مجلة جامعة بني وليد للعلوم الإنسانية والتطبيقية
Bani Waleed University Journal of Humanities and Applied Sciences
تصدر عن– جامعة بني وليد – ليبيا
Website:https://jhas-bwu.com/index.php/bwjhas/index
المؤتمر الجغرافي الأول لقسم الجغرافيا بكلية الآداب بني وليد
المجلد الحادي عشر ــ العدد الرابع ــ 2026 عدد خاص الصفحات (147- 159) ISSN 3005-3900

Spatial Analysis of Shoreline Dynamics and their Environmental Impacts on the Leptis Magna Site: An Analytical Study Using the DSAS Model (1990–2025)

Duha Amari Eddaba [1]*, Muftah Ali Alsed [2], Ail Mohamed Ben Taleb [3]
[1,2,3] Libyan center for Climate Change Research, Tripoli, Libya
aalkrekchi74@gmail.com

التحليل المكاني لديناميكية الخط الساحلي وتأثيراته البيئية على موقع لبدة الكبرى دراسة تحليلية باستخدام نموذجDSAS (1990-2025م)

ضحى العماري الضبع [1]، مفتاح علي الصيد [2] علي محمد بن طالب[3]
[3,2,1] المركز الليبي لأبحاث تغير المناخ، طرابلس، ليبيا

Received: 13-03-2026	Accepted: 15-04-2025	Published: 01-06-2026

Copyright: © 2026 by the authors. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الملخص

تتناول هذه الدراسة تحليل ديناميكية خط الساحلي وتأثيراته البيئة على موقع مدينة لبدة الكبرى الأثري، مع التركيز على ظاهرة التآكل الساحلي الناتجة عن التغيرات المناخية، واعتمدت المنهجية على دمج تقنيات الاستشعار عن بعد (RS) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) من خلال نموذج Digital Shoreline Analysis System (DSAS)، لتحليل التغيرات التي طرأت على خط الساحل خلال الفترة الزمنية (1990–2025).خلصت النتائج إلى أن ساحل المدينة يمر بمرحلة تراجع (Erosion)واضحة تهدد الهياكل الأثرية المتاخمة للشاطئ؛ حيث سجلت الدراسة تراجعاً في 185 مقطعاً عرضياً بنسبة 69.29% من إجمالي الساحل المدروس، بحد أقصى للتراجع بلغ 179.35 متراً. في المقابل، سجلت 82 مقطعاً حالة تقدم (Accretion) بنسبة 30.71% بحد أقصى 146.85 متراً. وكشفت الدراسة أن متوسط معدل التآكل السنوي بلغ 0.74 متر/سنة، وهو مؤشر رقمي يعكس حالة "الهشاشة الساحلية"؛ حيث يتجاوز هذا المعدل القدرة الطبيعية للشاطئ على التجدد، مما يؤدي إلى تآكل تدريجي في القاعدة المساحية للموقع الأثري؛ فهذا يعني أن اليابسة تفقد سنوياً قرابة 74 سم لصالح البحر، هذا الرقم يعتبر مرتفعاً في المناطق التي تحتوي على آثار ثابتة، لأنه سوف يفقد أمتار من الأرض كل عقد من الزمان، وبناءً على هذه المعطيات، تم تصنيف الساحل إلى ثلاث نطاقات: (ساحل متعرض للتآكل، ساحل مستقر، ساحل متعرض للترسيب)، مما يستوجب تدخلات عاجلة لحماية المناطق المصنفة كأكثر عرضة للخطر.

الكلمات الدالة: التحليل المكاني، الاستشعار عن بعد(RS)، خط الساحل، نظم المعلومات الجغرافية(Gis)، نظام تحليل الخط الساحلي الرقمي(DSAS) .

Abstract
This study addresses the analysis of coastal dynamics and their environmental impacts on the site of the ancient city of Leptis Magna, focusing on the phenomenon of coastal erosion resulting from climate change. The methodology relied on integrating remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS) techniques through the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) model to analyze changes that occurred along the coastline during the period (1990–2025). The results concluded that the city's coast is undergoing a clear phase of recession (Erosion) that threatens the archaeological structures adjacent to the shore; the study recorded recession in 185 cross-sections, representing 69.29% of the total studied coast, with a maximum recession of 179.35 meters. Conversely, 82 cross-sections showed accretion conditions (Accretion), accounting for 30.71%, with a maximum advance of 146.85 meters. The study revealed that the average annual erosion rate reached 0.74 meters/year, a numerical indicator reflecting the state of "coastal fragility"; this rate exceeds the natural capacity of the beach to regenerate, leading to gradual erosion of the spatial base of the archaeological site. This means that the land loses about 74 cm annually to the sea, a figure considered high in areas containing fixed monuments, as meters of land will be lost every decade. Based on these data, the coast was classified into three zones: (erosion-exposed coast, stable coast, sedimentation-exposed coast), necessitating urgent interventions to protect the areas classified as most at risk**.**

Keywords: Spatial Analysis, Remote Sensing (RS), Shoreline, Geographic Information Systems (GIS), Digital Shoreline Analysis System (DSAS).

المقدمة:

تُعد المناطق الساحلية من أكثر النظم البيئية تعقيداً وديناميكية، حيث يمثل "خط الساحل" الفاصل الحيوي الذي تتداخل فيه القوى الجيومورفولوجية، التكونية، والتغيرات المناخية، وتخضع هذه النطاقات لتأثيرات متباينة تشمل التعرية البحرية، والترسيب، وارتفاع منسوب سطح البحر، فضلاً عن الضغوط الناجمة عن الأنشطة البشرية(Mahapatra et al., 2014) ، وتتجلى خطورة هذه العمليات في إحداث تغييرات جذرية في مورفولوجيا السواحل؛ إذ تؤدي التعرية إلى تراجع اليابسة وفقدان الموائل البحرية، بينما تُسهم عمليات الترسيب في تبديل خصائص الوسط الشاطئي، مما يلقي بظلاله على الأنشطة الملاحية والترفيهية والاقتصادية.

ويعد حوض البحر الأبيض المتوسط من أكثر المناطق العالمية حساسية (Climate Hotspot) تجاه تداعيات التغير المناخي؛ نظرًا لطبيعته كبحر شبه مغلق محاط بثلاث قارات، وتشير الدراسات إلى أن معدل ارتفاع منسوب مياهه يتجاوز المعدلات العالمية بضعفين إلى ثلاثة أضعاف؛ ففي الوقت الذي يسجل فيه المنسوب العالمي ارتفاعاً بنحو 2.5ملم/ سنة، يقفز في البحر المتوسط ليصل إلى 6.8ملم/ سنة، وسط توقعات بارتفاع قد يبلغ 2.5متر بحلول نهاية القرن الحادي والعشرين (Brubacher, 2021) .

