التغير الزمني لشدة التطرف الحراري في مدينة القاهرة (١٩٩٠-٢٠٢٢م)

سوسن عبد المنصف عبد العظيم[١]، عبد العزيز عبد اللطيف يوسف[٢]، وليد عباس عبد الراضي[٣]

المُستخلص:

أضحت الأحداث المناخية المتطرفة أحد أهم مجالات البحث في علوم الغلاف الجوي، إن لم تكن الأهم على الإطلاق، خاصَة مع زيادة تركيز غازات الاحتباس الحراري الناجمة عن الأنشطة البشرية وما نجم عنها من زيادة في شدة وتكرارية ومدة نوبات التطرف المناخي. وتشتمل الظواهر المناخية المتطرفة على صورٍ عدة، منها التطرف الحراري، وموجات الحر والبرد، والأعاصير، والفيضانات، والسيول، والجفاف. ورغم أهميتها، تواجه دراسة التطرف المناخي، خاصَة درجة الحرارة والتساقط، عقبات عدة في مصر؛ أهمها صعوبة الحصول على البيانات اليومية اللازمة للكشف عن التطرف ومعالجة تغيره. اعتمدت الدراسة الحالية على بيانات الأرصاد الجوية اليومية لمحطة مطار القاهرة الدولي كنموذج للاستدلال على التغير الزمني في شدة التطرف الحراري بمدينة القاهرة خلال الفترة ١٩٩٠-٢٠٢٢م (٣٣ عامًا). وقد تم معالجة البيانات وتحليلها باستخدام برنامج RClimDEX؛ لإنتاج سبعة مؤشرات خاصة بشدة التطرف الحراري وتحليل اتجاهها العام، بالإضافة إلى مقارنة جميع الإحصاءات الخاصة بالاتجاه العام ومعدل التغير من خلال اختبار Mann-Kendall test، وتحليل Theil-Sen slope. كما اعتمدت الدراسة على التحليل الإحصائي باستخدام Box Plot للكشف عن التطرف والشذوذ الحراري في السلسة المناخية قيد الدراسة؛ ومن ثم تحليل التباين الفصلي لكل مؤشر. كشفت النتائج أن كلًا من درجات الحرارة الصغرى والعظمى قد شهدتا ارتفاعًا ملحوظًا؛ مما يدل عن اتجاه عام نحو الاحترار، وليس مجرد تغير في درجات الحرارة القصوى والدنيا. فقد شهدت شدة التطرف البارد (خلال الليل) ومؤشرات أبرد ليلة، أدفأ ليلة، ومتوسط درجات الحرارة الصغرى اتجاهًا عامًا صاعدًا خلال فترة الدراسة بنحو ٥,١°س، ٣,٨°س، ٢,٦°س على التوالي، وبدلالة معنوية قوية (p-value < 0.01). على الجانب الآخر، فقد أظهرت النتائج تغيرًا أقل حدة في مؤشرات شدة التطرف الحار (خلال النهار)، بقيم تغير كلي بلغت ٠,٢°س، ١,٦°س، ١,٢°س في مؤشرات أبرد نهار، أحر نهار، ومتوسط درجات الحرارة العظمى على

---

(١) معيد، قسم الجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية، كلية الآداب، جامعة عين شمس.

(٢) أستاذ الجغرافيا الطبيعية، قسم الجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية، كلية الآداب، جامعة عين شمس.

(٣) أستاذ جغرافية المناخ وتطبيقات الاستشعار من بعد ونظم المعلومات الجغرافية المساعد، قسم الجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية كلية الآداب، جامعة عين شمس.

الترتيب. وقد اتسم التغير في تلك المؤشرات باتجاه عام نحو الارتفاع أيضًا، ولكن بدون دلالة معنوية واضحة، عدا المؤشر الأخير. خلصت الدراسة إلى أن مدينة القاهرة قد شهدت احترارًا واضحًا في شدة التطرف الحراري على مدار اليوم خلال العقود الثلاثة المنصرمة، ولكن بقوة أكبر ودلالة معنوية أبرز خلال الليل عن النهار. وهو ما أدى بشكل واضح إلى انخفاض في المدى الحراري اليومي بالمدينة. وقد قدم ذلك دلالة لا لبس فيها على التأثير الواضح للعوامل المحلية في احترار الغلاف الجوي للمدينة، خاصًة ما يتعلق بدور النمو الحضري حول محطات الأرصاد، إضافًة إلى المؤثرات العامة المرتبطة بالنظام المناخي الإقليمي والعام في رفع درجة الحرارة. ومن ثم يمكن القول إن الاحترار الحضري المتسارع بالقاهرة هو نتاج مكونين رئيسيين، أحدهما محلي والآخر إقليمي/عالمي، وهو ما يجب أن يُؤخذ في الاعتبار عند صياغة استراتيجيات مواجهة للتطرف الحراري، سواء على مستوى التخفيف Mitigation أو التكيف Adaptation أو التعديل Adjustment.

الكلمات المفتاحية:

مؤشرات التطرف الحراري، Software RClimDEX، Box Plot، Mann-Kendall Test & Theil-Sen Estimator، الاتجاه العام، مدينة القاهرة.

١. مقدمة الدراسة:

يمثل التغير الزمني عنصرًا جوهريًا وحلقة أساسية في علوم الغلاف الجوي ودراساتها المختلفة. وتعتبر درجة الحرارة هي العنصر الرئيسي في دراسات تغير المناخ، حتى أن الكثير من تلك الدراسات استخدمت مصطلح تغير المناخ كمرادف لتغير درجة الحرارة فقط؛ نتيجًة للدور الأساسي الذي تلعبه درجة الحرارة كمؤثر في بقية عناصر النظام المناخي (وليد عباس، ٢٠٠٩). لذا، يمكن القول إن تغير درجة الحرارة مؤشرًا استدلاليًا كافيًا على حدوث تغيرات في النظام ككل. أشارت العديد من التقارير إلى أن متوسط درجة حرارة العالم قد ارتفع بمقدار ٠,٨°س تقريبًا خلال الفترة ١٨٩٠-١٩٩٠، وبمعدل أسرع (٠,٦°س) خلال الثلاثين عامًا الأخيرة (IPCC, 1995; 1997; 2001; 2007; 2014a; 2014b; 2022). وقد أكدت دراسات متنوعة على ذلك في أجزاء متفرقة من العالم (Easterling et al., 1997; Jones et al., 1999, Li et al., 2010; Peterson et al., 1999)، وفي منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا على المستويين الزمني والمكاني؛ فكانت النتائج تبرهن على اتجاه التغير نحو الاحترار بدلالة معنوية واضحة

خلال العقود القليلة الماضية بكامل المنطقة (El-Asrag., 1999; El Kenawy et al., 2016; Fontaine et al., 2013; Paeth et al., 2009).

