

دراسة تحليلية للخصائص الحرارية واتجاهاتها في منطقة الأصابعة
وانعكاساتها المحتملة على البيئة المحلية
باستخدام بيانات إعادة التحليل المناخي (NASA POWER (MERRA-2)
للفترة (1981–2025)

أ. عفاف الضاوي المشرقي
ماجستير دراسات بيئية – قسم الجغرافيا

نشر الورقة: 2026-06-02

قبول الورقة: 2026-05-20

استلام الورقة: 2026-04-22

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل الخصائص الحرارية لمنطقة الأصابعة (ليبيا) واتجاهاتها الزمنية خلال الفترة 1981–2025، وذلك في ظل غياب محطة أرصاد جوية محلية في المنطقة. واعتمدت الدراسة على بيانات منصة NASA POWER التابعة لوكالة الفضاء الأمريكية (ناسا)، والمستمدة من نموذج إعادة التحليل المناخي MERRA-2. لثلاثة متغيرات هي: الحرارة المتوسطة، والحرارة العظمى، والحرارة الصغرى. وحُللت البيانات على المستويات الشهرية والفصلية والعقدية والسنية، واختُبرت الاتجاهات الزمنية باستخدام الانحدار الخطي البسيط واختبار مان-كندال وميل سن، وحُدّدت نقاط التحول باختبار بيتيت. وأظهرت النتائج أن المتوسط السنوي للحرارة يبلغ 18.2°C ، بمدى شهري يقارب 19.7°C بين يناير (8.0°C) ويوليو (27.8°C). كما كشفت عن اتجاه موجب ذي دلالة إحصائية في المتغيرات الثلاثة؛ إذ بلغ معدل الارتفاع وفق ميل سن نحو 0.18°C لكل عقد للحرارة المتوسطة، و 0.20°C لكل عقد للحرارة العظمى، و 0.17°C لكل عقد للحرارة الصغرى، وهو ما يعادل ارتفاعاً كلياً يتراوح بين 0.7 و 0.9°C خلال فترة الدراسة. وسُجّل أكبر انحراف موجب في الفترة 2021–2025، التي جاءت أربع من سنواتها الخمس أعلى من معدل الفترة المرجعية 1991–2020 بأكثر من انحراف معياري واحد في الحرارتين المتوسطة والصغرى. وتناقش الدراسة الانعكاسات المحتملة لهذه التغيرات على الزراعة والموارد المائية والصحة العامة، وتقدم توصيات للتكيف معها.

الكلمات المفتاحية: الأصابعة، جبل نفوسة، اتجاهات درجات الحرارة، NASA POWER، MERRA-2، اختبار مان-كندال، التغير المناخي.

Abstract

This study analyses the thermal characteristics of Al-Asaba (north-western Libya) and their temporal trends over the period 1981–2025. In the absence of a local meteorological station, the study relied on data from NASA's Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) project, which derives its temperature parameters from the MERRA-2 atmospheric reanalysis. Three variables were examined: mean, maximum and minimum temperature. The data were analysed at monthly, seasonal, decadal and annual scales. Trends were tested using simple linear regression, the Mann–Kendall test and Sen's slope estimator, and change points were identified using the Pettitt

test. The mean annual temperature was 18.2 °C, with a monthly range of about 19.7 °C between January (8.0 °C) and July (27.8 °C). Statistically significant positive trends were found in all three variables. Sen's slope indicated warming of about 0.18 °C per decade for mean temperature, 0.20 °C per decade for maximum temperature and 0.17 °C per decade for minimum temperature, equivalent to a total rise of 0.7–0.9 °C over the study period. The largest positive anomaly occurred in 2021–2025: four of these five years exceeded the 1991–2020 mean by more than one standard deviation for both mean and minimum temperature. The study discusses the likely implications of these changes for agriculture, water resources and public health, and offers recommendations for adaptation.

Keywords: Al-Asaba; Nafusa Mountains; temperature trends; NASA POWER; MERRA-2; Mann–Kendall test; climate change.

أولاً: المقدمة

تُعد دراسة الظواهر الحرارية إحدى الركائز الأساسية لفهم التغيرات البيئية وتأثيراتها المباشرة على الموارد الطبيعية والأنشطة البشرية. ومع ذلك تفتقر العديد من المناطق في ليبيا، ومنها منطقة الأصابعة، إلى محطات رصد مناخية أرضية توفر بيانات دقيقة ومنتظمة عن درجات الحرارة وغيرها من عناصر المناخ. ويشكل هذا النقص في البيانات تحدياً أمام الباحثين وصناع القرار عند تقييم التغيرات المناخية ووضع استراتيجيات فعالة للتكيف معها.

وفي ظل هذا الغياب، أصبحت قواعد البيانات المناخية العالمية مصدراً بديلاً لسد الفجوات المعرفية، ومن أبرزها بيانات إعادة التحليل المناخي (Reanalysis)، التي تدمج أرصاد المحطات الأرضية والأقمار الصناعية وغيرها في نموذج عددي للغلاف الجوي، فتنتج سلاسل زمنية متصلة ومتجانسة تغطي سطح الأرض كله. ويُعد نموذج MERRA-2 الذي تنتجه وكالة الفضاء الأمريكية (ناسا) أحد أهم هذه النماذج (Gelaro et al., 2017)، وتتيح منصة NASA POWER بياناته الحرارية لأي موقع على سطح الأرض بصيغة جاهزة للتحليل. (NASA Langley Research Center, 2025) وقد اعتمدت بيانات هذه المنصة في دراسات مناخية ليبية في ظل غياب محطات الرصد المحلية (أبو سيف، 2026).

تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تحليل شامل للخصائص الحرارية لمنطقة الأصابعة واتجاهاتها خلال الفترة الممتدة من عام 1981 حتى عام 2025، بالاعتماد على بيانات منصة NASA POWER ويركز البحث على دراسة التغيرات الشهرية والفصلية والسنوية لدرجات الحرارة (المتوسطة والعظمى والصغرى)، واختبار دلالة اتجاهاتها الزمنية إحصائياً، وتحديد السنوات الحرارية الاستثنائية، إضافةً إلى مناقشة انعكاسات هذه التغيرات على البيئة المحلية بما يشمل الزراعة والموارد المائية والصحة العامة. كما تسعى الدراسة إلى سد فجوة الرصد المناخي المحلي وتوفير قاعدة معرفية يمكن أن تدعم السياسات البيئية والزراعية في المنطقة.

