اتجاهات التغير المناخي في درجات الحرارة العظمى الصيفية بوسط ليبيا
تحليل ديناميكي مناخي لجبل الهاروج للفترة 1981ـ2024

د. محمود مُحَمَّد محمود سليمان
أستاذ المناخ المشارك في قسم الجغرافيا، كلية الآداب، جامعة طبرق– ليبيا
mahmood.soliman@tu.edu.ly

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل اتجاهات التغير في متوسطات درجات الحرارة العظمى الصيفية بمنطقة جبل الهاروج في وسط ليبيا في الفترة (1981–2024)، اعتمادًا على بيانات 11 نقطة رصد ممثّلة لمنصة NASA Power. ولأغراض المقارنة قُسِّمت السلسلة الزمنية إلى فترتين: (1981–2002) و(2003–2024). اعتمدت الدراسة على توظيف اختبار (T-test) لقياس دلالة الفروق الإحصائية بين الفترتين، إلى جانب تحليل العتبات الحرارية باستخدام المئينات (Percentiles)، مع تمثيل مكاني للبيانات عبر أسلوب (Kriging) ضمن أدوات الاستيفاء المكاني في بيئة (ArcMap GIS). أظهرت النتائج وجود فروق ذات دلالة إحصائية عند مستوى (P=0.031) بين الفترتين. كما بيّن تحليل المئين التسعين (43.68°م) اتساع نطاق القيم المرتفعة مقارنة بالفترة المرجعية مكانيًا، تشير نتائج الاستيفاء إلى تراجع نسبي في القيم الحرارية فوق المناطق المرتفعة، مقابل امتداد القيم الأعلى نحو المناطق المنخفضة. وتخلُص الدراسة إلى وجود اتجاه عام نحو ارتفاع درجات الحرارة العظمى الصيفية في المنطقة، مع ما يترتب على ذلك من آثار محتملة على النظم البيئية والموارد المائية، الأمر الذي يستدعي أخذ هذه التغيرات في الاعتبار عند إعداد استراتيجيات التكيف.

الكلمات المفتاحية: اتجاهات التغير المناخي، الاحترار الصيفي، NASA Power، التحليل المكاني، جبل الهاروج، ليبيا.

تاريخ الاستلام:
2026/03/27
تاريخ القبول:
2026/04/12
تاريخ النشر:
2026/07/01

OPEN ACCESS

حقوق النشر: © 2026 للمؤلف (للمؤلفين). الناشر مجلة ليبيا للدراسات الجغرافية. هذه المقالة منشورة بنظام الوصول المفتوح، ويتم توزيعها وفق شروط وأحكام ترخيص المشاع الإبداعي الدولي:

CC BY-NC-SA 04

Vol. 6, Issue.2, July 2026, pp105-120
ISSN : 2789-4843 (Online) 3080-0463 (print)
المجلد 6 العدد 2 ، يوليو 2026م

Journal of Libya for Geographical Studies
مجلة ليبيا للدراسات الجغرافية

Detecting Climate Change Trends in Summer Maximum Temperatures in Central Libya: A Dynamic Climatic Analysis of Al-Haruj Mountains Based on NASA Power Platform Outputs.

Mahmoud M. M. Soliman
Associate Professor of Climatology, Department of Geography
Faculty of Arts, University of Tobruk - Libya.
mahmood.soliman@tu.edu.ly

Abstract:

This study aims to analyze trends in changes in the averages of summer maximum temperatures in the Al-Haruj Mountains region in central Libya during the period (1981–2024), based on data from 11 observation points represented by the NASA POWER platform. For comparison purposes, the time series was divided into two periods: (1981–2002) and (2003–2024). The study employed the T-test to measure the statistical significance of differences between the two periods, in addition to thermal threshold analysis using percentiles, with spatial representation of the data through the Kriging method within spatial interpolation tools in the ArcMap GIS environment. The results showed statistically significant differences at the level of (P = 0.031) between the two periods. The analysis of the 90th percentile (43.68°C) also indicated an expansion in the range of higher values compared to the reference period. Spatially, the interpolation results suggest a relative decrease in temperature values over elevated areas, in contrast to an expansion of higher values toward lower areas. The study concludes that there is a general trend toward an increase in summer maximum temperatures in the region, with potential implications for ecosystems and water resources, which necessitates taking these changes into account when developing adaptation strategies.

Keywords: Climate Change Trends, Summer Warming, NASA Power, Spatial Analysis, Al-Haruj Mountains, Libya.

Received: 27/03/2026

Accepted: 12/04/2026

Published: 01/07/2026

OPEN ACCESS

Copyright © 2026 by the author(s). Published by the Journal of Libya for Geographical Studies. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution International License:

CC BY-NC-SA 04

المقدمة:

شهد مناخ العالم في العقود الأخيرة تغيرات متسارعة وغير مسبوقة، تمثّلت بشكل خاص في ارتفاع درجات الحرارة العالمية وزيادة تكرار الظواهر المناخية المتطرفة، وعلى رأسها موجات الحر. وتشير تقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC). إلى أنّ الاحترار العالمي الناتج عن الأنشطة البشرية أدى إلى تغير واضح في درجات الحرارة، حيث أصبحت الأحداث الحرارية المتطرفة أكثر شيوعًا وشدة واستمرارية مقارنة بالماضي (IPCC, 2021). وتُعدّ البيئات الصحراوية من أكثر النظم البيئية حساسية للتغيرات المناخية؛ نظرًا لهشاشتها الطبيعية وارتباطها الشديد بتوازنات دقيقة بين عناصر المناخ، خاصة درجة الحرارة والتبخر. كما أنّ المناطق الجبلية تضيف بُعدًا طبوغرافيًا معقدًا، يؤثر بشكل مباشر على التوزيع المكاني والزماني لدرجات الحرارة، مما يجعل الجبال مختبرًا طبيعيًا لدراسة التغيرات المناخية، حيث تساهم آليات متعددة في تعزيز الاحترار في البيئات الجبلية، أبرزها التغيرات في بخار الماء، وتدفقات الإشعاع (Pepin et al., 2015).