تحول الاهتمام في الفترات الأخيرة إلى دراسة التغير الزمني للتطرف المناخي (Almazroui et al., 2014; El Kenawy et al., 2019; Soltani et al., 2015) باعتباره مقياسًا مكملًا للتغير في المتوسطات والمعدلات المناخية، يمكن من خلاله الكشف عن حدوث تغير في النظام المناخي للأرض بشكل شامل ورؤية أوسع. هذا إضافةً إلى كون التغير في التطرف المناخي أقوى وأوضح تأثيرًا في الإنسان والبيئة عما تمثله المتوسطات والمعدلات المناخية وتغيرها الزمني. ورغم أن للتطرف مفاهيم عدة توضحه، ومصطلحات كثيرة تدل عليه، إلا أنه غالبًا ما يُشار إلى التطرف باعتباره تباينًا مناخيًا نسبيًا وليس مطلقًا، حيث يستخدم لغويًا للإشارة إلى المغالاة أو المبالغة، كما يشير التطرف إلى الشذوذ عن الحدود المعتادة أو الطبيعية. ولقد أطلقت الهيئة الحكومية المعنية بتغير المناخ IPCC على المناخ المتطرف أنه حدث نادر في مكان ما خلال وقت محدد من العام. ومن ثم فإن التطرف حدثًا مقيدًا زمنيًا ومكانيًا، ففي حين يمكن وصف حدث أنه متطرف لمجرد حدوثه في مكان ووقت معينين، فإن نفس الحدث يُعتبر عاديًا ومعتادًا إذا تم رصده في مكان آخر على سطح الأرض، أو في وقت آخر في نفس المكان (IPCC, 2012).

عادًة ما تُصنف الأحداث المناخية المتطرفة وفقًا للسمات أو الخصائص التي تميزها، وهي الشدة Intensity، التكرارية Frequency، المدة Duration، الامتداد المكاني Spatial scale، وما إذا كانت أحداثًا متطرفة بسيطة تعتمد على عنصر مناخي واحد، أو مركبة تتشكل من تطرف عدة عناصر في نفس الوقت Multivariate Dependencies (Stephenson, 2008). ومن ثم فإن التطرف متنوع بشكل قد يجعل الظواهر المناخية المتطرفة معقدة للغاية من حيث الفهم والتصنيف. على سبيل المثال، ترتبط الأعاصير برياح قوية ورطوبة نسبية عالية وسحب كثيفة جدًا ومطر شديد، بالإضافة إلى البرودة القارسة. وتعتبر الشدة والتكرارية والمدة هي المعايير الأساسية لتصنيف ودراسة التطرف الحراري. حيث تشير شدة التطرف الحراري إلى قوته، أي الفارق بين درجة الحرارة المتطرفة أو الشاذة وتلك المعتادة. فكلما زاد الفارق كان التطرق أقوى وأشد. أما تكرارية التطرف الحراري فهي معدل حدوثه زمنيًا، سواء على المستوى الشهري أو الفصلي أو السنوي. أخيرًا فإن مدة التطرف الحراري يشير إلى الوقت الذي يستغرقه الحدث المتطرف الواحد بالأيام، ما يُطلق عليه نوبة التطرف Spell.

يبدو جليًا مما سبق أن دراسة التطرف الحراري تتطلب بيانات على مستوى زمني تفصيلي أكثر مما تحتاج إليه الدراسات المناخية الأخرى، حيث يجب توفر سلسلة زمنية من بيانات درجة الحرارة اليومية الفعلية أو المطلقة Absolute observations، وليس المتوسطات أو المعدلات الشهرية أو الفصلية أو السنوية كما هو معتاد في دراسات الغلاف الجوي. كما يجب توفر هذه السلسلة لفترة زمنية طويلة (لا تقل عن ٣٠ عامًا) تسمح بالكشف عن نتائج عالية الدقة والموثوقية لسمات التطرف الحراري. كما يجب أن تتوفر البيانات على مستوى درجات الحرارة القصوى المطلقة والدنيا المطلقة، بما يسمح بدراسة مؤشرات التطرف الحار والبارد بشكل منفصل، للكشف عن سمات التطرف على مدار اليوم نهارًا وليلًا.

في ضوء ذلك تعتمد الدراسة الحالية على السلسلة الزمنية لدرجات الحرارة اليومية المسجلة في محطة مطار القاهرة الدولي خلال الفترة ١٩٩٠-٢٠٢٢ للكشف عن سمات شدة التطرف الحراري ليلًا ونهارًا في مدينة القاهرة، وتأثير ذلك في المدى الحراري اليومي. ويمثل برنامج RClimDEX واختبار Mann-Kendall، وتحليل Theil-Sen أساليب وأدوات المعالجة الرئيسية لإنتاج سبعة مؤشرات خاصة بشدة التطرف الحراري وتحليل اتجاهها العام. كما يستخدم العمل التحليل الإحصائي باستخدام Box Plot للكشف عن التطرف والشذوذ الحراري في السلسة المناخية قيد الدراسة؛ ومن ثم تحليل التباين الفصلي لكل مؤشر. وسيركز التناول على ثلاثة مباحث رئيسية، هي (١) التباين والاتجاه العام السنوي والفصلي لشدة التطرف البارد (٢) التباين والاتجاه العام السنوي والفصلي لشدة التطرف الحار (٣) التباين والاتجاه العام السنوي والفصلي للمدى الحراري اليومي.

١-١. الدراسات السابقة:

جاء التطرف الحراري وتباينه الزمني والمكاني واتجاهه العام محورًا للاهتمام في كثير من الدراسات العربية والأجنبية. استخدمت دراسة محمد عبد العال إبراهيم (٢٠١٨) ثلاثة عشر مؤشرًا لقياس شدة وتكرارية ومدة التطرف الحراري، وذلك بهدف تقييم الاتجاهات الزمانية والمكانية لتطرف درجة الحرارة اليومية في الدلتا المصرية وعلاقة ذلك ببعض أنماط الدورة العامة للهواء خلال الفترة ١٩٦٠-٢٠١٠م. اعتمادًا على السلسلة الزمنية اليومية لدرجات الحرارة القصوى والدنيا المطلقة من قاعدة برينستون PRINCETON الشبكية. وقد بينت نتائج الدراسة وجود اتجاهًا عامًا نحو الاحترار في الدلتا المصرية خاصًة خلال فصلي الصيف والربيع، كما أوضحت وجود تناقصا واضحًا لمؤشرات التطرف الباردة، مع التأكيد على أن نمط تذبذب شمال الأطلسي هو أكثر أنماط الدورة الهوائية العامة تأثيرا في معظم مؤشرات التطرف الحراري.