1- مشكلة الدراسة

تتمثل مشكلة الدراسة في غياب بيانات مناخية محلية منتظمة لمنطقة الأصابعة، مما يجعل حجم التغير في درجات الحرارة واتجاهه غير معروفين على وجه الدقة، رغم أهمية ذلك للنشاط الزراعي وإدارة الموارد المائية في منطقة جبلية شبه جافة. وتسعى الدراسة إلى الإجابة عن التساؤلات الآتية:

1- ما الخصائص الشهرية والفصلية لدرجات الحرارة المتوسطة والعظمى والصغرى في منطقة الأصابعة خلال الفترة 1981-2025؟

2- هل شهدت درجات الحرارة السنوية اتجاهاً زمنياً ذا دلالة إحصائية، وما مقداره؟

3- هل حدث تحول مفاجئ في متوسط السلاسل الحرارية، ومتى حدث؟

4- ما السنوات الحرارية الاستثنائية خلال فترة الدراسة، وكيف توزعت زمنياً؟

5- ما الانعكاسات المحتملة لهذه التغيرات على الزراعة والموارد المائية والصحة العامة في المنطقة؟

2- فرضية الدراسة

تفترض الدراسة أن درجات الحرارة (المتوسطة والعظمى والصغرى) في منطقة الأصابعة شهدت اتجاهاً موجباً ذا دلالة إحصائية خلال الفترة 1981-2025.

3- أهداف الدراسة

- وصف الخصائص الشهرية والفصلية لدرجات الحرارة المتوسطة والعظمى والصغرى في منطقة الأصابعة.
- قياس معدل التغير في درجات الحرارة السنوية واختبار دلالاته الإحصائية.
- تحديد نقاط التحول في السلاسل الحرارية والسنوات الحرارية الاستثنائية.
- مناقشة الانعكاسات المحتملة لهذه التغيرات على البيئة المحلية، وتقديم توصيات للتكيف معها.

4- أهمية الدراسة

تكتسب الدراسة أهميتها من كونها، في حدود اطلاع الباحثة، من أوائل الدراسات التي تتناول اتجاهات درجات الحرارة في منطقة الأصابعة باختبارات إحصائية لدلالة الاتجاه، ومن إمكانية الاستفادة من نتائجها في التخطيط الزراعي وإدارة الموارد المائية في المنطقة، فضلاً عن تقديمها نموذجاً منهجياً لدراسة المناطق الليبية التي تفتقر إلى محطات رصد.

ثانياً: الدراسات السابقة

رغم أن منطقة الأصابعة لم تحظ، في حدود اطلاع الباحثة، بدراسات مناخية مباشرة تعتمد على بيانات الأقمار الصناعية أو إعادة التحليل، إلا أن هناك أبحاثاً مشابهة في مناطق ليبية أخرى يمكن الاستفادة منها كمراجع مقارنة. ففي مدينة تrehونة، تناولت دراسة أبو سيف (2026) الخصائص البصرية للغلاف الجوي وتحليل الإشعاع الشمسي بالاعتماد على بيانات NASA POWER، مؤكدة أهمية هذه البيانات في ظل غياب محطات أرصاد محلية.

كما درس الحداد (2025) الهطول المطري ومؤشر الجفاف الاستطلاعي لمدينة تrehونة - شمال غرب ليبيا، معتمداً على بيانات الأقمار الصناعية للفترة 1982-2020، وناقش مؤشرات الجفاف وتأثيراتها على الموارد المائية والزراعة، مما أبرز انعكاسات التغيرات المناخية على البيئة المحلية بشكل مباشر.

وعلى الصعيد الدولي، طوّر Hansen et al. (2010) تحليل GISTEMP لدرجة حرارة سطح الأرض العالمية، المبني على أرصاد المحطات الأرضية ودرجات حرارة سطح البحر، ووثّقوا من خلاله ارتفاع درجة الحرارة في معظم مناطق العالم. وعمل Lenssen et al. (2019, 2024) على تطوير نموذج تقدير عدم اليقين في هذا التحليل، مما عزز موثوقية تقديراته، خاصةً في المناطق ضعيفة التغطية بمحطات الرصد. أما نموذج MERRA-2 الذي تعتمد عليه هذه الدراسة فقد قدّمه Gelaro et al. (2017) بوصفه نموذج إعادة تحليل حديثاً يستوعب أرصاد الأقمار الصناعية والأرصاد التقليدية معاً. وعلى المستوى الإقليمي، بيّن Cramer et al. (2018) أن التغير المناخي المتسارع في حوض البحر المتوسط فاقم المشكلات البيئية القائمة، وأن المخاطر المرتبطة به على المياه والنظم البيئية والغذاء والصحة كبيرة ومتزايدة.

تؤكد هذه الدراسات مجتمعة أن الاعتماد على قواعد البيانات المناخية العالمية التابعة لناسا أصبح منهجاً معتمداً في الأبحاث المناخية، سواء في ليبيا أو على المستوى الدولي. غير أن الدراسات المحلية المتاحة ركزت على الإشعاع الشمسي والأمطار والجفاف، ولم تتناول اتجاهات درجات الحرارة واختبار دلالتها الإحصائية في مناطق جبل نفوسة. ومن هنا تأتي هذه الدراسة لتسد جانباً من هذه الفجوة المعرفية، وتكمل الصورة المناخية لمناطق جبل نفوسة وما حولها.

ثالثاً: منطقة الدراسة وحدودها

تقع منطقة الأصابعة ضمن نطاق جبل نفوسة في شمال غرب ليبيا، على بُعد نحو 120 كيلومتراً جنوب غرب العاصمة طرابلس.. وتتميز المنطقة بطبيعتها الجبلية ومناخها شبه الجاف، حيث تلعب التضاريس والارتفاع دوراً رئيسياً في تحديد أنماط درجات الحرارة.

ومن الجدير بالذكر أن المنطقة لا تمتلك محطة أرصاد جوية توفر بيانات مناخية مباشرة ومنظمة، وهو ما يشكل تحدياً أمام الباحثين في رصد التغيرات المناخية بدقة، ولذلك اعتمدت الدراسة على بيانات إعادة التحليل المناخي. وتحدد الدراسة بالحدود الآتية:

• الحد المكاني: منطقة الأصابعة، ممثلةً بالخلية الشبكية لنموذج MERRA-2 التي تقع فيها المنطقة.

• الحد الزمني: الفترة من يناير 1981 إلى ديسمبر 2025 (45 سنة).

• الحد الموضوعي: درجات الحرارة المتوسطة والعظمى والصغرى، دون غيرها من عناصر المناخ.

رابعاً: البيانات ومنهجية الدراسة

1- منهج الدراسة

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي لوصف الخصائص الحرارية لمنطقة الأصابعة وتحليل تغيراتها، وعلى المنهج الكمي (الإحصائي) في معالجة البيانات واختبار دلالة الاتجاهات الزمنية.

- مصدر البيانات

اعتمدت الدراسة على بيانات منصة (NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources التابعة لمركز لانغلي للأبحاث في وكالة الفضاء الأمريكية (NASA Langley Research Center, 2025)، والتي تستمد متغيراتها الحرارية من نموذج إعادة التحليل (MERRA-2 (Gelaro et al., 2017 بدقة مكانية تبلغ $0.5^\circ \times 0.625^\circ$. وقد استُخرجت البيانات الشهرية للخلية الشبكية التي تقع فيها منطقة الأصابعة، للفترة من يناير 1981 إلى ديسمبر 2025.

