

تحليل ديناميكيات زحف الكثبان الرملية والتنبؤ بتطورها في سهل بنغازي خلال الفترة (2000-2035)

د. فاطمة مفتاح محمد حسن غازي

محاضر بقسم الجغرافيا/ كلية الآداب/ جامعة إجدابيا- ليبيا

Falshrif24@gmail.com

تاريخ الاستلام 2025/11/22 تاريخ القبول 2025/12/17 تاريخ النشر 2026/01/01

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل ديناميكيات زحف الكثبان الرملية في سهل بنغازي خلال الفترة 2000-2025، بالاعتماد على صور الأقمار الصناعية Landsat و Sentinel-2 وتقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، بالإضافة إلى استخدام نموذج بيانات اللوحة عبر EViews والبيانات الميدانية. اعتمدت الدراسة على المنهج المكاني التحليلي لرصد توزيع الكثبان وقياس امتدادها وتحليل معدلات الزحف السنوية، كما استخدم المنهج الوصفي الإحصائي لتقدير العلاقة بين المتغيرات المناخية والبيئية ومعدلات الحركة. أظهرت النتائج ارتفاع معدل زحف الكثبان من 8.5 إلى 10.6 م/سنة، مع زيادة نسبة التربة الرملية من 60% إلى 64%، وثبات الانحدار عند 1.8 درجة، ما يعكس تأثير الخصائص الجيومورفولوجية في تسريع الحركة. كما توسعت مساحة الكثبان النشطة من 160 إلى 230 كم² نتيجة تدهور الغطاء النباتي والعوامل المناخية. وتشير التوقعات للفترة 2025-2035 إلى استمرار ارتفاع معدل الزحف ليصل إلى 13.6 م/سنة، مع تراجع مؤشر التربة والمياه (SMI) من 0.28 إلى 0.18، ما يعكس انخفاض الرطوبة وزيادة وتيرة التصحر، وتدهور الغطاء النباتي لتصل مساحة الكثبان المتأثرة إلى نحو 300 كم². لذلك، توصي الدراسة بتطبيق استراتيجيات مستدامة لمكافحة التصحر، تشمل استصلاح الأراضي وزراعة النباتات المقاومة للجفاف وتثبيت التربة، إلى جانب اعتماد إدارة متكاملة للكثبان ومتابعة التغيرات البيئية باستخدام الأقمار الصناعية و GIS، مع تطوير مؤشرات المخاطر مثل DSI لدعم خطط التنمية البيئية وتقليل أثر التصحر في المنطقة.

الكلمات المفتاحية: زحف الكثبان الرملية؛ مؤشر التربة والمياه (SMI)، نموذج بيانات اللوحة (Panel Data)؛ تدهور الغطاء النباتي، سهل بنغازي.

***Analysis of Sand Dune Encroachment Dynamics and Prediction
of Their Evolution in the Benghazi Plain during the Period
(2000–2035)***

FATMA. M. MOHAMED.H. GAZI

Department of Geography, Faculty of Arts, Ajdabiya University- Libya.

Falshrif24@gmail.com

Received: 22/11/2025

Accepted: 17/12/2025

Published: 01/01/2026

Abstract:

This study aims to analyze the dynamics of sand dune encroachment in the Benghazi Plain during the period 2000–2025, relying on Landsat and Sentinel-2 satellite imagery, Geographic Information Systems (GIS) techniques, panel data modeling using EViews, and field observations. A spatial analytical approach was adopted to monitor dune distribution, measure their spatial expansion, and analyze annual migration rates. In addition, a descriptive statistical approach was employed to estimate the relationships between climatic and environmental variables and dune movement rates. The results indicate an increase in the dune migration rate from 8.5 to 10.6 m/year, accompanied by a rise in sandy soil proportion from 60% to 64%, while slope remained constant at 1.8 degrees, highlighting the role of geomorphological characteristics in accelerating dune movement. Moreover, the area of active dunes expanded from 160 to 230 km² due to vegetation cover degradation and climatic factors. Projections for the period 2025–2035 suggest a continued increase in migration rates, reaching approximately 13.6 m/year, alongside a decline in the Soil Moisture Index (SMI) from 0.28 to 0.18, reflecting reduced moisture availability, intensified desertification processes, and further degradation of vegetation cover. Consequently, the area affected by sand dunes is expected to reach nearly 300 km². Accordingly, the study recommends the implementation of sustainable desertification control strategies, including land rehabilitation, planting drought-resistant vegetation, and soil stabilization measures. It also emphasizes the importance of adopting integrated dune management and continuous environmental monitoring using satellite imagery and GIS, as well as developing risk indicators such as the Desertification Severity Index (DSI) to support environmental planning and mitigate the impacts of desertification in the region.

Keywords: Sand dune encroachment; Soil Moisture Index (SMI); panel data model; vegetation cover degradation; Benghazi Plain.

مقدمة:

يُعدُّ زحف الكثبان الرملية من الظواهر الطبيعية المعقّدة التي تُفضي إلى تدهور بيئي واسع النطاق، خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة، حيث تلعب الرياح المستمرة، ندرة الأمطار، وخصائص التربة الرملية دوراً رئيسياً في تحريك الرمال وتشكيل الكثبان النشطة (Goudie, 1974, pp45-47). "وتؤثر هذه الظاهرة سلّياً على النظم البيئية والهيدرولوجية، كما تمثل تهديداً مباشراً للبنية التحتية، الأراضي الزراعية، والموارد المائية، ممّا يترجم إلى خسائر اقتصادية ملموسة على المستويين المحلي والوطني" (Middleton & Thomas, 1997, p123). يُصنّف سهل بنغازي، الواقع على الساحل الشمالي الشرقي، ضمن أكثر المناطق تعرضاً لزحف الرمال نتيجة طبيعته المناخية شبه الجافة، حيث تتضافر عوامل ارتفاع درجات الحرارة، سرعة الرياح السائدة، ونقص المطر لتعزّز ديناميكيات حركة الكثبان (Zurqani, 2019, p4). تشير الدراسات إلى أن نحو 95٪ من مساحة ليبيا تقع ضمن البيئات الصحراوية وشبه الصحراوية، ما يجعلها عرضة بشدة لظاهري التصحر وزحف الكثبان (FAO, 2020, p12). ويؤدي زحف الرمال إلى تدهور الغطاء النباتي، وفقدان التربة الخصبة، وزيادة المخاطر البيئية والاقتصادية. يُعرّف زحف الكثبان الرملية بأنه عملية جيومورفولوجية ديناميكية تنتج عن انتقال الرواسب الرملية بفعل الرياح السائدة، ممّا يؤدي إلى تحرك الكثبان من مواقعها الأصلية وتقدمها باتجاه المناطق المجاورة، تبعاً لشدة الرياح، خصائص الحبيبات الرملية، ودرجة تماسك السطح وغطائه النباتي (Lancaster, 1995, pp3-6). تُعدُّ هذه العملية من أبرز مظاهر النشاط الريحي في البيئات الجافة وشبه الجافة، إذ تسهم في إعادة تشكيل سطح الأرض وتسريع عمليات التدهور البيئي. وعلى الرغم من أهميتها، تُشير الدراسات السابقة إلى محدودية واضحة في البحوث الكمية طويلة المدى التي تناولت ديناميكيات زحف الكثبان وربطها بالمتغيرات المناخية والجيومورفولوجية. وفي هذا السياق، تبرز نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وتقنيات الاستشعار عن بُعد كأدوات فعّالة للتحليل المكاني والزمني للظاهرة، حيث تمكن من رصد التغيرات المورفولوجية، قياس معدلات الزحف، وتتبع تطور الكثبان عبر الزمن، بما يسهم في توفير فهم أدق للعمليات الطبيعية المؤثرة في المنطقة (Hugenholtz, Levin, Barchyn, 2012 & Baddock). بناءً على ذلك، تهدف هذه الدراسة إلى تحليل ديناميكيات زحف

الكثبان الرملية في سهل بنغازي خلال الفترة 2000-2035، وتقدير أثر المتغيرات المناخية والبيئية على معدلات الزحف، باستخدام منهجية تكاملية تجمع بين التحليل المكاني-الزماني عبر GIS، الاستشعار عن بُعد، والنماذج الإحصائية المعتمدة على بيانات اللوحة (Panel Data)، لتقديم رؤية علمية دقيقة تسهم في تطوير استراتيجيات مستدامة لمكافحة التصحر وإدارة الموارد الطبيعية في المنطقة.

- تحديد مشكلة البحث:

رغم الأهمية البيئية والاقتصادية لسهل بنغازي، تواجه المنطقة تحديات متزايدة نتيجة زحف الكثبان الرملية وتغيرات الغطاء الأرضي، ما يؤثر على التربة والمحاصيل والبنية التحتية. الدراسات السابقة اقتصرت غالباً على التحليل الوصفي، وكانت محدودة جغرافياً وزمناً، ولم تستخدم نماذج تنبؤية دقيقة لرصد حركة الكثبان الرملية. وتبرز الحاجة إلى دراسة شاملة تربط بين التغيرات المناخية، مؤشرات رطوبة التربة، والنماذج الإحصائية للتنبؤ بزحف الكثبان الرملية، باستخدام تقنيات الاستشعار عن بُعد، ونظم المعلومات الجغرافية، ونماذج بيانات اللوحة (Panel Data)، لتقديم تقييم دقيق وديناميكي للتغيرات الحالية والتنبؤ بمسار تطورها مستقبلياً.

- الفرضيات:

- 1- تؤثر العوامل المناخية (سرعة الرياح، معدل الهطول المطري، درجة الحرارة)، والعوامل البيئية (التركيب الرملي للتربة) تأثيراً مباشراً على توسع الكثبان الرملية النشطة في سهل بنغازي.
- 2- توجد علاقة إيجابية بين نسبة التربة الرملية وتوسع الكثبان النشطة، إذ يسهم ارتفاع التركيب الرملي للتربة في تسريع ديناميكيات حركة الكثبان.
- 3- توجد علاقة سلبية بين الغطاء النباتي ومعدلات زحف الكثبان الرملية، حيث يؤدي تدهور الغطاء النباتي إلى زيادة معدل الزحف.
- 4- يمكن لنموذج بيانات اللوحة (Panel Data)، المدمج مع تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وتقنيات الاستشعار عن بُعد، التنبؤ بدقة بمعدلات زحف الكثبان الرملية.

- أهداف البحث:

- تتبع ديناميكيات حركة الكثبان الرملية في سهل بنغازي خلال الفترة (2000-2025)،

- وتحليل معدلات زحفها واتساع مساحتها.
- تقييم أثر العوامل المناخية والبيئية (درجة الحرارة، سرعة الرياح، معدل الهطول المطري، تركيب التربة، الغطاء النباتي) على حركة الكثبان.
- توظيف نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، وتقنيات الاستشعار عن بعد، ونموذج بيانات اللوحة (Panel Data) في تحليل الظاهرة بدقة.
- تطوير نموذج تنبؤ لمعدلات زحف الكثبان المستقبلية واقتراح استراتيجيات فعالة للتكيف مع التصحر والحد من المخاطر البيئية الناتجة عن زحف الكثبان.
- موقع منطقة الدراسة:

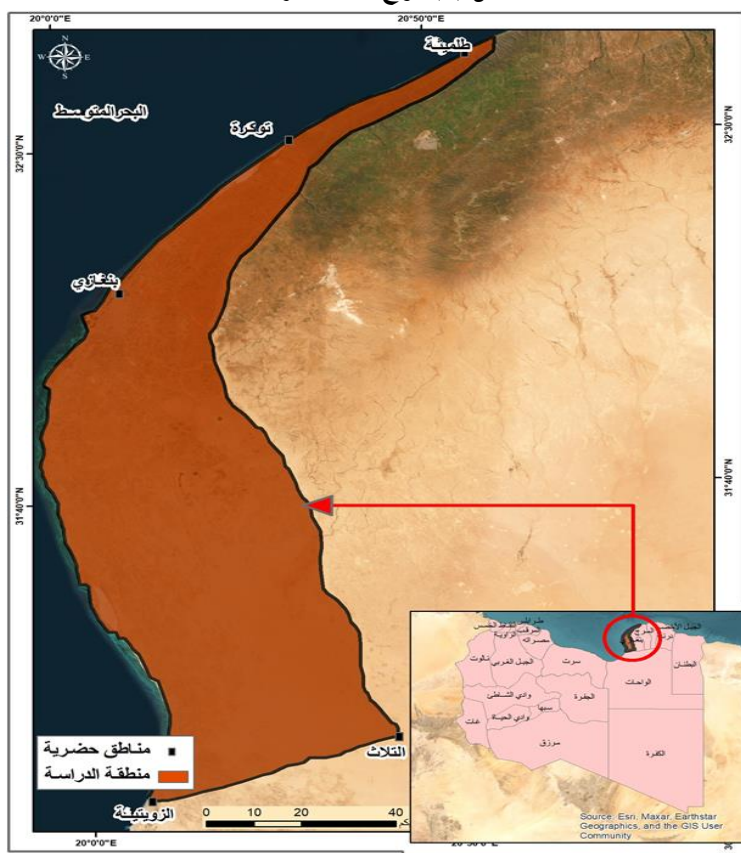
يقع سهل بنغازي في النطاق الشمالي الشرقي من ليبيا، بين دائرتي عرض $30^{\circ} 57' 34''$ و $30^{\circ} 44' 00''$ شمالاً، وبين خطي طول $17^{\circ} 55' 19''$ و $21^{\circ} 00' 00''$ شرقاً، وتبلغ مساحته حوالي 6620.4 كم^2 . ويمتد من جهة الغرب والشمال الغربي على ساحل البحر المتوسط بطول يصل إلى 255 كم كما تُحدّ المنطقة من جهتها الشمالية بالحافة الشرقية والجنوبية الشرقية لجبل الأخضر بطول يقارب 220 كم ، ويجاورها من الشمال الشرقي الجرف الأسود، بينما تمتد حدودها الجنوبية عند منطقة التداخل بين تربة برقة شبه الحمراء وتربة برقة البيضاء (سهل سرت). ويأخذ امتداد المنطقة شكلاً طويلاً من الشمال الشرقي إلى الجنوب الغربي على هيئة مثلث معقوف. وتقترب الحافة الشمالية لجبل الأخضر من خط الساحل كلما اتجهنا نحو الشمال الشرقي، حيث لا تفصلها عن الشاطئ سوى مسافة تُقدَّر بنحو 2 كم ، في حين تتسع مساحة المنطقة باتجاه الجنوب والجنوب الغربي لتصل إلى أقصى عرض لها بين بلدة الزويتينة على ساحل البحر وبلدة انتلات في الداخل بمسافة تقارب 54 كم كما يظهر في شكل (1).