جاءت دراسة أخرى (El Kenawy et al., 2019) للتطرف الحراري بمنظور أكثر اتساعا، حيث اعتمدت على ٢٣ مؤشرًا و٤٠ محطة رصد جوي لدراسة التطرف الحراري في مصر خلال الفترة ١٩٨٣-٢٠١٥ من خلال الأساليب الإحصائية اللابارامترية مثل اختبار Mann-Kendall Test (Kendall, 1975). أكدت نتائج الدراسة على أن تكرارية وشدة مؤشرات التطرف الحار تتدرج مكانيًا من جنوب شرق مصر حتى شمالها الغربي. بينما كانت شدة وتكرارية مؤشرات التطرف البارد أقل مقارنًة بمؤشرات التطرف الحار. كما توصلت الدراسة إلى أن موجات الحر على ساحل البحر الأحمر تحدث نتيجة للرياح الشرقية القادمة من شبة الجزيرة العربية وهضبة إيران، بينما تنجم موجات البرد بسبب الكتل الهوائية الباردة القادمة من أوروبا ومن المحيط الأطلسي. وضحت الدراسة أيضًا وجود اتجاهًا عامًا نحو الزيادة في مؤشرات التطرف الحارة بدلالة معنوية واضحة، بينما وجدت الدراسة اتجاهًا عامًا نحو الانخفاض في مؤشرات التطرف البارد بدون دلالة معنوية واضحة.

ركزت دراسة أخرى (Gamal, 2019) على مستوى مكاني أصغر، وذلك من خلال تحليل التطرف الحراري في القاهرة الكبرى، اعتمادًا على بيانات أربعة محطات للرصد الجوي، وهم مطار القاهرة الدولي والجيزة وحلوان وبهتيم خلال الفترة ١٩٤٨-٢٠١٥. وقد قامت المعالجة بتقسيم البيانات إلى فترتين فرعيتين (١٩٤٨-١٩٧٨ & ١٩٧٩-٢٠١٥). وخلصت الدراسة إلى وجود اتجاهًا هابطًا في درجات الحرارة بالفترة الأولى واتجاهًا صاعدًا في الثانية، ولكنها لم تتناول أي تحليل أو معالجة لسمات المناخ التفصيلي للتطرف الحراري ولم تفسر أي من أنماطها المكانية في ضوء التخطيط الحضري للإقليم.

جاءت دراسة (رباب عبد الحكيم، ٢٠٢١) في استعراض مشكلة أثر التطرف المناخي في المواقع الأثرية. وانصب تحليل التطرف على دراسة العوامل المؤثرة في التطرف الحراري في مصر، وبيان خصائصه وأبعاده المكانية والزمنية والاتجاهية. وأخيرًا ناقشت الدراسة أثر التطرف الحراري في تلف الآثار المصرية القديمة.

تناولت دراسة (Soltani et al., 2015) التغيرات المكانية/الزمنية للمؤشرات المناخية المتطرفة في إيران (١٩٧٥-٢٠١٠م). توصلت الدراسة إلى أن درجات الحرارة العظمى تتجه نحو الزيادة بجميع المؤشرات خلال الفترة الفرعية (١٩٩٥-٢٠١٠م). كما انخفض عدد الأيام والليالي الباردة بمقدار ٣-٤ أيام/عقد، مع زيادة عدد الأيام والليالي الدافئة بمقدار ١٣ يومًا/عقد. عالجت دراسة (Almazroui et al., 2014) مؤشرات درجات الحرارة الصغرى والعظمى للمملكة العربية السعودية (١٩٨١-٢٠١٠م). ووجدت الدراسة أن ٩٢٪

من مؤشرات الدفء قد شهدت اتجاهًا عامًا نحو الزيادة بدلالة معنوية واضحة، مع وجود اتجاهًا نحو الانخفاض في مؤشرات البرودة.

عالميًا حللت دراسة (Alexander, 2015) مدى التطرف في عنصري الحرارة والتساقط، ومدى اتساق البيانات في أي تحليلات، وما هي المبادرات الدولية الموجودة لتحسين توافر البيانات وتطوير أساليب لتقييم تجانس السلاسل الزمنية من خلال ٢٥ مؤشرًا، وفقًا لجميع خصائص التطرف من الشدة والتكرارية والفترة الزمنية. بشكل عام، يمكن القول استمرار مؤشرات التطرف الحارة في الزيادة، عكس مؤشرات التطرف الباردة، التي أوضحت تناقصًا واضحًا خلال فترة الدراسة منذ أوائل القرن العشرين حتى عام ٢٠١٣. بينما أظهرت مؤشرات التساقط ارتفاع معدلات التساقط من حيث الشدة والتكرارية والفترة الزمنية. كما أوضحت الدراسة أن افتقار القدرة على الوصول إلى البيانات في العديد من المناطق مثل إفريقيا وأمريكا الجنوبية أدى بدوره إلى الافتقار في مقارنة النتائج وتقييمها مكانيًا.

كشفت دراسة (Kostopoulou & Jones, 2005) عن تقييم الظواهر المناخية المتطرفة لعنصري الحرارة والتساقط في شرق البحر الأبيض المتوسط، حيث تم حساب الاتجاه العام للمؤشرات على المستويين الفصلي والسنوي خلال الفترة (١٩٥٨-٢٠٠٠م)؛ لتحليل التغيرات الزمنية في منطقة شرق البحر المتوسط. وقد أظهرت النتائج بشكل جلي ازدياد الاتجاه العام للتطرف الحراري سواء لدرجات الحرارة العظمى أو الصغرى في فصل الصيف، وذلك بدلالة معنوية قوية، بالإضافة إلى النوبات الحارة. وقد انخفضت بشكل واضح مؤشرات تكرارية الليالي الباردة خلال فصل الشتاء. أما مؤشرات التساقط فقد شهدت تناقضات إقليمية مختلفة، حيث ارتفع الاتجاه العام في معدلات التساقط في وسط منطقة البحر المتوسط بدلالة معنوية قوية، والتي دلت عنها المحطات الإيطالية. على النقيض، أظهر النصف الشرقي للمنطقة انخفاضًا في الاتجاه العام لمعدلات التساقط في جميع المؤشرات الخاصة به، وأشار إلى ظروف أكثر جفافًا في الآونة الأخيرة.

أظهرت دراسة (Imran et al., 2022) التباين المكاني في الاتجاه العام لدرجات الحرارة والتساقط من خلال تطبيق ٢٩ مؤشرًا خلال الفترة (١٩٨١-٢٠٢٠م) في بنجلاديش. وكانت هذه هي الدراسة الأولى التي بحثت في اتجاهات المناخ المتطرف في بنجلاديش، اعتمادًا على البيانات الشبكية عالية الدقة (٠,٥°×٠,٥°) بدلًا من محطات الرصد الجوي. أوضحت النتائج ارتفاع الاتجاه العام في متوسط درجات الحرارة العظمى والصغرى بقيمة +٣٨، +٢٥°س/عقد على التوالي. حيث زادت الأيام الحارة والليالي الدافئة بنحو ١٢,٧٥ يوم/عقد، مع أسرع معدل ارتفاع في درجات الحرارة في الجزء الشرقي من

البلاد. على النقيض تمامًا، بلغت أقصى درجات الانخفاض في كل من الأيام الباردة والليالي الباردة بمعدل ٧ يوم/عقد. في حين، كشفت الدراسات السابقة عن ارتفاع التغير الزمني لدرجات الحرارة الصغرى بمعدل أسرع من درجات الحرارة العظمى. بينما في الدراسة الحالية زادت درجات الحرارة العظمى بمعدل أسرع من درجات الحرارة الصغرى، وتلك الزيادة بدلالة معنوية واضحة في عنصري الحرارة والتساقط على حدٍ سواء؛ نظرًا للاعتماد على البيانات الشبكية عالية الجودة.