3- المتغيرات المدروسة

- الحرارة المتوسطة (T2M): متوسط درجة حرارة الهواء على ارتفاع مترين فوق سطح الأرض.
- الحرارة العظمى (T2M_MAX): أعلى قيمة لدرجة حرارة الهواء على ارتفاع مترين.
- الحرارة الصغرى (T2M_MIN): أدنى قيمة لدرجة حرارة الهواء على ارتفاع مترين.

وتجدر الإشارة إلى أن منصة NASA POWER تحتفظ في المتغيرين T2M_MAX و T2M_MIN بالقيمة الساعية العظمى أو الصغرى عند تجميع البيانات من المستوى اليومي إلى الشهري، أي أن القيمة الشهرية تمثل أعلى (أو أدنى) قيمة سُجِّلَت خلال الشهر، لا متوسط القيم اليومية. (NASA Langley Research Center, n.d.) وعليه فإن الحرارة العظمى السنوية في هذه الدراسة تمثل متوسط القيم العظمى الشهرية الاثنتي عشرة، وكذلك الحرارة الصغرى السنوية.

4- معالجة البيانات

جرى التحقق من اكتمال السلاسل الزمنية الثلاث (45 سنة لكل متغير)، ثم حُسبت المتوسطات الشهرية لكامل الفترة، والمتوسطات الفصلية والعقدية والسنوية. وعُزِفَت الفصول على النحو الآتي: الشتاء (ديسمبر-يناير-فبراير)، والربيع (مارس-مايو)، والصيف (يونيو-أغسطس)، والخريف (سبتمبر-نوفمبر). وحُسبت الانحرافات الحرارية (Anomalies) بالنسبة إلى الفترة المرجعية 1991-2020، وهي الفترة المناخية المعيارية المعتمدة حالياً لدى المنظمة العالمية للأرصاد الجوية. (WMO, 2017) ونظراً لأن الفترة الأخيرة (2021-2025) تضم خمس سنوات فقط، فقد اعتمد تحليل الاتجاه على السلسلة السنوية الكاملة، واستُخدمت المتوسطات العقدية لأغراض الوصف والمقارنة فقط.

5- الأساليب الإحصائية

- الإحصاء الوصفي: المتوسط، والانحراف المعياري، ومعامل الاختلاف، وأعلى القيم وأدناها وسنوات حدوثها.
- الانحدار الخطي البسيط: لتقدير معدل التغير في درجات الحرارة بوحدة $^\circ\text{C}$ لكل عقد، مع معامل التحديد (R^2) ومستوى الدلالة.
- اختبار مان-كندال اللامعلمي (Mann, 1945; Kendall, 1975): لاختبار دلالة الاتجاه عند مستوى دلالة 0.05، مع مقبّر ميل سن (Sen, 1968) لتقدير مقدار التغير. وقد فُحص الارتباط الذاتي من الدرجة الأولى في كل سلسلة بعد إزالة

الاتجاه منها، وطُبِّقَت طريقة الإزالة المسبقة للارتباط الذاتي بعد إزالة الاتجاه (TFPW) على السلسلة التي ظهر فيها ارتباط ذاتي دال. (Yue et al., 2002)

- اختبار بيتيت (Pettitt, 1979): لتحديد سنة التحول في متوسط السلسلة.
- السنوات الحرارية الاستثنائية: عُرِفَت بأنها السنوات التي يزيد انحرافها عن متوسط الفترة المرجعية 1991–2020 على انحراف معياري واحد، موجباً (سنوات دافئة) أو سالباً (سنوات باردة).

6- الأدوات المستخدمة

عُولِجَت البيانات ومُثِّلَت بيانياً باستخدام برنامج Microsoft Excel، وأُجريت الاختبارات الإحصائية باستخدام لغة Python (مكتبتا NumPy و SciPy).

7- حدود البيانات

تمثل بيانات إعادة التحليل متوسطاً لمساحة الخلية الشبكية (نحو 50–60 كيلومتراً)، ولا تعبر بدقة عن نقطة بعينها، خاصةً في المناطق الجبلية ذات التضاريس المتباينة كمنطقة الأصبعة، إذ قد تجمع الخلية الواحدة بين أراضي مرتفعة وأخرى منخفضة. ولذلك قد تختلف القيم المطلقة لدرجات الحرارة عن القيم الفعلية في المنطقة، في حين يظل تحليل الاتجاهات الزمنية أقل تأثراً بهذا الفرق. كما أن عدم توفر محطة أرضية في المنطقة حال دون التحقق المباشر من دقة البيانات، واقتصر التحليل على البيانات الشهرية والسنوية، فلم يشمل موجات الحر والبرد على المستوى اليومي.

خامساً: النتائج والتحليل

يُعد تحليل درجات الحرارة من أهم المؤشرات المناخية لفهم التغيرات البيئية طويلة المدى، إذ تمثل الحرارة المتوسطة والعظمى والصغرى عناصر أساسية في تقييم المناخ المحلي: فالحرارة العظمى تعكس شدة الحرارة النهارية في فصل الصيف، والحرارة الصغرى تعبر عن برودة الليل واحتمالية حدوث الصقيع في فصل الشتاء، أما الحرارة المتوسطة فتعطي صورة عامة عن النظام الحراري الشهري والسنوي. ويعرض هذا القسم نتائج تحليل كل متغير على المستويين الشهري والسنوي، ثم يقارن بينها فصلياً وعقدياً، ويختم بنتائج تحليل الاتجاه الزمني.

1- الحرارة المتوسطة

أ- القيم الشهرية للحرارة المتوسطة

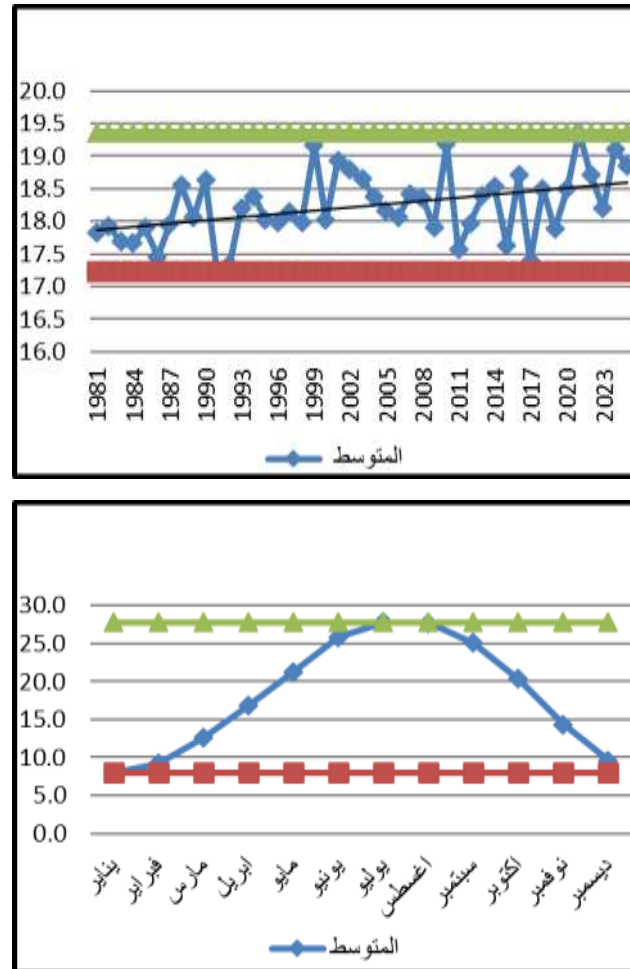
جدول (1) المتوسط الشهري للحرارة المتوسطة (°م) في منطقة الدراسة للفترة (1981–2025)