تمتلك ليبيا ساحلاً يمتد نحو 1900كيلومتر، احتضن عبر العصور حضارات متعاقبة تركت إرثاً ثقافياً ومعمارياً فريداً، غير أن الطبيعة الطبوغرافية لأغلب المدن الأثرية الليبية، والتي تقع ضمن نطاقات ساحلية منخفضة الارتفاع بنسبة تصل إلى ثلاثة أرباع طول الساحل (البيئة، 2010)، تجعلها عرضة لمخاطر "التهجير المكاني" نتيجة التآكل الساحلي والغمر البحري.

وتبرز مدينة "لبدة الكبرى (Leptis Magna)" كأحد أهم هذه المواقع؛ فهي المصنفة ضمن قائمة التراث العالمي منذ عام 1982؛ إلا أن المخاطر المحدقة بها دفعت لجنة التراث العالمي لإدراجها عام 2016 ضمن المواقع المهددة بالخطر(المتحدة،2016)، كما عزز تقرير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ

(IPCC)هذه المخاوف، بتصنيف "لبدة" ضمن سبعة مواقع أثرية في شمال أفريقيا مهددة بالاندثار نتيجة التعرية البحرية في الفترة ما بين 2100–2050م (Trisos et al, 2023).

2. مشكلة الدراسة:

تتمثل مشكلة الدراسة في تسارع معدلات التغير المكاني لديناميكية الخط الساحلي في المنطقة المواجهة لموقع لبدة الكبرى الأثري، وما يتبع ذلك من مخاطر بيئية وجيومورفولوجية تهدد استدامة المعالم الأثرية. ويمكن بلورة المشكلة في التساؤل الرئيس التالي:

ما طبيعة ومعدلات التغير المكاني لديناميكية الخط الساحلي لموقع لبدة الكبرى بين عامي (1990-2025م)، وكيف تساهم هذه التغيرات في تصاعد المخاطر الجيومورفولوجية والبيئية التي تهدد سلامة الموقع؟

ومن خلاله تتفرع الأسئلة الأتية: -

1- ما اتجاه ومقدار التغير الصافي (NSM) والمعدل السنوي للحركة (EPR) للخط الساحلي المواجه لمدينة لبدة الكبرى خلال فترة الدراسة؟

2- ما هي القطاعات الساحلية الأكثر تعرضاً للتآكل (Erosion) أو الترسيب (Accretion) وفقاً لمؤشر الانحدار الخطي(**LRR) ؟**

3- ما طبيعة العلاقة المكانية بين النطاقات ذات التآكل الشديد والتوزيع المكاني للمباني والآثار القائمة على طول الساحل؟

3. أهداف الدراسة:

1- حساب المعدلات السنوية للتآكل/الترسيب عند موقع لبدة باستخدام مؤشريEPR, LRR .

2- تحديد المناطق الثرية الأكثر عرضة لخطر التآكل الساحلي.

3- تحليل العلاقة بين بين التدخلات البشرية وسرعة تآكل خط الساحل امام الموقع.

4. أهمية الدراسة:

تكمن أهمية الدراسة في محاولة سد الفجوة البحثية حيث تفتقر الدراسات الجيومورفولوجية في ليبيا لبحوث كمية دقيقة توظف نموذجDSAS في تقييم المخاطر على المواقع الأثرية، بالإضافة الى انها توفر قاعدة بيانات رقمية لخطوط الساحل التاريخية (1990- 2025م) كمرجع للدراسات المستقبلية ورصد التغير المناخي.

كما يمكن ان تساهم أيضا في تزويد مصلحة الاثار والجهات ذات الاختصاص بخرائط دقيقة تحدد أولويات التدخل لحماية الاثار المهددة.

5. فرضية الدراسة:

تفترض الدراسة وجود علاقة ارتباطية موجبة بين التغيرات المورفوديناميكية لخط الساحل وبين هشاشة الاستقرار الإنشائي للموقع الأثري في لبدة، حيث يتجاوز معدل التآكل السنوي القدرة الطبيعية للشاطئ على التعويض، مما يصنف المنطقة كبيئة ذات "هشاشة ساحلية عالية".

6. مناهج الدراسة:

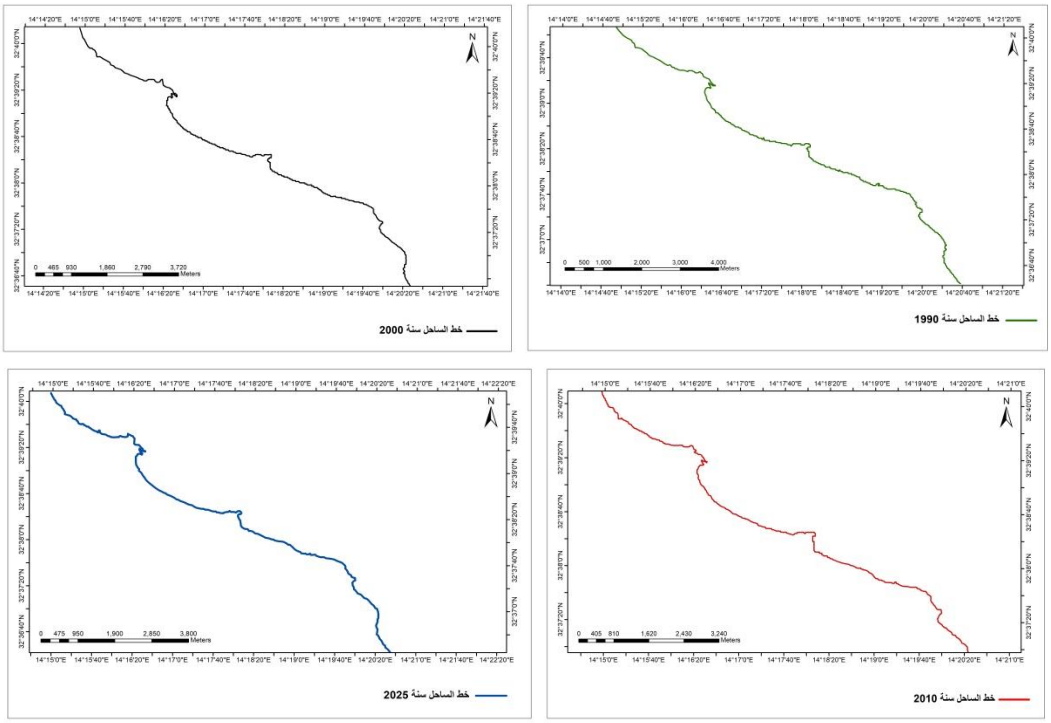
اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي والمنهج التاريخي، والمنهج المقارن، وذلك باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد(RS)، إلى جانب أدوات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) ونموذج (DSAS)التي تلعب دورًا مهماً في رصد تغيرات السواحل وتحليلها وحساب سرعة التغيرات خلال فترات زمنية مختلفة.