ويُمثّل تحليل السلاسل الزمنية لدرجات الحرارة العظمى أحد أكثر الأدوات استخدامًا في رصد اتجاهات التغير المناخي؛ نظرًا لكون تكرار الموجات الحارة من أكثر المؤشرات استجابة بين مؤشرات التطرف الحراري. ويتماشى هذا مع النمط العالمي المرصود منذ منتصف القرن العشرين، والذي يُظهر ارتفاعات تراكمية في درجات الحرارة تشمل معظم مناطق العالم (Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020). ومع ذلك تواجه الدراسات المناخية في البيئات الجبلية الصحراوية بشمال أفريقيا وليبيا بوجه خاص فجوة معرفية عميقة جراء ندرة محطات الرصد الأرضي في مساحات واسعة.

ولازال مدى تأثر درجات الحرارة الصيفية المتطرفة في البيئات الصحراوية الجبلية – تحديدًا في منطقة جبل الهاروج بوسط ليبيا– غير واضح بشكل كافٍ؛ نتيجة التداخل المعقد بين التغيرات المناخية طويلة الأمد والتذبذبات الطبيعية قصيرة الأجل. ويتضاعف هذا التعقيد في المناطق الجبلية بفعل تأثير الارتفاع على التوزيع الحراري؛ حيث تشير دراسة (Pepin et al., 2015) إلى ظاهرة الاحترار المعتمد على الارتفاع، مؤكدة أنّ المناطق المرتفعة تستجيب للاحترار العالمي وتيرة أسرع من المناطق المنخفضة المحيطة بها. بناءً على ذلك تتبلور إشكالية البحث في صعوبة التمييز بين الإشارات الحقيقية للتغير المناخي والتذبذبات الطبيعية، مما

يفتح الباب للتساؤل حول طبيعة التغيرات في درجات الحرارة العظمى الصيفية، ومدى انتظامها الزمني وتباينها المكاني، والقدرة على رصد تغير مناخي واضح في ظل هذه البيئات الصحراوية المعقدة.

بناءً على ما سبق يهدف هذا البحث إلى تحليل الديناميكية الزمنية لدرجات الحرارة العظمى الصيفية، واستكشاف الأنماط المكانية للقيم المتطرفة في منطقة جبل الهاروج عبر توظيف مؤشرات التطرف الحراري وأدوات التحليل المكاني. وتستند هذه الدراسة إلى فرضية مفادها أنّ تحليل الانحرافات المناخية والتحولات في توزيع القيم الحرارية يمثّل أداة أكثر دقة للكشف عن التغيرات الهيكلية في النظام المناخي، مقارنة بالأساليب التقليدية لتحليل اتجاهات للمناخ (Soliman, 2020). وتبرز أهمية هذا البحث في تعميق الفهم العلمي لديناميكيات المناخ في البيئات الجافة والجبلية الفريدة، وتوفير قاعدة معرفية رصينة تدعم التخطيط البيئي في المناطق الصحراوية. كما يسعى البحث إلى فحص التغيرات في الحالة الديناميكية الحرارية (Thermodynamic state) لوسط ليبيا، في ظل التداخل المعقد بين التقلبات الطبيعية وتغير المناخ الناتج عن الأنشطة البشرية (Trenberth et al., 2015).

1. منطقة الدراسة:

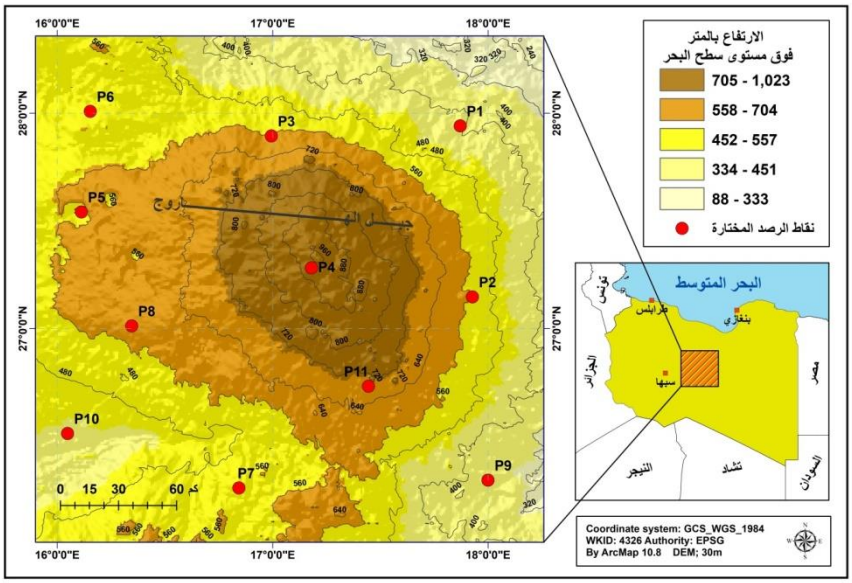
تقع جبال الهاروج في وسط ليبيا، وهي من أبرز التكوينات الجيومورفولوجية في المنطقة، حيث تمثّل كتلة جبلية بركانية واسعة ذات طابع صحراوي، تمتد المنطقة بين دائرتي عرض 26.023°–28.351° شمالًا وخطي طول 15.904°–18.254° شرقًا، وتبلغ مساحتها حوالي 82290 كم^2. ويظهر بالشكل (1) أنّ منطقة الدراسة ترتفع في مركزها إلى أكثر من 1000 متر فوق مستوى سطح البحر، وتنخفض تدريجيًا نحو الأطراف إلى أقل من 300 متر.