الشهر	يناير	فبراير	مارس	أبريل	مايو	يونيو	يوليو	أغسطس	سبتمبر	أكتوبر	نوفمبر	ديسمبر
الحرارة المتوسطة	8.0	9.2	12.6	16.8	21.3	25.9	27.8	27.8	25.1	20.4	14.4	9.6

المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يوضح الجدول (1) القيم الشهرية للحرارة المتوسطة في منطقة الأصابعة خلال الفترة 1981–2025، ويتبين منه أن المتوسط السنوي يبلغ نحو 18.2°م، مع تباين ملحوظ بين الأشهر. فقد سُجلت أدنى القيم في شهري يناير (8.0°م) وفبراير (9.2°م)، مما يعكس برودة الشتاء، بينما بلغت أعلى القيم في شهري يوليو وأغسطس (27.8°م)، وهو ما يؤكد شدة الحرارة في الصيف. أما الأشهر الانتقالية مثل أبريل ومايو وأكتوبر فقد أظهرت قيماً معتدلة تراوحت بين 16.8 و21.3°م. ويبلغ المدى الحراري السنوي، أي الفرق بين أحر الشهور وأبردها، نحو 19.7°م، وهو ما يعكس الطابع القاري شبه الجاف للمنطقة.

الشكل (1) المتوسط الشهري (يمين) والمتوسط السنوي (يسار) للحرارة المتوسطة في منطقة الأصابعة (1981–2025)



المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يوضح الرسم الأيمن من الشكل (1) الدورة الحرارية السنوية في منطقة الأصابعة، حيث ترتفع الحرارة المتوسطة تدريجياً من أدنى مستوياتها في يناير (8.0°م) لتبلغ ذروتها في يوليو وأغسطس (27.8°م)، ثم تنخفض في الخريف. أما الرسم الأيسر فيبين تذبذب المتوسط السنوي بين 17.24°م (سنة 1991) و19.37°م (سنة 2021)، مع خط اتجاه عام صاعد يعكس الاحترار التدريجي الذي يتناوله تحليل الاتجاه في البند (5) من هذا القسم. ويمثل الخطان الأفقيان في الرسمين أدنى قيمة وأعلى قيمة في السلسلة، ويُستخدمان للمقارنة فقط.

ب- القيم العقدية والسوية للحرارة المتوسطة

جدول (2) المتوسطات العقدية للحرارة المتوسطة (°م) وانحرافاتها عن معدل الفترة المرجعية 1991–2020

الفترة	1990–1981	2000–1991	2010–2001	2020–2011	*2025–2021
المتوسط (°م)	17.97	18.05	18.48	18.11	18.85
الانحراف عن معدل 1991–2020 (°م)	-0.24	-0.17	+0.27	-0.11	+0.64

* تضم الفترة 2025–2021 خمس سنوات فقط. معدل الفترة المرجعية 1991–2020 = 18.21°م.

المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يوضح الجدول (2) أن متوسط الحرارة في منطقة الأصابع ارتفع من 17.97°م في عقد الثمانينات إلى 18.85°م في الفترة 2021–2025. غير أن هذا الارتفاع لم يكن منتظماً؛ إذ سجل العقد 2001–2010 انحرافاً موجباً قدره 0.27°م، ثم عاد العقد 2011–2020 إلى ما دون المعدل بنحو 0.11°م، قبل أن تسجل الفترة الأخيرة أكبر انحراف موجب (0.64°م). وتراوح المتوسط السنوي خلال فترة الدراسة بين 17.24°م سنة 1991 و19.37°م سنة 2021، وهي أحر سنة في السلسلة، تليها سنة 2010 (19.18°م) ثم سنة 1999 (19.15°م).

2- الحرارة العظمى

أ- القيم الشهرية للحرارة العظمى

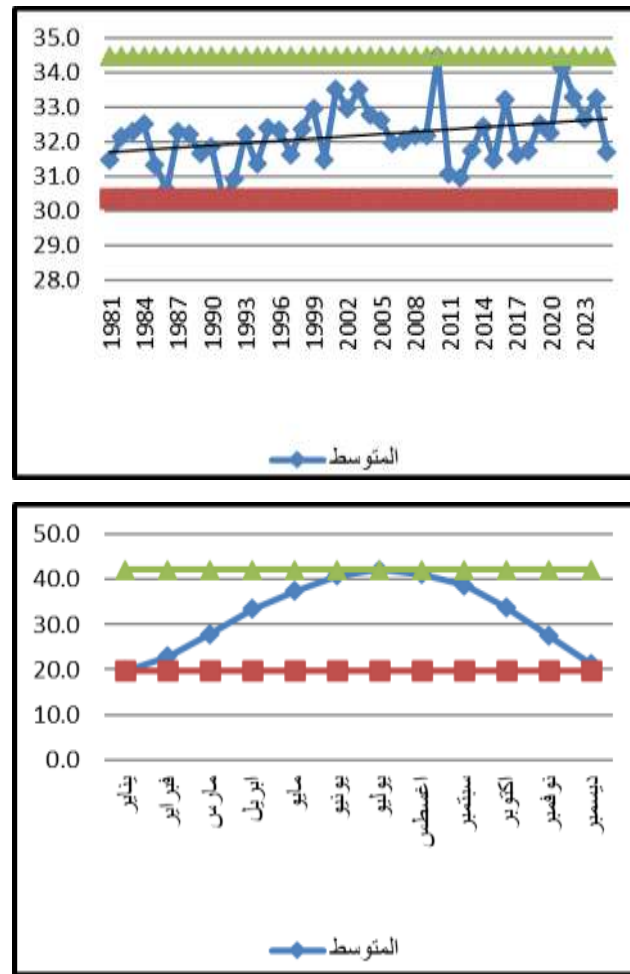
جدول (3) القيم العظمى الشهرية (°م) في منطقة الدراسة للفترة (1981–2025)

الشهر	يناير	فبراير	مارس	أبريل	مايو	يونيو	يوليو	أغسطس	سبتمبر	أكتوبر	نوفمبر	ديسمبر
الحرارة العظمى	19.8	22.9	27.9	33.5	37.4	40.8	42.1	41.1	38.7	33.7	27.4	21.2

المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يوضح الجدول (3) أن الحرارة العظمى في منطقة الأصابع تتبع النمط الموسمي المعتاد؛ إذ تنخفض في الشتاء إلى أدنى مستوياتها في يناير (19.8°م)، وترتفع تدريجياً لتبلغ ذروتها في يوليو (42.1°م) يليه أغسطس (41.1°م)، ثم تنخفض مرة أخرى في الخريف. ويبلغ المتوسط السنوي للقيم العظمى الشهرية 32.2°م، بمدى يقارب 22.3°م بين أحر الشهور وأبردها. ويلاحظ أن القيم العظمى تتجاوز 40°م في أشهر يونيو ويوليو وأغسطس، وهو ما يعني تعرض المنطقة سنوياً لدرجات حرارة نهائية مرتفعة جداً في ذروة الصيف.