- مناهج الدراسة:

تعتمد هذه الدراسة على تكامل عدد من المناهج الجغرافية الوصفية والتحليلية لدراسة ظاهرة زحف الكثبان الرملية في سهل بنغازي خلال الفترة (2015-2025)، مع التركيز على الأبعاد المكانية والبيئية. وقد شملت المنهجية ما يأتي:

- المنهج الإقليمي: تناولت دراسة الخصائص الطبيعية والبيئية لسهل بنغازي، بما في ذلك المناخ، خصائص التربة، والغطاء النباتي، بهدف تحديد العوامل الرئيسة المؤثرة في ديناميكيات

شكل (1) موقع منطقة الدراسة.



المصدر: أُعدت باستخدام برنامج ArcMap الإصدار 10.8، استناداً إلى محمد عبد الله لامي (2003م) ص26.

❖ أدوات ووسائل وأساليب الدراسة:

1- استخدام الصور الفضائية وتقنيات الاستشعار عن بُعد في تحليل ديناميكيات الكثبان الرملية:

- اعتمدت الدراسة على صور فضائية متعددة المصادر (Landsat 8، Landsat 7، Sentinel-2) خلال الفترة 2000-2025 لرصد معدلات زحف الكثبان الرملية في منطقة البحث. شملت المعالجة الأولية للصور تصحيحًا هندسيًا، وتجميع القنوات، وتحسينًا مكانيًا باستخدام برنامج ArcGIS 10.8، تلاها تطبيق أسلوب التصنيف المراقب (Supervised Classification). ولضمان دقة التصنيف، تم اختيار صور شهر أبريل نظرًا لانخفاض التداخل السحابي ووضوح التباين بين الغطاء النباتي والتربة العارية، مما عزز دقة رصد الكثبان النشطة. لضمان صحة نتائج التصنيف، تم استخدام عينات أرضية ميدانية (Ground Truthing) مأخوذة عبر مسوحات مباشرة ونقاط GPS، بالإضافة إلى الاستعانة بالخرائط الطبوغرافية والصور عالية الدقة للتحقق من فئات الأرض المختلفة. بعد إجراء التصنيف، تم تقييم دقة النتائج باستخدام مصفوفة الالتباس (Confusion Matrix)، وحساب مؤشرات الدقة مثل نسبة الدقة الكلية (Overall Accuracy) ومعامل كبا (Kappa Coefficient)، لضمان موثوقية تحليل تغيرات حواف الكثبان (Crest Lines) عبر الزمن.

- بيانات Landsat 8/9 (OLI/TIRS): بدقة 30 م وبفاصل زمني 16 يومًا، لرصد التغيرات طويلة الأجل في الغطاء الأرضي.

- Sentinel-2 (MSI): بدقة 10-20 م وتكرار 5-10 أيام، لمراقبة مفصلة ودورية للتغيرات في الغطاء النباتي والكثبان.

- MODIS (Terra/Aqua): بدقة 250-1000 م وغطاء يومي، لاشتقاق مؤشرات مناخية ونباتية إقليمية مثل NDVI وLST.

- SMAP وSMOS: لرصد رطوبة التربة وحساب مؤشر التربة والمياه (SMI) بدقة 36-9 كم.

- استخدام بيانات الارتفاع الرقمي وتحليل المرئيات متعددة السنوات: لتحليل تأثير التضاريس على ديناميكيات حركة الكثبان الرملية، تم استخدام نماذج الارتفاع الرقمي

(DEM) من نوع (Shuttle Radar Topography Mission) SRM وASTER GDEM المستخرجة من USGS EarthExplorer، لإنتاج خرائط الانحدار وتحليل التباينات الطبوغرافية في منطقة الدراسة. كما تم الاعتماد على سلسلة من الصور الفضائية متعددة السنوات (Sentinel-2، Landsat 8، Landsat 7) للفترة 2000-2025 لرصد التغيرات الزمنية للكثبان الرملية، مع التركيز على صور شهر أبريل لتقليل التداخل السحابي وضمان وضوح التباين بين التربة العارية والغطاء النباتي. وقد أتاح الجمع بين هذه البيانات المكانية والزمنية دراسة شاملة لتأثير التضاريس والارتفاع على معدلات وزحف الكثبان النشطة.

- GRACE/GRACE-FO: لتقدير التغيرات في مخزون المياه الجوفية وربطها بديناميكيات حركة الرمال. يوضح جدول (1) خصائص الصور الفضائية المستخدمة، والتي تم الحصول عليها من منصات USGS EarthExplorer و Copernicus Open Access Hub.

جدول (1) خصائص الصور الفضائية المستخدمة في الدراسة.

م. ر	القمر	نوع المستشعر	الدقة المكانية (م)
1	Landsat-7	ETM+ Panc	30 × 30
2	Landsat-8	OLI, Panc	15 × 30
3	Landsat-8	OLI, Panc	15 × 30
4	Sentinel-2	Multispectral	10
5	Sentinel-2	Multispectral	10

المصدر : إعداد الباحثة بالاعتماد على بيانات الأقمار الصناعية Landsat 7 وLandsat 8 و Sentinel-2 للفترة 2015-2025، تم الحصول عليها من موقع:

USGS EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>) و Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>).

2- تطبيق نموذج بيانات اللوحة (Panel Data): اعتمدت هذه الدراسة على نموذج بيانات اللوحة (Panel Data Regression) باستخدام برنامج EViews 10، استناداً إلى Baltagi (2021)، لقياس العلاقة بين المتغيرات المناخية والبيئية ومعدلات زحف الكثبان الرملية في سهل بنغازي. ويجمع هذا النموذج بين البيانات الزمنية (2015-2025) والبيانات المقطعية (مواقع الرصد)، بما يسمح بالتحكم في المتغيرات غير الملحوظة

وتقليل الانحياز. كما تم اعتماد نموذج التأثيرات الثابتة (Fixed Effects Model) وفقاً لـ Torres-Reyna (2007)، لتقدير الأثر النسبي للعوامل المناخية والجيومورفولوجية والهيدرولوجية والنباتية باستخدام أساليب الإحصاء المكاني. ويتضمن التحليل أيضاً اختبارات التكامل المشترك (Cointegration Tests)، للكشف عن ترابط المؤشرات وتفاعلها في التأثير على حركة الكثبان وصياغة توقعات مستقبلية لمساراتها. سيتم استخدام معادلة النموذج الآتية:

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{1,it} + \beta_2 X_{2,it} + \dots + \beta_k X_{k,it} + \alpha_i + \epsilon_{it}$$

حيث:

Y_{it} : مؤشر زحف الرمال في الموقع i والزمن t . (المتغير التابع: على سبيل المثال، معدل زحف الكثبان الرملية).

$X_{k,it}$: المتغيرات المستقلة (المؤشرات المناخية، الجيومورفولوجية، الهيدرولوجية، النباتية) في الموقع i والزمن t .

β_0 : الحد الثابت.

β_k : معاملات الانحدار للمتغيرات المستقلة التي تُعبر عن قوة وتأثير كل عامل.

α_i : التأثير الفردي الثابت (أو العشوائي) للموقع i ، ويمثل الخصائص غير الملحوظة لكل موقع التي لا تتغير عبر الزمن.

ϵ_{it} : حد الخطأ العشوائي. تم تنفيذ جميع الاختبارات الإحصائية باستخدام EViews 10، بما في ذلك تقدير معاملات النموذج، وحساب معايير الملاءمة، وإجراء الاختبارات التشخيصية للتحقق من سلامة النموذج وصحة الاستنتاجات.

3- البيانات المناخية والبيئية: تم جمع البيانات المناخية والبيئية اللازمة للدراسة من مصادر رسمية ومتخصصة لضمان الدقة والموثوقية، وشملت هطول الأمطار، سرعة الرياح، درجة الحرارة، ورطوبة التربة، من المصادر الآتية:

- ERA5 (ECMWF/C3S): تُستخدم لإعادة تحليل المتغيرات المناخية والغلاف الجوي على نطاق عالمي، بما في ذلك درجة الحرارة، سرعة الرياح، والرطوبة. تتميز هذه البيانات بدقة مكانية تصل إلى حوالي 31 كم × 31 كم ودقة زمنية ساعة واحدة؛ مما يتيح رصد التغيرات المناخية اليومية والفترات الطويلة.

- CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data): تُستخدم لتوفير بيانات دقيقة لهطول الأمطار، مستندة إلى

مزيج من الاستشعار عن بعد وقياسات محطات الأرصاد الجوي. توفر هذه البيانات دقة مكانية 0.05° حوالي 5 كم) ودقة زمنية يومية، ما يجعلها مناسبة لدراسة تأثير الهطول على حركة الكثبان الرملية وديناميكيات البيئة المحيطة. يسهم دمج هذه البيانات المكانية والزمنية في إجراء تحليل شامل ومتكامل لتأثير التضاريس والارتفاع والعوامل المناخية على ديناميكيات الكثبان الرملية في منطقة الدراسة.

– الدراسات السابقة:

على الرغم من وجود عدد من الدراسات التي تناولت ظاهرة زحف الكثبان الرملية، إلا أنه لم يتم العثور على أي دراسة تناولت هذه الظاهرة في منطقة سهل بنغازي مع التركيز على التنبؤ بحركة الكثبان باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، وهو ما شكّل الدافع الرئيسي لإجراء هذه الدراسة. ومن أبرز الدراسات السابقة التي تم الاطلاع عليها ما يلي:

– ركزت دراسة أبوبكر موسى محمد (2009) على ظاهرة زحف الكثبان الرملية وتأثيرها على الطرق الصحراوية الرئيسية في شمال وغرب ليبيا، محددةً أربع طرق رئيسية: نالوت – غدامس، الوطية – الجوش، العزيزية-غريان، وسبها- براك. أظهرت النتائج أن الرمال في هذه المناطق ذات حبيبات متوسطة إلى ناعمة وكثافة منخفضة؛ مما يسهل تحرك الكثبان تحت تأثير الرياح، خاصة مع انخفاض معدلات الأمطار وغياب الغطاء النباتي. وأكدت الدراسة أن الجمع بين الحلول الهندسية، مثل الحواجز الميكانيكية والطرق الخرسانية متعددة المراحل، وتطبيق الزراعة التثبيتية للنباتات المحلية ذات الجذور العميقة، يقلل بشكل ملحوظ من زحف الكثبان الرملية، ويحد من الحوادث المرورية والخسائر الاقتصادية المرتبطة بها.

– دراسة El Gammal, E. A., & El Gammal, A. E. A. (2010) بعنوان الأثر الخطر والتطور الجيني للكثبان الرملية غرب سمالوط، مصر، أظهرت الدراسة أن رمال الكثبان الرملية جنوب شرقي وادي النيل تخضع لتآكل أكثر تجانساً مقارنة بمصدرها، مع وجود نسب مرتفعة من الحبيبات المستديرة المطفأة (RM)، تعكس طول فترة النقل والترسيب وقرب المصادر الرسوبية. الرمال الشمالية أكثر استدارة ولمعناً بفعل العمليات النهرية، بينما تزداد الحبيبات المخططة والأقل استدارة في الجنوب بسبب الرياح. تتحرك الكثبان بفعل الرياح الشمالية والغربية، وتشكل كثباناً طولية مستقلة، ما يشير إلى نضج متقدم، وتظل حركة هذه الكثبان تهديداً مستمراً لإنتاجية الأراضي الزراعية.

دراسة - Gómez, D., Salvador, P., Sanz, J., Casanova, C., & Casanova, J. L. (2018) بعنوان كشف المناطق المعرضة لغزو الرمال باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في نواكشوط" استخدمت الدراسة مؤشر هشاشة غزو الكثبان الرملية (SDEVI) مع تقنيات نظم المعلومات الجغرافية لتقييم تعرض مدينة نواكشوط لتقدم الكثبان الرملية، مع الأخذ في الاعتبار خصائص الرياح، الانحدار، استخدام الأرض، الغطاء النباتي، وخصائص التربة. أظهرت النتائج أن أعلى مستويات الهشاشة تتركز في المناطق الشمالية الشرقية والشرقية، فيما سجلت بقية المناطق هشاشة متوسطة، وتشير الدراسة إلى أن الكثبان الرملية تشكل تهديداً كبيراً للبنية التحتية والأراضي الزراعية والمناطق السكنية.

دراسة ناصر بن سعيد جابر آل زينه (2020م) بعنوان مراقبة زحف الرمال والتنبؤ بحركتها باستخدام تقنية الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في محافظة بدر بمنطقة المدينة المنورة، هدفت إلى رصد حركة الرمال وتحديد اتجاهاتها وتقييم أضرارها على المناطق السكنية. أظهرت النتائج زيادة معدل زحف الرمال بنحو 150م² سنوياً خلال الفترة 2012-2016، مع حركة سنوية تقارب 24.6 متر/سنة باتجاه الغرب والجنوب، مما يشكل تهديداً للأحياء السكنية والمزارع والطرق، وخصوصاً الطريق المتفرع من السريع المدينة المنورة - ينبع.

تناولت جهان عبد القادر الخليف (2021م) دراسة بعنوان توظيف التقنيات الجغرافية الحديثة في تحديد المناطق المهددة بزحف الرمال على الطرق الرئيسية حول مدينة الرياض. أظهرت النتائج أن المنطقة المحيطة بالرياض تتعرض بشكل عام لخطر زحف الرمال من مختلف الاتجاهات، حيث تم تحديد مواقع الكثبان الرملية والمناطق المهددة باستخدام آلية التصنيف المقارن (Supervised Classification). وتبين أن أكثر الطرق تأثراً كان طريق مكة المكرمة، يليه طريق مطار الملك خالد، ثم طريق القصيم وطريق المدينة المنورة، مع وجود تباينات مكانية في درجة التهديد حسب تقاطع الطرق مع الكثبان الرملية. كما أبرزت الدراسة فعالية استخدام بيانات القمر الصناعي الأمريكي Landsat 8 في مراقبة زحف الرمال وتحديد المحاور الأكثر عرضة للمخاطر.

- دراسة إبراهيم سيد صابر بكري (2022) تناولت زحف الكثبان الرملية الهلالية وتأثيرها على طريق العقير - الهفوف في واحة الأحساء بالمملكة العربية السعودية، وخلص إلى أن متوسط حركة الكثبان بلغ 6.2 م/سنة خلال الفترة 2001-2013 و 9.5 م/سنة خلال الفترة 2013-2019، مع ملاحظة زيادة الحركة في الكثبان متوسطة الحجم وانخفاضها عند وجود الأعشاب الموسمية. وأظهرت النتائج أن أكثر من 75% من الزحف مرتبط بالرياح الشمالية، مما يؤكد الحاجة إلى مراقبة مستمرة لتقليل تأثيرات الزحف على الطرق.