7. أساليب الدراسة:

اعتمدت الدراسة على تقنية الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في تحليل التغيرات الساحلية، حيث تم استخدام برنامج ENVIاصدار 5.3 لاستخراج خطوط الساحل، بالإضافة الى برنامج ArcGIS بجانب نظام تحليل الخط الساحلي الرقمي لتحليل البيانات المكانية.

كما تم الاعتماد على نطاق الاشعة تحت الحمراء القريبةNIR لتمييز المياه عن اليابسة، وباستخدام برنامج ENVI، طبقت تقنية تقسيم الالوان Color Slicingعبر تحليل الهستوغرام باستخدام نطاقات طيفيه (Band4)في المرئيات Landsat 5 و (Band 5) في المرئية Landsat8 التي تظهر تباينا واضحا بين اليابسة والمسطح المائي، من خلال ضبط القيم اللونية، يتم تحديد الحدود الفاصلة بدقة بين البحر والبر، وبعد استخراج خط الساحل تلقائيًا يتم تصديره الى برنامج Arc Map الشكل (1).

وفي أطار تحليل التغيرات الساحلية تم استخدام نظام تحليل الخط الساحلي الرقمي (DSAS) الإصدار 5.0 "وهو برنامج مفتوح المصدر يعمل ضمن برنامج نظم المعلومات الجغرافية (Arc GIS) التابع لمعهد أبحاث النظم البيئية ESRI" (Mahapatra et al., 2014). "وهو أداة حسابية تحسب إحصاءات معدل التغير لسلسلة زمنية من بيانات متجهات الخط الساحلي" (Himmelstoss et al, 2021). وتعتبر هذه الأداة من أكثر الأدوات الفعالة في تحليل تغيرات الخط الساحلي، حيث تتطلب وقت أقل مقارنةً بالعديد من الأساليب والطرق التقليدية (Baig et al., 2020)، توفر أداة نظام تحليل الخط الساحلي الرقمي مجموعة من الأدوات الإحصائية المستخدمة في حساب وتحليل تغيرات خط الساحل، حيث يعتمد على تحليل سلسلة زمنية من خطوط الساحل لاستخراج معدلات التغيرات واتجاهاته.

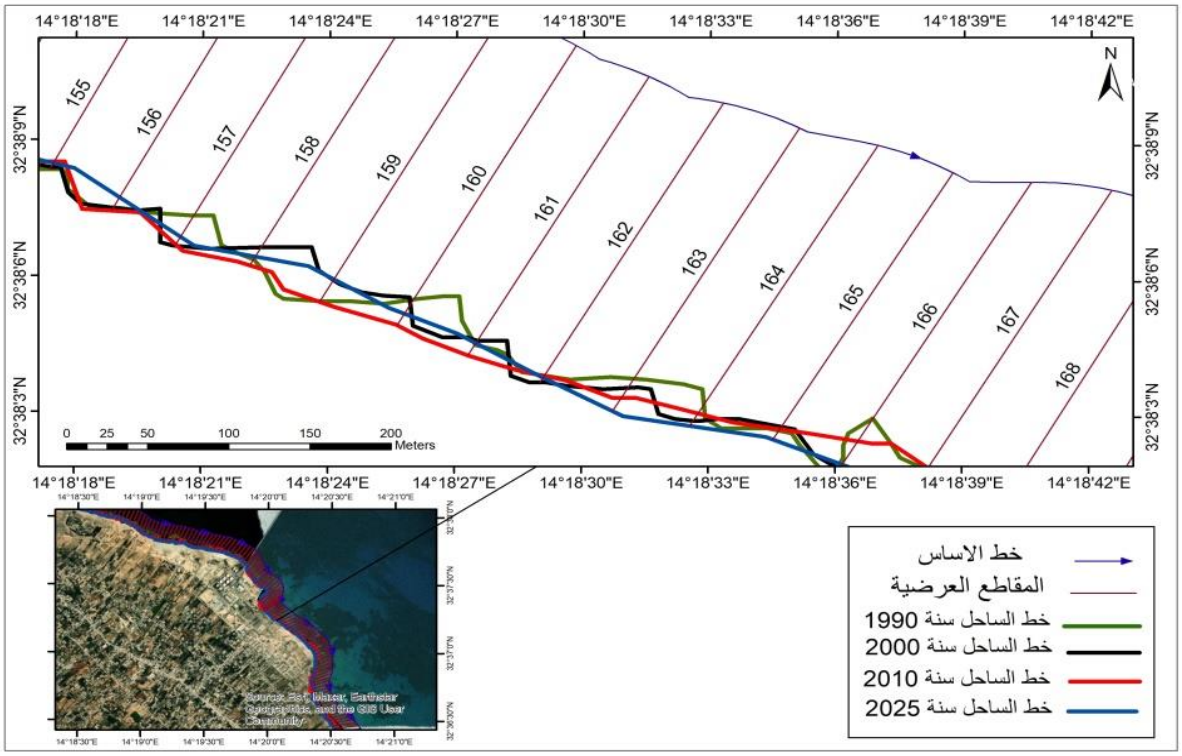


المصدر/عمل الباحث ببرنامج ENVI، وArc map10.8. اعتمادا على المرئيات الفضائية (Landsat)

شكل (1) خطوط ساحل منطقة الدراسة (2025/2010/2000/1990م)

ومن أبرزها مؤشر تغير خط الساحل Shoreline Change Envelope (SCE)، وحركة خط الساحل الصافية Net Shoreline Movement (NSM)، ومعدل نقطة النهاية End Point Rate (EPR)، ومعدل الإنحدار الخطي Linear Regression Rate (LRR) وغيرها (Mutaqin, 2017) كما يتيح البرنامج اعداد تقرير احصائي مفصل يتضمن معدلات التعرية والتراكم، وفترات الثقة وهامش الخطأ. يتطلب استخدام DSAS أن تكون البيانات بوحدات مترية في نظام إحداثيات مُسقط مثل (Universal Transverse Mercator) ، يتم إدارة جميع بيانات المدخلات و المخرجات الإحصائية ضمن قاعدة بيانات جغرافية نوع

personal Geodatabase كما يجب أن تكون جمع بيانات خطوط السواحل في طبقة واحدة ضمن قاعدة البيانات وادراج تواريخ خطوط الساحل بالصيغة MM/DD/YYYY ،بالإضافة الى إنشاء خط الأساس Baseline وهو خط موازي لخطوط الساحل، ويكون نقطة البداية لجميع المقاطع العرضية التي تُرسم عموديًا عليه بمسافة تباعد يحددها الباحث تتقاطع المقاطع العرضية مع كل خط ساحل لإنشاء نقطة قياس، وتُستخدم نقاط القياس هذه لحساب معدلات تغير خط الساحل(Himmelstoss et al., 2021) الشكل (2) يبين المقاطع العرضية.