الشكل (2) المتوسط الشهري (يمين) والمتوسط السنوي (يسار) للحرارة العظمى في منطقة الأصابعة (1981–2025)



المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يوضح الرسم الأيمن من الشكل (2) مسار الحرارة العظمى على مدار أشهر السنة، إذ ترتفع تدريجياً لتصل ذروتها في يوليو (42.1°C)، وتنخفض شتاءً إلى نحو 19.8°C في يناير. ويوضح الرسم الأيسر تذبذب المتوسط السنوي للحرارة العظمى بين 30.38°C كأدنى قيمة (سنة 1991) و 34.47°C كأعلى قيمة (سنة 2010)، مع خط اتجاه صاعد يشير إلى ارتفاع عام في الحرارة العظمى خلال فترة الدراسة.

ب- القيم العقدية والسنوية للحرارة العظمى

جدول (4) المتوسطات العقدية للحرارة العظمى ($^{\circ}\text{C}$) وانحرافاتهما عن معدل الفترة المرجعية 1991–2020

الفترة	1990–1981	2000–1991	2010–2001	2020–2011	*2025–2021
المتوسط ($^{\circ}\text{C}$)	31.85	31.81	32.82	31.91	33.02
الانحراف عن معدل 1991–2020 ($^{\circ}\text{C}$)	-0.33	-0.37	+0.64	-0.27	+0.84

* تضم الفترة 2025–2021 خمس سنوات فقط. معدل الفترة المرجعية 1991–2020 = 32.18°C .

المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يتضح من الجدول (4) أن الحرارة العظمى ظلت مستقرة تقريباً خلال عقدي الثمانينات والتسعينات (31.85°م و 31.81°م)، ثم ارتفعت في العقد 2001–2010 إلى 32.82°م ، وانخفضت في العقد التالي إلى 31.91°م ، لتبلغ أعلى مستوياتها في الفترة 2021–2025 (33.02°م)، بانحراف موجب قدره 0.84°م عن معدل الفترة المرجعية. وسجلت سنة 2010 أعلى متوسط سنوي (34.47°م)، تلها سنة 2021 (34.17°م) ثم سنة 2001 (33.53°م)، في حين سجلت سنة 1991 أدنى متوسط (30.38°م)، تلها سنة 1986 (30.62°م).

3- الحرارة الصغرى

أ- القيم الشهرية للحرارة الصغرى

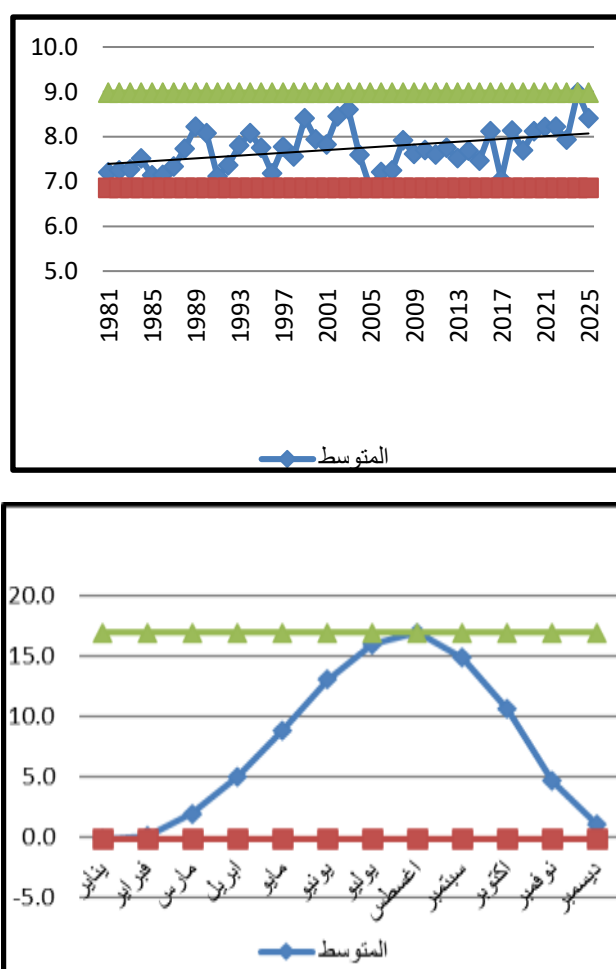
جدول (5) القيم الصغرى الشهرية ($^{\circ}\text{م}$) في منطقة الدراسة للفترة (1981–2025)

الشهر	يناير	فبراير	مارس	أبريل	مايو	يونيو	يوليو	أغسطس	سبتمبر	أكتوبر	نوفمبر	ديسمبر
الحرارة الصغرى	-0.1	0.1	1.9	5.0	8.9	13.1	16.0	16.9	14.9	10.6	4.6	1.0

المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يبين الجدول (5) أن أدنى قيم الحرارة الصغرى تُسجل في يناير (0.1°م تحت الصفر) وفبراير (0.1°م فوق الصفر)، وهي قيم قريبة من الصفر تعكس برودة الشتاء واحتمال حدوث الصقيع. وترتفع القيم تدريجياً لتبلغ ذروتها في أغسطس (16.9°م) ويوليو (16.0°م). أما الأشهر الانتقالية فتسجل قيمة معتدلة نسبياً، تتراوح بين 5.0°م و 8.9°م في أبريل ومايو، وبين 10.6°م و 4.6°م في أكتوبر ونوفمبر. ويبلغ الفرق بين أدنى قيمة شهرية وأعلىها نحو 17.0°م ، ويبلغ المتوسط السنوي 7.7°م .

الشكل (3) المتوسط الشهري (يمين) والمتوسط السنوي (يسار) للحرارة الصغرى في منطقة الأصابعة (1981–2025)



المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يوضح الرسم الأيمن من الشكل (3) التغير الشهري للحرارة الصغرى، حيث تنخفض إلى ما يقارب الصفر في يناير وفبراير، ثم ترتفع تدريجياً خلال الربيع لتبلغ ذروتها في أغسطس (16.9°م)، قبل أن تعاود الانخفاض في الخريف. ويوضح الرسم الأيسر تذبذب المتوسط السنوي للحرارة الصغرى بين 6.85°م كأدنى قيمة (سنة 2005) و8.98°م كأعلى قيمة (سنة 2024)، مع خط اتجاه صاعد يعكس دفء الليالي التدريجي، ويتضح فيه تركيز القيم المرتفعة في السنوات الأخيرة.