وتُعدّ منطقة الهاروج أكبر نطاق بركاني في ليبيا (Elshaafi & Gudmundsson, 2016)، ما يمنحها خصائص جيومورفولوجية داكنة تؤثر في امتصاص الإشعاع الشمسي ورفع درجات الحرارة السطحية. كما يسهم التباين الطبوغرافي الواضح في خلق فروق حرارية محلية، خاصة درجات الحرارة العظمى في فصل الصيف. إضافة إلى ذلك تفتقر المنطقة إلى الغطاء النباتي وبعيدة عن التأثيرات البحرية المباشرة، مما يعزز من قارية المناخ ويزيد من تطرفه

الحراري. وتُبرز هذه الخصائص مجتمعة أهمية المنطقة نموذجًا طبيعيًا لدراسة استجابة البيئات الصحراوية الجبلية للتغيرات المناخية.

وتمّ اختيار مجموعة من نقاط الرصد الشبكية (P1–P11) موزعة توزيعًا طبيعيًا بحيث تغطي مختلف الارتفاعات والاتجاهات. وتخضع منطقة الدراسة لمناخ صحراوي جاف يتميز بارتفاع درجات الحرارة صيفًا، وندرة الأمطار، مما يجعلها بيئة مناسبة لدراسة التطرف الحراري.

الشكل (1): منطقة الدراسة ومواضع نقاط الرصد المُختارة.



المصدر: إعداد الباحث باستخدام برنامج (Arc map GIS 10.8)، بالاعتماد على نموذج الارتفاع الرقمي (DEM 30m).

2. البيانات والمنهجية:

1.2. سلسلة بيانات درجات الحرارة العظمى: تعتمد هذه الدراسة على بيانات درجات الحرارة العظمى المستخرجة من منصة NASA Power، وهي منصة بيانات مناخية مفتوحة المصدر، مشتقة من الأقمار الصناعية ونماذج إعادة تحليل الغلاف الجوي، تتميز هذه البيانات بتغطية مكانية واسعة، مما يبرر اعتمادها الواسع في الدراسات المناخية والهيدرولوجية والتطبيقية، لا سيما في المناطق التي تعاني نقصًا حادًا في محطات الرصد الأرضي أو تعاني سجلاتها من الانقطاع، وهو ما يجعلها أداة ملائمة لتحليل الاتجاهات والظواهر المناخية (Rodrigues and Braga, 2021; Soliman, 2025).

وأكدت دراسات عديدة كفاءة منصة NASA Power في تمثيل المتغيرات المناخية؛ حيث أظهرت توافقًا إحصائيًا جيدًا مع سجلات المحطات الأرضية بمعامل ارتباط تراوح بين 0.57 و0.73 لدرجات الحرارة العظمى، ودقة مقبولة عند تجميع البيانات زمنيًا (Monteiro et al., 2018). كما عززت أبحاث حديثة موثوقية هذه المنصة في رصد الأنماط الحرارية، مع التوصية بتطبيق "تصحيح الانحياز" لرفع مستوى الدقة في التحليلات المحلية (Tan et al, 2023). كما أكدت دراسات أخرى فاعلية هذه البيانات وموثوقيتها في تمثيل الخصائص المناخية للبيئات الجافة وشبه الجافة كما في سلطنة عمان وليبيا (Marzouk, 2021; Soliman, 2025). وتأسيسًا على هذه الموثوقية تمّ إعداد قاعدة بيانات شهرية لدرجات الحرارة العظمى على ارتفاع مترين لـ11 نقطة رصد، تمثّل معدلات فصل الصيف للفترة الممتدة من 1981 إلى 2024. ويستعرض الجدول (1) الخصائص التفصيلية لنقاط الرصد المختارة.

الجدول (1) الخصائص الجغرافية والحرارية لنقاط الرصد المختارة.

نقطة الرصد	دائرة العرض شمالاً	خط الطول شرقاً	الارتفاع بالمتر	المسافة عن البحر/كلم	متوسط فصل الصيف (م°)	الانحراف المعياري
P1	°27.941	°17.870	402	332	43.02	1.11
P2	°27.147	°17.927	509	408	43.07	1.12
P3	°27.894	°16.994	700	363	42.79	0.94
P4	°27.282	°17.180	1016	419	41.86	0.85
P5	°27.541	°16.112	512	415	42.07	0.82
P6	°28.008	°16.153	460	355	42.00	0.86
P7	°26.260	°16.843	512	542	42.46	0.83
P8	°27.012	°16.345	590	472	42.24	0.79
P9	°26.296	°18.000	376	519	43.13	1.13
P10	°26.513	°16.048	340	527	42.48	0.81
P11	°26.732	°17.445	643	466	42.89	0.99

المصدر: إعداد الباحث، بالاعتماد على برنامج (Arc Map GIS 10.8) ونموذج الارتفاع الرقمي (DEM 30 m)، وبيانات درجات الحرارة العظمى بالاعتماد على منصة (NASA Power).
https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer

2.2. المنهجية: تعتمد هذه الدراسة منهجية تحليلية تكاملية تجمع بين الأبعاد الزمنية والإحصائية والمكانية، بهدف الكشف عن ديناميكيات التغير في درجات الحرارة الصيفية

المتطرفة. ونظرًا للاعتماد على بيانات موسمية، جرى بناء سلاسل زمنية صيفية عبر حساب متوسطات درجات الحرارة العظمى لأشهر (يونيو، يوليو، وأغسطس) لكل سنة، مما يتيح تحليل التحولات المناخية على المدى الطويل. وفي إطار التحليل الزمني تمّ حساب الشذوذات الحرارية بالاعتماد على فترة مرجعية؛ لعزل التغيرات طويلة الأمد عن التذبذبات الطبيعية العارضة. كما طُبِّق اختبار (T-test) للكشف عن الفروق الإحصائية بين فترتين زمنيتين: الأولى "مرجعية" (1981–2002) والثانية (2003–2024) عند مستوى دلالة (0.05)، باعتبار ذلك مؤشرًا على حدوث تحول مناخي في الخصائص الحرارية.