المصدر/ اعتمادا على نموذج DSAS وبرنامج Arc Map10.8.

شكل (2) القطاعات العرضية على طول خط ساحل منطقة الدراسة

8. حدود منطقة الدراسة:

تتمركز منطقة الدراسة حول مدنية لبدة الاثرية، الواقعة على الساحل الشمالي الغربي لليبيا، عند مصب وادي لبدة وتبعد حوالي 123كم شرق طرابلس، هذه الحدود الموضعية المحورية، اما فلكيا امتد تحليل خط الساحل ليغطي نطاقا اوسع بين خطي طول (55.89" 14' 14º) و(37.83" 20' 14º) شرقا ودائرتي عرض (59.34" 40' 32º) و (22.30" 36' 32º) شمالا، لضمان شمولية أكبر في رصد التغيرات الساحلية وتوفير تحليل أكثر عمقا لديناميكية الساحل في منطقة الدراسة خلال الفترة من (2025/1990م) الشكل (3).

المصدر/عمل الباحث باستخدام (Arc Map10.8) استناداً على بيانات OpenStreetMap.

شكل (3) الحدود الجغرافية لمنطقة الدراسة

9. الدراسات السابقة:

أجريت العديد من الدراسات الخاصة بدراسة المناطق الساحلية ورصد تغيرات خطوط السواحل لمعرفة التحديات والتهديدات التي تعرضت لها المناطق الساحلية المنخفضة ومنها:

1- اشارت دراسة (السباحي، 2018) التي أجريت على ساحل البحر الأحمر الشرقي بين منطقة القنفذة و الليث لفهم مدى تأثير التركيبة البيئية والعوامل الطبيعة بتأكل السواحل من خلال تحليل مرئيتين فضائيتين بفارق زمني أربعين سنة لخصت الدراسة أن خط الساحل لمنطقة الدراسة تعرض لعمليات تعرية نشطة بسبب ما تحمله مصبات الأودية من مواد رملية وطينية وغرينيه تلتصق مع بعضها عند مصب الوادي حيث تنجرف بسهولة مع موجات البحر كما أظهرت الدراسة أن البروزات الصخرية والرملية اكثر عرضة لتعرية نتيجة لتعرضها المستمر والمباشر للتيارات والأمواج البحرية كما أن التدخلات البشرية كبناء السدود عملت على اضطراب في التوازن الطبيعي للرواسب النهرية، والتي بدورها أوضحت أن قوى التعرية الساحلية نشطة على ساحل البحر الأحمر.

2- دراسة(مقطيط، 2022) التي أجريت على جوانب ميناء طنجة الواقع شمال المغرب حيث اعتمدت الدراسة على استخراج خط الساحل من مرئيات فضائية من الفترة 1984 الى 2002 وهي الفترة ما قبل بناء الميناء واستخراج خط الساحل من مرئيات من الفترة 2002الى 2017 الفترة بعد بناء الميناء استندت الدراسة على مؤشراتNSM EPR أوضحت نتائج الدراسة أن التدخلات البشرية والمتمثلة في إنشاء الموانئ ووضع حواجز وتغير العمق البحري لفتح فنوات لمرور السفن وكذلك تغير اتجاه مصبات الأودية من خلال انشاء سدود لمنع وصول الرواسب إلى الشواطئ كما هو الحالة في واد ي الرمل وتغير اتجاه وادي غلالة لتجنب وقوع فيضانات ساهم وبشكل كبير في تغير جيومرفولوجية الشاطئ وأصبحت المنطقة هشة وغير مستقرة.

3- دراسة (Westley et al., 2023) التي أجريت على ساحل شرق ليبيا لمعرفة مدى تأثير تآكل السواحل على المواقع الأثرية من خلال تقييم تغيرات خط الساحل بدقة مكانية مختلفة الأول من خلال استخراج خطوط ساحلية من صور لأندسات متوسطة الدقة (30متر) أما الثانية استخراج خطوط السواحل باستخدام

صور أقمار صناعية حديثة ذات دقة عالية جدًا (اقل من واحد متر) وباستخدام نظام تحليل الخط الساحلي الرقمي تمت مقارنة خطوط السواحل المستخرجة بعد حساب معدلات وحجم حركة خط الساحل أظهرت نتائج الدراسة وجود مناطق تآكل واسعة حول المواقع الأثرية في المنطقة الشرقية الليبية ،شملت أبولونيا وبتوليمايس وتوكرا، كما أكدت الدراسة أن معدلات تراجع السواحل ازداد خلال السنوات الأخيرة، ومن المرجح أن تكون مرتبطة بالأنشطة البشرية، كالتوسع العمراني واستخراج الرمال، مما قد يهدد الهيكلية الأثرية في المستقبل القريب.

4-أشارت دراسة (عبده، 2024) أن تراجع الشاطئ الغربي لخليج العقبة نحو اليابسة أدي إلى العديد من المخاطر منها تآكل أساسات المنشآت المقامة بمحاذاة الشاطئ وتدمير الطرق الساحلية كما أدي إلى نحت السواحل وتغيير جيومرفولوجية خط الشاطئ، كما لخصت الدراسة لوجود أربع انواع من الشواطئ ملحية، رملية، صخرية في منطقة الدراسة حيث بلغ متوسط تآكل الشاطئ في منطقة الدراسة 0.62 متر مكعب سنويًا. من خلال تتبع الصور الجوية والمرئيات الفضائية على فترات زمنية مختلفة تم الوصول لأسباب أدت إلى تراجع شاطئ العقبة منها التغيرات المناخية خاصة ظاهرة الاحتباس الحراري والعواصف البحرية وذوبان الجليد وغيرها كما توصلت الدراسة إلى بعض الحلول للتقليل من حد المخاطر التي تواجه شواطئ خليج العقبة.

10. رصد ديناميكية خط الساحل وتقدير معدلات التآكل والترسيب بمنطقة الدراسة:

اعتمدت الدراسة في مرحلة الرصد الخرائطي على سلسلة من المرئيات الفضائية (Landsat 5 / Landsat8)التي غطت الفجوة الزمنية ما بين (1990–2025م) كما موضحة بالجدول (1)، حيث أُخضعت هذه الصور لعمليات تصحيح اشعاعي وتصحيح تأثير الغلاف الجوي لضمان دقة استخلاص خط الساحل.

جدول (1) بيانات المرئيات الفضائية المستخدمة في رصد ديناميكية خط الساحل.