١-٢. أهداف الدراسة:

تهدف الدراسة بشكل رئيسي إلى الكشف عن التغير الزمني في شدة التطرف الحراري بمدينة القاهرة (١٩٩٠-٢٠٢٢م)، وذلك من خلال الاعتماد على أحدث التقنيات برنامج (RClimDEX). وهي تسعى من خلال ذلك إلى تكوين صورة شاملة ومكتملة عن التغير الزمني للشدة التطرف الحراري عبر:

- بيان ملامح التغير الزمني للتطرف الحراري تفصيلًا من خلال معالجة مؤشرات شدة التطرف على مستوى النهار والليل، وعلى مدار اليوم، وذلك على أساس فصلي وسنوي.
- معرفة مدى التوافق بين التغير الزمني للتطرف الحراري من جانب، وبين التغير الزمني لمتوسطات درجة الحرارة على الجانب الآخر.
- الكشف عن نمط الاتجاه العام للتطرف، وما إذا كان يتوافق مع نظرية الاحترار العالمي أم يخالفه.
- تقييم سمات التغير الزمني للتطرف الحراري وصولًا إلى استنتاج يتعلق بدور المؤثرات المحلية والإقليمية والعالمية في تغير شدة التطرف الحراري بمدينة القاهرة عبر الزمن.

٢. منطقة الدراسة:

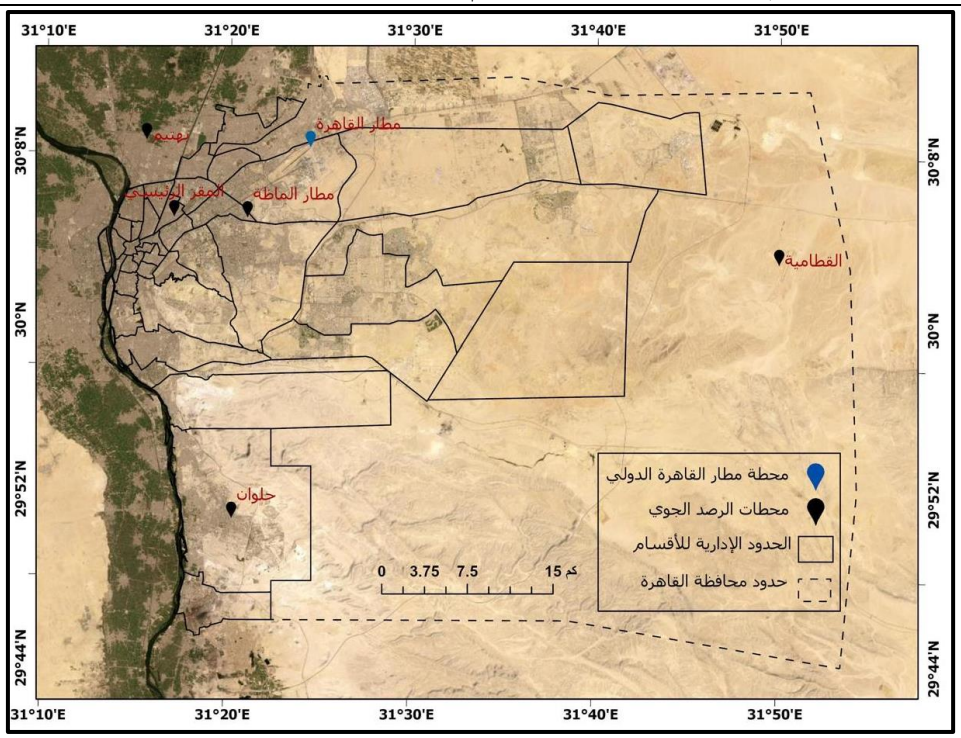
تقع القاهرة في العروض دون المدارية ضمن أكبر امتداد للمناخ شديد الجفاف على سطح الأرض، وهي الصحراء الكبرى. تتسم القاهرة بمناخ حار نادر المطر، مع ارتفاع الرطوبة في كثير من الأحيان؛ نتيجة لظروف المناخ العام، وتأثرًا بامتداد نهر النيل غرب المدينة. يتراوح متوسط درجة حرارة القاهرة بين ٩,٠-٢٤,٨°س في الشتاء، وفي الصيف بين ٢٠,١°س-٣٤,٧°س، في حين ترتفع إلى ٤٠,٠°س أثناء التطرف الحراري بالصيف (Abou El-Magd et al., 2016; Abutaleb et al., 2015). تتعرض القاهرة لمقدار كبير من الإشعاع الشمسي، والتي تصل إلى حد إمكانية تحويلها إلى طاقة كهربائية باستخدام الخلايا الشمسية (Kosmopoulos et al., 2018). حيث يسود القاهرة ضمن الحزام الشمسي والمناخ شديد الجفاف Hyper-arid وفقًا لتصنيف منظمة اليونسكو (UNESCO, 1977). وتضم

القاهرة تنوعًا يجعل لكتلتها المبنية ظهيرًا يجمع بين المسطحات الصحراوية في الشمال الشرقي والشرق والجنوب، وبين المسطحات الخضراء والمياه في الغرب والشمال الغربي، شكل (١).

