكن أن يؤثر تصلب سطح رصيف الشاطئ أيضًا على تطوير حفر التاقوني من خلال تثبيت سطح الصخور، والسماح بالانفصال تحت السطح للحبوب المعدنية، معززًا بتأثيرات المناخ المحلي الدقيق داخل منخفض التافوني (Dorn et al., 2017).

صورة (١٧) برك إذابة صخرية، ويلاحظ امتلائها بالمياه ووجود الحصى البحري في قاعها على أحد أرصفة الشاطئ على الساحل الجنوب لدوحة الحصين.

صورة (١٨) الحفر الوعائية الساحلية على أحد أرصفة الشاطئ بالساحل الجنوبي الغربي لرأس الزبارة، ويلاحظ تراكم الحصى البحري (أدوات البري) على قاع الحفر.

صورة (١٩) إحدى الحفر الوعائية العميقة على أحد أرصفة الشاطئ على بالساحل الشمالي لرأس أم حيش، ويلاحظ جفاف مياها وتصلب القشرة الملحية بداخلها.

صورة (٢٠) أحد أرصفة الشاطئ مستو السطح وتغطيه الطحالب الخضراء والصفراء على الساحل الشمالي الشرق لخليج زكريت.
التصوير: جهة الجنوب الغربى.

وتم تسجيل ظاهرة منحدرات رصيف الشاطئ (المتاريس الشاطئية) Ramps عند قواعد جروف رأس أبروق وهي عبارة عن سفوح منحدرة جهة البحر تمتد عند أقدام الجروف البحرية، وتتميز بأنها أكثر انحدارًا من بقية رصيف الشاطئ، وتتميز أسطحها بالنعومة الشديدة ويظهر أثر النحت الموجي فوقها، كما تنتشر فوقها حفر إذابة متفاوتة الأحجام، وبعض الشقوق العمودية على البحر والموازية له أيضًا. صورة (٢).

تنتشر الحفر الوعائية الساحلية بمنطقة الدراسة، وهي عبارة عن مجموعة من الحفر تظهر على سطح أرصفة الشاطئ في نطاق المد بمنطقة الدراسة، وتنشأ نتيجة الحركة الدوامية لمياه البحر المحملة بالحصى البحري الذي يُعد بمثابة أدوات نحت الحفر الوعائية، فتعمل على نحت الأجزاء الصخرية الضعيفة على شكل حُفر عميقة دائرية الشكل (مجدي تراب، ٢٠١١، ص ١٤٧). وتتميز بزيادة عمقها مقارنة باتساع قاعها، وأحيانًا يشغل قاع الحفر الوعائية الحصى البحري، وأحيانًا تكون خالية من الحصى (صورة: ١٨، ١٩). كما تنتشر تشققات التجوية والفواصل البنيوية باتجاهاتها المختلفة فوق أسطح أرصفة الشاطئ بمنطقة الدراسة، بالإضافة إلى انتشار الطحالب الخضراء والصفراء فوق أسطح أرصفة الشاطئ (صورة: ٢، ١٦، ٢٠).

يتضح مما سبق أن أرصفة الشاطئ تتميز بالانحدارات الخفيفة والارتفاعات القليلة، وزيادة الحفر المنحوتة فوقها بالإضافة إلى كثرة الشقوق والفواصل، حيث تنشط التجوية على طول هذه الشقوق، بالإضافة إلى الأنواع المختلفة من الطحالب، الأمر الذي يؤدى في النهاية إلى نشاط عمليات الإذابة بها وتخفيض منسوب أسطحها، حيث يمكن القول بأن هذه الأرصفة قد بلغت مرحلة متقدمة من مراحل تطورها الجيومورفولوجى، ربما ترجع إلى أواخر مرحلة النضج وبداية مرحلة الشيخوخة.

