



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

د. فاطمة مفتاح محمد حسون غازي

محاضر بقسم الجغرافيا/ كلية الآداب /جامعة إجدابيا -ليبيا

[Falshrif24@gmail.com](mailto:Falshrif24@gmail.com)

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

### الملخص:

تحدّف هذه الدراسة إلى تحليل ديناميكيات زحف الكثبان الرملية في سهل بنغازي خلال الفترة 2000–2025، بالاعتماد على صور الأقمار الصناعية Sentinel-2 وLandsat 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 توسيع مساحة الكثبان النشطة من 160 إلى 230 كم<sup>2</sup> نتيجة تدهور الغطاء النباتي والعوامل المناخية. وتشير التوقعات للفترة 2025–2035 إلى استمرار ارتفاع معدل الرhof 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 كم<sup>2</sup>. لذلك، توصي الدراسة بتطبيق استراتيجيات مستدامة لمكافحة التصحر، تشمل استصلاح الأراضي وزراعة النباتات المقاومة للجفاف وتثبيت التربة، إلى جانب اعتماد إدارة متکاملة للكثبان ومتتابعة التغيرات البيئية باستخدام الأقمار الصناعية وGIS، 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](mailto: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 km<sup>2</sup> 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 km<sup>2</sup>. 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 المعقدة 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, 2013, pp45-47). وتؤثر هذه الظاهرة سلباً على النظم البيئية والهيدرولوجية، كما تمثل تهديداً مباشراً للبنية التحتية، الأراضي الزراعية، والموارد المائية، مما يترجم إلى خسائر اقتصادية ملموسة على المستويين المحلي والوطني" (Middleton & Thomas, 1997, p123).

يصنف سهل بنغازي، الواقع على الساحل الشمالي الشرقي، ضمن أكثر المناطق تعرضاً لزحف الرمال نتيجة طبيعة المناخية شبه الجافة، حيث تتضاعف عوامل ارتفاع درجات الحرارة، سرعة الرياح السائدة، ونقص المطر المطول لتعزيز ديناميكيات حركة الكثبان (Zurqani, Mikhailova, Post, & Schlautman, 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. يُعرف زحف الكثبان الرملية بأنه عملية جيومورفولوجية ديناميكية تنتج عن انتقال الرواسب الرملية بفعل الرياح السائدة، مما يؤدي إلى تحرك الكثبان من مواقعها الأصلية وتقديمها باتجاه المناطق المجاورة، تبعاً لشدة الرياح، خصائص الحبيبات الرملية، ودرجة تماسك السطح وغضائه 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) وتقييمات الاستشعار عن بعد كأدوات فعالة للتحليل المكاني والزماني للظاهرة، حيث تمكن من رصد التغيرات المورفولوجية، قياس معدلات الرصف، وتتبع تطور الكثبان عبر الزمن، بما يسهم في توفير فهم أدق للعمليات الطبيعية المؤثرة في المنطقة (Hugenholtz, Levin, Barchyn, 2012 & Baddock, 2012). بناءً على ذلك، تهدف هذه الدراسة إلى تحليل ديناميكيات زحف

الكتبان الرملية في سهل بنغازي خلال الفترة 2000–2035، وتقدير أثر المتغيرات المناخية والبيئية على معدلات الزحف، باستخدام منهجية تكاملية تجمع بين التحليل المكانى– الزمانى عبر GIS، الاستشعار عن بعد، 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 الكتبان الرملية وتغيرات الغطاء الأرضي، ما يؤثر على التربة والمحاصيل والبنية التحتية. الدراسات السابقة اقتصرت غالباً على التحليل الوصفى، وكانت محدودة جغرافياً و زمنياً، ولم تستخدم نماذج تنبؤية دقيقة لرصد حركة الكتبان الرملية. وتبرز الحاجة إلى دراسة شاملة تربط بين التغيرات المناخية، مؤشرات رطوبة التربة، والنماذج الإحصائية للتنبؤ بزحف الكتبان الرملية، باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد، ونظم المعلومات الجغرافية، ونماذج بيانات اللوحة (Panel Data)، لتقديم تقييم دقيق وдинاميكى للتغيرات الحالية والتنبؤ بمسار تطورها مستقبلياً.

#### - الفرضيات:

- 1- تؤثر العوامل المناخية (سرعة الرياح، معدل المطر المطهول المطري، درجة الحرارة)، والعوامل البيئية (التركيب الرملي للتربة) تأثيراً مباشراً على توسيع الكتبان الرملية النشطة في سهل بنغازي.
- 2- توجد علاقة إيجابية بين نسبة التربة الرملية وتوسيع الكتبان النشطة، إذ يسهم ارتفاع التركيب الرملي للتربة في تسريع ديناميكيات حركة الكتبان.
- 3- توجد علاقة سلبية بين الغطاء النباتي ومعدلات زحف الكتبان 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 بعد، التنبؤ بدقة بمعدلات زحف الكتبان الرملية.

#### - أهداف البحث:

- تتبع ديناميكيات حركة الكتبان الرملية في سهل بنغازي خلال الفترة (2000–2025).



وتحليل معدلات زحفها واتساع مساحتها.

- تقييم أثر العوامل المناخية والبيئية (درجة الحرارة، سرعة الرياح، معدل المطر المطول، 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 تنبؤي لمعدلات زحف الكثبان المستقبلية واقتراح استراتيجيات فعالة للتكييف مع التصحر والحد من المخاطر البيئية الناجمة عن زحف الكثبان.
- موقع منطقة الدراسة:**

يقع سهل بنغازي في النطاق الشمالي الشرقي من ليبيا، بين دائري عرض  $30^{\circ} 57' 34''$  و  $00^{\circ} 44' 30''$  شمالاً، وبين خط طول  $19^{\circ} 55' 17''$  و  $00^{\circ} 00' 21''$  شرقاً، وتبلغ مساحته حوالي  $6620.4 \text{ km}^2$ . ويمتد من جهة الغرب والشمال الغربي على ساحل البحر المتوسط بطول يصل إلى 255 كم كما تُحَدُّد المنطقة من جهتها الشمالية بالحافة الشرقية والجنوبية الشرقية لجبل الأخضر بطول يقارب 220 كم، ويجاورها من الشمال الشرقي الحرف الأسود، بينما تنتد حدودها الجنوبية عند منطقة التداخل بين تربة برقة شبه الحمراء وتربة برقة البيضاء (سهل سرت). ويأخذ امتداد المنطقة شكلاً طولاً من الشمال الشرقي إلى الجنوب الغربي على هيئة مثلث معقوف. وتقرب 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 وببلدة 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:

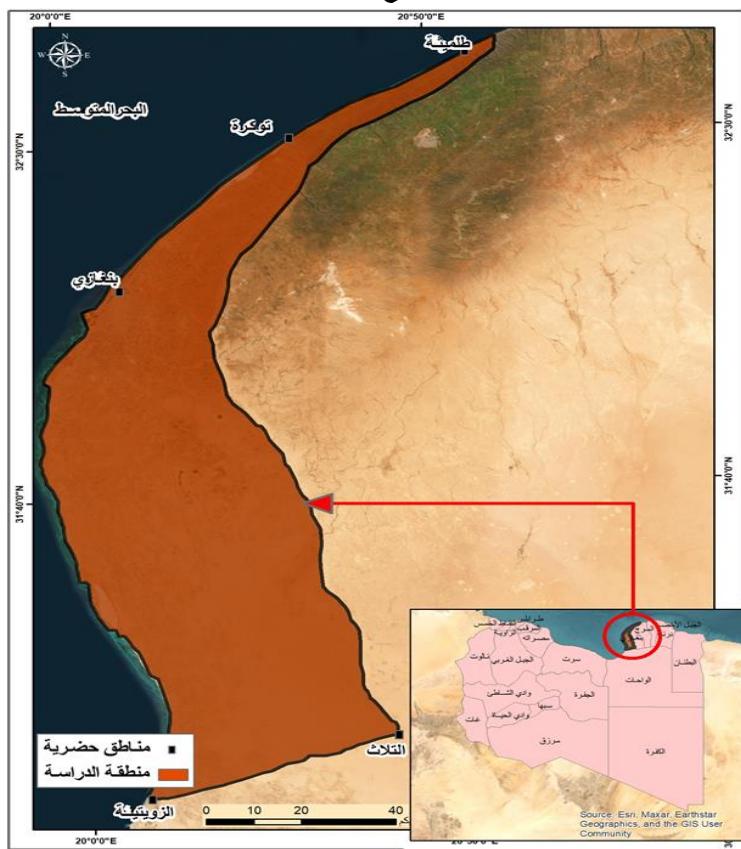
- **المنهج الإقليمي:** تناولت دراسة الخصائص الطبيعية والبيئية لسهل بنغازي، بما في ذلك المناخ، خصائص التربة، والغطاء النباتي، بهدف تحديد العوامل الرئيسية المؤثرة في ديناميكيات

حركة الكثبان الرملية. كما تضمن تحليل التغيرات المكانية والزمنية بالاستناد إلى صور الأقمار الصناعية والخراطط الجغرافية.