أمّا فيما يتعلق بتوصيف التطرف الحراري فتمّ تحليل نسبة السنوات التي تجاوزت العتبة الحرارية؛ وذلك لتقييم شدة وتكرار التطرف الحراري باستخدام المئينات (Percentiles-90) في المتوسطات الصيفية لفترتيّ الرصد، وهو أسلوب إحصائي يستخدم في معالجة البيانات الموسمية. وفي التحليل المكاني وُظف أسلوب الاستيفاء المكاني ضمن بيئة برنامج (ArcMap GIS)، حيث استُخدمت أداة (Kriging) لإنتاج خرائط تمثّل التباين المكاني لدرجات الحرارة الصيفية في فترتيّ الرصد، بما يسمح بتحليل الأنماط المكانية للتطرف الحراري داخل منطقة الدراسة. وبذلك يستند الكشف عن التغير المناخي في هذا البحث إلى تكامل نتائج التحليل الزمني والإحصائي والمكاني بتتبع التغير في الشذوذات الحرارية، ورصد زيادة تكرار القيم المرتفعة، وتحليل التحول في خصائص التوزيع واتساع نطاقه الجغرافي. ويشير هذا التكامل إلى فحص مناخي يتجاوز حدود التذبذب الطبيعي، بما يتوافق مع التوجهات الواردة في تقرير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC, 2021).

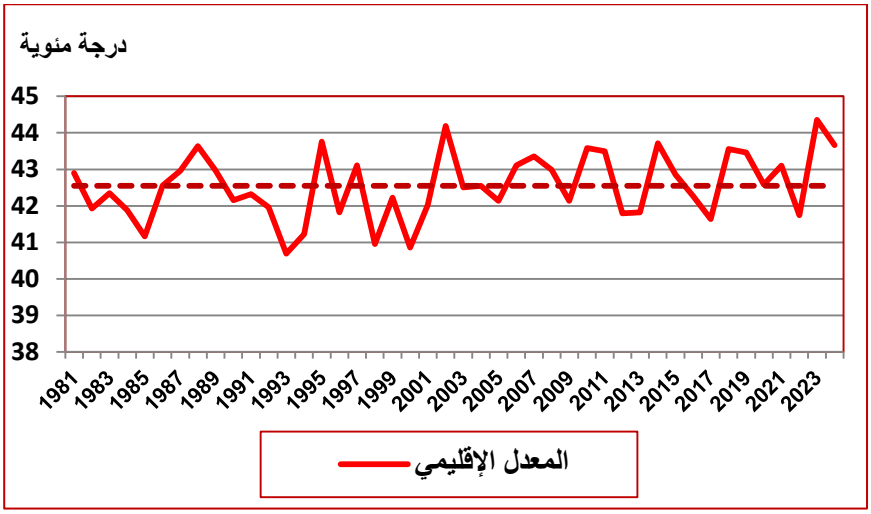
3. مناقشة النتائج:

1.3. المعدل الإقليمي العام لدرجات الحرارة العظمى خلال فترة الرصد: تمّ حساب المتوسطات الصيفية لدرجات الحرارة العظمى لجميع نقاط الرصد (P1-P11)، ثم أُشتق منها معدل إقليمي عام لمنطقة الدراسة لكل سنة من سنوات الرصد، ومن ثَمّ المعدل الإقليمي العام للمنطقة (الملحق 1).

يُظهر الشكل (2) تغير المعدل الإقليمي لدرجات الحرارة العظمى الصيفية في الفترة (1981–2024)، حيث تراوحت القيم بين نحو 38°م حد أدنى وقرابة 45°م حد أقصى، ما يعكس نطاقًا حراريًا يقترب من 7 درجات مئوية. ويلاحظ أنّ معظم القيم في فترة

الثمانينيات والتسعينيات تمحورت حول المتوسط العام (حوالي 41–42°م)، مع تذبذبات سنوية محدودة نسبيًا. في المقابل سجلت الفترة بعد عام 2000 ارتفاعًا نسبيًا، حيث تكررت القيم التي تتجاوز 43°م بشكل أوضح، خاصة في العقدين الأخيرين. كما يُظهر المنحنى وجود قمم حرارية بارزة في بعض السنوات الحديثة، ما يشير إلى زيادة في شدة التطرف الحراري. وبشكل عام يعكس الشكل استقرارًا نسبيًا في بداية السلسلة، يقابله ميل تدريجي نحو القيم الأعلى في نهايتها، وهو ما يدعم وجود تغير في السلوك الحراري للمنطقة.

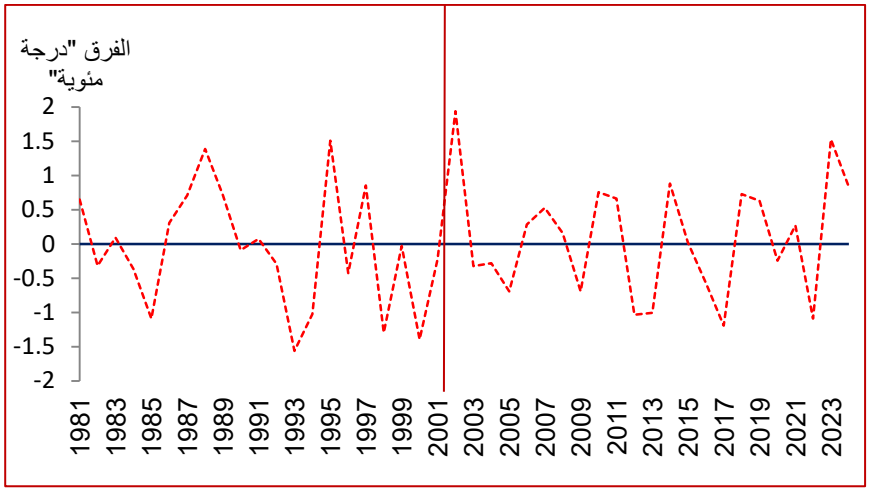
الشكل (2): المعدل العام لدرجات الحرارة العظمى المئوية في نقاط الرصد خلال المدة (1981–2024).



المصدر: إعداد الباحث اعتمادًا على بيانات (NASA Power) في الملحق (1).