ثامنًا: الخاتمة:

تُعد أرصفة الشاطئ من الظاهرات الجيومورفولوجية الدقيقة بالساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر، والتي تمتد أسفل الجروف البحرية والناتجة عن تراجعها، وتتعدد العوامل والعمليات التي تساعد في تشكيلها وتطورها مثل عمليات النحت البحرية(١) Erosion Processes وعمليات التجوية السطحية(٢) Sub-aerial Weathering، فعمليات التجوية ونحت الأمواج تسبب معظم النحت في المناطق الأكثر ضعفًا من الصخر، كما تساعد التجوية أيضًا على إضعاف صخور الشاطئ بحيث تجعلها أكثر قابلية وسريعة التأثر لعمليات النحت. وتمثل عملية نحت الأمواج العملية الرئيسية المسئولة عن تكون أرصفة الشاطئ، وتساعدها عمليات التجوية المختلفة بإضعاف الصخر وتهيئته للنحت في مرحلة سابقة.

تتميز مورفولوجية أرصفة الشاطئ بوجود نوعين من الأرصفة وهي الأرصفة المنحدرة A (رصيف نحت الأمواج) والأرصفة الأفقية B. وتتميز الأرصفة بصفة عامة بالانحدارات البسيطة والارتفاعات المنخفضة، ويزداد اتساعها بزيادة تراجع الجرف الساحلي. كما توجد علاقة ارتباط طردية قوية جدًا بين درجة انحدار الرصيف والفارق المدي في بيئة المد والجزر المنخفض، حيث يقل انحدار رصيف الشاطئ كلما انخفض الفارق المدي.

تم تصميم كل نماذج تطور أرصفة الشاطئ على أساس أن نحت الأمواج هي العملية الأساسية لتشكيل الأرصفة، وأن تطور الأرصفة الشاطئية يتم فقط عندما تتجاوز القوة النحتية للأمواج (Fw) قوة مقاومة صخور الشاطئ (Fr).

توجد بعض المقاييس الدقيقة لقياس معدلات النحت الصغيرة في صخور الأساس على أرصفة الشاطئ وتتمثل في مقياس النحت الدقيق (MEM). وتختلف معدلات النحت عبر قطاعات أرصفة الشاطئ، حيث تزداد معدلات النحت على هوامش الأرصفة باتجاه كل من اليابس والبحر عن منتصف الأرصفة. وتظهر بعض الظاهرات الدقيقة فوق أرصفة الشاطئ، مثل برك الإذابة، والحفر الوعائية الساحلية، وتشققات التجوية والفواصل البنيوية، والمتاريس الشاطئية.

---

(١) عمليات النحت erosion processes تشمل البرى أو الحت Corrosion / Abrasion، الصقل أو التلميع Scouring، الفعل الهيدروليكي Hydraulic Action، الإذابة Solution، و أخيراً الاحتكاك Attrition .

(٢) عمليات التجوية السطحية Sub-aerial Weathering تشمل التجمد والذوبان Freeze-Thaw، الرياح Wind، المطر Rain، الجريان السطحي Surface Run Off، الحرارة Heat، البرودة Cold، الإنسان Human. كما تشمل عملية التجوية البيولوجية Biological Weathering حفر الكائنات العضوية Burrowing organism، وجذور الأشجار والنباتات والطحالب. أما التجوية الميكانيكية فتتمثل في النمو البلورى للأملاح Salt Crystallization، والتجوية الكيميائية تتمثل في الإذابة Solution.

المراجع:

أولاً: المراجع العربية:

سمير سامي محمود (١٩٩٣). جيومورفولوجية منطقة الغردقة بين جبل نقارة جنوبا وجبل أبو شعر القبلي شمالا، رسالة دكتوراه غير منشورة، كلية الآداب، جامعة القاهرة.

سيد محمود مرسى (٢٠٠٢). جيومورفولوجية الرؤوس بساحل البحر الأحمر بين رأس جمسة ورأس بناس، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب، جامعة القاهرة.

سيد محمود مرسي (٢٠١٠): جيومورفولوجية أرصفة الشواطئ البحرية، مجلة المجمع العلمي المصري.

سيد محمود مرسي (٢٠١٧). جيومورفولوجية التومبولو بالساحل الشمالي الغربي من شبه جزيرة قطر، المجلة الجغرافية العربية، العدد ٧٠.

سيد محمود مرسي (٢٠٢٠). جيومورفولوجية حفر التاقوني على الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا – مصر – حولية كلية الآداب. جامعة بني سويف. – مج ٩، ج ٢. - ٢٨٥ : ٣٥٦

سيد محمود مرسي ومحمد خليفة الكواري (٢٠١٨). الظاهرات الجيومورفولوجية كمقومات للسياحة الطبيعية بدولة قطر، مجلة كلية الآداب. جامعة بني سويف. العدد ٤٨ يوليو – سبتمبر، ص ٤٤٤.