٣. أدوات الدراسة وأساليبها:

٣-١. بيانات درجة الحرارة:

تتطلب دراسة التطرف الحراري بيانات ذات مستوى زمني تفصيلي (ساعية أو يومية) خلال سلسلة زمنية طويلة (لا تقل عن ٣٠ عامًا) بما يمكن معه الكشف عن سمات التطرف على مستوى درجات الحرارة القصوى المطلقة والدنيا المطلقة، أي دراسة مؤشرات التطرف الحار والبارد بشكل منفصل، للكشف عن سمات التطرف على مدار اليوم نهارًا وليلًا. في ضوء ذلك اعتمد التحليل على مصدر رئيسي للبيانات، وهو السلسلة الزمنية لدرجات الحرارة اليومية المسجلة في محطة مطار القاهرة الدولي خلال الفترة (١٩٩٠-٢٠٢٢م) (٣٣ عامًا). وتمثل محطة القاهرة نموذجًا للاستدلال على التغير الزمني في شدة التطرف الحراري ليلًا ونهارًا في مدينة القاهرة، وتأثير ذلك في المدى الحراري اليومي. وهي نموذج كافي في ضوء الإطار المكاني المحلي للدراسة، خاصَة وأن التباين المكاني للتطرف خارج المجال البحثي للدراسة. وجدير بالذكر، أن جميع الدراسات السابقة أظهرت ثبات نمط التغير الزمني في التطرف الحراري على المستوى المكاني التفصيلي، بما يؤكد على كفاية محطة واحدة فقط لرصد التغير الزمني في التطرف الحراري لمدينة القاهرة. وقد تم الحصول على البيانات اليومية (٢٤ ألف قيمة تقريبًا) لمحطة مطار القاهرة الدولي من موقع "الإدارة الوطنية للغلاف الجوي والمحيطات (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)"، وهو ./https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web



شكل (١) التقسيم الإداري لمدينة القاهرة ومحطات الرصد الجوي بالمنطقة

٣-٢. مؤشرات التطرف الحراري:

تعتمد دراسة التطرف المناخي على مجموعة من المؤشرات المرتبطة بالغلاف الجوي. وقد تشكل في عام ٢٠١٢ مشروع تعاون مناخي تحت اسم Climdex بهدف تطوير مؤشرات للتطرف المناخي وإنتاج برنامج لاستخلاص هذه المؤشرات من البيانات المناخية. يتكون هذا المشروع من فريق يرأسه جامعة New South Wales في سيدني، وبمشاركة سبع هيئات ومؤسسات دولية معنية بالمناخ والتطرف المناخي، وفي مقدمتها منظمة الأرصاد الجوية العالمية WMO. وقد طور فريق من الخبراء التابع للمشروع نحو ٤٩ مؤشرًا لدراسة التطرف في عنصري درجة الحرارة والتساقط، مقسمين بين ٣٤ مؤشرًا لقياس تطرف درجة الحرارة، و١٥ مؤشرًا لقياس تطرف التساقط. وتنقسم مؤشرات التطرف الحراري إلى ١١ مؤشرًا للشدة، ٢١ مؤشرًا للتكرارية، ومؤشرين للمدة. وتتوفر المؤشرات وتوثيقها بالكامل على موقع المشروع https://www.climdex.org.

انتقت الدراسة سبعة مؤشرات لدراسة التغير الزمني في شدة التطرف الحراري داخل مدينة القاهرة، ثلاثة منها لتحليل شدة التطرف الحراري خلال الليل (التطرف البارد أو تطرف درجة الحرارة الصغرى)، وثلاثة أخرى لمعالجة شدة التطرف الحراري خلال النهار (التطرف الحار أو تطرف درجة الحرارة العظمى)، ومؤشر أخير لدراسة التطرف الحراري اليومي. وتتمثل هذه المؤشرات فيما يلي:

- مؤشر أبرد ليلة (TNn) Minimum value of daily minimum temperature.

مؤشر للتطرف البارد يعبر عن أصغر درجة حرارة دنيا مطلقة مسجلة خلال شهر.

- مؤشر أدفأ ليلة (TNx) Maximum value of daily minimum temperature.

مؤشر للتطرف البارد يعبر عن أكبر درجة حرارة دنيا مطلقة مسجلة خلال شهر.

- مؤشر المتوسط اليومي لدرجة الحرارة الصغرى (TNm) Mean daily minimum Temperature.

مؤشر للتطرف البارد يعبر عن متوسط درجة الحرارة الصغرى خلال شهر.

- مؤشر أبرد نهار (TXn) Minimum value of daily maximum temperature.

مؤشر للتطرف الحار يعبر عن أصغر درجة حرارة قصوى مطلقة مسجلة خلال شهر.

- مؤشر أدفأ نهار (TXx) Maximum value of daily maximum temperature.

مؤشر للتطرف الحار يعبر عن أكبر درجة حرارة قصوى مطلقة مسجلة خلال شهر.

- مؤشر المتوسط اليومي لدرجة الحرارة العظمى (TXm) Mean daily maximum Temperature.

مؤشر للتطرف الحار يعبر عن متوسط درجة الحرارة العظمى خلال شهر.

- مؤشر المدى الحراري اليومي (DTR) Daily temperature range.

مؤشر للتطرف اليومي يعبر عن الفارق بين درجتي الحرارة العظمى والصغرى خلال شهر.

٣-٣. معالجة البيانات باستخدام برنامج RClimDEX:

تم تطوير تطبيق RClimDEX 1.1 Statistical Software على يد (Zhang & Yang, 2004) بفرع البحث المناخي بكندا بهدف معالجة البيانات المناخية وحساب مؤشرات التطرف. ثم تغير اسمه فيما بعد إلى ClimPACT. تقوم بنية برنامج RClimDEX على لغة برمجة R، وهي لغة فعالة في التعامل مع البيانات وتحليلها إحصائيًا. تم الاستفادة من البرنامج في إجراء المعالجة الإحصائية لبيانات درجة الحرارة اليومية خلال الفترة (١٩٩٠-٢٠٢٢م)، واستخلاص مؤشرات التطرف الحراري السبعة على المستوى الشهري والفصلي والسنوي، مع تنفيذ تحليل الاتجاه العام لكل مؤشر.

٣-٤. التحليل الإحصائي:

استخدمت الدراسة أسلوبين رئيسيين لتحليل مؤشرات شدة التطرف في درجة الحرارة إحصائيًا. الأسلوب الأول هو أسلوب Box Plot بهدف استخلاص الإحصاءات الوصفية Descriptive Statistics للتطرف الحراري ودراسة تباينه الفصلي والسنوي. وتعتمد المعالجة هنا على مقاييس النزعة المركزية والتشتت والانتشار، وما يرتبط بهما من الكشف عن القيم المتطرفة والشاذة في كل مؤشر. الأسلوب الثاني هو تحليل

الاتجاه العام Trend Analysis من خلال اختبار Mann-Kendall test، وتحليل Theil-Sen slope. ويمكن من خلال هذا التحليل التعرف على الاتجاه العام للتغير الزمني لمؤشرات التطرف الحراري صعودًا وهبوطًا، ومعدل هذا التغير Slope بوحدة °س/عام، ومستوى المعنوية p-value والثقة Confidence level في النتائج، ومقدار الارتباط بين التغير والزمن R/R2.

٤. النتائج والمناقشة:

٤-١. التباين السنوي والفصلي لشدة التطرف البارد واتجاهه العام في القاهرة (١٩٩٠-٢٠٢٢م):

يتناول هذا المبحث دراسة للتباين الزمني وتحليل الاتجاه العام على المستوى الفصلي والسنوي لثلاثة من مؤشرات شدة التطرف الحراري في محطة القاهرة خلال الليل، وهي مؤشرات أبرد ليلة، أدفأ ليلة، ومتوسط درجة الحرارة الصغرى.