- **المنهج المكاني والتحليلي:** توظيف تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وأدوات التحليل المكاني لرصد توزيع الكثبان النشطة، وقياس امتدادها، ومتتابعة معدلات الزحف السنوية، بما يسهم في فهم أنماط التغير المورفولوجي عبر الزمن.

- **المنهج الوصفي والإحصائي:** تطبيق نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) باستخدام برنامج EViews 10 لقياس العلاقة بين المتغيرات المناخية والبيئية من جهة، ومعدلات زحف الكثبان من جهة أخرى. ويشمل ذلك تقدير الأثر النسيي لكل عامل على ديناميكيات حركة الكثبان من خلال الاعتماد على الأساليب الإحصائية المكانية.

شكل (1) موقع منطقة الدراسة.



المصدر: أُعدت باستخدام برنامج ArcMap الإصدار 10.8، استناداً إلى محمد عبد الله لامة (2003) ص.26.



## ❖ أدوات ووسائل وأساليب الدراسة:

### 1- استخدام الصور الفضائية وتقنيات الاستشعار عن بعد 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 تصحيحاً هندسياً، وتحميم القنوات، وتحسيناً مكانيّاً باستخدام برنامج ArcGIS 10.8، تلاها تطبيق أسلوب التصنيف المراقب (Supervised Classification). ولضمان دقة التصنيف، تم اختيار صور شهر أبريل نظراً 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 الاستعanaة 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 كابا (Kappa Coefficient) لضمان موثوقية تحليل تغيرات حواف الكثبان (Crest Lines) عبر الزمن.

- بيانات Landsat 8/9 (OLI/TIRS): بدقة 30 م وبفاصل زمني 16 يوماً، 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 و LST.

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

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

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

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

جدول (1) خصائص الصور الفضائية المستخدمة في الدراسة.

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

المصدر : إعداد الباحثة بالاعتماد على بيانات الأقمار الصناعية 7 و 8 Landsat و 2 Sentinel 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 (Baltagi, 2021)، لقياس العلاقة بين المتغيرات المناخية والبيئية ومعدلات زحف الكثبان الرملية في سهل بنغازي. ويجمع هذا النموذج بين البيانات الزمنية (2015-2025) والبيانات المقطعة (موقع الرصد)، بما يسمح بالتحكم في المتغيرات غير الملاحظة



وتقليل الانحياز. كما تم اعتماد نموذج التأثيرات الثابتة (Fixed Effects Model) وفقاً ل Torres-Reyna (2007)، لتقدير الأثر النسبي للعوامل المناخية والجيومورفولوجية والهيدرولوجية والنباتية باستخدام أساليب الإحصاء المكانى. ويتضمن التحليل أيضاً اختبارات التكامل المشترك (Cointegration Tests)، للكشف عن ترابط المؤشرات وتفاعلها في التأثير على حركة الكثبان وصياغة توقعات مستقبلية لمسارتها. 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  $i$  والזמן  $t$ . (المتغير التابع: على سبيل المثال، معدل زحف الكثبان الرملية).

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

$\beta_0$ : الحد الثابت.

$\beta_k$ : معاملات الالخار للمتغيرات المستقلة التي تُعبر عن قوة وتأثير كل عامل.

$\alpha_i$ : التأثير الفردي الثابت (أو العشوائي) للموقع  $i$ ، ويعتبر الخصائص غير الملاحظة لكل موقع التي لا تتغير عبر الزمن.

$\epsilon_{it}$ : حد الخطأ العشوائي. تم تفييد جميع الاختبارات الإحصائية باستخدام 10 EViews، 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 الالزامية 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. تميز هذه البيانات بدقة مكانية تصل إلى حوالي  $31 \text{ km} \times 31 \text{ km}$  ودقة زمنية ساعة واحدة؛ مما يتيح رصد التغيرات المناخية اليومية والفترات الطويلة.

**CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data)**

مزيج من الاستشعار عن بعد وقياسات محطات الأرصاد الجوي. توفر هذه البيانات دقة مكانية  $0.05^{\circ}$  (حوالي 5 كم) ودقة زمنية يومية، مما يجعلها مناسبة لدراسة تأثير المطر على حركة الكثبان الرملية وдинاميكيات البيئة المحيطة. يسهم دمج هذه البيانات المكانية والزمنية في إجراء تحليل شامل ومتكمال 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 شكل 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، الوطنية - الجوش، العزيزية-غريان، وسيها-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 العطاء النباتي. وأكدت الدراسة أن الجمع بين الحلول الهندسية، مثل الحواجز الميكانيكية والطرق الخرسانية متعددة المراحل، وتطبيق الزراعة الشبيهية للنباتات المحلية ذات الجذور العميقية، 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 الخطير والتتطور الجيني للكثبان الرملية غرب سمالوط، مصر، أظهرت الدراسة أن رمال الكثبان الرملية جنوب شرقى وادى النيل تخضع لاتكال أكثر تجانساً مقارنة بمصدرها، مع وجود نسب مرتفعة من الحبيبات المستديرة المطفأة (RM)، تعكس طول فترة النقل والتربيس وقرب المصادر الروسية. الرمال الشمالية أكثر استدارة ولعلهاً 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 تحدثاً مستمراً لإنتاجية الأرضي 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 لتقديم 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 بـ  $150\text{ م}^2$  سنوياً خلال الفترة 2012-2016، مع حركة سنوية تقارب 24.6 متراً/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 الحبيطة بالرياض تتعرض بشكل عام لخطر زحف الرمال من مختلف الاتجاهات، حيث تم تحديد موقع 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 - المفوف في واحة الأحساء بالملكة 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، أحمد أنور رفاعي، (2022)، بعنوان الأبعاد الاجتماعية والاقتصادية الناجمة عن زحف الكثبان الرملية في محافظة الوادي الجديد. تناولت زحف الكثبان الرملية في محافظة الوادي الجديد، وأظهرت النتائج عيّاً متوسطاً إلى مرتفع لدى السكان، وتأثره بالعمر والدخل والنوع والحالة التعليمية، مع وجود علاقات معنوية بين الوعي والمتغيرات الديموغرافية والاجتماعية. وأكدت الدراسة أن الرحف يشكل مشكلة رئيسية للمحافظة بسبب طبيعتها الصحراوية واتساع الأرضي غير المأهولة.

- دراسة أحمد عباس حسن وآخرون (2023)، 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 متراً خلال ستة أعوام، مع تنوع أشكال الكثبان بين الهلالية النشطة وأنواع أخرى مثل المستعرضة والسيفية والقباب والتبكة.

- 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 الأرضي الجافة باستخدام تقنيات التعلم الآلي، اعتمدت على استخدام تقنيات SVM و RF 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 المؤشرات):

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

**1- المناخ:** يُعد المناخ العامل الأساسي الحرك لдинاميكيات 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 م إلى 220 م 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 تعد مؤشرات رئيسية في تسريع زحف الكثبان الرملية في المنطقة. ويشير المتوسط للفترة (2015–2025) إلى سرعة رياح تبلغ 7.1 م/ث، وهطول أمطار 245.4 م، ومتوسط درجة حرارة 21.5° م، مما يوفر مرجعية علمية لفهم ديناميكيات التغير المناخي وتأثيرها على زحف الرمال.