القمر والمستشعر	رقم المشهد	تاريخ	الدقة المكانية
Landsat TM-5	188037	1990	30
Landsat TM-5	188037	2000	30
Landsat TM-5	188037	2010	30
Landsat8-OLI/TIRS	188037	2025	30

المصدر/ عمل الباحث استناداً على بيانات هيئة المساحة الجيولوجية الأميركية USGS

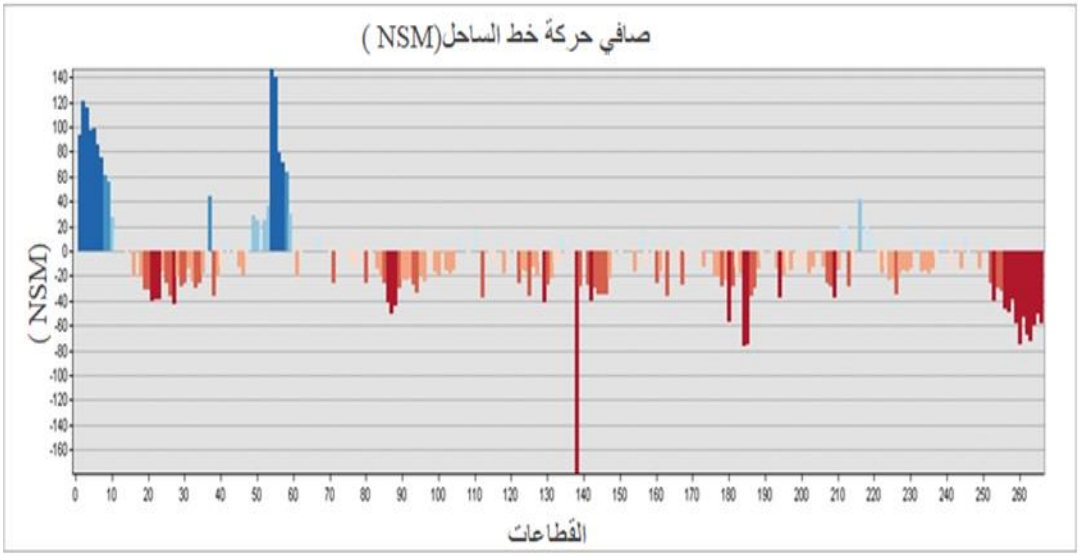
ولتحويل هذه البيانات الخام إلى مؤشرات كمية قابلة للقياس، تم توظيف نموذج نظام تحليل خط الساحل الرقمي (DSAS) كإضافة برمجية متقدمة ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (ArcGIS) تكمن أهمية هذه الأداة في قدرتها على إنشاء مقاطع عرضية (Transects) عمودية على خط الأساس، مما يتيح حساب معدلات التغير عبر مؤشرات إحصائية، أبرزها معدل الانحدار الخطي (LRR) ونطاق حركة خط الساحل (NSM)ومعدل النقطة النهائية (EPR)، وهو ما سمح بتحويل التغيرات المورفولوجية المرئية إلى خرائط رقمية تعكس بوضوح مناطق الهشاشة الساحلية.

في هذه الدراسة تم حساب المعاملات الإحصائية (NSM)و(EPR) و(LRR) عند مستوى الثقة 95% لكل معدل تغيير، ومسافة التباعد بين القطاعات العرضية 100 متر كالاتي: -

1- مؤشر صافي حركة خط الساحل Net shoreline Movement (NSM) يتم تحديد المسافة بالأمتار بين أقدم وأحدث خط للساحل بحسب التسلسل الزمني والتي تمكن من معرفة تقدم اليابسة على حساب البحر أو العكس.

NSM = distance (m) between oldest and youngest shorelines

ومن خلال تحليل خط الساحل لمدينة لبدة الكبرى سجلت أقصى مسافة تراجع -179.35متر سجلت في قطاع (138)، حيث كان متوسط مسافة التآكل على طول خط الساحل 22.44متر، وأقصي مسافة تقدم 146.85متر سجلت في القطاع (56) بمتوسط مسافة تقدم على طول خط الساحل 24.4 متر كما موضح بالشكل (4).

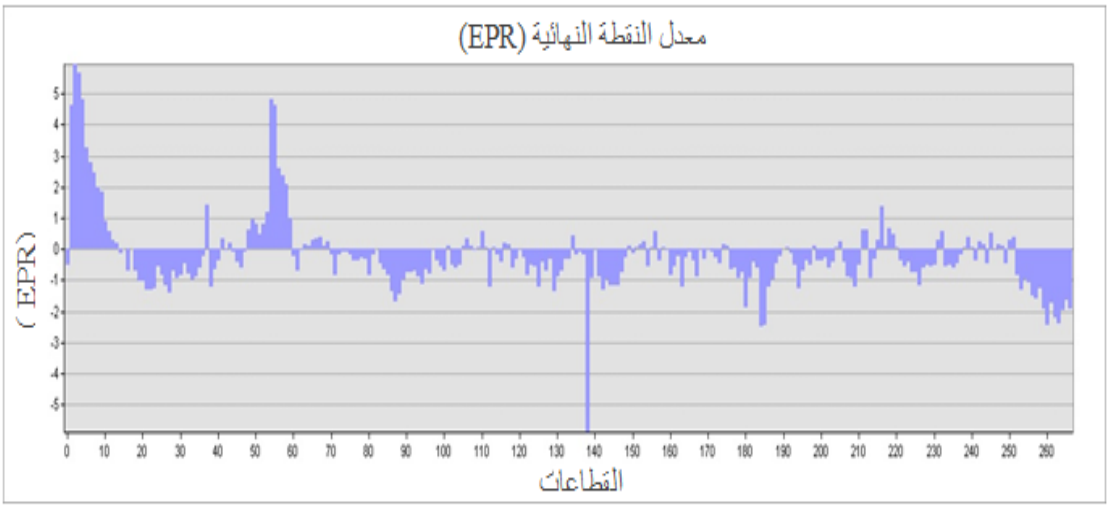


المصدر/عمل الباحث باستخدام نموذج نظام تحليل خط الساحل الرقمي (DSAS) برنامج Arc Map10.8.