- **مؤشر أبرد ليلة TNn:**

يُعبر مؤشر أبرد ليلة عن أصغر درجة حرارة دنيا مطلقة مسجلة خلال شهر، وهو أحد أهم المؤشرات المستخدمة للدلالة على شدة التطرف خلال الليل، أي في درجة الحرارة الصغرى. يوضح جدول (١) التباين السنوي لمؤشرات شدة التطرف الحراري في القاهرة خلال فترة الدراسة (١٩٩٠-٢٠٢٢م). يظهر من الجدول أن مؤشر أبرد ليلة قد سجل أدنى درجات الحرارة الصغرى على الإطلاق، بمتوسط ٤,٢°س (الوسيط ٤,٩°س)، وانحراف معياري ٢,٩°س. وقد بلغت أقل درجة حرارة مسجلة في هذا المؤشر -١,٧°س، ولم تتخط أعلى قيمه ٩,٩°س. ومن ثم فإن أقل درجات الحرارة المسجلة في محطة مطار القاهرة خلال فترة الدراسة سُجلت في مؤشر أبرد ليلة وتخطت مستوى الصفر.

على الجانب الآخر، يصور شكل (٢) الاتجاه العام السنوي لمؤشرات شدة التطرف الحراري بالقاهرة باستخدام برنامج RClimDex خلال نفس الفترة. ويضم جدول (٢) مقارنة بين الإحصاءات الاتجاهية السنوية لشدة التطرف الحراري والمدى الحراري اليومي الناتجة عن كل من برنامج RClimDex، واختبار Mann-Kendall test، وتحليل Theil-Sen slope. ويظهر من الشكل أن مؤشر أبرد ليلة قد شهد اتجاهًا عامًا قويًا نحو الاحترار، بمعدل تزايد حراري بلغ ٠,١٦±٠,٠٤°س/عام. وهو أقوى معدل احترار من بين كل المؤشرات قيد الدراسة كما يوضح الشكل والجدول. وهي نتائج ذات مستوى عالي من الثقة (+٩٩٪)، حيث تحققت بدلالة معنوية قوية مقدارها ٠,٠٠٠١>. وهي أقل من قيمة alpha (٠,٠١)، مما

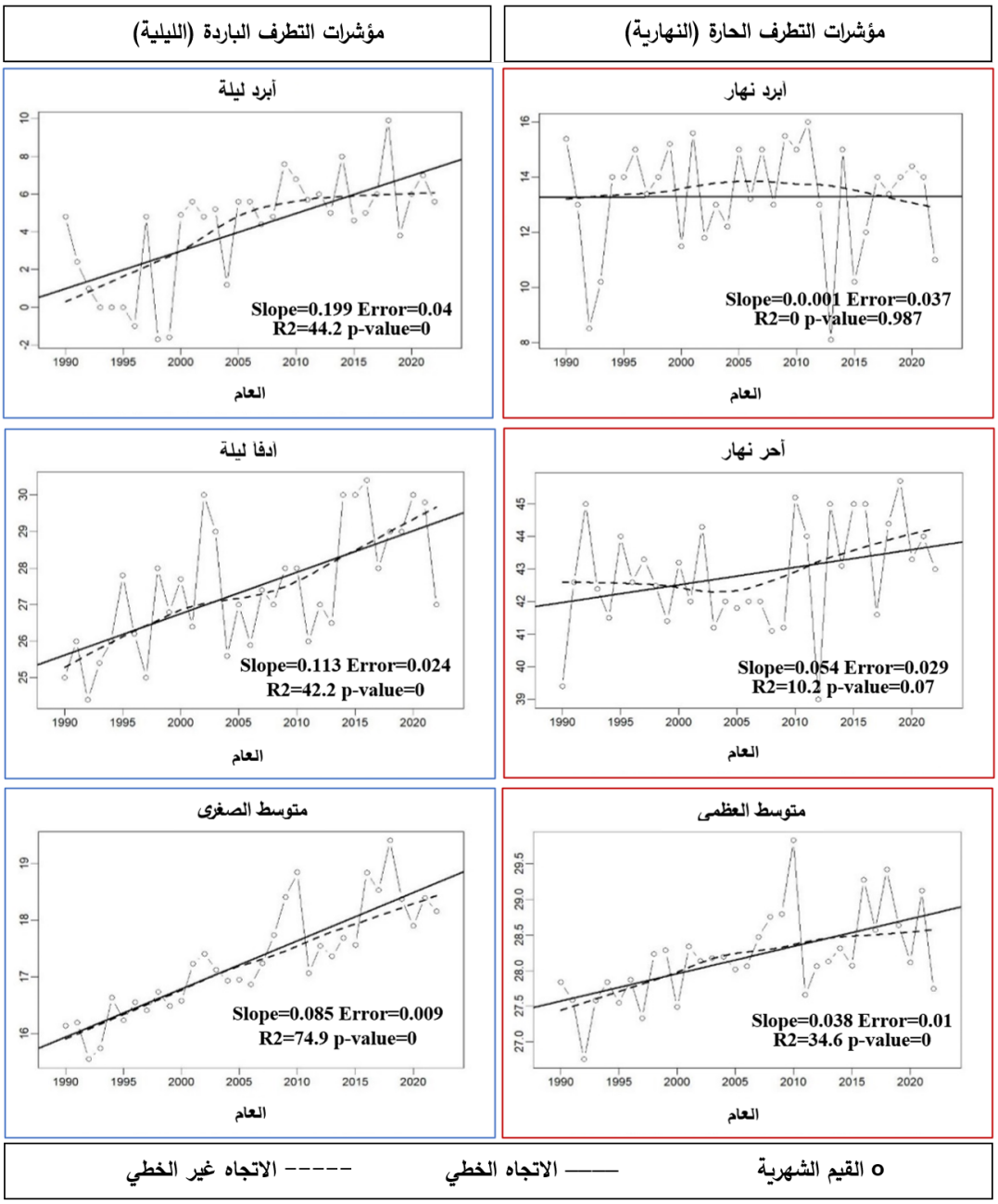
يعني قبول الفرضية البديلة ورفض الفرضية الصفرية التي تنص على عدم وجود اتجاهًا واضحًا بالسلسلة الزمنية للبيانات. وقد وصل معدل الاحترار السنوي في المؤشر إلى ٠,١٦°س، ومن ثَم يمكن حساب إجمالي التغير السنوي لفترة الدراسة بالكامل ليصل إلى ٥,١°س تقريبًا. وقد أظهر تحليل الاتجاه العام وجود علاقة طردية متوسطة بين الزمن ومؤشر أبرد ليلة، حيث بلغ ارتباط كيندال ٠,٦٧. كما يشير الجدول إلى أن احتمالية وجود خطأ في معامل الانحدار ضعيف جدًا، حيث لا تتجاوز قيمته ٠,٠٤°س.