**2- العامل الجيولوجي:** يمثل سهل بنغازى نموذجاً لللتتابع الجيولوجي المتدرج، الذي يعكس التعاقب الزمني للتكتونيات الصخرية، بدءاً من أواخر الزمن الثاني (العصر الطباشيري الأعلى)، مروراً بتكتونيات الزمن الثالث، وصولاً إلى رواسب الزمن الرابع الحديثة. وتتميز تكتونيات الزمنين الثالث والرابع بكونها الأكثر انتشاراً من حيث الامتداد السطحي، مع لعبها دوراً محورياً في تشكيل الخصائص الجيومورفولوجية للسهل (Conant & Goudarzi, 1967, pp41–45). تمثل أقدم التكتونيات الجيولوجية في منطقة سهل بنغازى تكوين توكرة، العائد إلى الطباشيري الأعلى، والذي يظهر في نطاقات محدودة شمال السهل بمساحة تُقدر بنحو 32 كم<sup>2</sup>، أي ما يمثل نحو 0.5% من إجمالي مساحة المنطقة. ويتكوّن هذا التكتون من طبقات متراصّة 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، ص(36). تتمثل تكوينات الزمن الثالث عنصراً أساسياً في التطور الجيولوجي لسهل بنغازي، ويزر ضمنها تكوين أبولونيا الجيري، الذي يظهر في بعض الأودية جنوب غرب منطقة توكرة، مع توقيع امتداده إلى أعماق كبيرة تحت سطح السهل. ويكون هذا التكوين من صخور حيرية بحرية غنية بالحفريات الدقيقة، مما يعكس بيئات بحرية ضحلة نسبياً خلال تلك الحقبة (Conant & Goudarzi, 1967, pp88–90). ويُعد تكوين درنة من أبرز تكوينات المنطقة لاحتوائه على حفريات مجهرية متنوعة، خاصة الفورامينيفرا، مما يجعله مؤشراً مهماً على البيئات البحرية خلال الإيوسين الأوسط إلى الأعلى. كما يزد تكوين الرجمة – عضو بنغازي (الميوسين الأوسط)، الذي يغطي نحو 11٪ من مساحة السهل، ويكون أساساً من الحجر الجيري. وتغطي رواسب الزمن الرابع المساحة الأكبر من سهل بنغازي، إذ تبلغ نحو 88٪، وتشمل رواسب فناتية، وأودية موسمية، ورواسب رجية، إضافة إلى التربة الحمراء التي تمثل الأساس الزراعي للمنطقة، وُسُهم 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 (°C)
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 للبيانات الجوية متعددة المدى (ECMWF)، والتي توفر إعادة تحليل عالية الدقة للمتغيرات المناخية والغلاف الجوي عالمياً، بما في ذلك: درجة الحرارة، وسرعة الرياح، والرطوبة. كما استُخدمت بيانات MODIS LST المستمدّة من مستشعر MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) التابع لوكالة ناسا، بمدّف قياس درجة حرارة سطح الأرض. وُعد هذه البيانات أساسية في تحليل التغيرات المناخية والبيئية، بما في ذلك دراسة ظاهرة زحف الرمال.



**3 - العامل الجيومورفولوجي:** يساهم المظاهر 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.

يلاحظ أن متوسط الانحدار ظل ثابتاً عند  $1.8^{\circ}$  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% سنوياً. يعكس هذا التغير الطفيف تدهوراً مستمراً في تركيب التربة وزيادة مساحة الرمال المكشوفة، مما يوفر مصدراً إضافياً لحببيات الرمل المتحركة. ويعزى ذلك جزئياً إلى ضعف الغطاء النباتي وتناقص رطوبة التربة، ما يقلل من تماسكها وثباتها و يجعلها أكثر عرضة للحركة بفعل الرياح.

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

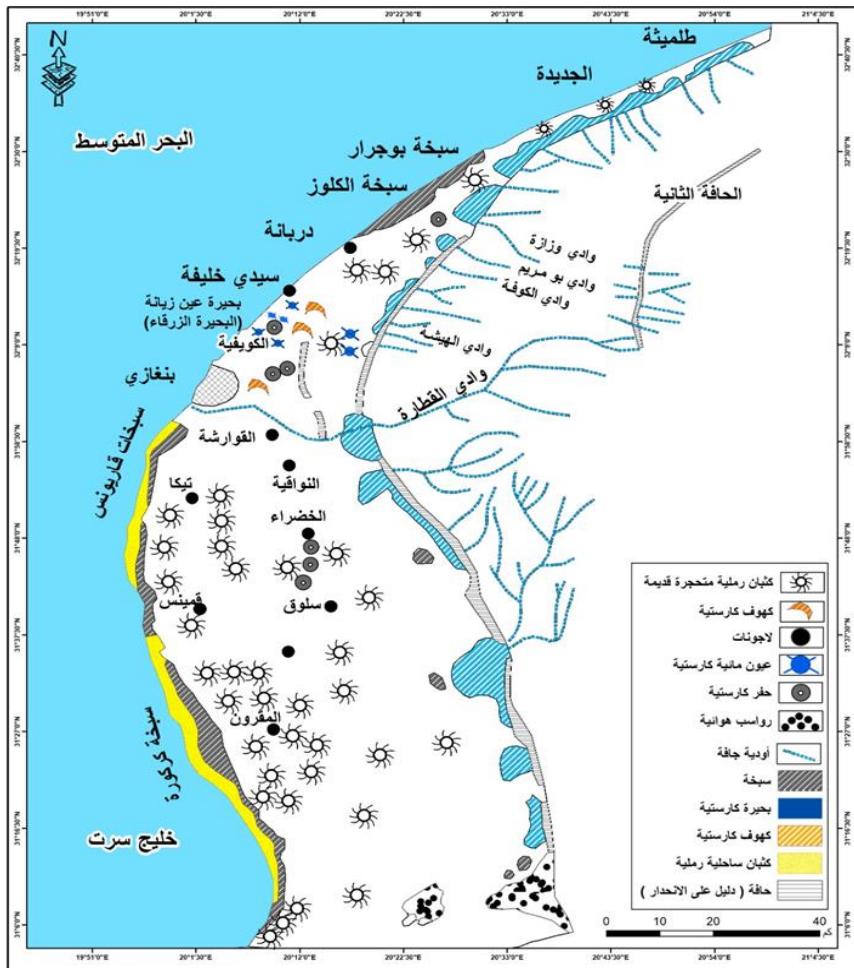
السنة	متوسط الانحدار (درجة)	نسبة التربة الرملية (%)	متوسط معدل زحف الكثبان (متر/سنة)
2015	1.8	60	8.5
2016	1.8	60	8.7
2017	1.8	61	8.9
2018	1.8	61	9.2
2019	1.8	62	9.4
2020	1.8	62	9.6
2021	1.8	62	9.8
2022	1.8	63	10.0
2023	1.8	63	10.2
2024	1.8	64	10.4
2025	1.8	64	10.6
المتوسط	1.8	62.0	9.6

المصدر:- أعدته الباحثة بالاعتماد على المصادر والبيانات الآتية:

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

يُعد متوسط معدل زحف الكثبان الرملية من العوامل الأكثُر ديناميكية وأهمية، حيث سُجِّلَ 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 وتوسيعها نحو المناطق المأهولة والزراعية، ويشير إلى التفاعل المباشر بين العوامل المناخية، مثل: زيادة قوة الرياح، وتوفُّر الرمال المرتبط بنسبة التربة الرملية، إضافة إلى ضعف مقاومة التربة للتعرية الناتج عن نقص الغطاء النباتي وتناقص رطوبة التربة.

الشكل (2) الخريطة الجيومورفولوجية لسهيل بنغازي.



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



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

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

السنة	متوسط مؤشر التربة والمياه (SMI)	متوسط انخفاض منسوب المياه الجوفية (متر/سنة)
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
<b>المتوسط</b>	<b>0.32</b>	<b>0.51</b>

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

يوضح الجدول القيم السنوية للمؤشرات الهيدرولوجية في سهل بنغازي للفترة من 2015 إلى 2025م، حيث يلاحظ انخفاضاً مستمراً في متوسط مؤشر التربة والمياه (SMI)، الذي يعكس رطوبة التربة وتتوفر 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 الاستنراف المستمر للمياه الجوفية، وما ينجم عنه من تأثير سلبي مباشر على الغطاء النباتي (البعد النباتي)، حيث تصبح البنيات غير قادرة على الوصول إلى كميات كافية من المياه، مما يؤدي إلى تدهورها وموتها في بعض المناطق. ويسهم ذلك في زيادة نسبة التربة المكشوفة والتعرية الريحية وتوضّح 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 كميّاً على أن الإجهاد المائي والجفاف في سهل بنغازى يُسهمان بشكل مباشر في تفاقم مشكلة زحف الرمال، من خلال إضعاف تمسك 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 لقليل استنراف المياه وتحسين مقاومة التربة للتعرية الريحية.