شكل (4) مؤشر صافي حركة خط الساحل (NSM)

2- معدل النقطة النهائية (EPR) (متر /سنة) يتم حسابه بقسمة مسافة حركة الخط الساحلي (NSM)على الزمن بين الخط الساحلي الأقدم والأحدث وفق المعادلة التالية:

EPR=NSM/ Time between oldest and most recent shoreline



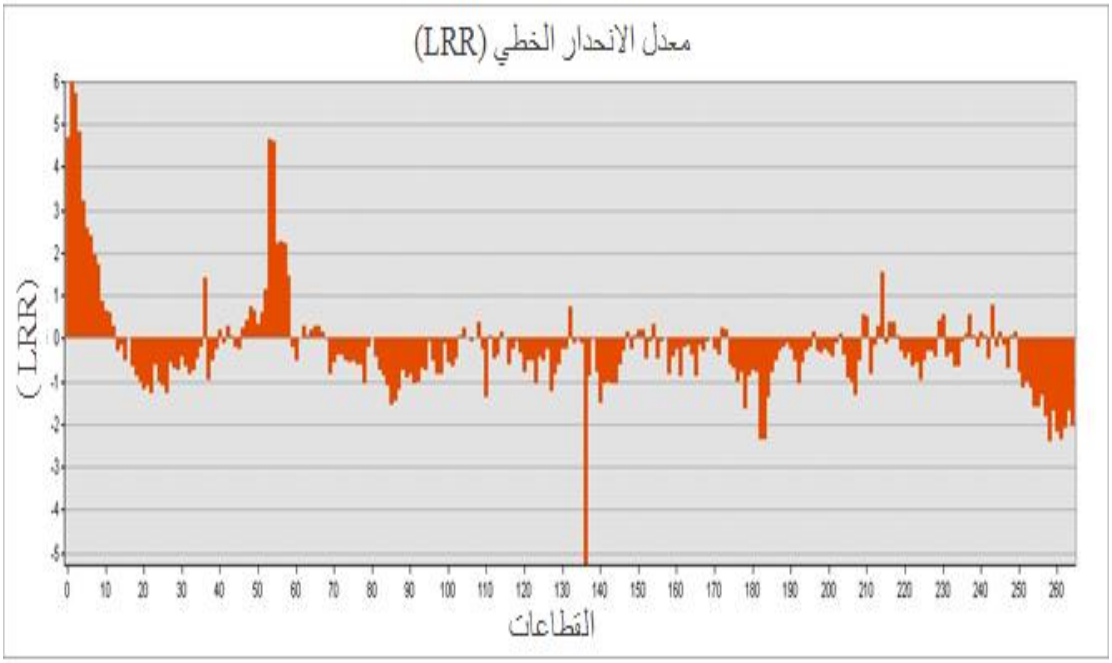
المصدر/عمل الباحث باستخدام نموذج نظام تحليل خط الساحل الرقمي (DSAS) برنامج Arc Map10.8.

شكل (5) معدل النقطة النهائية (EPR)

أظهرت نتائج EPR بهامش خطأ ±0.06 أن أقصى قيمة تراجع -5.89متر/سنة سجلت في قطاع (138)، حيث كان متوسط جميع معدلات التآكل على طول خط الساحل 0.74متر/سنة، وأقصي قيمة تقدم 5.95متر/سنة سجلت في القطاع (4) بمتوسط جميع معدلات التقدم على طول خط الساحل 0.89متر/سنة كما موضح بالشكل (5).

3- معدل الانحدار الخطي (LRR) وهو يعطي معدل تغير خط الساحل بناءً على الانحدار الخطي المطبق على جميع مواقع خط الساحل في السلسلة الزمنية (متر/ سنة) (Himmelstoss et al., 2021).

بهامش خطأ ±0.06 كانت أقصى قيمة تراجع -5.29متر/سنة سجلت في قطاع (138)، حيث كان متوسط جميع معدلات التآكل على طول خط الساحل 0.71متر/سنة، وأقصي قيمة تقدم 6 متر/سنة سجلت في القطاع (4) بمتوسط جميع معدلات التقدم على طول خط الساحل 0.93متر/سنة كما موضح بالشكل (6).



المصدر/عمل الباحث باستخدام نموذج نظام تحليل خط الساحل الرقمي (DSAS) برنامج Arc Map10.8.

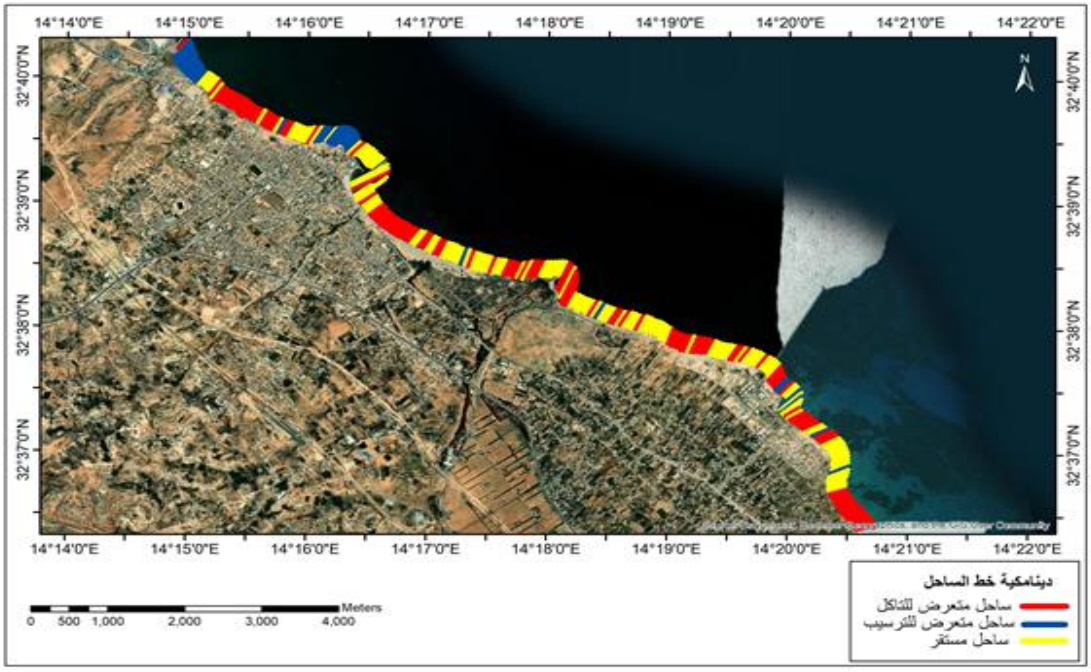
شكل (6) معدل الانحدار الخطي (LRR)

ويتم استخدام NSM لتوصيف تغير خط الساحل أما(EPRو(LRR)لتحديد معدل سرعة تغير خط الساحل تكون المخرجات التي يتم الحصول عليها القيمة الموجبة تدل على تقدم الساحل أو زيادة مساحته، والقيمة السالبة تدل على تراجع الساحل أو تآكله (Ambarwati & Siswanto, 2025)، يتم تصنيف الخط الساحلي بناء على هذه الإحصائيات بالإضافة الى تقارير إحصائية تبين معدلات التعرية والتراكم، وفترات الثقة.