2.3. تحليل الفروق الإحصائية: قبل تحليل الفروق الإحصائية، جرى حساب الشذوذات الحرارية بعد تقسيم مدة الرصد إلى فترتين زمنيتين لاستخراج المتوسط المرجعي لكل منهما؛ حيث بلغ المتوسط المرجعي للفترة الأولى (1981–2002) 42.25°م، بينما سجلت الفترة الثانية (2003–2024) متوسطاً قدره 42.83°م. وبناءً على هذه المعطيات، تم عرض قيم الشذوذات الحرارية (الفروقات) في الشكل (3) كما هو موضح أدناه.

الشكل (3): الشذوذات الحرارية خلال فترتي الرصد (1981–2002) و(2003–2024).

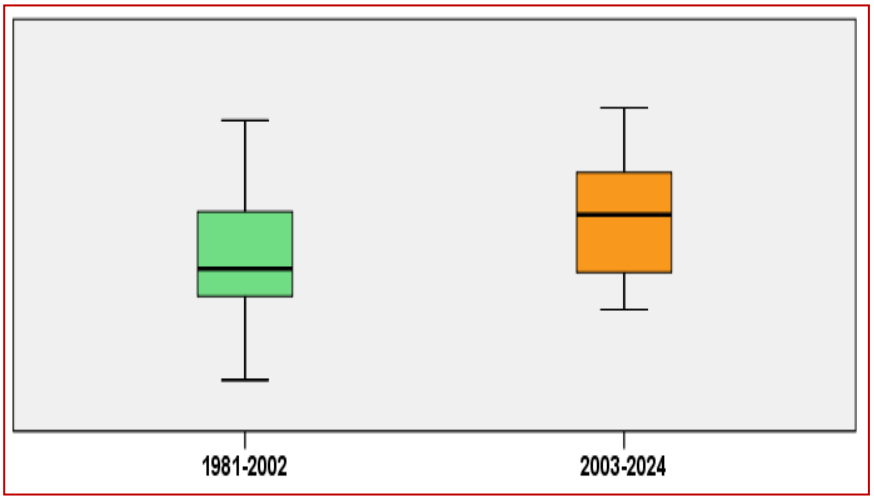


المصدر: إعداد الباحث اعتمادًا على بيانات (NASA Power).

أُجري اختبار الفروق (T-test) بالاعتماد على قيم المتوسطات والانحرافات المعيارية للفترتين. وبعد إجراء التحليل الإحصائي عبر برنامج (SPSS)، وأظهرت نتائج اختبار (T-test) للعينات المستقلة وجود فروق ذات دلالة إحصائية بين الفترة الأولى (1981–2002) والفترة الثانية (2003–2024)؛ حيث بلغت قيمة (T) المحسوبة (-2.232) عند مستوى دلالة (P = 0.031)، وهي قيمة أدنى من عتبة المعنوية المعتمدة (0.05). وتؤكد هذه النتيجة أنّ التغير في درجات الحرارة العظمى الصيفية يتجاوز حدود التذبذب الطبيعي، مما يشكّل مؤشرًا إحصائيًا قويًا على استجابة المنطقة لظاهرة الاحترار العالمي.

ويجسد الشكل (4) هذا التحول الحراري؛ حيث يُلاحظ من الرسم البياني للصندوق (Box Plot) حدوث إزاحة رأسية كاملة لمنظومة التوزيع الحراري نحو القيم الأعلى في الفترة الثانية. فارتفاع خط الوسيط (Median) في الصندوق البرتقالي مقارنة بالصندوق الأخضر، وانحصار معظم قيم الفترة الحديثة ضمن النطاق العلوي للفترة السابقة يثبت بصريًا أنّ الاحترار في منطقة الدراسة تجاوز مجرد الطفرات العشوائية ليصبح سمة ثابتة للمناخ المحلي.

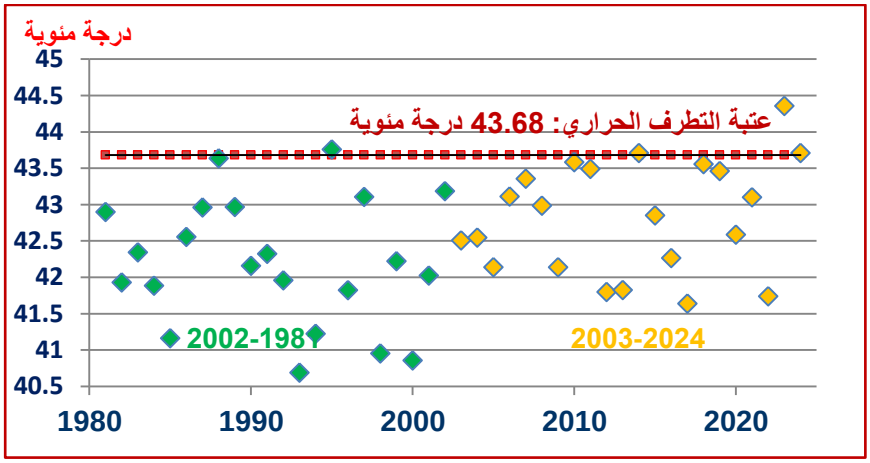
الشكل (4): الانزياح الحراري في متوسطات درجات الحرارة العظمى الصيفية بجبل الهاروج في الفترتين الزمنيتين (1981–2002) و(2003–2024).



المصدر: إعداد الباحث بناءً على نتائج برنامج SPSS.