**5 - التربة:** تميز تربات سهل بنغازى بتنوع كبير في التركيب والخصائص الفيزيائية والكيميائية، نتيجة التفاعل المعقد بين العوامل المناخية والجيولوجية والتضاريسية. يعكس هذا التنوع تأثيره المباشر على استخدامات الأراضي الزراعية، وبعد مؤشراً مهمًا لفهم ديناميكيات زحف الكبان الرملية في المنطقة. يوضح الجدول (5) والشكل (3) تصنيف وتوزيع أنواع التربات في سهل بنغازى، مع تحديد الواقع الجغرافي لكل نوع ومدى انتشاره على مساحة السهل. تشكل تربة المراعي الجزء الأكبر من مساحة السهل، حيث تبلغ مساحتها 4377.7 كم<sup>2</sup>، أي ما يعادل 67.1% من إجمالي مساحة السهل، مما يعكس وفرة الغطاء النباتي والمراعي الطبيعية. تليها تربة السهول بمساحة 998.1 كم<sup>2</sup> (15.3%)، ثم التربة الساحلية بمساحة 532.6 كم<sup>2</sup> (8.2%). أما تربة الأودية والغابات والخلافات، فتشكل نسباً أقل تتراوح بين 2.5% و4.4%. يعكس هذا التوزيع التفاوت الطبيعي في استخدامات الأراضي وتكوين التربة. يُظهر هذا التوزيع أيضاً أن مناطق المراعي معرضة



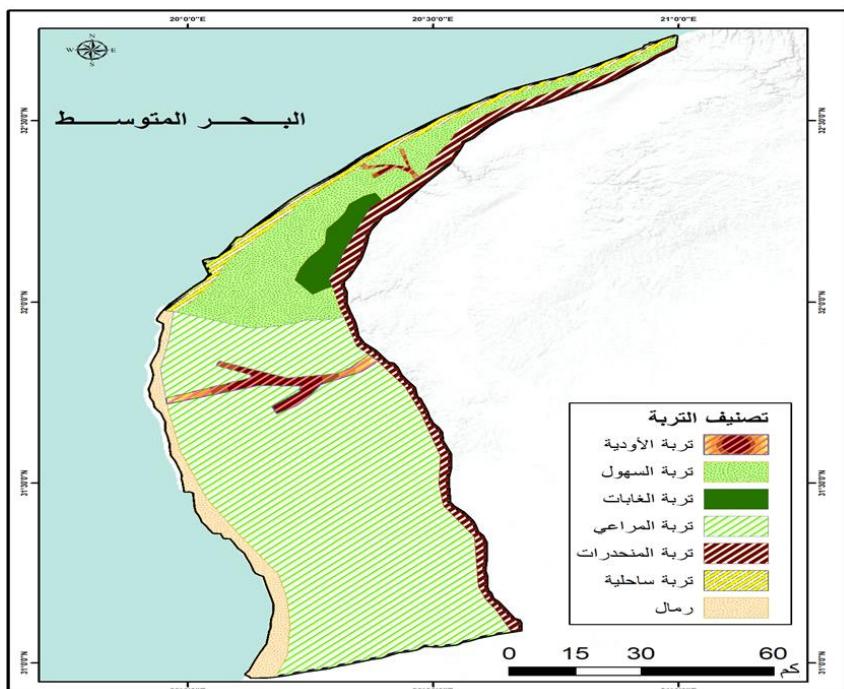
بشكل أكبر لنشاط الرياح، نتيجة ممارسات الرعي الجائر التي تقلل من كثافة الغطاء النباتي، مما يؤدي إلى ضعف تثبيت التربة وزيادة قابلية الرمال للتحرك. في المقابل، توفر المناطق المغطاة بالغابات الكثيفة حماية نسبية ضد حركة الكثبان الرملية، مما يحد من زحفها في تلك المناطق.

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

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

المصدر: منصف محمد صالح (ديسمبر 2014) ص.5.

**شكل (3) تصنیف وتوزیع أنواع التربات في سهل بنغازي.**



المصدر: أُعدت باستخدام برنامج ArcMap الإصدار 10.8، استناداً إلى: منصف محمد صالح (ديسمبر 2014) ص.6.

**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. ويُبيّن 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 سنويًا. 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  $160 \text{ كم}^2$  عام 2015 إلى  $230 \text{ كم}^2$  عام 2025، أي بزيادة قدرها  $70 \text{ كم}^2$  خلال 11 عاماً، وبمعدل يقارب  $6.4 \text{ كم}^2$  سنويًا. ويفيد 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 (2015–2025) أن قيمة NDVI لم تتجاوز 0.26، وهي قيمة منخفضة نسبياً، في حين بلغ متوسط المساحات المتدهورة نحو  $193.2 \text{ كم}^2$ . ولا ينفصل هذا التدهور عن العوامل المناخية والميدرولوجية المؤثرة، إذ يعزى 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 الكثبان الرملية وتوسيعها، 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 المنهورة (km <sup>2</sup> )	(NDVI)
2015	160	0.32
2016	165	0.30
2017	170	0.29
2018	178	0.28
2019	185	0.27
2020	192	0.26
2021	200	0.25
2022	208	0.24
2023	215	0.23
2024	222	0.22
2025	230	0.21
المتوسط	193.2	0.26

المصدر: تم استخدام مركبات MODIS وLandsat-2 من موقع USGS Sentinel، وتحليلها باستخدام ArcGIS 10.8.

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

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

وبالاعتماد على مركبات Landsat TM يُحسب المؤشر كما يلي:

$$\text{Landsat TM , NDVI} = (\text{Band 4} - \text{Band 3}) / (\text{Band 4} + \text{Band 3})$$

بينما يُحسب باستخدام مركبات Landsat OLI وفق المعادلة:

$$\text{Landsat OLI , NDVI} = (\text{Band 5} - \text{Band 4}) / (\text{Band 5} + \text{Band 4})$$

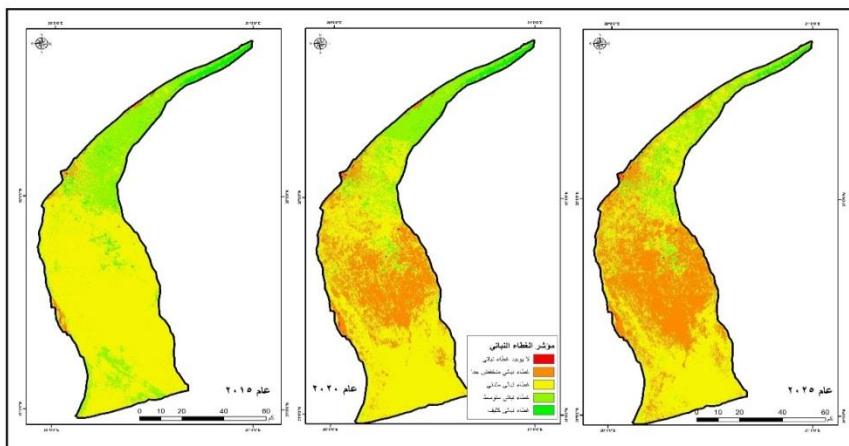
تتراوح قيم هذا المؤشر بين (-1 إلى +1)، إذ تشير القيم القريبة من +1 إلى وجود غطاء نباتي كثيف، في حين تدل القيم القريبة من الصفر على أسطح عارية أو غطاء نباتي ضعيف تشير القيم السالبة إلى المسطحات المائية أو الأسطح غير النباتية (Rouse et al., 1974, pp. 309–317)

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

2025		2020		2015		السنوات
0.21		0.26		0.32		(NDVI)
%	كم²	%	كم²	%	كم²	المساحة %
3.62	230	3.02	192	2.52	160	المناطق المتردبة
%	كم²	%	كم²	%	كم²	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 جداً
50.5	3340.0	57.8	3829.2	72.3	4783.6	غطاء نباتي متدين
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: أعدت البيانات من قبل الباحثة بالاعتماد على تحليلات مؤشر الفرق النباتي (NDVI) باستخدام صور الأقمار الصناعية 8 للأعوام 2015 و2020 و2025، من أرشيف USGS Earth Explorer، وقت معالجة البيانات وتحليلها في برنامج ArcMap 10.8 لتحديد الغطاء النباتي ومساحة المناطق المتردبة في سهل بنغازي.

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



المصدر: أعدت 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 شلت المعالجة المسبيقة للصور تصحيح الإشعاع واللحو، ثم استخراج مؤشر NDVI، وبعد ذلك تم تصنيف وتحديد أنواع الغطاء النباتي ومساحة المناطق المتردبة 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  $160 \text{ km}^2 (2.52\%)$  في 2015 إلى  $192 \text{ km}^2 (3.02\%)$  في 2020، ثم إلى  $230 \text{ km}^2 (3.62\%)$  في 2025، مع زيادة واضحة في المساحات التي يغطيها غطاء نباتي منخفض جدًا، من 93.7  $\text{km}^2$  في 2015 إلى 1722.3  $\text{km}^2$  في 2020، ثم إلى 2499  $\text{km}^2$  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 و2025؛ مما يسرع من تدهور التربة ويزيد من نشاط حركة الرمال في سهل بنغازى.