ب- القيم العقدية والسنوية للحرارة الصغرى

جدول (6) المتوسطات العقدية للحرارة الصغرى (°م) وانحرافاتهما عن معدل الفترة المرجعية 1991–2020

الفترة	1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2020	2021–2025*
المتوسط (°م)	7.49	7.70	7.70	7.71	8.35
الانحراف عن معدل 1991–2020 (°م)	-0.22	-0.01	0.00	+0.01	+0.65

* تضم الفترة 2021–2025 خمس سنوات فقط. معدل الفترة المرجعية 1991–2020 = 7.70°م.

المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يتضح من الجدول (6) أن الحرارة الصغرى ارتفعت من 7.49°م في الثمانينات إلى نحو 7.70°م في العقود الثلاثة التالية، التي بقيت متقاربة جداً، ثم قفزت إلى 8.35°م في الفترة 2021–2025 بانحراف موجب قدره 0.65°م، وهو أكبر تغير عقدي في السلسلة. وسجلت سنة 2024 أعلى متوسط (8.98°م)، تليها سنة 2003 (8.60°م) ثم سنة 2002 (8.45°م)، في حين سجلت سنة 2005 أدنى متوسط (6.85°م)، تليها سنة 2017 (7.04°م).

4- المقارنة بين العناصر الحرارية الثلاثة

جدول (7) المقارنة الشهرية للقيم الحرارية (°م) في منطقة الدراسة (1981–2025)

الشهر	الحرارة الصغرى	الحرارة المتوسطة	الحرارة العظمى	المدى (العظمى – الصغرى)
يناير	-0.1	8.0	19.8	19.9
فبراير	0.1	9.2	22.9	22.8
مارس	1.9	12.6	27.9	26.0
أبريل	5.0	16.8	33.5	28.5
مايو	8.9	21.3	37.4	28.6
يونيو	13.1	25.9	40.8	27.7
يوليو	16.0	27.8	42.1	26.1
أغسطس	16.9	27.8	41.1	24.2
سبتمبر	14.9	25.1	38.7	23.9
أكتوبر	10.6	20.4	33.7	23.2
نوفمبر	4.6	14.4	27.4	22.8
ديسمبر	1.0	9.6	21.2	20.2
المتوسط السنوي	7.7	18.2	32.2	24.5

المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يوضح الجدول (7) أن الحرارة المتوسطة تقع دائماً بين العظمى والصغرى، وأن المدى بين القيم العظمى والصغرى يتراوح بين 19.9°م في يناير و28.6°م في مايو. ويبلغ هذا المدى أقصاه في أواخر الربيع وأوائل الصيف (أبريل–يونيو)، ويبلغ أدناه في الشتاء، ويُرجَّح أن يرتبط ذلك بقوة الإشعاع الشمسي نهائياً وجفاف الهواء النسبي في هذه الفترة. ففي الشتاء تقترب الحرارة الصغرى من الصفر بينما تصل العظمى إلى نحو 20°م، وفي الصيف ترتفع الصغرى إلى 13–17°م بينما تتجاوز العظمى 40°م.

جدول (8) المتوسطات الفصلية للقيم الحرارية (°م) في منطقة الدراسة (1981–2025)

الفصل	الحرارة الصغرى	الحرارة المتوسطة	الحرارة العظمى
الشتاء (ديسمبر–فبراير)	0.3	9.0	21.3
الربيع (مارس–مايو)	5.3	16.9	32.9
الصيف (يونيو–أغسطس)	15.3	27.1	41.3
الخريف (سبتمبر–نوفمبر)	10.0	20.0	33.3

المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يبين الجدول (8) أن الصيف هو الفصل الأحرار بمتوسط 27.1°م، يليه الخريف (20.0°م) ثم الربيع (16.9°م)، في حين يبلغ متوسط الشتاء 9.0°م. ويُلاحظ أن الخريف أدفأ من الربيع بنحو 3.1°م في الحرارة المتوسطة وبنحو 4.8°م في الحرارة الصغرى،

وهو ما يُعزى عادةً إلى تأخر استجابة حرارة سطح الأرض للإشعاع الشمسي، واحتفاظ الأرض بجزء من حرارة الصيف خلال أشهر الخريف.

جدول (9) المقارنة العقدية للقيم الحرارية (°م) في منطقة الدراسة (1981–2025)

الفترة	الحرارة الصغرى	الحرارة المتوسطة	الحرارة العظمى
1990–1981	7.49	17.97	31.85
2000–1991	7.70	18.05	31.81
2010–2001	7.70	18.48	32.82
2020–2011	7.71	18.11	31.91
*2025–2021	8.35	18.85	33.02

* تضم الفترة 2025–2021 خمس سنوات فقط.

المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يتضح من الجدول (9) أن العناصر الحرارية الثلاثة سجلت أعلى قيمها في الفترة 2025–2021، وأن العقد 2020–2011 شهد تراجعاً نسبياً في الحرارتين المتوسطة والعظمى مقارنة بالعقد الذي سبقه، مما يؤكد أن الاحترار في المنطقة لم يكن خطياً منتظماً، بل اتخذ شكل تذبذبات حول اتجاه عام صاعد.

5- تحليل الاتجاه الزمني

جدول (10) الإحصاء الوصفي للمتوسطات السنوية للقيم الحرارية في منطقة الدراسة (1981–2025)

المتغير	المتوسط (°م)	الانحراف المعياري (°م)	معامل الاختلاف (%)	أعلى قيمة (السنة)	أدنى قيمة (السنة)
الحرارة المتوسطة	18.23	0.52	2.8	19.37 (2021)	17.24 (1991)
الحرارة العظمى	32.20	0.87	2.7	34.47 (2010)	30.38 (1991)
الحرارة الصغرى	7.73	0.47	6.1	8.98 (2024)	6.85 (2005)

المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

جدول (11) نتائج تحليل الاتجاه الزمني للمتوسطات السنوية للقيم الحرارية في منطقة الدراسة (1981–2025)

المتغير	ميل الانحدار (°م/عقد)	R ²	p (الانحدار)	Z (كندال)	p (كندال)	ميل سن (°م/عقد)	التغير الكلي (°م)
الحرارة المتوسطة	+0.17	0.18	0.004	2.92	0.003	+0.18	+0.80
الحرارة العظمى	+0.22	0.11	0.026	2.04	0.041	+0.20	+0.87
الحرارة الصغرى*	+0.15	0.19	0.003	2.90	0.004	+0.17	+0.73

* طُبِّقت على سلسلة الحرارة الصغرى طريقة TFPW بسبب وجود ارتباط ذاتي دال (معامل الارتباط الذاتي بعد إزالة الاتجاه

= 0.29)؛ وقبل تطبيقها كانت $Z = 2.94$ و $p = 0.003$. التغير الكلي = ميل سن $\times$ 44 سنة. تكون النتيجة دالة إحصائياً عندما تكون p أقل من 0.05.

المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

تُظهر نتائج الجدول (11) وجود اتجاه موجب ذي دلالة إحصائية في المتغيرات الثلاثة. فقد بلغ معدل الارتفاع وفق ميل سن 0.18°م لكل عقد في الحرارة المتوسطة، و 0.20°م لكل عقد في الحرارة العظمى، و 0.17°م لكل عقد في الحرارة الصغرى، وجاءت قيم الانحدار الخطي متقاربة معها (0.17 و 0.22 و 0.15°م لكل عقد على الترتيب). ويعني ذلك ارتفاعاً كلياً خلال فترة الدراسة يبلغ نحو 0.80°م في الحرارة المتوسطة، و 0.87°م في الحرارة العظمى، و 0.73°م في الحرارة الصغرى. والاتجاه دال عند مستوى 0.01 في الحارتين المتوسطة والصغرى، وعند مستوى 0.05 في الحرارة العظمى. وتشير قيم معامل التحديد المنخفضة نسبياً ($0.11-0.19$) إلى أن الاتجاه الخطي لا يفسر إلا جزءاً محدوداً من التباين بين السنوات، وأن التذبذب من سنة إلى أخرى يظل كبيراً، خاصةً في الحرارة العظمى.

وأظهر اختبار بيتيت وجود نقطة تحول دالة إحصائياً ($p = 0.03$) في سلسلة الحرارة المتوسطة بعد سنة 1998؛ إذ ارتفع متوسط الحرارة من 17.94°م للفترة 1981–1998 إلى 18.42°م للفترة 1999–2025، أي بزيادة قدرها 0.48°م . أما سلسلتا الحرارة العظمى والصغرى فلم تظهر فيهما نقطة تحول دالة عند مستوى 0.05 ($p = 0.08$) و 0.12 (p على الترتيب)، مما يشير إلى أن الارتفاع فيهما كان تدريجياً أكثر منه مفاجئاً.

جدول (12) السنوات الحرارية الاستثنائية في منطقة الدراسة (انحراف يزيد على انحراف معياري واحد عن معدل 1991–

(2020)

المتغير	السنوات الدافئة الاستثنائية	السنوات الباردة الاستثنائية
الحرارة المتوسطة ($\sigma = 0.50^{\circ}\text{م}$)	1999، 2001، 2002، 2010، 2016، 2021، 2022، 2025، 2024	1983، 1984، 1986، 1991، 1992، 2011، 2015، 2017
الحرارة العظمى ($\sigma = 0.88^{\circ}\text{م}$)	2001، 2003، 2010، 2016، 2021، 2022، 2024	1986، 1991، 1992، 2011، 2012
الحرارة الصغرى ($\sigma = 0.42^{\circ}\text{م}$)	1989، 1999، 2002، 2003، 2018، 2021، 2022، 2025، 2024	1981، 1982، 1983، 1985، 1986، 1991، 1996، 2005، 2006، 2007، 2017

المصدر: عمل الباحثة اعتماداً على بيانات منصة (NASA POWER نموذج MERRA-2) للفترة 1981–2025.

يوضح الجدول (12) أن معظم السنوات الباردة الاستثنائية تركزت في الثمانينات وأوائل التسعينات، مع عودة بعضها في العقد 2011–2020، في حين تركزت السنوات الدافئة الاستثنائية في العقدين الأخيرين. ولم تُسجل أي سنة باردة استثنائية بعد سنة 2017 في أي من المتغيرات الثلاثة، بينما جاءت أربع من سنوات الفترة 2021–2025 الخمس سنوات دافئة استثنائية في الحارتين المتوسطة والصغرى، وثلاث منها في الحرارة العظمى. وتُعد سنتا 2010 و 2021 الأكثر استثنائية؛ إذ ظهرت ضمن السنوات الدافئة في الحارتين المتوسطة والعظمى، وظهرت سنة 2021 كذلك في الحرارة الصغرى.

سادساً: المناقشة

تتفق نتائج الدراسة مع الاتجاه العالمي نحو الاحترار الذي وثقته تحليلات (Hansen et al., 2010; Lenssen et al., 2019; GISTEMP Team, 2025) وتقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC, 2021)، ومع ما تشير إليه الأدبيات من تسارع التغير المناخي في حوض البحر المتوسط (Cramer et al., 2018). كما أن تركيز الاحترار في الفترة 2021–2025، وتذبذب

العقود السابقة بين الارتفاع والانخفاض، يشير إلى أن درجات الحرارة في المنطقة تتأثر بالتقلبات المناخية الطبيعية من سنة إلى أخرى، إلى جانب الاتجاه العام طويل المدى.

وينبغي قراءة هذه النتائج في ضوء حدود البيانات المستخدمة؛ فالقيم مستمدة من نموذج إعادة تحليل يمثل متوسط مساحة واسعة نسبياً، وقد تختلف قيمه المطلقة عن ظروف الموقع الفعلية في منطقة جبلية. غير أن اتساق الاتجاه الموجب في المتغيرات الثلاثة، ودلالته الإحصائية، يعززان الثقة في أن المنطقة شهدت احتراراً فعلياً خلال فترة الدراسة. وفي ضوء هذه النتائج يمكن مناقشة الانعكاسات المحتملة على البيئة المحلية على النحو الآتي:

1- الزراعة

يشير تجاوز الحرارة العظمى 40°م في أشهر الصيف، مع اتجاهها الصاعد، إلى ضغط حراري متزايد على المحاصيل الصيفية، وقد يؤدي استمرار هذا الاتجاه إلى تقصير موسم النمو وزيادة الاحتياجات المائية للري. وفي المقابل، تجعل الحرارة الصغرى القريبة من الصفر في يناير وفبراير خطر الصقيع قائماً على المحاصيل والأشجار المثمرة في الشتاء، وإن كان ارتفاع الحرارة الصغرى قد يقلل من تكراره مستقبلاً ويغير مواعيد نمو بعض المحاصيل الشتوية. وتظل الأشهر المعتدلة (أبريل ومايو وأكتوبر) الفترات الأكثر ملاءمة للأنشطة الزراعية.

2- الموارد المائية

يزيد ارتفاع درجات الحرارة من معدلات التبخر والتبخر-النتج، مما يرفع الطلب على المياه ويزيد الضغط على الموارد المائية المتاحة في المنطقة. كما أن ارتفاع الحرارة الصغرى يعني ليالي أهدأ تستمر فيها خسائر التبخر لفترة أطول من اليوم. وتُعد الموارد المائية من أكثر القطاعات تعرضاً لمخاطر التغير المناخي في حوض البحر المتوسط. (Cramer et al., 2018)

3- الصحة العامة

يزيد تكرار السنوات الدافئة الاستثنائية في الفترة الأخيرة، وارتفاع الحرارة العظمى صيفاً إلى ما يتجاوز 40°م، من احتمالية التعرض للإجهاد الحراري والأمراض المرتبطة بالحرارة، خاصة لدى كبار السن والعاملين في الأعمال الخارجية. كما أن ارتفاع الحرارة الصغرى يقلل من برودة الليل التي تساعد الجسم على التعافي من حرارة النهار.