صلاح الدين البحيري (١٩٩٥) أشكال الأرض، دار الفكر بدمشق، سورية للكتاب، القاهرة.

عادل عبد السلام (٢٠٠٠). أشكال الأرض، منشورات جامعة دمشق، الطبعة الرابعة، سوريا.

محمد صبري محسوب (١٩٩١). جيومورفولوجية السواحل، دار الثقافة للنشر والتوزيع، القاهرة.

محمد صبري محسوب (١٩٩٨). جيومورفولوجية الأشكال الأرضية، دار الفكر العربي، القاهرة.

محمد صفى الدين أبو العز (١٩٧٦). جيومورفولوجية قشرة الأرض، دار النهضة العربية، بيروت.

محمد مجدي تراب (٢٠٠٥). أشكال سطح الأرض، منشأة المعارف، الإسكندرية.

محمد مجدي تراب (٢٠١١). الموسوعة الجيومورفولوجية، الإسكندرية.

محمد مجدي تراب (٢٠١٥). خريطة جيومورفولوجية قديمة لساحل منطقة الإسكندرية باستخدام دلائل الآثار الغارقة، المجلة المصرية للتغير البيئي، العدد السابع، ص ٩٢.

محمود محمد عاشور (١٩٨٩). سطح قطر بين الماضي والحاضر، دراسة في تغير ملامح السطح، نشرة دورية يصدرها قسم الجغرافيا بجامعة الكويت والجمعية الجغرافية الكويتية، العدد ١٢٦، الكويت.

نبيل امبابي ومحمود عاشور (١٩٨٣). الكثبان الرملية في شبة جزيرة قطر، الجزء الثاني، مركز الوثائق والبحوث الإنشائية، الدوحة، قطر.

ثانياً: المراجع الأجنبية:

-Andrew S. Goudie (2004). Encyclopedia of Geomorphology, Routledge, London, Volume 2.

- Aoki H and Maekado A (2006). Formation of limestone shore platforms: A case study from Cape Hedo, Okinawa Island (in Japanese with English abstract). Transactions, Japanese Geomorphological Union 27: 461–475.

- Bird, E.C.F, (1978). Coasts. An Introduction to Systematic Geomorphology, vol. 4, the M.I.T. Press, London.

- Carlos López-Fernández, Sergio Llana-Fúnez, Gabriela Fernández-Viejo, María José Domínguez-Cuesta, Luis María Díaz-Díaz, (2020). Comprehensive characterization of elevated coastal platforms in the north Iberian margin: A new template to quantify uplift rates and tectonic patterns, Geomorphology, 107242, 364 – 376.

- Cooke RU and Smalley IJ (1968). Salt weathering in deserts. Nature 220: 1226–1227.

- Danielle H. Buchanan, Larissa A. Naylor, Martin D. Hurst and Wayne J. Stephenson. (2020). Erosion of rocky shore platforms by block detachment from layered stratigraphy, Earth Surface Processes and Landforms, 45: 1028–1037.

- Dorn, R.I.; Mahaney, W.C., and Krinsley, D.H., (2017). Case hardening: Turning weathering rinds into protective shells. Elements, 13, 165–169.

Geophysical Research 87(C12): 9499–9508.

trine coastal istories. Lakehead University Review 3, 36–45.

- **Phillips, B.M. (1970b).** Effective levels of marine planation on raised and present rock platforms. Révue Géographie ontreal 24, 40-227.

- **Rajarshi Dasgupta. (2010).** Whither shore platforms? Progress in Physical Geography 35(2) 183–209.

Stephenson, W.J. (2000). Shore platforms: a neglected coastal feature?. Progress in Physical Geography, 24,3, pp. 311–327

- **Stephenson WJ, Naylor LA, Smith H, Chen B, Brayne RP. (2018).** Wave transformation across a macrotidal shore platform under low to moderate energy conditions. Earth Surface Processes and Landforms 43: 298–311.

- **Stephenson, W., Dickson, M., Trenhaile, A., (2013).** Rock coasts, Treatise in Geomorphology, Vol. 10, p. 289-307.