ثانيًا: 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)، نظرًا لكونها الأنسب للتحكم في الخصائص غير المرصودة والثابتة نسبيًا عبر الواقع الجغرافي المختلفة في سهل بنغازى خلال الفترة الزمنية 2015–2025، ويهدف هذا التحليل إلى تقدير أثر كل من العوامل المناخية والهيدرولوجية والنباتية والجيومرفولوجية 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، ودلالتها الإحصائية لكل متغير، إلى جانب مؤشرات كفاءة النموذج. تُظهر النتائج أن جميع المتغيرات المناخية ذات دلالة إحصائية عالية ( $\text{Prob.} < 0.001$ )، مما يؤكد تأثيرها الكبير ول المباشر على معدل زحف الكثبان، ويزز العلاقات المعقّدة التي تسهم في تفاقم الظاهرة في سهل بنغازى.

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

الاحتمالية	القيمة	الخطأ المعياري	المعامل	المتغير
0.0000	5.6693	0.1503	0.8521	متوسط سرعة الرياح
0.0000	4.1961-	0.0051	0.0214-	متوسط كثافة الأمطار
0.0001	3.8444	0.0405	0.1557	متوسط درجة الحرارة
0.0000	6.3984	0.5002	3.2005	( الثابت ) C
9.6000	المتوسط الحسابي للمتغير التابع	0.7853	( معامل التجديد $R^2$ )	
2.1000	S.D. dependent var ( الانحراف المعياري للمتغير التابع )	0.7602	Adjusted R-squared ( معامل التجديد المصحح )	
1.8502	Akaike info criterion (أكيك ) ( معيار معلومات )	0.5801	S.E. of regression للتقدير	الانحراف المعياري
2.0505	Schwarz criterion ( معيار شوارز )	15.2003	Sum squared resid	مجموع مربعات الباقي
1.9504	Hannan-Quinn Criterion ( معيار هنان-كون )	-25.5008	Log likelihood	دالة الاختفائية اللوغارitmية
0.5801	Root Mean Squared Error (الجذر التربيعي لمتوسط مربعات الخطأ )	1.9805	Durbin-Watson stat	إحصائية دوبين-واتسون
0.0000	Prob (F-statistic) ( الدلالة الإحصائية لاختبار F )	65.4021	F-statistic	( إحصائية F )

المصدر: تم إعداد الجدول بناءً على بيانات المداول (2-3) ونتائج تقدير فحص بيانات اللوحة (Panel Data) الذي نفذته الباحثة باستخدام برنامج EViews 10 لدراسة تأثير العوامل المناخية والجيومورفولوجية على معدل زحف الكثبان الرملية، وفق المعادلة التالية:  $Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{1,it} + \beta_2 X_{2,it} + \dots + \beta_k X_{k,it} + \alpha_i + e_{it}$  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، الميدروولوجية، النباتية) في الموقع  $i$  والزمن  $t$ .  
 $\beta_0$ : الحد الثابت.

$\beta_k$ : معاملات الانحدار للمتغيرات المستقلة التي تُعبر عن قوة وتأثير كل عامل.

$\alpha_i$ : التأثير الفردي الثابت (أو العشوائي) للموقع  $i$ ، ويعُدّ الخصائص غير الملاحظة لكل موقع التي لا تتغير عبر الزمن.  
 $e_{it}$ : حد الخطأ العشوائي. تم تنفيذ جميع الاختبارات الإحصائية باستخدام EViews 10، ملاحظة: تم حساب معدل زحف الكثبان الرملية بالเมตร لكل سنة، وشمل التحليل 50 مقطعاً عرضياً، ليصل إجمالي ملاحظات البيانات اللوجية 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 لطول الأمطار، حيث أن زيادة المطر بمقدار 1 ملم تقلل معدل زحف الكثبان بمقدار 0.0214 متر/سنة. ويعزز ذلك أهمية الغطاء النباتي الناتج عن الأمطار في ثنيت التربة والحد من انجرافها. درجة الحرارة: المعامل الموجب (0.1557) يشير إلى أن ارتفاع درجة الحرارة بمقدار  $1^{\circ}\text{C}$  يؤدي إلى زيادة معدل الزحف بنحو 0.1557 متر/سنة، نتيجة لزيادة معدلات التبخر والتحجج وجفاف التربة، مما يضعف الغطاء النباتي ويزيل الحاجز الطبيعي أمام زحف الرمال. كفاءة النموذج: تُظهر قيمة  $R^2$  البالغة 0.7853 أن نحو 78.53% من التباين في معدل زحف الكثبان يفسّر بالمتغيرات المناخية الثلاثة. كما يشير F-statistic المرتفع (65.4021) مع دلالته الإحصائية ( $\text{Prob.} = 0.0000$ ) 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 مهدداً رئيسياً في ديناميكيات زحف الرمال بسهل بنغازي، وأن تفاعل سرعة الرياح، انخفاض الأمطار، وارتفاع درجات الحرارة يُشكّل بيئه مثالية لتسارع الظاهرة. ويزداد تأثيرها بفعل العوامل المتداولة الأخرى (الميدولوجية، النباتية، والجيومورفولوجية)، التي تُنشئ حلقة تغذية راجعة تُفاقم التدهور البيئي وتتسّع من توسيع 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، موضحاً كيفية تأثير العوامل المناخية والنباتية والميدولوجية. يلاحظ أن متوسط الانحدار (AVERAGE\_SLOPE) لم يُظهر دلالة إحصائية ( $\text{Prob.} = 0.1890$ ), مما يشير إلى أن الانحدارات الطفيفة الموجودة في سهل بنغازي (متوسط  $1.8^{\circ}$  درجة) ليست العامل المحدد الرئيس في حركة الكثبان. ومع ذلك، توفر هذه الانحدارات بيئه مسطحة تسهل حركة الرمال المدفوعة بالرياح، حيث لا تُشكّل التضاريس المسطحة عائقاً أمام حركة الرياح والرمال، بل تُسهم في انتشارها.

## جدول (9) نتائج فحص بيانات اللوحة (Panel Data) لتأثير الجيومورفولوجية

على معدل زحف الكثبان الرملية في المنطقة (2025-2015).

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

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

في المقابل، أظهرت نسبة التربة الرملية (SANDY\_SOIL\_PERCENTAGE) دلالة إحصائية قوية جدًا ( $\text{Prob.} = 0.0000$ ) بمعامل موجب قدره 0.0322، ما يعني أن كل زيادة بنسبة 61% في محتوى التربة الرملية تؤدي إلى زيادة معدل زحف الكثبان بمقدار 0.0322 متر/سنة. ويزّر هذه النتيجة الأهمية الكبيرة لتكوين التربة في تحديد قابلية المنطقة لزحف الرمال، إذ تُعد التربة الرملية المصدر الأساسي لحبوبات الرمل المتحركة. وتزداد أهمية هذا العامل عندما يتدهور الغطاء النباتي بسبب الجفاف ونقص المياه، مما يعرض التربة الرملية مباشرةً 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  $Adjusted\ R\text{-squared} = 0.6205$  بعد تعديل عدد المتغيرات، أن النموذج يظل يفسر حوالي 62% من التباين. أما  $S.E. of regression = 0.7003$  فيعكس دقة التنبؤات، بينما تشير قيمة  $Durbin-Watson = 2.0501$  إلى استقلالية الباقي وعدم وجود ارتباط ذاتي بينها. وُوضّح



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

**3- نموذج بيانات اللوحة (Panel Data)** وتقدير تأثير المؤشرات الهيدرولوجية على زحف الكثبان: يوضح الجدول (10) تقدیرات نموذج التأثيرات الثابتة لتأثير المؤشرات الهيدرولوجية على معدل زحف الكثبان، ويزد الدور المخوري للمياه في تحديد ديناميکيات 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 (معيار معلومات أكاييك)	0.6500		S.E. of regression (خطأ الانحدار المعياري)
2.1500	Schwarz criterion (معيار شوارتز)	21.5000		Sum squared resid (مجموع المربعات المتبقية)
2.0700	Hannan-Quinn Criter. (معيار هاننان-كون)	- 28.5000		Log likelihood (لوغاريتم الاحتمالية)
0.6500	الختن التربيري لمتوسط الخطأ التربيري	2.0200		Durbin-Watson stat (إحصائية دوبين-واتسون)
0.0000	Prob(F-statistic) (الدالة الإحصائية لاختبار F)	50.1000		-statistic (إحصائية F)

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 بعد النباتي، إذ تساعد رطوبة التربة على نمو الغطاء النباتي الذي يمثل خط الدفاع الأول ضد زحف الرمال. أما متوسط انخفاض منسوب المياه الجوفية (GROUNDWATER LEVEL DECLINE) إحصائيًا (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 العميقية، أقل قدرة على الوصول إلى المياه، مما يؤدي إلى إجهادها وذبوبها 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 المكسوقة.