- دراسة انتصار على حسن على، ماهر إبراهيم عبد المقصود، احمد أنور رفاعي، (2022)، بعنوان الأبعاد الاجتماعية والاقتصادية الناتجة عن زحف الكثبان الرملية في محافظة الوادي الجديد. تناولت زحف الكثبان الرملية في محافظة الوادي الجديد، أظهرت النتائج وعياً متوسطاً إلى مرتفع لدى السكان، وتأثره بالعمر والدخل والنوع والحالة التعليمية، مع وجود علاقات معنوية بين الوعي والمتغيرات الديموغرافية والاجتماعية. وأكدت الدراسة أن الزحف يشكل مشكلة رئيسية للمحافظة بسبب طبيعتها الصحراوية واتساع الأراضي غير المأهولة.

- دراسة أحمد عباس حسن وآخرون (2023م)، بعنوان: تحديد ومراقبة معدلات حركة الكثبان الرملية في وسط العراق باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد. وأظهرت النتائج زيادة سريعة في حركة الرمال باتجاه الرياح السائدة (الشمال الغربي-الجنوب الشرقي) بمعدلات تتراوح بين 40 و 600 مترًا خلال ستة أعوام، مع تنوع أشكال الكثبان بين الهلالية النشطة وأنواع أخرى مثل المستعرضة والسيفية والقباب والنبكة.

- دراسة El Aal, A. K. A., GabAllah, H. M., Megahed, H. A., Selim, M. K., Hegab, M. A., Fadl, M. E., Rebouh, N. Y., & El-Bagoury, H (2024). بعنوان تقييم المخاطر البيئية والجغرافية لمخاطر زحف الكثبان الرملية في الأراضي الجافة باستخدام تقنيات التعلم الآلي، اعتمدت على استخدام تقنيات RF و SVM و ANN، مع تطوير مؤشر جديد للكثبان المتحركة (DSI).

المبحث الأول: العوامل المؤثرة في ظاهرة زحف الرمال - دراسة تحليلية وتطبيق نموذج بيانات اللوحة (Panel Data):

أولاً: - العوامل المؤثرة في ظاهرة زحف الرمال (دراسة تحليلية للعوامل والمؤثرات):

تم تصنيف العوامل المؤثرة في هذه الظاهرة إلى أربعة أبعاد رئيسية، تتفاعل معًا بشكل متكامل لتشكيل ديناميكياتها، وهي على النحو الآتي:

1- المناخ: يُعد المناخ العامل الأساسي المحرك لديناميكيات زحف الرمال، حيث تؤثر سرعة الرياح، وكميات الأمطار، ودرجات الحرارة بشكل مباشر على شدة الظاهرة وتكرار حدوثها. يعرض الجدول (2) متوسط سرعة الرياح، وهطول الأمطار السنوي، ومتوسط درجة الحرارة خلال الفترة من 2015 إلى 2025. تشير البيانات إلى زيادة تدريجية في سرعة الرياح من 6.5 م/ث في عام 2015 إلى 7.6 م/ث في عام 2025، مع انخفاض ملحوظ في هطول الأمطار من 290 مم إلى 220 مم خلال نفس الفترة. كما يظهر ارتفاع تدريجي في متوسط درجة الحرارة السنوية من 20.8°م إلى 22.3°م. يعكس هذا الاتجاه المناخي تصاعد عوامل الجفاف والرياح، التي تُعد مؤثرات رئيسية في تسريع زحف الكشبان الرملية في المنطقة. ويشير المتوسط للفترة (2015-2025) إلى سرعة رياح تبلغ 7.1 م/ث، وهطول أمطار 245.4 مم، ومتوسط درجة حرارة 21.5°م، مما يوفر مرجعية علمية لفهم ديناميكيات التغير المناخي وتأثيرها على زحف الرمال.

2- العامل الجيولوجي: يمثل سهل بنغازي نموذجًا للتتابع الجيولوجي المتدرج، الذي يعكس التعاقب الزمني للتكوينات الصخرية، بدءًا من أواخر الزمن الثاني (العصر الطباشيري الأعلى)، مرورًا بتكوينات الزمن الثالث، وصولًا إلى رواسب الزمن الرابع الحديثة. وتتميز تكوينات الزمنين الثالث والرابع بكونها الأكثر انتشارًا من حيث الامتداد السطحي، مع لعبها دورًا محوريًا في تشكيل الخصائص الجيومورفولوجية للسهل (Conant & Goudarzi, 1967, pp41-45). تُمثل أقدم التكوينات الجيولوجية في منطقة سهل بنغازي تكوين توكرة، العائد إلى الطباشيري الأعلى، والذي يظهر في نطاقات محدودة شمال السهل بمساحة تُقدَّر بنحو 32 كم²، أي ما يمثل نحو 0.5% من إجمالي مساحة المنطقة. ويتكوّن هذا التكوين من طبقات متراصة من الحجر الجيري الصلب الغني بعقيدات الصوان، مع ميل عام للطبقات باتجاه الشمال الغربي، ما يشير إلى انتشار الرواسب البحرية خلال تلك الفترة (لامه،

(2003، ص36). تُمثّل تكوينات الزمن الثالث عنصراً أساسياً في التطور الجيولوجي لسهل بنغازي، ويبرز ضمنها تكوين أبولونيا الجيري، الذي يظهر في بعض الأودية جنوب غربي منطقة توكرة، مع توقع امتداده إلى أعماق كبيرة تحت سطح السهل. ويتكوّن هذا التكوين من صخور جيرية بحرية غنية بالحفريات الدقيقة، مما يعكس بيئة بحرية ضحلة نسبياً خلال تلك الحقبة (Conant & Goudarzi, 1967, pp88–90). ويُعدّ تكوين درنة من أبرز تكوينات المنطقة لاحتوائه على حفريات مجهرية متنوعة، خاصة الفورامنيفرا، مما يجعله مؤشراً مهماً على البيئات البحرية خلال الإيوسين الأوسط إلى الأعلى. كما يبرز تكوين الرجمة – عضو بنغازي (الميوسين الأوسط)، الذي يغطي نحو 11% من مساحة السهل، ويتكوّن أساساً من الحجر الجيري. وتغطي رواسب الزمن الرابع المساحة الأكبر من سهل بنغازي، إذ تبلغ نحو 88%، وتشمل رواسب فتاتية، وأودية موسمية، ورواسب ريجية، إضافة إلى التربة الحمراء التي تمثل الأساس الزراعي للمنطقة، وتُسهم في تشكيل ملامحها الجيومورفولوجية الراهنة (لامه، مرجع سابق، ص. 39–41).

جدول (2) المؤشرات المناخية السنوية ومتوسطها في سهل بنغازي للفترة (2015–2025).

السنة	متوسط سرعة الرياح (م/ث)	متوسط هطول الأمطار (مم/سنة)	متوسط درجة الحرارة السنوية (°م)
2015	6.5	290	20.8
2016	6.7	275	21.0
2017	6.8	260	21.1
2018	7.0	245	21.4
2019	7.1	230	21.6
2020	7.2	225	21.8
2021	7.0	250	21.5
2022	7.3	240	21.7
2023	7.4	235	21.9
2024	7.5	230	22.1
2025	7.6	220	22.3
المتوسط	7.1	245.4	21.5

المصدر: من إعداد الباحثة اعتمدت الدراسة على بيانات ERA5 الصادرة عن المركز الأوروبي للتنبؤات الجوية متوسطة المدى (ECMWF)، والتي توفر إعادة تحليل عالية الدقة للمتغيرات المناخية والغلاف الجوي علمياً، بما في ذلك: درجة الحرارة، وسرعة الرياح، والرطوبة. كما استُخدمت بيانات MODIS LST المستمدة من مستشعر MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) التابع لوكالة ناسا، بهدف قياس درجة حرارة سطح الأرض. وتُعد هذه البيانات أساسية في تحليل التغيرات المناخية والبيئية، بما في ذلك دراسة ظاهرة زحف الرمال.

3- العامل الجيومورفولوجي: يساهم المظهر الجيومورفولوجي للمنطقة بشكل مباشر في تحديد قابلية التربة للتعرية وديناميكيات حركة الكثبان الرملية، مما يؤثر بدوره على قدرة الرمال المنتشرة في منطقة الدراسة على الزحف والانتشار، كما يتضح من الشكل (2). ويعرض الجدول (3) المؤشرات الجيومورفولوجية وتطورها السنوي خلال الفترة 2015-2025. يُلاحظ أن متوسط الانحدار ظل ثابتًا عند 1.8° طوال السنوات العشر، مما يشير إلى استقرار تأثيره على زحف الكثبان الرملية، وبالتالي يمكن استبعاده كعامل رئيسي في زيادة معدل الزحف السنوي خلال هذه الفترة. أما نسبة التربة الرملية فقد تراوحت بين 60% في 2015 م و 64% في 2025 م، بمعدل متوسط 62%، مع زيادة تدريجية بمعدل حوالي 0.36% سنويًا. يعكس هذا التغير الطفيف تدهورًا مستمرًا في تركيب التربة وزيادة مساحة الرمال المكشوفة، مما يوفر مصدرًا إضافيًا لحبيبات الرمل المتحركة. ويُعزى ذلك جزئيًا إلى ضعف الغطاء النباتي وتناقص رطوبة التربة، ما يقلل من تماسكها وثباتها ويجعلها أكثر عرضة للحركة بفعل الرياح.

جدول (3) المؤشرات الجيومورفولوجية السنوية ومتوسطها وتأثيرها على زحف الرمال للفترة (2015-2025)

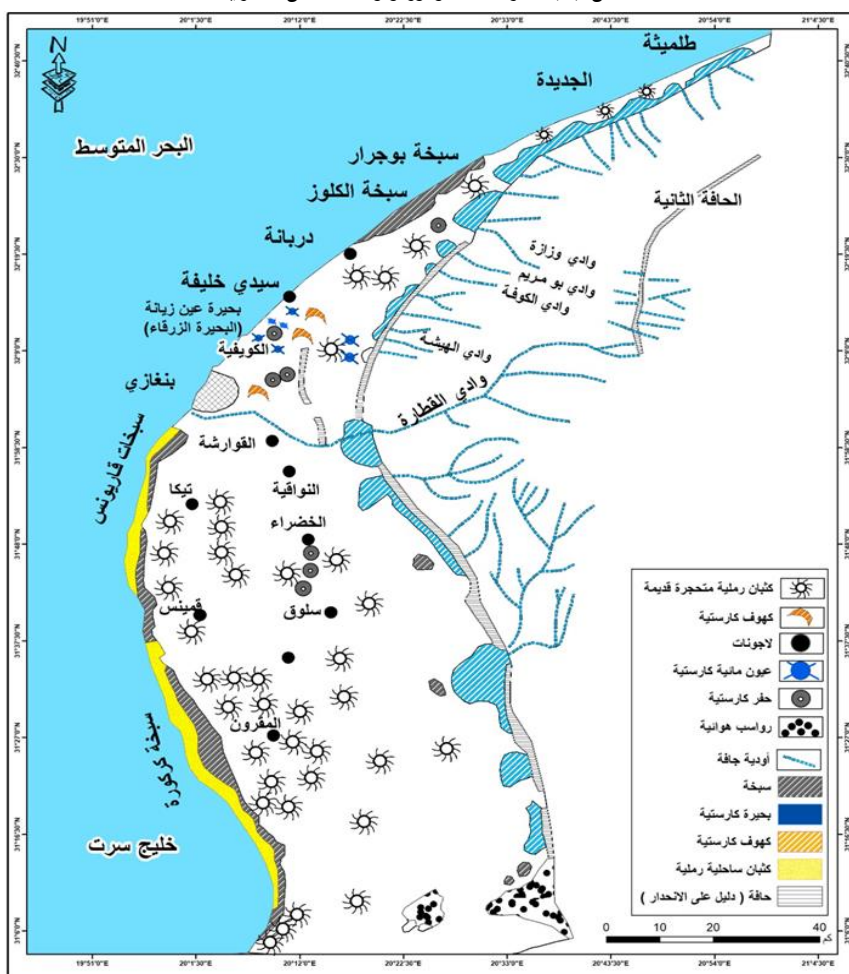
السنة	متوسط الانحدار (درجة)	نسبة التربة الرملية (%)	متوسط معدل زحف الكثبان (متر/سنة)
2015	1.8	60	8.5
2016	1.8	60	8.7
2017	1.8	61	8.9
2018	1.8	61	9.2
2019	1.8	62	9.4
2020	1.8	62	9.6
2021	1.8	62	9.8
2022	1.8	63	10.0
2023	1.8	63	10.2
2024	1.8	64	10.4
2025	1.8	64	10.6
المتوسط	1.8	62.0	9.6

المصدر:- أعدته الباحثة بالاعتماد على المصادر والبيانات الآتية:

- موقع (USGS Earth Explorer) تم استخلاص خريطة الارتفاع الرقمية (DEM) والانحدارات من بيانات SR TM و ASTER GDEM لتوضيح تضاريس المنطقة.
- منصف محمد صالح. (2021). سهل بنغازي - دراسة في جغرافية التربة. طرابلس: دار الجابر للطباعة والنشر والتوزيع.
- استخدام مريثات Sentinel-2 للسنوات المدروسة لحساب متوسط معدل زحف الكثبان الرملية، وتحليل تغير مواقعها السنوي.

يُعد متوسط معدل زحف الكثبان الرملية من العوامل الأكثر ديناميكية وأهمية، حيث سجل زيادة مستمرة من 8.5 م/سنة في 2015 م إلى 10.6 م/سنة في 2025 م، بمعدل متوسط 9.6 م/سنة، أي بزيادة سنوية تقارب 0.19 م/سنة. ويعكس هذا الاتجاه التصاعدي نشاطاً متزايداً للكثبان الرملية وتوسعها نحو المناطق المأهولة والزراعية، ويشير إلى التفاعل المباشر بين العوامل المناخية، مثل: زيادة قوة الرياح، وتوفر الرمال المرتبط بنسبة التربة الرملية، إضافة إلى ضعف مقاومة التربة للتعرية الناتج عن نقص الغطاء النباتي وتناقص رطوبة التربة.

الشكل (2) الخريطة الجيومورفولوجية لسهل بنغازي.



المصدر: إعداد الباحثة باستخدام برنامج ArcMap الإصدار 10.8، استناداً إلى المرجع: لامة، 2003، ص 77.