ويُلاحظ أن هذه الانعكاسات استُنتجت من خصائص درجات الحرارة وحدها، وتحتاج إلى دراسات تعتمد على بيانات زراعية ومائية وصحية فعلية لقياسها كمياً.

سابعاً: الخاتمة والاستنتاجات

تناول هذا البحث دراسة وتحليل درجات الحرارة في منطقة الأصابعة خلال الفترة 1981-2025 باستخدام بيانات منصة NASA POWER المستمدة من نموذج MERRA-2، من خلال تحليل القيم الشهرية والفصلية والعقدية والسوية للحرارة المتوسطة والعظمى والصغرى، واختبار اتجاهاتها الزمنية إحصائياً. وخلصت الدراسة إلى الاستنتاجات الآتية:

- تتميز المنطقة بتباين حراري واسع بين الفصول؛ إذ يبلغ المدى بين أحر الشهور وأبردها نحو 19.7°م في الحرارة المتوسطة، وتقترب الحرارة الصغرى من الصفر في يناير وفبراير، بينما تتجاوز الحرارة العظمى 40°م في أشهر الصيف، وهو ما يعكس الطابع القاري شبه الجاف للمنطقة.
- الخريف أدفأ من الربيع بنحو 3.1°م في الحرارة المتوسطة، وبنحو 4.8°م في الحرارة الصغرى.
- سجلت العناصر الحرارية الثلاثة اتجاهًا موجباً ذا دلالة إحصائية، بمعدل يتراوح بين 0.17 و 0.20°م لكل عقد وفق ميل سن، أي بارتفاع كلي يتراوح بين 0.7 و 0.9°م خلال فترة الدراسة، وهو ما يؤكد فرضية الدراسة.
- لم يكن الاحترار منتظماً؛ إذ تخللته تذبذبات عقدية، وتركز أكبر انحراف موجب في الفترة 2021–2025، كما أظهرت الحرارة المتوسطة تحولاً دالاً في متوسطها بعد سنة 1998.
- تركزت السنوات الباردة الاستثنائية في بداية فترة الدراسة، والدافئة في نهايتها، ولم تُسجَل أي سنة باردة استثنائية بعد سنة 2017.
- يُتوقع أن تنعكس هذه التغيرات على الزراعة والموارد المائية والصحة العامة، من خلال زيادة الإجهاد الحراري على المحاصيل والسكان، وارتفاع الطلب على المياه.

ثامناً: التوصيات

1- التوصيات المؤسسية والبحثية

- إنشاء محطة أرصاد جوية محلية في الأصابعة لرصد درجات الحرارة والعناصر المناخية الأخرى بدقة.
- دعم الدراسات المناخية المستقبلية لرصد التغيرات بشكل دوري وتوفير قاعدة بيانات محلية.
- مقارنة بيانات NASA POWER بأرصاد أقرب محطة أرضية متاحة، للتحقق من دقتها في المناطق الجبلية.
- تحليل البيانات اليومية لدراسة موجات الحر والبرد وأيام الصقيع باستخدام مؤشرات الظواهر المناخية المتطرفة المعتمدة دولياً.
- دراسة الاتجاهات الفصلية لدرجات الحرارة، وربطها بعناصر المناخ الأخرى كالأمطار والرطوبة.
- تقدير التبخر-النتح المرجعي من بيانات الحرارة باستخدام معادلة Hargreaves–Samani (Hargreaves & Samani, 1985) لقياس أثر الاحترار على الاحتياجات المائية.

2- التوصيات الزراعية

- اعتماد محاصيل أكثر مقاومة للجفاف والحرارة.
- إدخال تقنيات حديثة للري مثل الري بالتنقيط لتقليل استهلاك المياه.

3- التوصيات المائية

- وضع خطط لترشيد الاستهلاك المائي على مستوى الأفراد والمؤسسات.

- تطوير مشاريع حصاد مياه الأمطار وتخزينها للاستفادة منها في فترات الجفاف.

4- التوصيات الصحية

- تعزيز الوعي الصحي بمخاطر موجات الحر والإجهاد الحراري.
- إدخال برامج وقائية لمواجهة الأمراض المرتبطة بالحرارة.

5- التوصيات الاستراتيجية

- صياغة سياسات تكيفية طويلة المدى لمواجهة التغيرات المناخية.
- إشراك المجتمع المحلي في برامج التوعية والتكيف.
- الاستثمار في مشاريع مستدامة تضمن حماية البيئة والموارد الطبيعية.

المراجع

أولاً: المراجع العربية

- أبو سيف، نجية علي عبد الرحيم. (2026). التقييم الفيزيائي للخصائص البصرية للغلاف الجوي وتحليل الإشعاع الشمسي فوق ترهونة – ليبيا باستخدام بيانات NASA POWER. *مجلة روافد المعرفة*، 6(12). كلية العلوم، جامعة الزيتونة.
- الحداد، عبد العاطي أحمد محمد. (2025). الهطول المطري وقياس مؤشر الجفاف الاستطلاعي لمدينة ترهونة – شمال غرب ليبيا. *مجلة روافد المعرفة*، 9(9). كلية العلوم، جامعة الزيتونة.

ثانياً: المراجع الأجنبية

- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N., & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8(11), 972–980. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, A. M., Gu, W., . . . Zhao, B. (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30(14), 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- GISTEMP Team. (2025). *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4* [Data set]. NASA Goddard Institute for Space Studies. <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

-
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2010). Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 48(4), RG4004. <https://doi.org/10.1029/2010RG000345>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- 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 Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods* (4th ed.). Charles Griffin.
- Lenssen, N. J. L., Schmidt, G. A., Hansen, J. E., Menne, M. J., Persin, A., Ruedy, R., & Zyss, D. (2019). Improvements in the GISTEMP uncertainty model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(12), 6307–6326. <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>
- Lenssen, N., Schmidt, G. A., Hendrickson, M., Jacobs, P., Menne, M. J., & Ruedy, R. (2024). A NASA GISTEMPv4 observational uncertainty ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(17), e2023JD040179. <https://doi.org/10.1029/2023JD040179>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- NASA Langley Research Center. (n.d.). *Data processing*. POWER documentation. Retrieved October 23, 2026, from <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/data/processing/>
- NASA Langley Research Center. (2025). *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) project* [Data set]. <https://power.larc.nasa.gov/>
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126–135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- World Meteorological Organization. (2017). *WMO guidelines on the calculation of climate normals* (WMO-No. 1203). WMO.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 16(9), 1807–1829. <https://doi.org/10.1002/hyp.1095>