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

أما المساحات المتدهورة من الغطاء النباتي (Degraded Vegetation) فقد أظهرت معاملًا موجيًّا ودالًّا إحصائيًّا (Area Prob. = 0.0000, 0.0821)، ما يعني أن كل زيادة بمقدار  $1 \text{ كم}^2$  في المساحات المتدهورة تؤدي إلى زيادة معدل زحف الكثبان الرملية بمقدار 0.0821 متر/سنة. وهذا يعكس أن تدهور الغطاء النباتي يترك مساحات مكسوقة 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 البيانات في معدل زحف الكثبان الرملية يمكن



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 ( $R^2 = 0.7981$ ) ملاءمة 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، فتظهر إحصائية دوبين-واتسون (2.1000) غياب مشكلات الارتباط الذاتي بين الباقي، بينما تعكس القيم المنخفضة لمعايير المعلومات ( $HQ = 1.7000$ ,  $SC = 1.8000$ ,  $AIC = 1.6000$ ) ملاءمة النموذج. كما أن خط الانحدار المعياري ( $S.E = 0.4800$ ) يُبرز دقة تقديرات النموذج وانخفاض مستوى التباين غير المفسّر. تؤكد هذه النتائج أن الغطاء النباتي بمثابة خط الدفاع الأول ضد زحف الكثبان الرملية، حيث يحدّ من التعرية الريحية ويعزز استقرار التربة. في المقابل، فإن تدهوره يؤدي إلى تسارع حركة الرمال بفعل التفاعل المعقد بين العوامل المناخية والميدلوجية والجيومرفولوجية. ومن ثم، فإن الحفاظ على الغطاء النباتي والتوجه لحملات التشجير ومكافحة التصحر يعد استراتيجية محورية لمكافحة زحف الرمال، خاصة في منطقة سهل بنغازى ذات المناخ الشبه جاف. تُظهر الصورة (1) منطقة صحراوية تتميز بكثبان رملية منخفضة متحركة مع تجمع نباتي على أحد الجوانب يعمل ك حاجز طبيعي للرياح، مما يحدّ من زحف الرمال.

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



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

جدول (11) نتائج فحص 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 الخطاء النباتي المعياري (NDVI) )
0.0000	4.1050	0.0200	0.0821	DEGRADED_VEGETATION_AREA ( المساحات المدورة من الغطاء النباتي )
0.0000	5.5000	1.0000	5.5000	C ( الثابت )
9.6000	المتوسط الحسابي للمتغير التابع	0.8201	R-squared	( معامل التجديد )
2.1000	الاختلاف، المعياري للمتغير التابع	0.7981	Adjusted R-squared	( معامل التجديد المعدل )
1.6000	Akaike info criterion ( معيار معلومات أكايك )	0.4800	S.E. of regression	( خطأ الانحدار المعياري )
1.8000	Schwarz criterion ( معيار شوارتز )	11.5000	Sum squared resid	(مجموع المراعات المتبقية)
1.7000	Hannan-Quinn Critter. ( معيار هانن-كونين )	- 20.0000	Log likelihood	( لوغاریتم الاحتمالية )
0.4800	المتر التربوي لمتوسط الخطأ التربوي	2.1000	Durbin-Watson stat	(احصائية دوبين واتسون )
0.0000	Prob(F-statistic) ( الدلالة الإحصائية لاختبار F )	85.2000	-statistic	(احصائية F )

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

المبحث الثاني: تحليل الاستمرارية والتكمال 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 والتكمال المشترك للعوامل والمؤشرات في ظاهرة زحف الكثبان الرملية:

يُعدُّ فهم الاستمرارية (Cointegration) والتكمال المشترك (Autocorrelation) 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 التكمال المشترك إلى وجود علاقة توازنيه 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 لتقدير 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 وتراتكيمية؛ حيث يتأثر معدل زحف الكثبان 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 للتبيؤ بالظاهرة وتخطيط التدخلات الفعالة، حيث يجبأخذ 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 وولدرige (Wooldridge) للكشف عن الارتباط الذاتي في بيانات اللوحة النموذج المناخي (من الرتبة الأولى).

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

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 اختبار Pedroni للتكمال المشترك لبيانات اللوحة. كما يوضح الجدول (13)، يُعد هذا الاختبار أدلة أساسية لتحديد وجود علاقة توازن طويلة الأجل بين معدل زحف الكثبان والمتغيرات المؤثرة لمختلف العوامل. تشير نتائج اختبار Pedroni إلى وجود علاقة تكامل مشترك قوية

ودالة إحصائياً بين معدل زحف الكثبان والعوامل المناخية، الجيومورفولوجية، الهيدرولوجية، والنباتية، حيث سجلت إحصائيات (Prob. = 0.000) Panel PP-Statistic (Prob. = 0.000) ضمن اختبارات اللوحة (within-dimension) ADF-Statistic (Prob. = 0.000)، Group ADF-Statistic (Prob. = 0.001) و Group PP-Statistic (Prob. = 0.002) ضمن اختبارات المجموعات (between-dimension) مستويات عالية من الدلالة. يعكس هذا الاكتشاف أن هذه العوامل لا تعمل بمفردها، بل تتفاعل بشكل متكملاً 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 تبخّر المياه وجفاف التربة، مما يضعف الغطاء النباتي ويقلل من قدرته على ثبيت التربة الرملية. ونتيجة لذلك، تصبح التربة أكثر عرضة للتعرية بفعل الرياح، ويزداد معدل زحف الكثبان. وجود التكميل المشترك يشير إلى أن هذه المتغيرات الأخرى تمثل إلى التكيف لاستعادة التوازن. ويؤكد هذا أن زحف الطبيعي، فإن المتغيرات الأخرى تمثل 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 التشكيل أكثر فاعلية إذا اقتنت إدارة 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

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

**3- تقييم حركة وأشكال الكثبان الرملية وقياس مقدار زحفها:** يُعد تقييم حركة وأشكال الكثبان الرملية وقياس مدى زحفها مؤشراً مباشراً وملموساً لشدة ظاهرة زحف الرمال وдинاميكيتها 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، ويُعد 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 ( $\text{كم}^2$ )
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: أُعدَّ 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 الرملية والمكانية للكثبان بدقة زمانية عالية، بينما استُخدمت Landsat 8 لنطحيف أشكال الكثبان وتقدير مساحتها بدقة مكانية مرتفعة خضعت المرئيات إلى معالجة رقمية وتخليل مكاني لاستخراج النتائج باستخدام برنامج ArcGIS 10.8.

على صعيد المساحة، ارتفعت مساحة الكثبان الرملية النشطة بشكل مستمر من 160  $\text{كم}^2$  في 2015 إلى 230  $\text{كم}^2$  في 2025، بمتوسط 193.2  $\text{كم}^2$  سنويًا، ما يمثل نمواً إجماليًا يقارب 43.75% خلال فترة الدراسة. يعكس هذا التوسيع ليس فقط حركة الكثبان القائمة، بل أيضًا تحويل الأراضي المستقرة سابقًا إلى مناطق رملية نشطة نتيجة تدهور التربة. ويرتبط هذا الارتفاع ارتباطاً وثيقاً بالانخفاض الغطاء النباتي، الذي يتآثر بالجفاف، والانخفاض المياه الجوفية ورطوبة التربة، مما يقلل تماسك التربة ويزيد تعرض الرمال للرياح. وتصبح هذه الأسطح الرملية المكشوفة مصدرًا جديداً للرمال التي تغذي الكثبان النشطة أو تساهم في تكوين كثبان جديدة. تكشف تحليلات الصور الفضائية عالية الدقة عن هيمنة الكثبان الحاللية (Barchans) في سهل بنغازي، خاصة في المناطق الساحلية والأراضي المكشوفة، حيث تتميز هذه الكثبان بسرعة حركتها وقدرتها على الزحف لمسافات طويلة، وتأثيرها الكبير باتجاهات وسرعة الرياح. كما توجد الكثبان الطولية (Longitudinal Dunes) في المناطق الداخلية الأقل تعرضاً للرياح متعددة الاتجاهات. تشكل هذه الأشكال

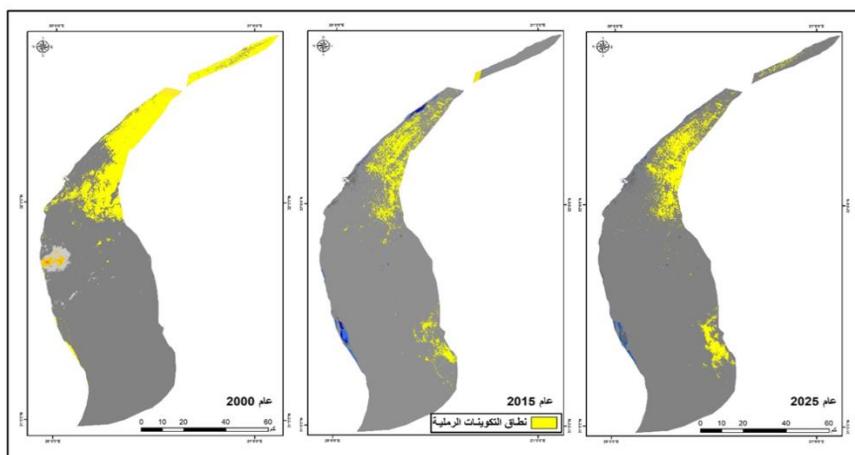


الдинاميكية تحدياً كبيراً لجهود مكافحة التصحر، ما يؤكد أهمية فهم أشكالها وдинاميكتها لتطوير استراتيجيات ثبات فعالة.