4- العامل الهيدرولوجي: يؤثر توافر المياه ورطوبة التربة بشكل مباشر على مقاومة التربة للتعرية، ويسهم في دعم الغطاء النباتي الذي يسهم في تثبيت الرمال والحد من زحفها. يُظهر الجدول (4) المؤشرات الهيدرولوجية السنوية ومتوسطها خلال الفترة (2015-2025)، وتأثيرها على زحف الرمال في سهل بنغازي.

جدول (4) المؤشرات الهيدرولوجية وتأثيرها على زحف الرمال في سهل بنغازي (2015-2025)

السنّة	متوسط مؤشر التربة والمياه (SMI)	متوسط انخفاض منسوب المياه الجوفية (متر/سنّة)
2015	0.38	0.40
2016	0.37	0.42
2017	0.36	0.45
2018	0.35	0.48
2019	0.34	0.50
2020	0.33	0.52
2021	0.32	0.55
2022	0.31	0.58
2023	0.30	0.60
2024	0.29	0.62
2025	0.28	0.65
المتوسط	0.32	0.51

المصدر: أعدته الباحثة بالاعتماد على بيانات خرائط مؤشر التربة والمياه (SMI) السنوية المستخلصة من أقمار SMAP و SMOS (NASA Earthdata)، ESA Copernicus Data Space) للفترة من 2015 إلى 2025، وخرائط تغيرات مخزون المياه الجوفية المستمدة من بيانات GRACE/GRACE-FO (NASA Earthdata).

يوضح الجدول القيم السنوية للمؤشرات الهيدرولوجية في سهل بنغازي للفترة من 2015م إلى 2025م، حيث يُلاحظ انخفاضاً مستمراً في متوسط مؤشر التربة والمياه (SMI)، الذي يعكس رطوبة التربة وتوفر المياه فيها. فقد بلغ متوسط SMI فترة الدراسة 0.32، وانخفض مؤشر التربة والمياه من 0.38 في عام 2015 إلى 0.28 في عام 2025. ويشير هذا الانخفاض إلى تدهور متواصل في رطوبة التربة، مما يؤدي إلى فقدان التماسك السطحي وزيادة تعرضها للتعرية الريحية، لا سيما تحت تأثير العامل المناخي المتمثل في الرياح القوية وارتفاع درجات الحرارة، التي تُسهم في زيادة تبخر المياه من سطح التربة.

في الوقت ذاته، يُظهر متوسط انخفاض منسوب المياه الجوفية ارتفاعاً مستمراً، حيث بلغ متوسط الانخفاض للفترة 0.51 متر/سنة، مع زيادة سنوية من 0.40 متر/سنة في 2015 إلى 0.65 متر/سنة في 2025. يعكس هذا الاتجاه الاستنزاف المستمر للمياه الجوفية، وما ينجم عنه من تأثير سلبي مباشر على الغطاء النباتي (البعد النباتي)، حيث تصبح النباتات غير قادرة على الوصول إلى كميات كافية من المياه، مما يؤدي إلى تدهورها وموتها في بعض المناطق. ويُسهم ذلك في زيادة نسبة التربة المكشوفة والتعرية الريحية وتوضح البيانات أيضاً وجود علاقة عكسية واضحة بين مؤشر التربة والمياه وانخفاض منسوب المياه الجوفية؛ فكلما انخفض SMI، ارتفع معدل انخفاض المياه الجوفية، ما يعكس استجابة النظام الهيدرولوجي للجفاف المتزايد وسعي التربة لتعويض نقص الرطوبة. هذه المعطيات تقدم دليلاً كمياً على أن الإجهاد المائي والجفاف في سهل بنغازي يُسهمان بشكل مباشر في تفاقم مشكلة زحف الرمال، من خلال إضعاف تماسك التربة وإزالة الغطاء النباتي الواقي. إذا استمر هذا الاتجاه، فقد تواجه المنطقة ضغوطاً متزايدة على الموارد المائية والتربة، مما يستلزم اعتماد استراتيجيات إدارة مستدامة تشمل: تحسين إدارة الموارد المائية الجوفية، تعزيز الحفاظ على رطوبة التربة، تطبيق أساليب الزراعة والري المستدامة لتقليل استنزاف المياه وتحسين مقاومة التربة للتعرية الريحية.

5- التربة: تتميز تربات سهل بنغازي بتنوع كبير في التركيب والخصائص الفيزيائية والكيميائية، نتيجة التفاعل المعقد بين العوامل المناخية والجيولوجية والتضاريسية. يعكس هذا التنوع تأثيره المباشر على استخدامات الأراضي الزراعية، ويعد مؤشراً مهماً لفهم ديناميكيات زحف الكثبان الرملية في المنطقة. يوضح الجدول (5) والشكل (3) تصنيف وتوزيع أنواع التربات في سهل بنغازي، مع تحديد المواقع الجغرافية لكل نوع ومدى انتشاره على مساحة السهل. تشكل تربة المراعي الجزء الأكبر من مساحة السهل، حيث تبلغ مساحتها 4377.7 كم²، أي ما يعادل 67.1% من إجمالي مساحة السهل، مما يعكس وفرة الغطاء النباتي والمراعي الطبيعية. تليها تربة السهول بمساحة 998.1 كم² (15.3%)، ثم التربة الساحلية بمساحة 532.6 كم² (8.2%). أما تربة الأودية والغابات والحافات، فتشكل نسباً أقل تتراوح بين 2.5% و 4.4%. يعكس هذا التوزيع التفاوت الطبيعي في استخدامات الأراضي وتكوين التربة. يُظهر هذا التوزيع أيضاً أن مناطق المراعي معرضة

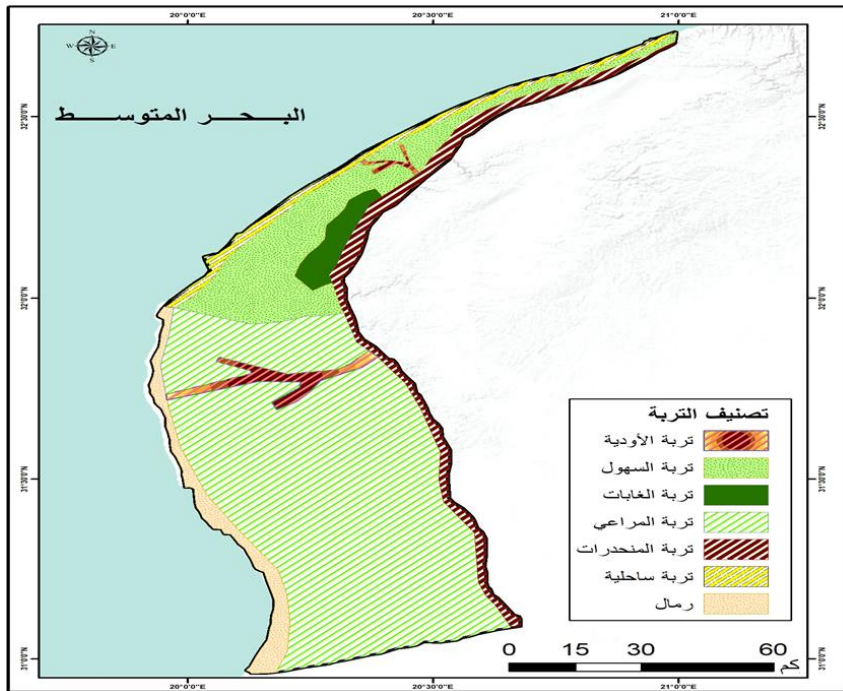
بشكل أكبر لنشاط الرياح، نتيجة ممارسات الرعي الجائر التي تقلل من كثافة الغطاء النباتي، مما يؤدي إلى ضعف تثبيت التربة وزيادة قابلية الرمال للتحرك. في المقابل، توفر المناطق المغطاة بالغابات الكثيفة حماية نسبية ضد حركة الكثبان الرملية، مما يحد من زحفها في تلك المناطق.

جدول (5) توزيع مساحات وأنواع التربة في منطقة سهل بنغازي.

نوع التربة	تربة الأودية	تربة السهول	تربة المراعي	تربة الغابات	تربة الحافات	تربة ساحلية	الاجمالي
المساحة (كم ²)	163.6	998.1	4377.7	164.5	286.4	532.6	6522.9
النسبة	2.5	15.3	67.1	2.5	4.4	8.2	100

المصدر: منصف محمد صالح (ديسمبر 2014) ص5.

شكل (3) تصنيف وتوزيع أنواع التربات في سهل بنغازي.



المصدر: أُعدّت باستخدام برنامج ArcMap الإصدار 10.8، استناداً إلى: منصف محمد صالح (ديسمبر 2014) ص6.

6- الغطاء النباتي: يُعد الغطاء النباتي الدرع الوقائي الأساسي ضد زحف الرمال، حيث تعمل جذور النباتات على تثبيت التربة وتقليل تأثير سرعة الرياح على سطحها، مما يحد من

عمليات التعرية الريحية. كما يوضح الجدول (6) والشكل (4) مؤشرات اختلاف الغطاء النباتي والمناطق المتدهورة خلال الفترة المدروسة. ويُبين الجدول القيم السنوية لمؤشر الغطاء النباتي، والتي تكشف بوضوح عن تدهور ملحوظ في الوضع البيئي بسهل بنغازي. فقد انخفض متوسط مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) من 0.32 عام 2015 إلى 0.21 عام 2025، بمعدل تراجع يقارب 0.01 وحدة سنوياً. ويعكس هذا الانخفاض المستمر تراجعاً في كثافة وحيوية الغطاء النباتي، مما يقلل من قدرته على تثبيت التربة والحد من التعرية. في المقابل، ازدادت مساحة الغطاء النباتي المتدهورة من 160 كم² عام 2015م إلى 230 كم² عام 2025، أي بزيادة قدرها 70 كم² خلال 11 عامًا، وبمعدل يقارب 6.4 كم² سنوياً. ويُؤكد هذا الاتجاه التصاعدي اتساع رقعة المناطق المتدهورة بشكل مطرد، الأمر الذي يُسهم في إضعاف الدفاع الطبيعي ضد زحف الرمال.

كما تُبرز البيانات وجود علاقة عكسية واضحة بين المؤشرين؛ فكلما انخفض مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) ازدادت المساحات المتدهورة. ويُوضح المتوسط العام للفترة (2025–2015) أن قيمة NDVI لم تتجاوز 0.26، وهي قيمة منخفضة نسبياً، في حين بلغ متوسط المساحات المتدهورة نحو 193.2 كم². ولا ينفصل هذا التدهور عن العوامل المناخية والهيدرولوجية المؤثرة، إذ يُعزى بدرجة كبيرة إلى تكرار موجات الجفاف، وتراجع معدلات الأمطار، وارتفاع درجات الحرارة، إضافةً إلى استنزاف المياه الجوفية ونقص رطوبة التربة. وتُضعف هذه الظروف القاسية قدرة النباتات على البقاء والنمو، مما يؤدي إلى موتها واتساع رقعة الأراضي العارية. ومع ضعف الغطاء النباتي أو اختفائه، تصبح التربة، ولا سيما الرملية منها، عرضة مباشرة للرياح القوية، الأمر الذي يُسهل حركة الكتلان الرملية وتوسعها، وهو ما يشير إلى فقدان متزايد للقدرات البيئية والإيكولوجية للأراضي المدروسة.

جدول (6) المؤشرات النباتية السنوية وتأثيرها على زحف الرمال للفترة (2015-2025).

السنة	متوسط مؤشر الغطاء النباتي (NDVI)	مساحة الغطاء النباتي المتدهورة (كم ²)
2015	0.32	160
2016	0.30	165
2017	0.29	170
2018	0.28	178
2019	0.27	185
2020	0.26	192
2021	0.25	200
2022	0.24	208
2023	0.23	215
2024	0.22	222
2025	0.21	230
المتوسط	0.26	193.2

المصدر: تم استخدام مرئيات MODIS و Landsat و Sentinel-2 من موقع USGS، وتحليلها باستخدام ArcGIS 10.8.

يُعد مؤشر الفرق المعياري للغطاء النباتي (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) من أكثر المؤشرات الطيفية استخدامًا في دراسات الغطاء النباتي، ويُحسب وفق المعادلة الآتية:

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

وبالاعتماد على مرئيات Landsat TM يُحسب المؤشر كما يلي:

$$Landsat TM, NDVI = (Band 4 - Band 3) / (Band 4 + Band 3)$$

بينما يُحسب باستخدام مرئيات Landsat OLI وفق المعادلة:

$$Landsat OLI, NDVI = (Band 5 - Band 4) / (Band 5 + Band 4)$$

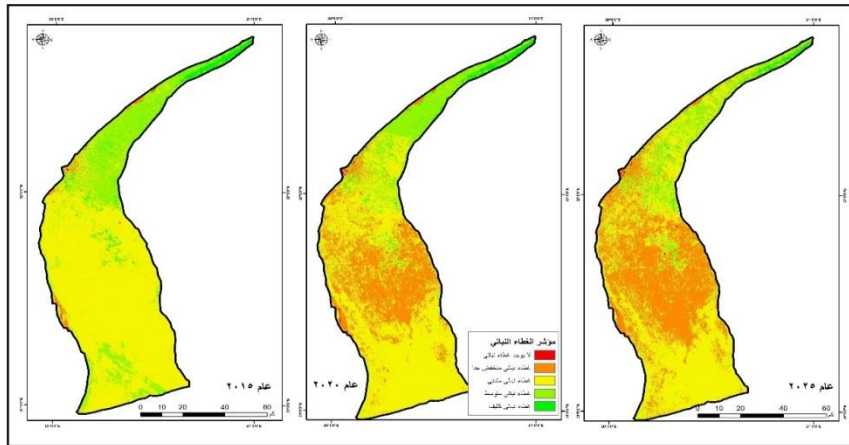
تتراوح قيم هذا المؤشر بين (-1 إلى +1)، إذ تشير القيم القريبة من +1 إلى وجود غطاء نباتي كثيف، في حين تدل القيم تدل القيم القريبة من الصفر على أسطح عارية أو غطاء نباتي ضعيف تشير القيم السالبة إلى المسطحات المائية أو الأسطح غير النباتية (Rouse et al., 1974, pp. 309-317).