جدول (١) التباين السنوي لشدة التطرف الحراري في مدينة القاهرة (١٩٩٠-٢٠٢٢م)

المؤشر	أدنى قيمة	أعلى قيمة	الربيع الأول	الوسيط	الربيع الثالث	المتوسط	الانحراف المعياري
أبرد ليلة	١,٧٠-	٩,٩٠	٢,٤٠	٤,٩٠	٥,٧٠	٤,١٨	٢,٩٠
أدفأ ليلة	٢٤,٤٠	٣٠,٤٠	٢٦,٠٠	٢٧,٠٠	٢٩,٠٠	٢٧,٤٣	١,٦٩
متوسط الصغرى	١٥,٥٥	١٩,٤١	١٦,٥٨	١٧,٢٤	١٧,٩٠	١٧,٣٠	٠,٩٥
أحر نهار	٣٩,٠٠	٤٥,٧٠	٤١,٨٠	٤٢,٦٠	٤٤,٠٠	٤٢,٨٤	١,٦٤
أبرد نهار	٨,١٠	١٦,٠٠	١٢,٢٠	١٤,٠٠	١٥,٠٠	١٣,٢٩	٢,٠٠
متوسط العظمى	٢٦,٧٦	٢٩,٨٣	٢٧,٨٤	٢٨,١٣	٢٨,٤٧	٢٨,١٩	٠,٦٣
المدى الحراري اليومي	٩,٥٨	١١,٨١	١٠,٥١	١٠,٩٩	١١,٢٣	١٠,٨٩	٠,٥٢

جدول (٢) الفرق بين الإحصاءات الاتجاهية السنوية لشدة التطرف الحراري والمدى الحراري اليومي باستخدام برنامج RClimDex، واختبار Mann-Kendall test، وتحليل Theil-Sen slope (١٩٩٠-٢٠٢٢م)

المؤشرات	RClimDex				Mann-Kendall Test & Theil-Sen Estimator				
	معامل التحديد R^2	معدل التغير Slope	مقدار الخطأ Slope error	الدلالة المعنوية	الارتباط	معدل التغير slope	إجمالي التغير	الانحراف المعياري	الدلالة المعنوية
أبرد ليلة	٤٤,٣٪	٠,١٩٩	٠,٠٤	>٠,٠١	٠,٦٧	٠,١٥٩	٥,٠٩	٢,٩	>٠,٠١
أدفأ ليلة	٤٢,٢٪	٠,١١٣	٠,٠٢٤	>٠,٠١	٠,٦٥	٠,١١٧	٣,٧٤	١,٧	>٠,٠١
الحرارة الصغرى	٧٤,٩٪	٠,٠٨٥	٠,٠٠٩	>٠,٠١	٠,٨٧	٠,٠٧٨	٢,٥٠	٠,٩	>٠,٠١
أحر نهار	١٠,٢٪	٠,٠٥٤	٠,٠٢٩	٠,٠٧	٠,٣٢	٠,٠٥	١,٦٠	١,٦	٠,١٨١
أبرد نهار	٠,٠٪	٠,٠٠١	٠,٠٣٧	٠,٩٨٧	صفر	٠,٠٠٦	٠,١٩٢	٢	٠,٩٨٨
الحرارة العظمى	٣٤,٦٪	٠,٠٣٨	٠,٠١	>٠,٠١	٠,٥٩	٠,٠٣٨	١,٢٢	٠,٦	>٠,٠١
المدى اليومي	٧١,٣٪	٠,٠٤٦-	٠,٠٠٥	>٠,٠١	٠,٨٤-	٠,٠٤٥-	١,٤٤-	٠,٥	>٠,٠١



شكل (٢) الاتجاه العام السنوي لمؤشرات شدة التطرف الحراري بالقاهرة (١٩٩٠-٢٠٢٢م) باستخدام برنامج RClimDex

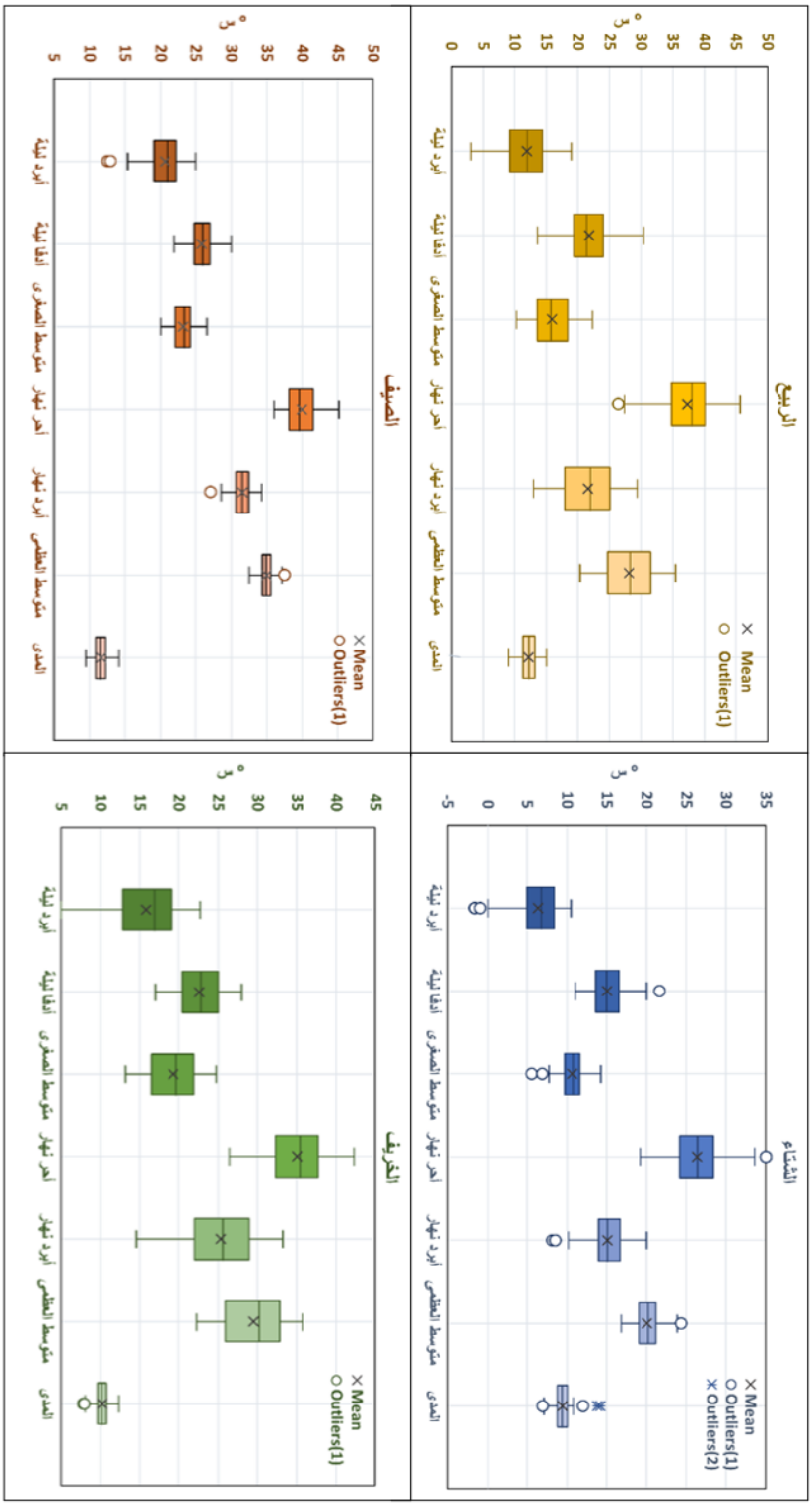
أما على المستوى الفصلي، يوضح شكل (٣) التباين الفصلي لشدة التطرف الحراري والمدى الحراري بالقاهرة خلال الفترة ١٩٩٠-٢٠٢٢ اعتمادًا على مؤشرات التحليل الوصفي (مقاييس النزعة المركزية والتشتت والانتشار) باستخدام تحليل Box Plot. ويلخص جدول (٣) نتائج هذ التحليل. أوضحت نتائج شكل (٣) للتباين الفصلي لشدة التطرف البارد والمبينة بجدول (٣)، أن فصل الشتاء هو الأدنى بين الفصول في قيم مؤشر أبرد ليلة، وذلك بمتوسط ٦,٤°س (الوسيط ٦,٨°س). بينما سجلت قيم المؤشر أقصاها في فصل الصيف بمتوسط ٢٠,٦°س (الوسيط ٢١,٠°س)، أي بفارق يقترب من ١٤,٠°س بين الانقلابين. وقد ظهر فصل الخريف كامتداد لفصل الصيف بمتوسط ١٥,٨°س (الوسيط ١٦,٩°س). في