من خلال تحليل خط الساحل لمدينة لبدة الكبرى من الفترة 1990م إلى 2025م، تبين أن هنالك تعرية (تآكل) و تراكم (ترسيب) على طول خط ساحل لبدة ، إلا أن أغلب المقاطع العرضية أظهرت عمليات تعرية على طول الساحل أي تراجعاً لخط الساحلي نحو اليابسة حيث كانت عدد المقاطع التي سجلت تراجع 185 قطاع من إجمالي عدد القطاعات البالغ 267 أي بنسبة 69.29 % وأعلى مسافة تراجع 179.35متر سجل في القطاع 138 يدل هذا التراجع على التآكل الشديد في هذا القطاع والذى كان بعد مصب وادي لبدة حيث تعرض لعمليات تعرية نشطة على الارجح بسبب ما يحمله الوادي من مواد رملية وطينية عند مصب الوادي

حيث تنجر بسهولة مع موجات البحر، أما عدد المقاطع التي سجلت تقدم 82 قطاع من إجمالي عدد القطاعات البالغ 267 أي بنسبة 30.71% وهذه القطاعات كان في المناطق القريبة جدا من ميناء الخُمس وبالقرب من ميناء الصيد البحري، ويرجع ذلك بسبب عمل حواجز للميناء ككاسرات الأمواج والحواجز الخرسانية حيث تشكل حاجز امام حركة التيارات الساحلية المتحركة من الغرب الي الشرق، كما تعمل على حجز الرواسب من الجهة الشرقية ، وكانت أعلى مسافة تقدم 146.85 متر سجلت في القطاع 56، وأن الحد الأقصى للتأكل بلغ 5.89 متر/سنة في القطاع 138 وأن متوسط معدلات التآكل على طول خط الساحل 0.74 متر/سنة، وهذا يشير لهشاشة المناطق الساحلية مما قد يُشكل خطورة على هيكلية المنطقة الأثرية القريبة جدا من الشاطئ.

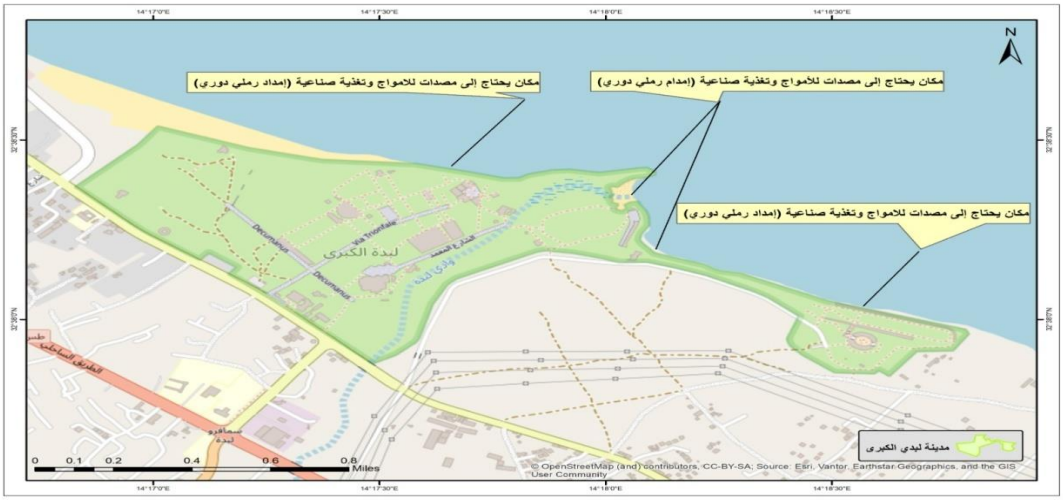
تم تصنيف الخط الساحلي لمنطقة الدراسة بناءً على نتائج (LRR) لتحديد المناطق الأكثر هشاشة لمنطقة الدراسة إلى ثلاثة فئات ساحل متعرض للتأكل (-5.3 الى0.5 متر/سنة)، ساحل مستقر (- 0.5 إلى 0.5 متر/سنة)، وساحل متعرض للترسيب (0.5 الى6 متر/سنة) كما هو مبين في الشكل (7).



المصدر/عمل الباحث باستخدام نموذج نظام تحليل خط الساحل الرقمي (DSAS) ببرنامج Arc Map10.8. استنادا على بيانات هيئة المساحة الجيولوجية الامريكية.

شكل (7) التصنيف المكاني لديناميكية خط الساحل بمنطقة الدراسة.

استنادا الى التصنيف المكاني لديناميكية خط الساحل الموضح في الشكل (7)، تم توجيه التحليل نحو القطاعات الاكثر هشاشة ضمن ساحل لبدة، وتحديد المواقع التي تتطلب استراتيجيات واولويات عاجلة للتدخل، كما هو موضح في الشكل (8). هذه القطاعات يجب ان تحظى بأهمية خاصة بسبب تداخلها مع مواقع ذات قيمة اثرية.



المصدر/عمل الباحث باستخدام (Arc Map10.8) استناداً على نتائج (LRR) وبيانات OpenStreetMap.

شكل (8) الواجهات الأثرية في مدينة لبدة الأكثر عرضة للخطر.

الخاتمة:

تأسيساً على ما تقدم من تحليل رقمي ورصد جيومورفولوجي، تخلص هذه الدراسة إلى أن ساحل مدينة "لبدة الكبرى" يواجه تهديداً وجودياً ناتجاً عن تضافر العوامل المناخية والديناميكيات البحرية النشطة. فقد أثبتت النتائج أن الموقع يقع ضمن "النطاقات الحرجة (Hotspots) "في حوض البحر الأبيض المتوسط، حيث تساهم القوى الطاقية للأمواج وارتفاع منسوب البحر في تسريع وتيرة تآكل القاعدة المساحية للموقع، بما يتماشى مع التحذيرات الدولية الصادرة عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC).

إن المؤشرات الرقمية المستخلصة تدق ناقوس الخطر؛ إذ إن استمرار معدلات التآكل الحالية لا يعني مجرد تراجع جغرافي لخط الساحل، بل ينذر بفقدان أمتار طولية من الحرم الأثري كل عقد من الزمان، مما يضع هذا الإرث الإنساني العالمي أمام حتمية "الانهيار الإنشائي" أو "الغمر الكلي" في المستقبل القريب والمتوسط. كما كشف التحليل عن وجود خلل هيكلي في الميزانية الرسوبية للشاطئ، حيث تجاوزت معدلات التعرية القدرة الطبيعية للمنطقة على التجدد الذاتي(Natural Recovery) ، وهوما يؤكد هشاشة النظام البيئي الساحلي في هذه المنطقة.

النتائج والتوصيات:

نتائج الدراسة:

كشفت المعالجة الرقمية والتحليل الإحصائي لخط ساحل مدينة لبدة الكبرى باستخدام نموذج (DSAS) خلال الفترة (1990–2025م) عن الحقائق الجيومورفولوجية التالية: -

1- أظهرت القياسات أن النمط العام السائد هو "التراجع الساحلي(Shoreline Retreat) "، حيث شملت عمليات التآكل 185 مقطعاً عرضياً، ما يمثل 69.29%من إجمالي طول الساحل المدروس، بحد أقصى للتراجع بلغ 179.35متراً.