3.3. تحليل التطرف الحراري باستخدام Percentiles: اعتمدت الدراسة في هذا الجانب على مؤشر المئينات (Percentiles) معيارًا إحصائيًا قائم على العتبات النسبية، حيث حُدِّدت العتبة الحرارية التي تمثّل أعلى 10% من البيانات (المئين التسعين) عند قيمة 43.68°م. وكشفت النتائج عن استقرار في تكرار السنوات المتطرفة بين الفترتين الزمنيتين؛ إذ سجلت كل فترة ظهور سنتين متطرفتين بنسبة تكرار بلغت 9.1%. ويعزز هذا الاستنتاج فرضية أنّ التغير المناخي في منطقة الدراسة لا يتجلى فقط في زيادة وتيرة الموجات المتطرفة، بقدر ما يتجلى في زحف حراري مستمر يرفع القاعدة العامة لدرجات الحرارة، وهو ما يتفق مع دراسة هانسن وزملاؤه حول انزياح توزيع الشذوذات الحرارية (Shift of anomalies distribution)، حيث أكدت دراستهم أنّ الاحترار العالمي أدى إلى تحويل القيم التي كانت تُصنف متطرفات نادرة في الماضي إلى حالات تتكرر بنسب تصل إلى 10 في المئة في الوقت الحاضر (Hansen et al., 2012).

الشكل (5): تكرار سنوات التطرف الحراري والنزعة العامة للاحترار الصيفي بين فترتي الرصد.

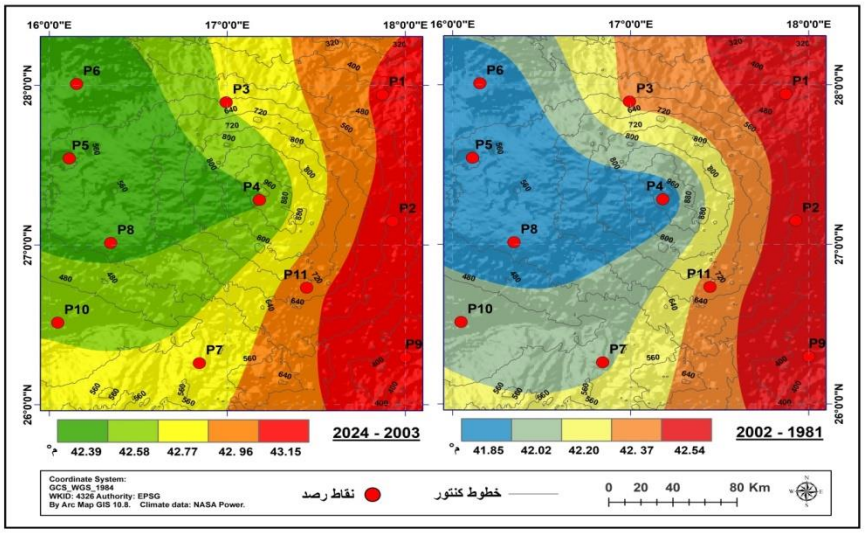


المصدر: من إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات برنامج SPSS وبيانات NASA Power.

من الشكل (5) يُظهر المخطط المبعثر تحولًا واضحًا في النمط الحراري للسنوات غير المتطرفة مقارنة بالعتبة الحرارية المحددة عند المئين التسعين (th Percentile90) والبالغة (43.68°م)؛ حيث انزاحت القيم التي كانت تُصنف ضمن النطاق المتوسط في الفترة الأولى لتقترب في الفترة الثانية من العتبة الحرارية دون تجاوزها فعليًا. وهذا التموضع في الفترة الجديدة يفسّر غياب الدلالة الإحصائية في اختبار (Chi-Square) رغم الوضوح البصري للاحترار؛ إذ لم يتغير عدد الحالات التي تجاوزت الخط الأحمر في كلا الفترتين، بل حدث زحف جماعي لقيم الفترة الحديثة (النقاط البرتقالية) نحو الأعلى. ويؤكد هذا الاستنتاج أنّ منطقة الدراسة تمر بمرحلة تراكم حراري، رفعت من القاعدة الحرارية الصيفية.

4.3. التباين المكاني للخصائص الحرارية الصيفية في منطقة الدراسة: نظرًا للتنوع التضاريسي والامتداد المساحي الشاسع لمنطقة الدراسة كان لزامًا الانتقال من التحليل الزمني إلى التفسير المكاني؛ وذلك لتحديد البؤر الحرارية الأكثر تأثراً بالاحترار. ولتحقيق هذه الدقة تمّ استخدام أداة 'Kriging' ضمن بيئة برنامج (ArcMap GIS). وتُعدّ هذه الأداة من أكثر خوارزميات الاستيفاء المكاني استخدامًا (Spatial Interpolation)، حيث تتيح التنبؤ بالقيم في المناطق غير المرصودة بناءً على الأوزان النسبية والارتباط المكاني بين نقاط الرصد الأحد عشر (P1-P11)، مما يمنحنا خرائط سطحية تعكس التدرج الحراري وتكشف عن التباينات المكانية بين الفترتين الزمنيتين.

الشكل (6): التباين المكاني في فترتي رصد درجات الحرارة العظمى وتأثرها بتضاريس منطقة الدراسة.



المصدر: من إعداد الباحث باستخدام برنامج (ArcMap GIS 10.8) وبالاعتماد على بيانات (NASA Power).

من الشكل (6) تُظهر المقارنة المكانية بين الفترتين الزمنيتين تحولًا لافتًا في الأداء الحراري بمنطقة الدراسة، حيث يكشف التوزيع المكاني عن استجابة واضحة لارتفاعات السطح وتضاريسه في تشكيل النطاقات الحرارية، إذ تتركز "النواة الباردة" فوق الكتل الجبلية المرتفعة التي تتجاوز 800 متر حول النقاط (P4, P5, P8)، بينما تشتد القمم الحرارية في النطاقات المنخفضة والهوامش الشرقية والجنوبية حول النقاط (P1, P2, P9). وبتحليل الفوارق بين الخريطتين يُلاحظ تقلص المساحات المظللة بالألوان الزرقاء التي تمثّل النطاقات الأقل حرارة في الفترة الأولى لصالح تمدد واكتساح الألوان البرتقالية والحمراء في الفترة الثانية، وهو ما يشير إلى زحف حراري من المناطق المنخفضة باتجاه القمم الجبلية؛ حيث ارتفعت أدنى قيمة حرارية مسجلة في المنطقة من (41.85°م) في الفترة الماضية إلى (42.39°م) في الفترة الحالية أي بفارق (0.54°م)، مما يؤكد أنّ الاحترار العالمي حوّل المنظومة الحرارية لجبل الهاروج نحو نمط أكثر قسوة في ارتفاع درجات الحرارة العظمى الصيفية.