Stephenson, W., Finlayson, B., (2009). Measuring erosion with the micro erosion meter contribution to understanding landform evolution, Earth Science Reviews, Vol. 95, p. 53-62.

- **Stephenson, W.J. and Kirk, R.M. (1996).** Measuring erosion rates using the micro-erosion meter: 20 years of data from shore platforms, Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand. Marine Geology 131, 18-209.

- **Stephenson, W.J. and Kirk, R.M. (2000a).** Development of shore platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand. Part I. The role of waves. Geomorphology 32, 21–41.

- **Stephenson, W.J. and Kirk, R.M. (2000b).** Development of shore platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand. Part II. The role of subaerial weathering. Geomorphology, 32, 43–56.

- **Sunamura, T. (1992).** Geomorphology of rocky coasts. New York: Wiley.

- **Healy, T.R. (1968).** Shore platform morphology on the Whangaparaoa Peninsula, Auckland. Conference Series, New Zealand Geographical Society 5, 68-163.

- **Kennedy DM and Beban JG (2005).** Shore platform morphology on a rapidly uplifting coast, Wellington, New Zealand: Part One: The role of waves. Geomorphology 32: 21–41.

- **Kirk, R.M. (1977).** Rates and forms of erosion on intertidal platforms at Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand. New Zealand Journal of Geology and Geophysics 20, 571–613.

- **Knight, J. and Burningham, H., (2020).** What controls bedrock shore platform hardness? A field study from South Africa. In: Malvárez, G. and Navas, F. (eds.), Global Coastal Issues of 2020. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 95, pp. 537-541. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

- **Miller, W.R. and Mason, T.R. (1994).** Erosional features of coastal beachrock and aeolianite outcrops in Natal and Zululand, South Africa. Journal of Coastal Research 10, 94-374.

- **Moses CA, Robinson DA, Williams RGB, and Marques FMSF (2006).** Predicting rates of shore platform downwearing from rock geotechnical properties and laboratory simulation of weathering and erosion processes. Geophysical Research 87(C12): 9499–9508.

- **Naylor LA and Viles HA (2002).** A new technique for evaluating short-term rates of coastal bioerosion and bioprotection. Geomorphology 47: 31–44.

- **Pappalardo, M.; Maggi, E.; Geppini, C., and Pannacciulli, F., (2018).** Bioerosive and bioprotective role of barnacles on rocky shores. Science of the Total Environment, 619–620, 83–92.

- **Phillips, B.M. (1970a).** The significance of inheritance in the interpretation of marine and lacus-

- **Sunamura T (1994).** Rock control in coastal geomorphic processes. Transactions, Japanese Geomorphological Union 15: 253–272.

- **Taylor AJ (2003).** Change and processes of change on shore platforms. Unpublished PhD thesis, University of Canterbury.

-**Thornton EB and Guza RT (1982).** Energy saturation and phase speeds measured on a natural beach. Journal of

- **Trenhaile AS (1987).** The Geomorphology of Rock Coasts. Oxford: Clarendon Press.

- **Trenhaile AS. (2019).** Hard-Rock Coastal Modelling: Past Practice and Future Prospects in a Changing World. Journal of Marine Science and Engineering 7: 34–49.

- **Trenhaile, A.S. (1971).** Lithological control of high water rock ledges in the Vale of Glamorgan, Wales. Geografiska Annaler 56A, 59–69.

- **Trenhaile, A.S. (1978).** The shore platforms of Gaspé, Québec. Annals of the Association of American Geographers 68, 95–114.

- **Trudgill, S.T. (1976a).** The marine erosion of limestones on Aldabra Atoll, Indian Ocean. Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband 26, 164–200.

- **Trudgill, S.T. (1976b).** The subaerial and subsoil erosion of limestone on Aldabra Atoll, Indian Ocean. Zeitschrift für Geomophologie Supplementband 26, 10-201.

- **Tsujimoto, H. (1987).** Dynamic conditions for shore platform initiation. Science Reports of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba A8, 45–93.

- **Twidale, C.R. and Campbell, E.M. (1999).** Development of a basin, doughnut and font assemblage on a sandstone coast, Western Eyre Peninsula, South Australia. Journal of Coastal Research 14, 94-1385.