2- سجلت الدراسة متوسط معدل تآكل سنوي يقدر بـ 0.74متر/سنة .وبالنظر إلى طبيعة المنطقة كحرم أثري يضم منشآت ثابتة، فإن فقدان ما يقارب 7سم سنوياً يعد مؤشراً حرصاً يعكس تسارع وتيرة خسارة اليابسة لصالح البحر.

3- سجلت الدراسة حالة تقدم (Accretion) في 82مقطعاً فقط بنسبة 30.71%، بحد أقصى بلغ 146.85 متراً، وهي معدلات غير كافية لتعويض الفقد المساحي الناتج عن التعرية البحرية.

4- أتاح التحليل المكاني تصنيف الساحل إلى ثلاث نطاقات متباينة الخطورة (ساحل متعرض للتآكل ساحل متعرض للترسيب وساحل مستقر) الشكل (7)، مما كشف عن تركز المخاطر في المقاطع الملاصقة مباشرة للهياكل الأثرية الأساسية، مما يجعلها في حالة "هشاشة ساحلية" قصوى.

توصيات الدراسة:

بناءً على ما كشفت عنه نتائج التحليل المكاني باستخدام نموذج DSAS، ومن واقع الهشاشة الساحلية المرصودة، تخلص الدراسة إلى التوصيات التالية:

1- تبني استراتيجية التغذية الاصطناعية والبدء في تنفيذ عمليات إمداد رملي دورية للمناطق التي سجلت معدلات تآكل عالية (أكثر من 0.74 متر/سنة) الشكل (8)، لتعويض العجز في الميزانية الرسوبية وحماية القواعد الإنشائية للآثار المتاخمة للشاطئ.

2- إنشاء حواجز أمواج مغمورة بتركيب مصدات أمواج تقنية أمام الواجهات الأثرية الأكثر عرضة للخطر، لخفض طاقة الأمواج الواصلة للساحل وتحفيز الترسيب الطبيعي للرمال دون تشويه المشهد البصري للموقع التاريخي الشكل (8).

3- تفعيل نظام مراقبة دائم من أجل تحديث التحليل المكاني لخط الساحل بشكل دوري (كل سنتين) باستخدام صور الأقمار الصناعية عالية الدقة، لمراقبة تطور "نقاط الخطورة" وتعديل خطط التدخل وفق المتغيرات المستجدة.

4- الإدارة المتكاملة للمنطقة الساحلية بالتنسيق بين مصلحة الآثار والهيئة العامة للبيئة يمنع أي أنشطة بشرية أو إنشائية في النطاقات التي صنفها النموذج كبيئة "عالية التآكل" ووضع نطاق حماية (Set-back Zone) .

5- التوعية والتوثيق الرقمي من خلال توثيق المعالم الأثرية الساحلية باستخدام تقنية المسح الليزري لإنشاء سجل رقمي دقيق لها، بالتوازي مع حملات توعية حول تأثير التغيرات المناخية على التراث الوطني.

6- السعي للحصول على دعم فني ومالي دولي من المنظمات المهتمة بحماية التراث العالمي (مثل اليونسكو) لتمويل مشاريع الحماية والترميم للمواقع الأثرية المهددة.

المراجع.

[1] الأمم المتحدة (2016م)، تقرير لجنة التراث العالمي المجتمعة، إسطنبول، خمسة مواقع ليبيّة على قائمة التراث العالمي المعرّض للخطر. https://news.un.org/ar/story/2016/07/255532

[2] السباحي، صالح (2019م)، تغيرات خط ساحل البحر الأحمر الشرقي ما بين القنفذة –الليث باستخدام المرئيات الفضائية 1980-2018م)، المؤتمر العلمي العاشر بجامعة الملك عبد العزيز بجدة.

[3] الهيئة العامة للبيئة (2010). التقرير الوطني الرابع حول تنفيذ اتفاقية التنوع الحيوي Retrieved from .طرابلس-ليبيا

[4] عبده، أسامة حسين شعبان، التغيرات الشاطئية على الساحل الغربي لخليج العقبة: دراسة في الجيومورفولوجيا التطبيقية، مجلة كلية الآداب بقنا، العدد 63.

[5] 5- مقطيط، عبد الرحيم (2022م). دراسة دينامية خط الساحل بهوامش ميناء طنجة المتوسط بتطبيق نظم المعلومات الجغرافية الاستشعار عن بعد، مجلة العلوم الانسانية والطبيعية، العدد 3، المجلد الرابع، كلية الآداب والعلوم الإنسانية، جامعة سيدي محمد بن عبد الله.

المراجع باللغة الإنجليزية

[6] Ambarwati, R. D., & Siswanto, A. D. (2025). Shoreline Stability Analysis At Merah Putih Beach, Bangkalan Regency. BIO Web of Conferences,

[7] Baig, M. R. I., Ahmad, I. A., Shahfahad, Tayyab, M., & Rahman, A. (2020). Analysis of shoreline changes in Vishakhapatnam coastal tract of Andhra Pradesh, India: an application of digital shoreline analysis system (DSAS). Annals of GIS, 26(4), 361-376.

[8] Brubacher, M. (2021). CLIMATE-FRAGILITY RISK BRIEF LIBYA. adelphi research GmbH. 1-23.

[9] Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2021). Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.1 user guide (2331-1258). (Open-File Report, Issue. U. S. G. Survey.
[10] Mahapatra, M, Ratheesh, R., & Rajawat, A. (2014). Shoreline change analysis along the coast of South Gujarat, India, using digital shoreline analysis system. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 42(4), 869-87
[11] Mutaqin, B. W. (2017). Shoreline changes analysis in kuwaru coastal area, Yogyakarta, Indonesia: An application of the digital shoreline analysis system (DSAS). International Journal of Sustainable Development and Planning, 12(7), 1203-1214
[12] Trisos CH, A. I, Totin E, Ayanlade A, Efitre J, Gemeda A, Kalaba K, Lennard C, Masao C, Mgaya Y, Ngaruiya G, Olago D, Simpson NP, Zakieldeen S. 2022. . (2023). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Contribution of Working Group II to the IPCC Sixth Assessment Report. https://hdl.handle.net/10568/122034
[13] Westley, K., Nikolaus, J, Emrage, A, Flemming, N., & Cooper, A. (2023). The impact of coastal erosion on the archaeology of the Cyrenaican coast of Eastern Libya. PLOS ONE, 38-31. Retrieved from https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283703.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **JLABW** and/or the editor(s). **JLABW** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.