جدول (7) متوسط مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) وتوزيع أنواع الغطاء النباتي والمناطق المتدهورة في سهل بنغازي للسنوات 2015، 2020، و2025م

2025		2020		2015		السنوات
0.21		0.26		0.32		متوسط (NDVI)
%	كم ²	%	كم ²	%	كم ²	المساحة/ %
3.62	230	3.02	192	2.52	160	المناطق المتدهورة
%	كم ²	%	كم ²	%	كم ²	أنواع الغطاء النباتي
0.2	16.2	0.3	17.6	0.1	7.0	لا يوجد غطاء نباتي
37.8	2499.0	26.0	1722.3	1.4	93.7	غطاء نباتي منخفض جدا
50.5	3340.0	57.8	3829.2	72.3	4783.6	غطاء نباتي متدني
9.8	650.4	13.4	887.8	23.3	1540.9	غطاء نباتي متوسط
1.7	114.8	2.5	163.5	2.9	195.2	غطاء نباتي كثيف
100	6620.4	100.0	6620.4	100.0	6620.4	إجمالي الغطاء النباتي

المصدر: أُعدت البيانات من قبل الباحثة بالاعتماد على تحليلات مؤشر الفرق النباتي (NDVI) باستخدام صور الأقمار الصناعية Landsat 8 للأعوام 2015 و2020 و2025، من أرشيف USGS Earth Explorer، وتمت معالجة البيانات وتحليلها في برنامج ArcMap 10.8 لتحديد الغطاء النباتي ومساحة المناطق المتدهورة في سهل بنغازي.

شكل (4) مؤشر الغطاء النباتي لسهل بنغازي للسنوات (2015، 2020، 2025م).



المصدر: أُعدت البيانات من قبل الباحثة بالاعتماد على تحليل مؤشر الفرق المعياري للغطاء النباتي (NDVI) باستخدام صور الأقمار الصناعية Landsat 8 OLI/TIRS للأعوام 2015 و2020 و2025، المستخرجة من أرشيف USGS Earth Explorer. وقد شملت المعالجة المسبقة للصور تصحيح الإشعاع والجو، ثم استخراج مؤشر NDVI، وبعد ذلك تم تصنيف وتحديد أنواع الغطاء النباتي ومساحة المناطق المتدهورة باستخدام برنامج ArcMap 10.8.

يوضح الجدول (7) والشكل (4) انخفاض متوسط مؤشر NDVI من 0.32 في عام 2015 إلى 0.26 في عام 2020، ثم إلى 0.21 في عام 2025، ما يعكس تراجعاً عاماً في صحة الغطاء النباتي. ارتفعت مساحة المناطق المتدهورة من 160 كم² (2.52٪) في 2015 إلى 192 كم² (3.02٪) في 2020، ثم إلى 230 كم² (3.62٪) في 2025، مع زيادة واضحة في المساحات التي يغطيها غطاء نباتي منخفض جداً، من 93.7 كم² في 2015 إلى 1722.3 كم² في 2020، ثم إلى 2499 كم² في 2025، ما يقلل من قدرة التربة على الثبات ويزيد من نشاط زحف الكثبان الرملية. كما لوحظ انخفاض ملحوظ في الغطاء النباتي متوسط وكثيف الكثافة بين عامي 2015 و 2025 م؛ مما يسرع من تدهور التربة ويزيد من نشاط حركة الرمال في سهل بنغازي.

ثانياً: تحليل نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) لدراسة العوامل المؤثرة في ظاهرة زحف الرمال:

سيتم عرض نتائج تقديرات نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) باستخدام طريقة التأثيرات الثابتة (Fixed Effects Model)، نظراً لكونها الأنسب للتحكم في الخصائص غير المرصودة والثابتة نسبياً عبر المواقع الجغرافية المختلفة في سهل بنغازي خلال الفترة الزمنية 2015-2025، ويهدف هذا التحليل إلى تقدير أثر كل من العوامل المناخية والهيدرولوجية والنباتية والجيومورفولوجية على معدل زحف الكثبان الرملية (Dune Migration Rate)، باستخدام برنامج EViews 10.

1- نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) وتقدير تأثير العوامل المناخية على زحف الكثبان:

يعرض جدول (8) نتائج تقديرات نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) لتحديد أثر المتغيرات المناخية على معدل زحف الكثبان الرملية في المنطقة خلال الفترة 2015-2025. يوضح الجدول قيمة المعاملات، الانحراف المعياري، ودلالاتها الإحصائية لكل متغير، إلى جانب مؤشرات كفاءة النموذج. تُظهر النتائج أن جميع المتغيرات المناخية ذات دلالة إحصائية عالية (Prob. < 0.001)، مما يؤكد تأثيرها الكبير والمباشر على معدل زحف الكثبان، ويبرز العلاقات المعقدة التي تسهم في تفاقم الظاهرة في سهل بنغازي.

جدول (8) نتائج نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) لتأثير المتغيرات المناخية على معدل زحف الكثبان الرملية في المنطقة (2015-2025)

المتغير	المعامل	الخطأ المعياري	القيمة	الاحتمالية
متوسط سرعة الرياح	0.8521	0.1503	5.6693	0.0000
متوسط كمية الأمطار	-0.0214	0.0051	-4.1961	0.0000
متوسط درجة الحرارة	0.1557	0.0405	3.8444	0.0001
C (الثابت)	3.2005	0.5002	6.3984	0.0000
R-squared (معامل التحديد R^2)	0.7853		المتوسط الحسابي للمتغير التابع	9.6000
Adjusted R-squared (معامل التحديد المصحح)	0.7602		S.D. dependent var (الانحراف المعياري للمتغير التابع)	2.1000
S.E. of regression (التقدير للانحراف المعياري للتقدير)	0.5801		Akaike info criterion (مقياس معلومات أكايك)	1.8502
Sum squared resid مجموع مربعات البواقي	15.2003		Schwarz criterion (مقياس شوارز)	2.0505
Log likelihood دالة الاحتمالية اللوغاريتمية	-25.5008		Hannan-Quinn Criter. (مقياس هانان-كوين)	1.9504
Durbin-Watson stat إحصائية دوين واتسون	1.9805		Root Mean Squared Error (الجذر التربيعي لمتوسط مربعات الخطأ)	0.5801
F-statistic (إحصائية ف)	65.4021		Prob (F-statistic) (الدلالة الإحصائية لاختبار F)	0.0000

المصدر: تم إعداد الجدول بناءً على بيانات الجداول (2-3) ونتائج تقدير نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) الذي نفذته الباحثة باستخدام برنامج EViews 10 لدراسة تأثير العوامل المناخية و الجيومورفولوجية على معدل زحف الكثبان الرملية، وفق المعادلة التالية: $Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{1,it} + \beta_2 X_{2,it} + \dots + \beta_k X_{k,it} + \alpha_i + \epsilon_{it}$ حيث:

Y_{it} : مؤشر زحف الرمال في الموقع i والزمن t . (المتغير التابع: معدل زحف الكثبان الرملية).

$X_{k,it}$: المتغيرات المستقلة (المؤشرات المناخية، الجيومورفولوجية، الهيدرولوجية، النباتية) في الموقع i والزمن t .

β_0 : الحد الثابت.

β_k : معاملات الانحدار للمتغيرات المستقلة التي تُعبر عن قوة وتأثير كل عامل.

α_i : التأثير الفردي الثابت (أو العشوائي) للموقع i ، ويُمثل الخصائص غير الملاحظة لكل موقع التي لا تتغير عبر الزمن.

ϵ_{it} : حد الخطأ العشوائي. تم تنفيذ جميع الاختبارات الإحصائية باستخدام EViews 10، ملاحظة: تم حساب معدل زحف الكثبان الرملية بالمتر لكل سنة، وشمل التحليل 50 مقطعاً عرضياً، ليصل إجمالي ملاحظات البيانات اللوحية إلى 550.

تُعدُّ سرعة الرياح: المعامل الموجب (0.8521) يشير إلى أن زيادة سرعة الرياح بمقدار 1 متر/ثانية، تؤدي إلى زيادة معدل زحف الكثبان بمقدار 0.8521 متر/سنة، مع ثبات العوامل الأخرى. وهذا يعكس دور الرياح كعامل محرك أساسي لعمليات التعرية والنقل الرملي، خاصة في ظل التربة الرملية السائدة في المنطقة، الأمطار: المعامل السالب

(-0.0214) يدل على الأثر الوقائي لهطول الأمطار، حيث أن زيادة الهطول بمقدار 1 ملم تقلل معدل زحف الكثبان بمقدار 0.0214 متر/سنة. ويُبرز ذلك أهمية الغطاء النباتي الناتج عن الأمطار في تثبيت التربة والحد من انجرافها. درجة الحرارة: المعامل الموجب (0.1557) يُشير إلى أن ارتفاع درجة الحرارة بمقدار 1°C يؤدي إلى زيادة معدل الزحف بنحو 0.1557 متر/سنة، نتيجة لزيادة معدلات التبخر والنتح وجفاف التربة، مما يُضعف الغطاء النباتي ويُزيل الحاجز الطبيعي أمام زحف الرمال. كفاءة النموذج: تُظهر قيمة R^2 البالغة 0.7853 أن نحو 78.53% من التباين في معدل زحف الكثبان يُفسَّر بالمتغيرات المناخية الثلاثة. كما يشير F-statistic المرتفع (65.4021) مع دلالة الإحصائية (Prob. = 0.0000) إلى أن النموذج ككل ذو معنوية عالية، بينما تُشير قيمة S.E. of regression المنخفضة (0.5801) إلى دقة تنبؤات النموذج، تؤكد النتائج أن العامل المناخي يمثل محددًا رئيسيًا في ديناميكيات زحف الرمال بسهل بنغازي، وأن تفاعل سرعة الرياح، انخفاض الأمطار، وارتفاع درجات الحرارة يُشكل بيئة مثالية لتسارع الظاهرة. ويزداد تأثيرها بفعل العوامل المترابطة الأخرى (الهيدرولوجية، النباتية، والجيومورفولوجية)، التي تُنشئ حلقة تغذية راجعة تُفاقم التدهور البيئي وتسرع من توسع الكثبان الرملية.

2- نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) وتقدير تأثير العوامل الجيومورفولوجية

على زحف الكثبان: يعرض الجدول (9) تقديرات نموذج التأثيرات الثابتة لدراسة تأثير المؤشرات الجيومورفولوجية على معدل زحف الكثبان الرملية، موضحًا كيفية تأثير العوامل المناخية والنباتية والهيدرولوجية. يُلاحظ أن متوسط الانحدار (AVERAGE_SLOPE) لم يُظهر دلالة إحصائية (Prob. = 0.1890)، مما يشير إلى أن الانحدارات الطفيفة الموجودة في سهل بنغازي (بمتوسط 1.8 درجة) ليست العامل المحدد الرئيس في حركة الكثبان. ومع ذلك، توفر هذه الانحدارات بيئة مسطحة تُسهل حركة الرمال المدفوعة بالرياح، حيث لا تُشكل التضاريس المسطحة عائقًا أمام حركة الرياح والرمل، بل تُسهل انتشارها.

جدول (9) نتائج نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) لتأثير الجيومورفولوجية على معدل زحف الكثبان الرملية في المنطقة (2025-2015).

المتغير	المعامل	الخطأ المعياري	t-Statistic (القيمة)	القيمة الاحتمالية
AVERAGE_SLOPE (متوسط الانحدار)	-0.1055	0.0802	-1.3155	0.1890
SANDY_SOIL_PERCENTAGE (نسبة التربة الرملية)	0.0322	0.0070	4.6000	0.0000
C (الثابت)	2.5008	0.3501	7.1429	0.0000
R-squared (معامل التحديد)		0.6501	المتوسط الحسابي للمتغير التابع	9.6000
Adjusted R-squared (معامل التحديد المعدل)		0.6205	الانحراف المعياري للمتغير التابع	2.1000
S.E. of regression (خطأ الانحدار المعياري)		0.7003	Akaike info criterion (مقياس معلومات أكايك)	2.1005
Sum squared resid (مجموع المربعات المتبقية)		24.5008	Schwarz criterion (مقياس شوارتز)	2.2508
Log likelihood (لوغاريتم الاحتمالية)		30.2009	Hannan-Quinn Criter. (مقياس هانان-كوين)	2.1706
Durbin-Watson stat (إحصائية دوين-واتسون)		2.0501	الجذر التربيعي لمتوسط الخطأ التربيعي	0.7003
-statistic (إحصائية ف)		40.5000	Prob (F-statistic) (الدلالة الإحصائية لاختبار F)	0.0000

المصدر: بالاعتماد على بيانات الجدولين (3-4)، وباستخدام برنامج EViews 10 في تحليل البيانات.

في المقابل، أظهرت نسبة التربة الرملية (SANDY_SOIL_PERCENTAGE) دلالة إحصائية قوية جداً (Prob. = 0.0000) بمعامل موجب قدره 0.0322، ما يعني أن كل زيادة بنسبة 1% في محتوى التربة الرملية تؤدي إلى زيادة معدل زحف الكثبان بمقدار 0.0322 متر/سنة. وتبرز هذه النتيجة الأهمية الكبرى لتكوين التربة في تحديد قابلية المنطقة لزحف الرمال، إذ تُعد التربة الرملية المصدر الأساسي لحبيبات الرمل المتحركة. وتزداد أهمية هذا العامل عندما يتدهور الغطاء النباتي بسبب الجفاف ونقص المياه، مما يعرض التربة الرملية مباشرة للرياح دون حماية. كما تشير قيمة $R\text{-squared} = 0.6501$ إلى أن 65% من التباين في معدل زحف الكثبان يمكن تفسيره بواسطة هذه المتغيرات الجيومورفولوجية، وهو مؤشر جيد على ملاءمة النموذج. ويُظهر $\text{Adjusted } R\text{-squared} = 0.6205$ بعد تعديل عدد المتغيرات، أن النموذج يظل يفسر حوالي 62% من التباين. أما S.E. of regression = 0.7003 فـيُشير دقة التنبؤات، بينما تُشير قيمة Durbin-Watson = 2.0501 إلى استقلالية البواقي وعدم وجود ارتباط ذاتي بينها. وتوضح

قيمة $F\text{-statistic} = 40.5000$ مع دلالتها الإحصائية العالية ($\text{Prob.} = 0.0000$) أن النموذج ككل معنوي إحصائياً، وأن المتغيرات المستقلة المدرجة تفسر بشكل كبير التغيرات في المتغير التابع. وتشمل مؤشرات جودة النموذج الأخرى $\text{Sum squared resid} = 24.5008$ ، والتي تعكس حجم الخطأ الكلي للنموذج، بالإضافة إلى المعايير المعلوماتية $Akaike = 2.1005$ ، $Schwarz = 2.2508$ ، $Hannan-Quinn = 2.1706$ ، والتي تساعد في مقارنة النماذج.

3- نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) وتقدير تأثير المؤشرات الهيدرولوجية على زحف الكثبان: يوضح الجدول (10) تقديرات نموذج التأثيرات الثابتة لتأثير المؤشرات الهيدرولوجية على معدل زحف الكثبان، ويبرز الدور المحوري للمياه في تحديد ديناميكيات زحف الرمال وتفاعلاتها مع العوامل الأخرى.

جدول (10) نتائج نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) لتأثير الهيدرولوجية على معدل زحف الكثبان الرملية في المنطقة (2015-2025).

القيمة الاحتمالية	t-Statistic (القيمة)	الخطأ المعياري	المعامل	المتغير
0.0000	-4.9995	0.2501	-1.2505	SOIL_MOISTURE_INDEX (SMI) (مؤشر رطوبة التربة)
0.0009	3.3344	0.1800	0.6002	GROUNDWATER_LEVEL_DECLINE (انخفاض منسوب المياه الجوفية)
0.0000	6.8571	0.7000	4.8000	C (الثابت)
9.6000	المتوسط الحسابي للمتغير التابع	0.7003	R-squared (معامل التحديد)	
2.1000	الانحراف المعياري للمتغير التابع	0.6755	Adjusted R-squared (معامل التحديد المعدل)	
2.0000	Akaike info criterion (مقياس معلومات أكايك)	0.6500	S.E. of regression (خطأ الانحدار المعياري)	
2.1500	Schwarz criterion (مقياس شوارتز)	21.5000	Sum squared resid (مجموع المربعات المتبقية)	
2.0700	Hannan-Quinn Criter. (مقياس هانان-كوين)	28.5000	Log likelihood (لوغاريتم احتمالية)	
0.6500	الجذر التربيعي للمتوسط الخطأ التربيعي	2.0200	Durbin-Watson stat (إحصائية دوين-واتسون)	
0.0000	Prob(F-statistic) (الدلالة الإحصائية لاختبار F)	50.1000	-statistic (إحصائية ف)	

المصدر: بالاعتماد على بيانات الجداول (3-4) واستخدام برنامج EViews 10.

يظهر متوسط مؤشر التربة والمياه (SMI) معاملاً سالباً ودالاً إحصائياً بقوة (-1.2505)، مما يعني أن زيادة مؤشر SMI بمقدار 0.01 (أي زيادة رطوبة التربة) تؤدي

إلى انخفاض ملحوظ في معدل زحف الكثبان بمقدار 0.0125 متر/سنة. هذا يدل على الدور الحاسم لرطوبة التربة في تثبيت الرمال ومقاومة التعرية بفعل الرياح، حيث تتماسك حبيبات الرمل معًا بشكل أفضل عند رطوبة التربة، مما يقلل من سهولة اقتلاعها. ويعزز هذا التأثير البعد النباتي، إذ تُساعد رطوبة التربة على نمو الغطاء النباتي الذي يمثل خط الدفاع الأول ضد زحف الرمال. أما متوسط انخفاض منسوب المياه الجوفية (GROUNDWATER_LEVEL_DECLINE) فقد أظهر معاملاً موجباً ودالاً إحصائياً (0.6002)، مما يشير إلى أن كل زيادة بمقدار متر واحد في انخفاض المياه الجوفية تؤدي إلى زيادة معدل زحف الكثبان بمقدار 0.6002 متر/سنة. ويعزى ذلك إلى تأثير انخفاض المياه الجوفية على الغطاء النباتي، حيث تصبح النباتات، خاصة الأشجار والشجيرات ذات الجذور العميقة، أقل قدرة على الوصول إلى المياه، مما يؤدي إلى إجهادها وذبولها وموتها، وبالتالي إزالة الغطاء الواقي الذي يثبت التربة. كما أن نقص هطول الأمطار يفاقم تأثير انخفاض المياه الجوفية ويزيد من جفاف التربة، مما يعزز التعرية الريحية للتربة المكشوفة.

4- نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) لتقدير تأثير مؤشرات الغطاء النباتي على معدل زحف الكثبان الرملية: يتناول الجدول (11) تقديرات نموذج التأثيرات الثابتة لقياس تأثير المؤشرات النباتية على معدل زحف الكثبان الرملية، ويظهر بوضوح أن الغطاء النباتي يُمثل أحد أهم العوامل في مكافحة زحف الرمال، حيث يتفاعل بشكل وثيق مع الأبعاد المناخية والهيدرولوجية والجيومورفولوجية.

أما المساحات المتدهورة من الغطاء النباتي (Degraded Vegetation Area) فقد أظهرت معاملاً موجباً ودالاً إحصائياً (0.0821، Prob. = 0.0000)، ما يعني أن كل زيادة بمقدار 1 كم² في المساحات المتدهورة تؤدي إلى زيادة معدل زحف الكثبان الرملية بمقدار 0.0821 متر/سنة. وهذا يعكس أن تدهور الغطاء النباتي يترك مساحات مكشوفة للرياح ويزيد من نسبة التربة الرملية المعرضة للانجراف، مما يُسهم في تعزيز زحف الرمال. وبالنسبة للثابت (C = 5.5000)، فهو يُعبر عن معدل زحف الكثبان في حالة غياب تأثير المؤشرات النباتية. من حيث جودة النموذج، تُشير قيمة معامل التحديد ($R^2 = 0.8201$) إلى أن نحو 82% من التباين في معدل زحف الكثبان الرملية يُمكن

تفسيره بواسطة المتغيرات النباتية، وهي النسبة الأعلى مقارنة ببقية الأبعاد المدروسة، ما يؤكد الأهمية القصوى للغطاء النباتي في استقرار التربة. كما يؤكد معامل التحديد المعدل ($Adjusted R^2 = 0.7981$) ملائمة النموذج حتى بعد ضبطه لعدد المتغيرات. كذلك، تشير إحصائية ($F(85.2000, Prob. = 0.0000)$ إلى أن النموذج ككل دال إحصائياً. أما من حيث معايير صلاحية النموذج، فتُظهر إحصائية دوين-واتسون (2.1000) غياب مشكلات الارتباط الذاتي بين البواقي، بينما تعكس القيم المنخفضة لمعايير المعلومات ($HQ = 1.7000$ ، $SC = 1.8000$ ، $AIC = 1.6000$) ملائمة النموذج. كما أن خطأ الانحدار المعياري ($S.E = 0.4800$) يُبرز دقة تقديرات النموذج وانخفاض مستوى التباين غير المفسر. تؤكد هذه النتائج أن الغطاء النباتي يمثل خط الدفاع الأول ضد زحف الكثبان الرملية، حيث يحدّ من التعرية الريحية ويُعزز استقرار التربة. في المقابل، فإن تدهوره يؤدي إلى تسارع حركة الرمال بفعل التفاعل المعقد بين العوامل المناخية والهيدرولوجية والجيومورفولوجية. ومن ثمّ، فإن الحفاظ على الغطاء النباتي والتوجه لحمولات التشجير ومكافحة التصحر يُعد استراتيجية محورية لمكافحة زحف الرمال، خاصة في منطقة سهل بنغازي ذات المناخ شبه جاف. تُظهر الصورة (1) منطقة صحراوية تتميز بكثبان رملية منخفضة متحركة مع تجمع نباتي على أحد الجوانب يعمل كحاجز طبيعي للرياح، مما يحدّ من زحف الرمال.

صورة (1) تأثير الغطاء النباتي على زحف الكثبان الرملية في سهل بنغازي.



المصدر: الدراسة الميدانية بتاريخ 28-8-2025م.

جدول (11) نتائج نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) لتأثير المؤشرات النباتية على معدل زحف الكثبان الرملية في المنطقة (2015-2025م).

القيمة الاحتمالية	t-Statistic (القيمة)	الخطأ المعياري	المعامل	المتغير
0.0000	-5.0718	0.7000	-3.5503	NORMALIZED_DIFFERENCE_VEG ETATION_INDEX (NDVI) (مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI))
0.0000	4.1050	0.0200	0.0821	DEGRADED_VEGETATION_AREA (المساحات المتدهورة من الغطاء النباتي)
0.0000	5.5000	1.0000	5.5000	C (الثابت)
9.6000	المتوسط الحسابي للمتغير التابع	0.8201		R-squared (معامل التحديد)
2.1000	الانحراف المعياري للمتغير التابع	0.7981		Adjusted R-squared (معامل التحديد المعدل)
1.6000	Akaike info criterion (مقياس معلومات أكايك)	0.4800		S.E. of regression (خطأ الانحدار المعياري)
1.8000	Schwarz criterion (مقياس شوارتز)	11.5000		Sum squared resid (مجموع المربعات المتبقية)
1.7000	Hannan-Quinn Criter. (مقياس هانان-كوين)	- 20.0000		Log likelihood (لوغاريتم الاحتمالية)
0.4800	الجذر التربيعي لمتوسط الخطأ التريبي	2.1000		Durbin-Watson stat (إحصائية دوين-واتسون)
0.0000	Prob(F-statistic) (الدلالة الإحصائية لاختبار F)	85.2000		-statistic (إحصائية ف)

المصدر: بالاعتماد على بيانات الجدول (6) واستخدام برنامج EViews 10.

المبحث الثاني: تحليل الاستمرارية والتكامل المشترك للعوامل المؤثرة في زحف الكثبان الرملية مع تتبع تغيرات مساحة الكثبان خلال الفترة (2000-2025) وتوقعات حركتها المستقبلية في سهل بنغازي (2025-2035):

أولاً:- الاستمرارية والتكامل المشترك للعوامل والمؤشرات في ظاهرة زحف الكثبان الرملية:

يُعدُّ فهم الاستمرارية (Autocorrelation) والتكامل المشترك (Cointegration) بين العوامل والمؤشرات المختلفة أمراً أساسياً في تحليل ديناميكيات زحف الرمال على المدى الطويل. إذ تُعبّر الاستمرارية عن وجود ارتباط بين قيم المتغير عبر الفترات الزمنية المتعاقبة، في حين يُشير التكامل المشترك إلى وجود علاقة توازنه طويلة الأجل بين متغيرين أو أكثر، حتى وإن كانت كل منها غير مستقرة على حدة، مما يعكس تزامن تغيراتها في الأمد الطويل.

1- اختبار الاستمرارية (Autocorrelation):

تم استخدام اختبار Wooldridge للارتباط الذاتي في بيانات اللوحة لتقييم وجود الارتباط الذاتي من الدرجة الأولى في بقايا النموذج. يُعد هذا الاختبار فعالاً في اكتشاف الارتباط الذاتي، الذي يشير إلى أن الأخطاء (البقايا) في فترة زمنية معينة مرتبطة بالأخطاء في الفترة السابقة؛ مما قد يؤثر على كفاءة التقديرات إذا لم يتم تصحيحه. تشير نتائج الجدول (12) قيمة الاحتمالية (0.0000) الأقل من مستوى الدلالة 0.05 إلى رفض الفرضية الصفرية، وبالتالي وجود ارتباط ذاتي من الدرجة الأولى في بقايا النموذج. هذا الارتباط الذاتي يعكس أن زحف الرمال في سهل بنغازي عملية ديناميكية وتراكمية؛ حيث يتأثر معدل زحف الكتبان في فترة معينة بالظروف السابقة وبقايا الأخطاء من الفترات السابقة. بمعنى آخر، تأثير الرياح، تدهور الغطاء النباتي، أو نقص المياه قد لا يظهر كاملاً في نفس السنة، بل يتراكم ويؤثر على السنوات اللاحقة.

توضح هذه النتيجة أن الظاهرة تتطور بمرور الوقت، وأن آثار التغيرات المناخية أو التدهور البيئي ليست فورية بالكامل. هذا الاكتشاف مهم للتنبؤ بالظاهرة وتخطيط التدخلات الفعالة، حيث يجب أخذ التأثيرات المتراكمة للعوامل المؤثرة في الاعتبار عند وضع استراتيجيات طويلة الأجل لمكافحة زحف الرمال، مثل إعادة التشجير أو إدارة موارد المياه.

جدول (12) نتائج اختبار وولدرج (Wooldridge) للكشف عن الارتباط الذاتي في بيانات اللوحة النموذج المناخي (من الرتبة الأولى).

Statistic (الإحصائية)	القيمة	df1 (درجات الحرية الأولى)	df2 (درجات الحرية الثانية)	Prob > F (الدالة الاحصائية)
statistic-F (F إحصائية)	15.205	1	49	0.0000

المصدر: بالاعتماد على بيانات الجداول (2-8) واستخدام برنامج EViews 10.

2- اختبار التكامل المشترك (Cointegration):

لتحليل التكامل المشترك بين العوامل والمؤشرات المختلفة، تم استخدام اختبارات Pedroni للتكامل المشترك لبيانات اللوحة. كما يوضح الجدول (13)، يُعد هذا الاختبار أداة أساسية لتحديد وجود علاقة توازن طويلة الأجل بين معدل زحف الكتبان والمتغيرات المؤثرة لمختلف العوامل. تشير نتائج اختبار Pedroni إلى وجود علاقة تكامل مشترك قوية

ودالة إحصائية بين معدل زحف الكثبان والعوامل المناخية، الجيومورفولوجية، الهيدرولوجية، والنباتية، حيث سجلت إحصائيات (Panel PP-Statistic (Prob. = 0.000 و Panel و ADF-Statistic (Prob. = 0.000 ضمن اختبارات اللوحة (within-dimension)، و Group PP-Statistic (Prob. = 0.001 و Group ADF-Statistic (Prob. = 0.002 ضمن اختبارات المجموعات (between-dimension) مستويات عالية من الدلالة. يعكس هذا الاكتشاف أن هذه العوامل لا تعمل بمعزل عن بعضها، بل تتفاعل بشكل متكامل يؤثر على زحف الرمال على المدى الطويل. فعلى سبيل المثال، التغيرات المناخية مثل زيادة سرعة الرياح أو نقص الأمطار لا تؤثر فقط مباشرة على زحف الكثبان، بل تمتد تأثيراتها لتشمل العامل الهيدرولوجي من خلال زيادة تبخر المياه وجفاف التربة، مما يضعف الغطاء النباتي ويقلل من قدرته على تثبيت التربة الرملية. ونتيجة لذلك، تصبح التربة أكثر عرضة للتعرية بفعل الرياح، ويزداد معدل زحف الكثبان. وجود التكامل المشترك يشير إلى أن هذه المتغيرات مرتبطة بعلاقة توازن طويلة الأجل؛ فإذا انحرف أحدها عن مساره الطبيعي، فإن المتغيرات الأخرى تميل إلى التكيف لاستعادة التوازن. ويؤكد هذا أن زحف الرمال في سهل بنغازي ناتج عن تفاعلات نظام بيئي معقد، ما يستدعي أن تكون استراتيجيات الإدارة شاملة، مع مراعاة جميع العوامل المتفاعلة بدل التركيز على عامل واحد فقط. على سبيل المثال، ستكون جهود إعادة التشجير أكثر فاعلية إذا اقترنت بإدارة مستدامة للموارد المائية لمواجهة الجفاف، إلى جانب دراسة ديناميكيات الرياح وأنواع التربة الرملية. يتيح هذا التحليل فهماً متعمقاً لديناميكيات زحف الرمال، ويشكل أساساً قوياً للتنبؤات المستقبلية ووضع السياسات الفعالة للحد منها.