4. النتائج والتوصيات:

1.4. النتائج:

1.1.4. أظهرت النتائج أنّ هناك اتجاه نحو الارتفاع رفع من أرضية درجات الحرارة العظمى

الصيفية بشكل عام؛ حيث استقر تكرار السنوات المتطرفة فوق المئين التسعين (43.68°م) بواقع حالتين لكل فترة، بينما سجلت الصيفيات الاعتيادية في الفترة الحديثة اقترابًا حثيثًا من سقف هذا المئين.

2.1.4. أكد اختبار (T-test) وجود فروق ذات دلالة إحصائية (P = 0.031) بين الفترة الأولى (1981–2002) والفترة الثانية (2003–2024)، مما يثبت أنّ الارتفاع المرصود يمثّل تحولًا هيكليًا في النظام الحراري وليس مجرد تقلبات طبيعية عابرة.

3.1.4. كشفت النمذجة المكانية بأداة (Kriging) عن انكماش واضح في مساحة المنطقة الحرارية الباردة فوق القمم الجبلية لصالح تمدد النطاقات الدافئة الزاحفة من الهوامش المنخفضة، مما أدى في المجمل إلى تراكم حراري قلص الفجوة بين الصيف الطبيعي والصيف الحار بفارق وصل إلى (0.54°م) في الحد الأدنى للنطاقات الحرارية بين الفترتين.

2.4. التوصيات: ضرورة تكثيف محطات الأرصاد الجوية الأرضية في عموم ليبيا؛ وذلك لتعزيز دقة البيانات الفضائية ومراقبة النطاقات الحرارية في المناطق ذات التباين التضاريسي الحاد. وتوصي الدراسة باعتماد المئين التسعين (43.68°م) عتبة إنذار مبكر في الخطط التنموية المستقبلية للحد من الضغط البيئي على النظم الحيوية الهشة في المناطق الصحراوية. كما توصي الدراسة بتوجيه البحوث المستقبلية لرصد انعكاس هذا التراكم الحراري على موارد المياه الجوفية، ووضع استراتيجيات محلية للتكيف تتعامل مع الاحترار بوصفه نمطًا شاملًا ومستدامًا وليس مجرد حالات طارئة، بما يضمن إدارة رشيدة للموارد الطبيعية في مواجهة قسوة التغيرات المناخية.

5. المصادر والمراجع:

- Elshaafi, A., & Gudmundsson, A. (2016). Volcano-tectonics of the Al Haruj Volcanic Province, Central Libya. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 325, 189–202. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.06.025
- Hansen, J., Sato, M., & Ruedy, R. (2012). Perception of climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(37), E2415–E2423. https://doi.org/10.1073/pnas.120527610
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

- Marzouk, O. A. (2021). Assessment of global warming in Al Buraimi, Sultanate of Oman based on statistical analysis of NASA POWER data over 39 years, and testing the reliability of NASA POWER against meteorological measurements. Heliyon, 7(3), e06571. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06571
- Monteiro, L. A., Sentelhas, P. C., & Pedra, G. U. (2018). Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. International Journal of Climatology, 38(3), 1571-1581. https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.5282
- Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., ... & Yang, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain systems of the world. Nature Climate Change, 5(5), 424-430. https://doi.org/10.1038/nclimate2563
- Rodrigues, C. & Braga, P. (2021). Evaluation of NASA POWER Reanalysis Products to Estimate Daily Weather Variables in a Hot Summer Mediterranean Climate. Agronomy, 11(6), 1207. https://doi.org/10.3390/agronomy11061207
- Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Lewis, S. C. (2020). Increasing trends in regional heatwaves. Nature Communications, 11(1), 3359. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7
- Sparks, A. H. (2018). nasapower: A NASA POWER global meteorology, surface solar energy and climatology data client for R. Journal of Open Source Software, 3(30), 1035. https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.01035
- Soliman, M. M. M. (2020). Trend analysis of temperature and precipitation data in the northern part of Libya (PhD Thesis No. 618882), Karabuk University, Department of Geography. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/
- Soliman, M. M. M. (2025). Trend analysis of seasonal temperature in the Al-Bardi region, Northeastern Libya. Journal of Materials and Environmental Science, 16(8), 1412–1425. https://orcid.org/0000-0003-4192-4894
- Tan, M. L., Armanuos, A. M., Ahmadianfar, I., Demir, V., Heddam, S., Al-Areeq, A. M., Abba, S. I., Halder, B., Kilinc, H. C., & Yaseen, Z. M. (2023). Evaluation of NASA POWER and ERA5-Land for estimating tropical precipitation and temperature extremes. Journal of Hydrology, 625, 129940. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129940
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Shepherd, T. G. (2015). Attribution of climate extreme events. Nature Climate Change, 5(8), 725-730. https://doi.org/10.1038/nclimate2657

6. الملاحق:

الملحق (1): المعدلات الصيفية لدرجات الحرارة العظمى في نقاط الرصد المختارة بمنطقة الدراسة.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	Average
1981	44.13	43.34	43.60	42.35	42.57	42.75	42.41	42.56	42.87	42.68	42.62	42.90
1982	43.05	42.72	42.05	40.98	41.24	41.29	41.59	41.55	43.09	41.46	42.21	41.93
1983	43.00	43.26	42.82	42.06	41.68	41.88	42.09	41.64	42.82	41.89	42.64	42.34
1984	42.29	43.21	42.09	40.79	41.10	41.26	41.72	40.98	43.62	41.34	42.33	41.88
1985	41.26	41.41	41.48	40.98	40.83	40.75	41.28	40.74	41.51	41.05	41.49	41.16
1986	43.54	43.25	43.04	41.88	41.69	41.89	42.34	41.78	43.47	42.21	43.01	42.56
1987	42.47	44.02	42.89	42.46	42.61	42.52	42.88	42.63	43.88	42.75	43.46	42.96
1988	43.95	43.91	44.27	43.15	43.54	43.57	43.40	43.34	43.88	43.34	43.66	43.64
1989	44.33	43.89	43.00	41.90	42.18	42.02	42.70	42.48	43.71	42.95	43.49	42.97
1990	42.44	42.49	42.69	41.37	41.89	41.65	42.14	42.05	42.44	42.28	42.31	42.16
1991	42.84	42.60	42.75	41.60	41.64	41.82	42.14	42.00	42.91	42.54	42.71	42.32
1992	42.31	42.01	42.91	41.56	41.91	41.95	41.76	41.76	42.06	41.53	41.79	41.96
1993	40.32	40.92	40.65	40.01	40.59	40.30	40.92	40.90	41.00	40.80	41.16	40.69
1994	41.98	41.52	41.35	40.96	40.87	40.55	41.01	41.18	41.39	41.42	41.22	41.22
1995	44.26	44.07	44.00	42.98	43.02	43.09	43.87	43.22	44.60	43.75	44.51	43.76
1996	42.50	42.33	41.96	40.86	41.34	41.22	41.96	41.67	42.42	41.88	41.92	41.82
1997	44.32	43.55	43.34	42.24	42.72	42.52	42.86	43.01	43.49	42.93	43.18	43.11
1998	40.71	40.97	40.96	40.31	40.76	40.51	40.98	41.03	41.70	41.30	41.25	40.95
1999	42.50	42.47	42.59	41.71	41.66	41.68	42.08	42.04	42.55	42.11	43.05	42.22
2000	40.48	40.67	41.01	40.26	41.00	40.75	41.22	41.49	40.59	41.31	40.64	40.86
2001	41.98	42.54	42.44	41.41	41.49	41.67	41.77	41.70	42.67	42.00	42.60	42.02
2002	45.37	44.69	45.15	43.61	43.48	43.83	43.73	43.50	44.63	43.79	44.26	44.19
2003	42.67	42.64	42.59	41.77	42.37	42.01	42.39	42.41	43.25	42.61	42.86	42.51
2004	43.41	42.71	42.99	41.90	42.07	41.77	42.63	42.49	42.59	42.72	42.72	42.55
2005	42.77	42.77	42.19	41.05	41.80	41.47	41.95	41.91	42.87	41.98	42.76	42.14
2006	44.38	44.40	42.78	41.98	42.30	42.13	42.98	42.45	44.41	42.48	43.93	43.11
2007	43.81	43.81	43.85	42.85	42.94	43.09	43.16	42.99	43.57	43.42	43.43	43.36
2008	42.95	43.77	43.17	42.32	42.34	42.27	42.88	42.42	44.28	42.74	43.70	42.99
2009	43.15	42.53	42.30	41.72	41.59	41.52	42.29	41.72	42.22	42.01	42.49	42.14
2010	43.96	44.47	43.53	42.82	42.94	42.45	43.51	43.38	44.49	44.04	43.82	43.58
2011	44.17	43.98	43.83	42.97	42.97	42.74	43.32	43.15	43.91	43.55	43.82	43.49
2012	41.82	42.08	42.00	41.28	41.28	41.33	42.11	41.23	42.41	41.62	42.62	41.80
2013	41.78	41.44	42.35	41.62	41.72	41.33	41.90	42.05	41.79	42.25	41.83	41.83
2014	43.70	44.41	43.55	43.35	43.37	43.04	43.48	43.50	44.64	43.61	44.17	43.71
2015	43.40	44.01	42.81	41.93	41.90	41.80	42.79	42.58	43.62	43.09	43.44	42.85
2016	42.76	42.67	42.94	41.84	41.82	41.95	42.02	41.63	42.67	42.10	42.51	42.27
2017	41.95	42.07	41.78	40.87	41.20	41.13	41.78	41.61	41.85	41.92	41.88	41.64
2018	44.91	44.26	44.07	42.57	42.40	42.78	43.33	42.61	44.81	43.08	44.33	43.56
2019	43.59	44.44	43.12	42.31	42.74	42.64	43.71	43.15	44.58	43.58	44.22	43.46
2020	43.09	43.78	42.35	41.65	42.00	41.84	42.52	42.20	43.72	42.46	42.86	42.59
2021	43.50	43.39	43.27	42.47	42.90	42.80	43.10	43.00	43.34	42.97	43.37	43.10
2022	42.21	42.29	41.44	40.66	41.26	41.17	41.86	41.69	42.36	42.10	42.08	41.74
2023	44.92	45.07	44.67	43.48	43.93	44.24	44.09	43.91	44.92	43.89	44.80	44.36
2024	43.94	44.15	43.94	43.05	43.29	43.22	43.65	43.42	44.23	43.48	43.87	43.66

ملاحظة: القيم المظللة بالأحمر أعلى من المعدل الإقليمي العام، بينما القيم المظللة باللون الأزرق أقل من ذلك المعدل. كما أنّ السنوات التي تمثل الفترة الأولى في الدراسة لونت باللون البرتقالي، بينما سنوات الفترة الثانية لونت باللون الأخضر.

المصدر: إعداد الباحث، بالاعتماد على بيانات (NASA Power) https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer

الملحق (2): أهم نتائج اختبار T–test للفروق بين فترتي الدراسة (1981–2002) و(2003–2024).

المتغير الإحصائي	القيمة	التفسير
قيمة اختبار ليفين (Levene's Sig.)	0.529	تشير إلى تجانس التباين بين الفترتين
قيمة (ت) المحسوبة (t–value)	2.232-	تدل على وجود فرق جوهري لصالح الفترة الثانية
مستوى الدلالة (Sig. 2–tailed)	0.031	نتيجة ذات دلالة إحصائية (P < 0.05)
خطأ المعايرة المعياري (Std. Error)	0.261	مدى دقة تقدير الفرق بين المتوسطات

المصدر: إعداد الباحث اعتمادًا على نتائج الاختبار.