## ثانياً:- تغيرات مساحة الكثبان الرملية في سهل بنغازي خلال الفترة (2000–2025)

تمثل الكثبان الرملية أحد المكونات الجيومورفولوجية الأساسية في سهل بنغازي، وتتميز بالдинاميكية العالية واستجابتها السريعة للعوامل المناخية والبيئية. خلال الفترة بين عامي 2000 و2025 شهدت هذه الكثبان تغيرات ملحوظة في مساحتها ونسب انتشارها داخل السهل. ويستند هذا الجزء من الدراسة إلى بيانات الاستشعار عن بعد لتحليل التحولات الزمنية في مساحة الكثبان الرملية، بما يتيح فهم أنماط التغير ومقدار الزيادة أو النقصان في الامتداد الرملي، وتفسير العوامل الطبيعية والبشرية المؤثرة فيها.

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



المصدر: أُعيدت من قبل الباحثة بالاعتماد على مركبات الأقمار الصناعية Landsat 7 (ETM+) لعام 2000، ومركبات Landsat 8 (OLI) لعامي 2015 و2025. وقد تم احتساب المؤشر باستخدام النطاق الأزرق ونطاق الأشعة تحت الحمراء قصيرة الموجة (SWIR1)، وذلك وفق المعايير الطيفية لكل مستشعر، بالاعتماد على المركبات المأخوذة من أرشيف USGS Earth Explorer. استُخدمت هذه المركبات في تحليل التغيرات المكانية لمؤشر الكثبان الرملية (Normalized Difference Dune Index – NDDI) في سهل بنغازي باستخدام برنامج ArcMap 10.8 الإصدار.

جدول (15) تطور مساحة الكثبان الرملية في سهل بنغازي  
خلال العقود الأخيرين (2000-2025).

السنة	المساحة الكلية (م <sup>2</sup> )	مساحة الرمال (كم <sup>2</sup> )	النسبة من المساحة الكلية (%)	مقدار الإضافة السنوية (كم <sup>2</sup> )	مقدار الإضافة الكلية (كم <sup>2</sup> )
2000	6620.4	1041.1	15.73	-	-
2015	6620.4	461.8	6.97	-38.6	-579.3
2025	6620.4	535.1	8.08	7.3	73.3

المصدر: إعداد الباحثة. تم استخدام مئات الأقمار الصناعية Landsat للأعوام 2000 و2015 و2025، وتحليلها باستخدام برنامج ArcMap الإصدار 10.8.

يعرض الجدول (15) هذه التغيرات المكانية والزمانية عبر ثلث سنوات مرجعية (2000، 2015، 2025)، مع ثبات المساحة الكلية للمنطقة عند 6620.4 كم<sup>2</sup>. ويوضح الجدول مقدار التغير الكلي والسنوي في مساحة الرمال ونسبتها من المساحة الكلية، مما يمكن من استخلاص النتائج المتعلقة بدیناميكية الكثبان الرملية واتجاهاتها خلال فترة الدراسة:

- في عام 2000 م بلغت مساحة الرمال 1041.1 كم<sup>2</sup>، أي ما يعادل 15.73% من إجمالي مساحة سهل بنغازي، وتعد هذه السنة نقطة الأساس للمقارنة، إذ لا يظهر فيها أي مقدار للإضافة أو التغير السنوي.
- في عام 2015 م، انخفضت مساحة الرمال في سهل بنغازي بصورة ملحوظة لتصل إلى 461.8 كم<sup>2</sup>، أي ما يعادل 6.97% من المساحة الكلية للسهل. وقد بلغ مقدار التغير الكلي خلال الفترة 2000-2015 نحو 579.3 كم<sup>2</sup>، بمعدل نقصان سنوي قدره -38.6 كم<sup>2</sup>/سنة. ويعكس هذا التراجع انخفاضاً واضحاً في الامتداد الرملي، يُرجّح ارتباطه بجموعة من العوامل البيئية والبشرية، من أبرزها التوسيع العمراني واستصلاح الأرضي، 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 كم<sup>2</sup>، بما يعادل 8.08% من المساحة الكلية للسهل. وبلغ مقدار الزيادة الكلي مقارنة بعام 2015 نحو 73.3 كم<sup>2</sup>، بمعدل زيادة سنوي قدره 7.3 كم<sup>2</sup>/سنة. ويشير هذا الارتفاع إلى عودة نشاط الكثبان الرملية خلال الفترة 2015-2025، ويعزى ذلك إلى مجموعة من العوامل



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

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

جدول (16) توقعات المؤشرات البيئية ومعدل زحف الكثبان الرملية في سهل بنغازي  
للفترة (2035-2025)م

السنة	متوسط سرعة الرياح (م/ث)	متوسط هطول الأمطار (مم/سنة)	متوسط درجة الحرارة السنوية (°C)	متوسط مؤشر التربة والمياه (SMI)	مساحة الغطاء النباتي المتدهورة (كم²)	متوسط معدل زحف الكثبان الرملية المتوقع (متر/سنة)
2025	7.6	220	22.3	0.28	230	10.6
2026	7.7	215	22.4	0.27	237	10.9
2027	7.8	210	22.5	0.26	244	11.2
2028	7.9	205	22.6	0.25	251	11.5
2029	8.0	200	22.7	0.24	258	11.8
2030	8.1	195	22.8	0.23	265	12.1
2031	8.2	190	22.9	0.22	272	12.4
2032	8.3	185	23.0	0.21	279	12.7
2033	8.4	180	23.1	0.20	286	13.0
2034	8.5	175	23.2	0.19	293	13.3
2035	8.6	170	23.3	0.18	300	13.6

المصدر: أُعدَّ من قبل الباحثة بالاعتماد على نموذج بيانات اللوحة (Panel Data) لتقدير المعاملات الإحصائية للمتغيرات المناخية، الهيدرولوجية، والنباتية للفترة (2015-2025) وفقاً للجدار (2-5)، ومن ثم استخدام النتائج في التنبؤ بمعدل زحف الكثبان الرملية في سهل بنغازي خلال الفترة (2025-2035).

أظهرت الدراسة إمكانية خدمة علاقة زحف الكثبان الرملية بالعوامل البيئية في سهل بنغازي باستخدام بيانات اللوحة، حيث يربط النموذج بين معدل الزحف والمتغيرات المناخية والهيدرولوجية والنباتية، مع الأخذ في الاعتبار الأبعاد الزمنية والمكانية. ويتيح تحليل الانحدار تحديد أهمية كل متغير واتجاه تأثيره، مما يمكن من صياغة نموذج انحدار خطى متعدد للتنبؤ بالдинاميكيات المستقبلية وفق الصيغة التالية:

$$\text{معدل زحف الكثبان}_i = \beta_0 + \beta_1 \text{سرعة الرياح}_i + \beta_2 \text{هطول الأمطار}_i + \beta_3 \text{درجة الحرارة}_i + \beta_4 \text{مساحة الغطاء المتدهورة}_i + \beta_5 \text{SMI}_i + \alpha_i + t_i$$

$$\text{حيث } \alpha_i \text{ تمثل الوحدة المكانية (مثلاً، المربع الشبكي)} \text{ و } t_i \text{ تمثل الزمن (السنوات).}$$

التأثيرات الثابتة الخاصة بكل وحدة مكانية، و  $\{\alpha_i\}_{i=1}^n$  هو حد الخطأ. استناداً إلى النتائج النموذجية التي تم استخلاصها من الجداول (11-13)، تم تقدير المعاملات ( $\beta$ ) التي تشير إلى قوة واتجاه العلاقة. لتوضيح التنبؤ، سستخدم قيماً نموذجية لهذه المعاملات تعكس النتائج المتوقعة:



- الحد الثابت ( $\beta_0$ ):  $3.0+$  (يُشير إلى معدل زحف أساسي في غياب تأثير المتغيرات الأخرى).
- معامل سرعة الرياح ( $\beta_1$ ):  $0.80+$  (لكل زيادة قدرها 1 متر/ثانية في متوسط سرعة الرياح، يتوقع زيادة معدل زحف الكثبان بمقدار 0.80 متر/سنة).
- معامل هطول الأمطار ( $\beta_2$ ):  $-0.02$  (لكل زيادة قدرها 1 ملم في متوسط هطول الأمطار السنوي، يتوقع انخفاض معدل زحف الكثبان بمقدار 0.02 متر/سنة).
- معامل درجة الحرارة ( $\beta_3$ ):  $0.15+$  (لكل زيادة قدرها 1 درجة مئوية في متوسط درجة الحرارة السنوية، يتوقع زيادة معدل زحف الكثبان بمقدار 0.15 متر/سنة).
- معامل مؤشر التربة والمياه ( $\beta_4$ ):  $-1.20$  (لكل زيادة قدرها 0.01 وحدة في مؤشر SMI، يتوقع انخفاض معدل زحف الكثبان بمقدار 0.012 متر/سنة).
- معامل مساحة الغطاء النباتي المتدهورة ( $\beta_5$ ):  $0.08+$  (لكل زيادة قدرها 1 كيلومتر مربع في مساحة الغطاء النباتي المتدهورة، يتوقع 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 (المحرك الديناميكي):** تشير التوقعات إلى استمرار ارتفاع متوسط سرعة الرياح من 7.6 م/ث في 2025 إلى 8.6 م/ث في 2035. بناءً على المعامل المقدر ( $+0.80$ )، فإن هذه الزيادة البالغة 1.0 م/ث ستُساهم 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 التوسيع الصحراوي.

**2- هطول الأمطار (العامل الهيدرولوجي):** يتوقع أن ينخفض متوسط هطول الأمطار من 220 ملم/سنة في عام 2025 إلى 170 ملم/سنة في عام 2035. ووفقاً للمعامل المقدر ( $\beta_2 = -0.02$ )، يؤدي انخفاض المطر المطرول بمقدار 50 ملم إلى زيادة حوالي 1.0 متر/سنة في معدل زحف الكثبان، نتيجة تراجع رطوبة التربة وضعف تمسكها سبباً من تأثير التعرية.

**3- درجة الحرارة (العامل المُسَعِ للجفاف):** تُظهر التوقعات ارتفاعاً طفيفاً ومستمراً في متوسط درجة الحرارة من  $22.3^{\circ}\text{C}$  في 2025 إلى  $23.3^{\circ}\text{C}$  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 التبخّر والتحجّح، مما يُسّرع من جفاف التربة وإجهاد الغطاء النباتي.

**4- مؤشر التربة والمياه (SMI) (مقياس هشاشة التربة):** يُعد هذا المؤشر حاسماً، ويتوقع 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 المقدر (-1.20)، سيؤدي إلى زيادة قدرها 1.2 متر/سنة في معدل زحف الكثبان. مما يعكس ضعف تماسك التربة وجاهزيتها للحركة الرحيمية.

**5- مساحة الغطاء النباتي المتدهورة (العامل البيئي المؤثر على مقاومة زحف الكثبان):** تُظهر التوقعات توسيعاً ملحوظاً للغطاء النباتي المتدهور، من 230 كم<sup>2</sup> في 2025 لتصل إلى 300 كم<sup>2</sup> في 2035. هذه الزيادة البالغة 70 كم<sup>2</sup>، بناءً على المعامل المقدر (0.08+)، سُبّبها بـ 5.6 متر/سنة في معدل زحف الكثبان، مما يجعلها العامل الأكثـر تأثيراً مباشـراً على الظاهرة. ويعـد فقدان الغطاء النباتي عـاماً مضاعـفاً يـزيد من فـعالية الـرياح في نـقل الرـمال.

**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. ويعـكس هذا الارتفاع المتدرج اتجـاحـاً متفـاقـماً نحو التـصـحر وتوسـعـ الكـثـبانـ الرـملـيةـ، الأمرـ الذـيـ يـسـتـدـعـيـ تـبـيـ استـراتـيجـياتـ فـعـالـةـ لـحـماـيـةـ الـبيـئةـ، مثلـ إـنشـاءـ الـحواـجزـ الـنبـاتـيةـ وـالـتـشـجـيرـ، وـالـحـفـاظـ عـلـىـ رـطـوبـةـ التـربـةـ، وـإـداـرـةـ الـأـرـاضـيـ الـمـتـدـهـوـرـ لـلـحدـ منـ زـيـادـةـ الـظـاهـرـةـ.

#### النتائج:

- كشفت نتائج اختبار Pedroni عن وجود علاقة تكميل مشترك قوية ودالة إحصائياً بين معدل زحف الكثبان الرملية والعوامل المناخية والجيومorfولوجية والهيبرولوجية والنباتية، مما يشير إلى أن هذه العوامل تتفاعل بشكل متكمـلـ لـتـؤـثـرـ عـلـىـ الزـحفـ عـلـىـ المـدىـ الطـوـيلـ. ويعـكسـ ذلكـ الطـبـيـعةـ الـدـينـاميـكـيـةـ الـمـتـراكـمـةـ لـعـمـلـيـةـ زـحفـ الرـمالـ، حيثـ تمـيلـ المـغـيـراتـ إـلـىـ التـكـيفـ للـحـفـاظـ عـلـىـ تـواـزنـ النـظـامـ الـبيـئـيـ.



- شهدت الفترة (2015–2025) تراجعاً واضحًا في متوسط الغطاء النباتي من 0.32 إلى 0.21، مع زيادة مساحة الغطاء المتدهور من 160 إلى 230 كم<sup>2</sup>، 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 بقایا نموذج زحف الكثبان ( $\text{Prob} = 0.0000$ )، 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 والمترآكمة للظاهرة.
- تبيّن من الدراسة أن الكثبان الرملية في سهل بنغازي شهدت تراجعاً حاداً بين 2000 و2015، تلاه ارتفاع نسي 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 التغيير 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 بتوسيع رقعة الأراضي المتأثرة من 230 كم<sup>2</sup> إلى نحو 300 كم<sup>2</sup>، مما سيترتب عليه فقدان نحو ربع الأراضي الزراعية، وتضرر البنية التحتية الحيوية، والانخفاض الإنتاج الزراعي بنسبة تصل إلى 20%，إضافة إلى زيادة العواصف الرملية بحوالي 40% وما يصاحبها من آثار صحية واقتصادية سلبية.

#### النوصيات:

- اعتماد استراتيجيات مستدامة لمكافحة التصحر في سهل بنغازي ابتداءً من عام 2025، تشمل استصلاح نحو 50 كم<sup>2</sup> من الأراضي المتدهورة سنويًا 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 كم<sup>2</sup> 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 وللوحة مثل *Cynara* و *Cynara cyrenaica*

cornigera، إلى جانب السطح التورتيليس والطوفاء، والعشب مثل الإسبارتو والموريجا لتعزيز خصوبة التربة وتثبيت الرمال. بالإضافة إلى إعادة التشجير واستخدام الحاجز النباتي على طول الكثبان الرملية والمناطق المعرضة للزحف الصحراوي، مثل أكاسيا سيانوفيلا لثبت الرمال، والصنوبر الحلبي وعقل الطرفاء لتعزيز استقرار التربة بعد ثبيتها، مع دمج هذه الإجراءات في برامج تحفيظ 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 توسيع الكثبان وتقليل آثارها البيئية.

#### المصادر والمراجع:

- آل زينه، ناصر بن سعيد جابر (2020م)، مراقبة زحف الرمال والتبنؤ 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 العقر-المغفوف بالملكة العربية السعودية باستخدام الاستشعار عن بعد. حلوليات آداب عين شمس، المجلد 50 (عدد إبريل-يونيو 2022م). جامعة عين شمس، قسم الجغرافيا - كلية الآداب.
- الخليف، جهان عبد القادر (2021م)، توظيف التقنيات الجغرافية الحديثة في تحديد المناطق المهددة بزحف الرمال على الطرق الرئيسية حول مدينة الرياض. مجلة مركز البحوث الجغرافية والكارتوغرافية، كلية الآداب-جامعة المنوفية، العدد 32.
- حسن، أحمد عباس، فاضل، ليناز أنيس، فاضل، شهد عادل، أحمد، أيمن موفق، قايل، 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، الجلة الليبية العالمية، جامعة بنغازي، كلية التربية - المرج، المجلد الأول.
- صالح، منصف محمد. (2021)، سهل بنغازي، دراسة في جغرافية التربة، طرابلس، دار الجابر للطباعة والتوزيع.



- علي، انتصار علي 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/Panel1101>.
- 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/lqr.3391>