جدول (13) نتائج اختبار **Pedroni** للتكامل المشترك لبيانات اللوحة

(**Panel Cointegration Test**) بين معدل زحف الكثبان

والمؤشرات المناخية والبيئية للفترة (2015-2025م)

Prob	Statistic	(dimension-Panel Test (within
0.015	2.150	Statistic-Panel v
0.002	2.800-	Statistic-rho Panel
0.000	4.500-	Statistic-Panel PP
0.000	3.900-	Statistic-Panel ADF
(dimension-Group Test (between		
0.067	1.500-	Statistic-Group rho
0.001	3.200-	Statistic-Group PP
0.002	2.800-	Statistic-Group ADF

المصدر: بالاعتماد على بيانات الجداول (2-3-4-5-6) واستخدام برنامج EViews 10.

3- تقييم حركة وأشكال الكثبان الرملية وقياس مقدار زحفها: يُعدُّ تقييم حركة وأشكال الكثبان الرملية وقياس مدى زحفها مؤشراً مباشراً وملموساً لشدة ظاهرة زحف الرمال وديناميكيته في سهل بنغازي. توفر تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية أدوات أساسية وفعالة لإجراء هذا التقييم بدقة وعلى نطاق واسع، كما يتضح من الجدول (14). الذي يقدم معلومات تفصيلية حول حركة الكثبان الرملية في سهل بنغازي خلال الفترة 2015-2025، ويُعدُّ مؤشراً مباشراً وشاملاً لتقييم شدة زحف الرمال وتفاعلها مع مختلف الأبعاد البيئية. لوحظ ارتفاع مطرد في متوسط سرعة حركة الكثبان، من 8.5 متر/سنة في عام 2015 إلى 10.6 متر/سنة في عام 2025، بمتوسط عام يبلغ 9.6 متر/سنة. يعكس هذا الاتجاه التصاعدي زيادة نشاط الكثبان وتسارع زحفها مع مرور الوقت، مما يوسع قدرتها على الانتشار إلى مناطق جديدة. ويعزى هذا التسارع أساساً إلى العوامل المناخية، وخصوصاً زيادة قوة الرياح السائدة، التي توفر الطاقة اللازمة لنقل كميات أكبر من الرمال.

جدول (14) حركة الكثبان الرملية في سهل بنغازي (2015-2025).

السنة	متوسط سرعة حركة الكثبان (م/سنة)	مساحة الكثبان الرملية النشطة (كم ²)
2015	8.5	160
2016	8.7	165
2017	8.9	170
2018	9.2	178
2019	9.4	185
2020	9.6	192
2021	9.8	200
2022	10.0	208
2023	10.2	215
2024	10.4	222
2025	10.6	230
المتوسط	9.6	193.2

المصدر: أُعِدَّ من قبل الباحثة بالاعتماد على تحليل حركة وانتشار الكثبان الرملية باستخدام مرئيات الأقمار الصناعية Sentinel-2 (MSI) و Landsat 8 (OLI) للأعوام محل الدراسة، حيث استُخدمت Sentinel-2 لرصد المواقع الزمنية والمكانية للكثبان بدقة زمنية عالية، بينما استُخدمت Landsat 8 لتصنيف أشكال الكثبان وتقدير مساحتها بدقة مكانية مرتفعة خضعت المرئيات إلى معالجة رقمية وتحليل مكاني لاستخراج النتائج باستخدام برنامج ArcGIS 10.8.

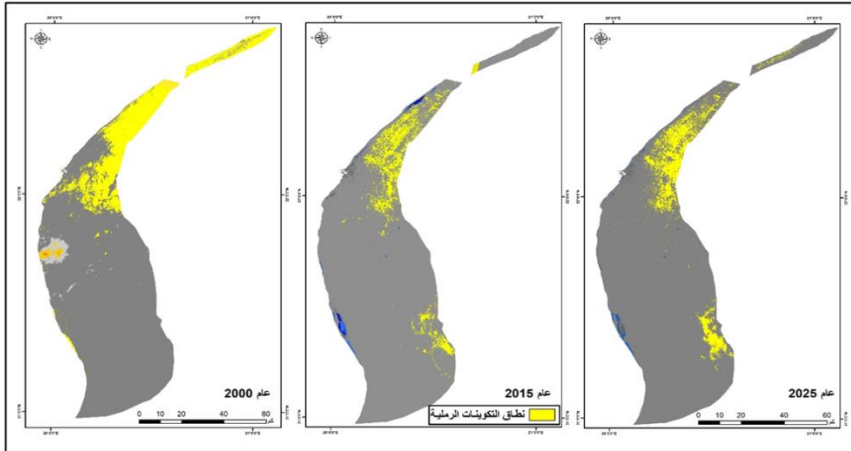
على صعيد المساحة، ارتفعت مساحة الكثبان الرملية النشطة بشكل مستمر من 160 كم² في 2015 إلى 230 كم² في 2025، بمتوسط 193.2 كم² سنوياً، ما يمثل نمواً إجمالياً يقارب 43.75% خلال فترة الدراسة. يعكس هذا التوسع ليس فقط حركة الكثبان القائمة، بل أيضاً تحويل الأراضي المستقرة سابقاً إلى مناطق رملية نشطة نتيجة تدهور التربة. ويرتبط هذا الارتفاع ارتباطاً وثيقاً بانخفاض الغطاء النباتي، الذي يتأثر بالجفاف، وانخفاض المياه الجوفية ورطوبة التربة، مما يقلل تماسك التربة ويزيد تعرض الرمال للرياح. وتصبح هذه الأسطح الرملية المكشوفة مصدراً جديداً للرمال التي تغذي الكثبان النشطة أو تساهم في تكوين كثبان جديدة. تكشف تحليلات الصور الفضائية عالية الدقة عن هيمنة الكثبان الهلالية (Barchans) في سهل بنغازي، خاصة في المناطق الساحلية والأراضي المكشوفة، حيث تتميز هذه الكثبان بسرعة حركتها وقدرتها على الزحف لمسافات طويلة، وتأثرها الكبير باتجاهات وسرعة الرياح. كما توجد الكثبان الطولية (Longitudinal Dunes) في المناطق الداخلية الأقل تعرضاً للرياح متعددة الاتجاهات. تشكل هذه الأشكال

الديناميكية تحديًا كبيرًا لجهود مكافحة التصحر، ما يؤكد أهمية فهم أشكالها وديناميكياتها لتطوير استراتيجيات تثبيت فعالة.

ثانيًا: - تغيرات مساحة الكثبان الرملية في سهل بنغازي خلال الفترة (2000-2025):

تمثل الكثبان الرملية أحد المكونات الجيومورفولوجية الأساسية في سهل بنغازي، وتتميز بالديناميكية العالية واستجابتها السريعة للعوامل المناخية والبيئية. خلال الفترة بين عامي 2000 و 2025 شهدت هذه الكثبان تغيرات ملحوظة في مساحتها ونسب انتشارها داخل السهل. ويستند هذا الجزء من الدراسة إلى بيانات الاستشعار عن بُعد لتحليل التحولات الزمنية في مساحة الكثبان الرملية، بما يتيح فهم أنماط التغير ومقدار الزيادة أو النقصان في الامتداد الرمي، وتفسير العوامل الطبيعية والبشرية المؤثرة فيها.

شكل (5) التحليل المكاني والزمني لمساحة الكثبان الرملية في سهل بنغازي (2000-2025).



المصدر: أُعدت من قبل الباحثة بالاعتماد على مرئيات الأقمار الصناعية Landsat، حيث استُخدمت مرئيات Landsat 7 (ETM+) لعام 2000، ومرئيات Landsat 8 (OLI) لعامي 2015 و 2025. وقد تم احتساب المؤشر باستخدام النطاق الأزرق ونطاق الأشعة تحت الحمراء قصيرة الموجة (SWIR1)، وذلك وفق الخصائص الطيفية لكل مستشعر، بالاعتماد على المرئيات المأخوذة من أرشيف USGS Earth Explorer. استُخدمت هذه المرئيات في تحليل التغيرات المكانية لمؤشر الكثبان الرملية (Normalized Difference Dune Index – NDDI) في سهل بنغازي باستخدام برنامج ArcMap الإصدار 10.8.

جدول (15) تطور مساحة الكثبان الرملية في سهل بنغازي

خلال العقدين الأخيرين (2000-2025).

السنة	المساحة الكلية (م ²)	مساحة الرمال (م ²)	النسبة من المساحة الكليّة (%)	مقدار الإضافة الكلية (م ²)	مقدار الإضافة السّوية (م ²)
2000	6620.4	1041.1	15.73	-	-
2015	6620.4	461.8	6.97	-579.3	-38.6
2025	6620.4	535.1	8.08	73.3	7.3

المصدر: إعداد الباحثة. تم استخدام مريثات الأقمار الصناعية Landsat 8 للأعوام 2000 و 2015 و 2025، وتحليلها باستخدام برنامج ArcMap الإصدار 10.8

يعرض الجدول (15) هذه التغيرات المكانية والزمانية عبر ثلاث سنوات مرجعية (2000، 2015، 2025)، مع ثبات المساحة الكلية للمنطقة عند 6620.4 كم². ويوضح الجدول مقدار التغير الكلي والسّوي في مساحة الرمال ونسبتها من المساحة الكلية، مما يمكن من استخلاص النتائج المتعلقة بديناميكية الكثبان الرملية واتجاهاتها خلال فترة الدراسة:

- في عام 2000 م بلغت مساحة الرمال 1041.1 كم²، أي ما يعادل 15.73% من إجمالي مساحة سهل بنغازي، وتُعد هذه السنة نقطة الأساس للمقارنة، إذ لا يظهر فيها أي مقدار للإضافة أو التغير السّوي.

- في عام 2015 م، انخفضت مساحة الرمال في سهل بنغازي بصورة ملحوظة لتصل إلى 461.8 كم²، أي ما يعادل 6.97% من المساحة الكلية للسهل. وقد بلغ مقدار التغير الكلي خلال الفترة 2000-2015 نحو -579.3 كم²، بمعدل نقصان سنوي قدره -38.6 كم²/سنة. ويعكس هذا التراجع انخفاضاً واضحاً في الامتداد الرملي، يُرجّح ارتباطه بمجموعة من العوامل البيئية والبشرية، من أبرزها التوسع العمراني واستصلاح الأراضي، وتزايد النشاطات التعدينية والمحاجر، إلى جانب التغيرات في حركة الرياح ونقص معدلات الترسيب الطبيعي.

- في عام 2025 م، ارتفعت مساحة الرمال في سهل بنغازي لتصل إلى 535.1 كم²، بما يعادل 8.08% من المساحة الكلية للسهل. وبلغ مقدار الزيادة الكلي مقارنة بعام 2015 نحو 73.3 كم²، بمعدل زيادة سنوي قدره 7.3 كم²/سنة. ويشير هذا الارتفاع إلى عودة نشاط الكثبان الرملية خلال الفترة 2015-2025، ويُعزى ذلك إلى مجموعة من العوامل

البيئية والبشرية، من أبرزها زيادة ديناميكية الرياح وتراجع عمليات التثبيت الطبيعي بفعل الجفاف، وانخفاض الغطاء النباتي الطبيعي، إضافة إلى التأثيرات البشرية المتمثلة في إزالة الغطاء النباتي، وإنشاء المباني والطرق، والرعي الجائر، والنشاطات الصناعية التي تسهم في تسهيل تراكم الرمال وزيادة حركتها.

- يتبين من الشكل (5) أنه خلال الفترة ما بين 2000-2025 م شهدت الكثبان الرملية تحركاً تدريجياً من الشمال نحو الجنوب داخل منطقة سهل بنغازي. ففي عام 2000 م، كانت الكثبان مركزة بشكل رئيسي في الجزء الشمالي، حيث تأثرت المناطق الشمالية بشكل أكبر، بينما كانت المناطق الجنوبية شبه خالية من الكثبان، مع وجود بعض البقع الرملية الصغيرة المتفرقة التي تشير إلى بدء نشاط محدود هناك. وبحلول عام 2015 م، لوحظ توسع ملموس للكثبان نحو وسط وسهل بنغازي الجنوبي، مع ظهور بقع جديدة في الجنوب، ما يعكس تزايد معدلات زحف الرمال جنوباً، في حين استمرت المناطق الشمالية بالمعاناة من كثافة كبيرة للكثبان الرملية. ومع حلول عام 2025 م، أصبح الانتشار الجنوبي أكثر وضوحاً، خاصة في الجنوب والجنوب الشرقي، حيث سجلت هذه المناطق أكبر قدر من التضرر نتيجة تراكم الرمال وزحفها، بينما انخفضت الكثافة في الشمال نسبياً مقارنة بالسنوات السابقة.

ثالثاً: - التنبؤ بحركة الكثبان الرملية في سهل بنغازي خلال الفترة (2025-2035):

استناداً إلى نموذج بيانات اللوحة (2015-2025) وتحليل التفاعلات بين الأبعاد المناخية والجيومورفولوجية والهيدرولوجية والنباتية، تشير التنبؤات إلى استمرار تسارع زحف الكثبان الرملية في سهل بنغازي خلال 2025-2035 كما يظهر في الجدول (16)، ما لم تُتخذ إجراءات استباقية، نتيجة لحلقات التغذية الراجعة السلبية بين العوامل المختلفة.

- الحد الثابت (0β): $+3.0$ (يُشير إلى معدل زحف أساسي في غياب تأثير المتغيرات الأخرى).
- معامل سرعة الرياح (1β): $+0.80$ (لكل زيادة قدرها 1 متر/ثانية في متوسط سرعة الرياح، يُتوقع زيادة معدل زحف الكثبان بمقدار 0.80 متر/سنة).
- معامل هطول الأمطار (2β): -0.02 (لكل زيادة قدرها 1 ملم في متوسط هطول الأمطار السنوي، يُتوقع انخفاض معدل زحف الكثبان بمقدار 0.02 متر/سنة).
- معامل درجة الحرارة (3β): $+0.15$ (لكل زيادة قدرها 1 درجة مئوية في متوسط درجة الحرارة السنوية، يُتوقع زيادة معدل زحف الكثبان بمقدار 0.15 متر/سنة).
- معامل مؤشر التربة والمياه ($4SMI$) (β): -1.20 (لكل زيادة قدرها 0.01 وحدة في مؤشر SMI، يُتوقع انخفاض معدل زحف الكثبان بمقدار 0.012 متر/سنة).
- معامل مساحة الغطاء النباتي المتدهورة (5β): $+0.08$ (لكل زيادة قدرها 1 كيلومتر مربع في مساحة الغطاء النباتي المتدهورة، يُتوقع زيادة معدل زحف الكثبان بمقدار 0.08 متر/سنة).

من الجدول (16) يظهر تأثير كل عامل على التنبؤ ومستقبل حركة الكثبان الرملية كما يلي:

- 1- سرعة الرياح (الحرك الديناميكي): تُشير التوقعات إلى استمرار ارتفاع متوسط سرعة الرياح من 7.6 م/ث في 2025 إلى 8.6 م/ث في 2035. بناءً على المعامل المقدّر ($+0.80$)، فإن هذه الزيادة البالغة 1.0 م/ث ستساهم بزيادة قدرها 0.8 متر/سنة في معدل زحف الكثبان على مدار العقد. ويعزى ذلك إلى أن تصاعد الرياح يعزز الحركة الميكانيكية للرمال، مما يزيد من خطر التوسع الصحراوي.
- 2- هطول الأمطار (العامل الهيدرولوجي): يُتوقع أن ينخفض متوسط هطول الأمطار من 220 ملم/سنة في عام 2025 إلى 170 ملم/سنة في عام 2035. ووفقاً للمعامل المقدّر ($\beta_2 = -0.02$)، يؤدي انخفاض الهطول بمقدار 50 ملم إلى زيادة حوالي 1.0 متر/سنة في معدل زحف الكثبان، نتيجة تراجع رطوبة التربة وضعف تماسكها سيزيد من تأثير التعرية.
- 3- درجة الحرارة (العامل المُسرّع للجفاف): تُظهر التوقعات ارتفاعاً طفيفاً ومستمرًا في متوسط درجة الحرارة من 22.3°C في 2025 إلى 23.3°C في 2035. بالرغم من أن

التأثير المباشر على معدل الزحف قد يكون محدوداً (زيادة قدرها 0.15 متر/سنة بناءً على المعامل $+0.15$)، إلا أن الأهمية تكمن في تأثيرها غير المباشر على زيادة معدلات التبخر والنتح، مما يُسرّع من جفاف التربة وإجهاد الغطاء النباتي.

4- مؤشر التربة والمياه (SMI) (مقياس هشاشة التربة): يُعد هذا المؤشر حاسماً، ويُتوقع أن ينخفض بشكل مطرد من 0.28 في 2025 إلى 0.18 في 2035. هذا الانخفاض بواقع 0.10 وحدة في (SMI)، بناءً على المعامل المقدّر (-1.20)، سيؤدي إلى زيادة قدرها 1.2 متر/سنة في معدل زحف الكثبان. مما يعكس ضعف تماسك التربة وجهازيتها للحركة الريحية.

5- مساحة الغطاء النباتي المتدهورة (العامل البيئي المؤثر على مقاومة زحف الكثبان): تُظهر التوقعات توسعاً ملحوظاً للغطاء النباتي المتدهور، من 230 كم² في 2025 لتصل إلى 300 كم² في 2035. هذه الزيادة البالغة 70 كم²، بناءً على المعامل المقدّر (+0.08)، ستُسهم بـ 5.6 متر/سنة في معدل زحف الكثبان، مما يجعلها العامل الأكثر تأثيراً مباشراً على الظاهرة. ويُعد فقدان الغطاء النباتي عاملاً مضاعفاً يزيد من فعالية الرياح في نقل الرمال.

6- معدل زحف الكثبان الرملية المتوقع (متر/سنة): تشير التوقعات إلى تصاعد تدريجي من 10.6 م/سنة في عام 2025 إلى 13.6 م/سنة في عام 2035. ويعكس هذا الارتفاع المتدرج اتجاهاً متفقاً نحو التصحر وتوسع الكثبان الرملية، الأمر الذي يستدعي تبني استراتيجيات فعّالة لحماية البيئة، مثل إنشاء الحواجز النباتية والتشجير، والحفاظ على رطوبة التربة، وإدارة الأراضي المتدهورة للحد من زيادة الظاهرة.

النتائج:

- كشفت نتائج اختبار Pedroni عن وجود علاقة تكامل مشتركة قوية ودالة إحصائية بين معدل زحف الكثبان الرملية والعوامل المناخية والجيومورفولوجية والهيدرولوجية والنباتية، مما يشير إلى أن هذه العوامل تتفاعل بشكل متكامل لتؤثر على الزحف على المدى الطويل. ويعكس ذلك الطبيعة الديناميكية المتراكمة لعملية زحف الرمال، حيث تميل المتغيرات إلى التكيف للحفاظ على توازن النظام البيئي.

- شهدت الفترة (2015-2025) تراجعاً واضحاً في متوسط الغطاء النباتي من 0.32 إلى 0.21، مع زيادة مساحة الغطاء المتدهور من 160 إلى 230 كم²، مما يبرز الدور الحاسم لفقدان الغطاء النباتي في تعزيز معدل زحف الكثبان الرملية.

- أظهر اختبار Wooldridge لبيانات اللوحة وجود ارتباط ذاتي من الدرجة الأولى في بقايا نموذج زحف الكثبان (Prob = 0.0000)، مما يدل على تراكم تأثير العوامل البيئية، مثل سرعة الرياح وتدهور الغطاء النباتي، عبر الزمن، وبالتالي تأثيرها على معدل الزحف في الفترات اللاحقة، بما يعكس الطبيعة الديناميكية والمتراكمة للظاهرة.

- تبين من الدراسة أن الكثبان الرملية في سهل بنغازي شهدت تراجعاً حاداً بين 2000 و2015، تلاه ارتفاع نسبي في الفترة بين 2015 و2025. وهذا يدل على أن النظام الرملي في المنطقة ديناميكي ومتغير، ويتأثر بالعوامل المناخية والبيئية والبشرية، مما يستلزم متابعة دورية لرصد اتجاهات التغير ووضع استراتيجيات مناسبة لإدارة الكثبان الرملية.

- تشير نتائج تحليل نموذج بيانات اللوحة إلى أن سهل بنغازي سيشهد خلال الفترة (2025-2035) تسارعاً ملحوظاً في معدل زحف الكثبان الرملية، حيث سيرتفع المعدل من 10.6 متر/سنة إلى 13.6 متر/سنة، أي بنسبة زيادة تبلغ 28.3%. ويرتبط هذا التسارع بتوسع رقعة الأراضي المتأثرة من 230 كم² إلى نحو 300 كم²، مما سيترتب عليه فقدان نحو ربع الأراضي الزراعية، وتضرر البنية التحتية الحيوية، وانخفاض الإنتاج الزراعي بنسبة تصل إلى 20%، إضافة إلى زيادة العواصف الرملية بحوالي 40% وما يصاحبها من آثار صحية واقتصادية سلبية.

التوصيات:

- اعتماد استراتيجيات مستدامة لمكافحة التصحر في سهل بنغازي ابتداءً من عام 2025، تشمل استصلاح نحو 50 كم² من الأراضي المتدهورة سنوياً وتطبيق تقنيات حصاد المياه لرفع مؤشر رطوبة التربة، بما يسهم في خفض معدل زحف الكثبان الرملية إلى أقل من 9 م/سنة بحلول عام 2035، واستعادة نحو 80 كم² من الأراضي المتدهورة، وتقليل العواصف الرملية بنسبة تصل إلى 25%، وتحسين جودة الهواء، إلى جانب تعزيز الأمن الغذائي وتحقيق الاستدامة البيئية والاقتصادية للمنطقة.

- زراعة النباتات المحلية المقاومة للجفاف والملوحة مثل *Cynara* و *Cynara cyrenaica*

cornigera، إلى جانب السنط التورتيليس والطرفاء، والعشب مثل الإسبارتو والمورينجا لتعزيز خصوبة التربة وتثبيت الرمال. بالإضافة إلى إعادة التشجير واستخدام الحواجز النباتية على طول الكثبان الرملية والمناطق المعرضة للزحف الصحراوي، مثل أكاسيا سيانوفيليا لتثبيت الرمال، والصنوبر الحلبي وعقل الطرفاء لتعزيز استقرار التربة بعد تثبيتها، مع دمج هذه الإجراءات في برامج تخطيط مستدامة لمراقبة حركة الرمال وضمان استدامة مكافحة التصحر.

– استخدام تقنيات الأقمار الصناعية ونظم المعلومات الجغرافية لمتابعة التغيرات البيئية والمخاطر الجغرافية بصورة دورية، وتطوير مؤشرات جديدة لتقييم المخاطر، مثل مؤشر الكثبان المتحركة (DSI)، إلى جانب إعادة التشجير مع مراعاة العوامل المناخية والجغرافية، للحد من توسع الكثبان وتقليل آثارها البيئية.

المصادر والمراجع:

- آل زينه، ناصر بن سعيد جابر (2020م)، مراقبة زحف الرمال والتنبؤ بحركتها باستخدام تقنية الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في محافظة بدر بمنطقة المدينة المنورة. مجلة جامعة طيبة: للآداب والعلوم الإنسانية، السنة السابعة، العدد 20.
- البكري، إبراهيم سيد صابر (2022)، زحف الكثبان الرملية وأثره على طريق العقير-الهفوف بالمملكة العربية السعودية باستخدام الاستشعار عن بعد. حوليات آداب عين شمس، المجلد 50 (عدد إبريل-يونيو 2022م). جامعة عين شمس، قسم الجغرافيا - كلية الآداب.
- الخليف، جيهان عبد القادر (2021م)، توظيف التقنيات الجغرافية الحديثة في تحديد المناطق المهددة بزحف الرمال على الطرق الرئيسية حول مدينة الرياض. مجلة مركز البحوث الجغرافية والكارتوجرافية، كلية الآداب-جامعة المنوفية، العدد 32. <https://mkgc.journals.ekb.eg>
- حسن، أحمد عباس، فاضل، لبناز أنيس، فاضل، شهد عادل، أحمد، أيمن موفق، قابيل، هالة حمزة (2023م)، تحديد ومراقبة معدلات حركة الكثبان الرملية في وسط العراق باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد. مجلة شمال إفريقيا، المجلد 1، العدد 4، أكتوبر-ديسمبر 2023.
- <https://najsp.com/index.php/home/article/download/308/277/559>
- صالح، منصف محمد (2014)، التصنيف الجغرافي للتربة في سهل بنغازي، المجلة الليبية العالمية، جامعة بنغازي، كلية التربية - المرج، المجلد الأول.
- صالح، منصف محمد (2021)، سهل بنغازي، دراسة في جغرافية التربة، طرابلس، دار الجابر للطباعة والنشر والتوزيع.

- علي، انتصار على حسن، عبد المقصود، ماهر إبراهيم، رفاعي، أحمد أنور (2022)، الأبعاد الاجتماعية والاقتصادية الناتجة عن زحف الكثبان الرملية في محافظة الوادي الجديد، مجلة الاقتصاد الزراعي والعلوم الاجتماعية، المجلد 13(5)، 113-123.

<https://doi.org/10.21608/jaess.2022.132282.1040>

-لامه، محمد عبد الله (2003)، سهل بنغازي: دراسة في الجغرافية الطبيعية بنغازي: منشورات جامعة قاريونس (الطبعة الأولى).

-محمد، أبوبكر موسى (2009)، دراسة ظاهرة زحف الكثبان الرملية على الطرق الصحراوية واقتراح الحلول العلاجية، رسالة ماجستير (غير منشورة)، قسم الجغرافيا، كلية الآداب، جامعة الفاتح، ليبيا.

-Baltagi, B. H. (2021). *Econometric analysis of panel data* (6th ed.). Springer-<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-53953-5>
-Conant, L. C., & Goudarzi, G. H. (1967). *Stratigraphic and Tectonic Framework of Libya*. U.S. Geological Survey Professional Paper 560-A.

-El Aal, A. K. A., GabAllah, H. M., Megahed, H. A., Selim, M. K., Hegab, M. A., Fadl, M. E., Rebouh, N. Y., & El-Bagoury, H. (2024). Geo-environmental risk assessment of sand dunes encroachment hazards in arid lands using machine learning techniques. *Sustainability*, 16(24), 11139.

<https://doi.org/10.3390/su162411139>

- El Gammal, E. A., & El Gammal, A. E. A. (2010). Hazard impact and genetic development of sand dunes west of Samalut, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 13(2), 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2010.02.001>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), (2020), *State of land and water resources in Libya: Challenges and opportunities for sustainable land management*. FAO. Rome, Italy.

- Gómez, D., Salvador, P., Sanz, J., Casanova, C., & Casanova, J. L. (2018). Detecting areas vulnerable to sand encroachment using remote sensing and GIS techniques in Nouakchott, Mauritania. *Remote Sensing*, 10(10), 1541. <https://doi.org/10.3390/rs10101541>

- Goudie, A. S. (2013). *Arid and semi-arid geomorphology*. Cambridge University Press.

- Hamdi, A., Zurqani, E. A., Mikhailova, C., Post, C., & Schlautman, M. A. (2019). A review of Libyan soil databases for use within an ecosystem services framework. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/333118078>

- Hugenholtz, C. H., Levin, N., Barchyn, T. E., & Baddock, M. C. (2012). Remote sensing and spatial analysis of aeolian sand dunes: A review and outlook. *Earth-Science Reviews*, 111, 319–334.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.11.006>

-Lancaster, N. (1995). *Geomorphology of desert dunes*. Routledge.

-Middleton, N. J., & Thomas, D. S. G. (1997). *World atlas of desertification* (2nd ed.). Arnold / United Nations Environment Programme.

-Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (Vol. 1, pp. 309–317). Washington, DC: NASA, Special Publication SP-351.

-Torres-Reyna, O. (2007). *Panel Data Analysis: Fixed and Random Effects using Stata*. Princeton University. Retrieved from <https://www.princeton.edu/~otorres/Panel101>.

-Zurqani, H. A., Mikhailova, E. A., Post, C. J., & Schlautman, M. A. (2019). *Land desertification in Libya: Causes, impacts and management*. *Land Degradation & Development*, 30(15), 1833–1849. <https://doi.org/10.1002/ldr.3391>