حين جاءت قيم المؤشر في فصل الربيع أكثر قربًا من فصل الشتاء، بمتوسط ١٢,٠°س (الوسيط ١٢,٠°س). وقد ظهر جليًا من جدول (٣) وشكل (٣) أن الاعتدالين هما أكثر الفصول تشتتًا وتباينًا في درجات الحرارة لمؤشر أبرد ليلة. فقد وصل الانحراف المعياري للمؤشر إلى ٤,٢°س في فصل الخريف، انخفض إلى ٣,٣°س في فصل الربيع. وقد أظهرت قيم الانحراف المعياري أن فصل الصيف هو الأكثر تجانسًا في مؤشر أبرد ليلة (٢,٣°س)، يليه فصل الشتاء (٢,٨°س). وقد تبين من تحليل Box Plot أن أقصى شذوذ متوسط بارد قد تحقق بقيمة -١,٧°س في فصل الشتاء عام ١٩٩٨؛ نتيجة الانخفاض الشديد في درجات الحرارة بمصر خلال هذا العام، وفقًا لما أشارت إليه دراسة (El Kenawy et al., 2019) لوقوع ذروة لأدنى درجات الحرارة في مصر خلال الفترة ١٩٩٣-٢٠٠٠م. كما كشفت النتائج عن وقوع أقصى شذوذ متوسط بارد بمقدار ١٢,٥°س في فصل الصيف عام ٢٠١٦م.

يوضح جدول (٤) إحصاءات تحليل الاتجاه العام لمؤشرات شدة التطرف الحراري والمدى الحراري على المستوى الفصلي خلال الفترة ١٩٩٠-٢٠٢٢ باستخدام اختبار Mann-Kendall Test وتحليل Theil-Sen Estimator. خلصت نتائج تحليل مؤشر أبرد ليلة فصليًا إلى وجود اتجاهًا عامًا نحو الارتفاع والاحترار، بمعدل ٠,١٨، ٠,١٦، ٠,١٠، ٠,٠٤°س/عام، في فصول الشتاء والخريف والصيف

والربيع على الترتيب، بدلالة معنوية قوية بجميع الفصول عدا فصل الربيع. فقد وصلت قيمة الدلالة المعنوية بالربيع إلى ٠,١٣، أي أكبر من قيمة alpha (٠,٠١) مما يعني عدم رفض الفرضية الصفرية التي تنص على عدم وجود اتجاهًا واضحًا بالسلسلة الزمنية للبيانات. وعليه فقد حدث أعلى تغير كلي خلال فترة الدراسة في فصل الشتاء بمقدار ٥,٨°س؛ يليه فصل الخريف بقيمة ٥,١°س. وجاء بالمرتبة الثالثة فصل الصيف باحترار قيمته ٣,٢°س؛ وأخيرًا فصل الربيع بأدنى مقدار للتغير بحوالي ١,٣°س. وقد جاءت هذه النتائج متسقة مع ما أشارت إليه دراسة (محمد عبد العال، ٢٠١٨) عن الدلتا المصرية،

حيث توصلت الدراسة إلى وجود اتجاهًا عامًا نحو التزايد في مؤشر أبرد ليلة بمقدار ٠,١°س لكل عقد، ويرتفع إلى أقصاه في فصل الصيف، محققًا تزايدًا بمقدار ٠,٣°س.



شكل (٣) التباين الفصلي لشدة التطرف الحراري والمدى الحراري بالقاهرة خلال الفترة ١٩٩٠-٢٠٢٢ باستخدام تحليل Box Plot

Outliers (1) شذوذ متوسط حار/بارد – Outliers (2) شذوذ قياسي حار/بارد

جدول (٣) نتائج تحليل مخطط Box Plot لمؤشرات شدة التطرف الحراري والمدى الحراري اليومي فصليًا بالقاهرة (١٩٩٠-٢٠٢٢)

المستوى الزمني	العنصر	أبرد ليلة	أفتا ليلة	متوسط الصغرى	أحر نهار	أبرد نهار	متوسط العظمى	المدى اليومي
الشتاء	الأدنى	١٠,٥٠	١١,٠٠	٥,٥٠	١٩,٢٠	٨,١٠	١٦,٧٨	٦,٨٩
	الأعلى	٥,٠٠	١٣,٦٠	٩,٧٣	٢٤,٢٠	١٤,٠٠	١٩,٠٧	٨,٨١
	الربيع الأول	٦,٨٠	١٥,٠٠	١٠,٧٦	٢٦,٤٠	١٥,١٠	٢٠,٢٥	٩,٣٨
	الوسيط	٨,٤٠	١٦,٦٠	١١,٦١	٢٨,٤٥	١٦,٧٠	٢١,١٦	١٠,٠٦
	الربيع الثالث	٦,٣٦	١٥,٠٥	١٠,٦٥	٢٦,٣٧	١٥,١١	٢٠,٠٩	٩,٤٤
	المتوسط	٢,٨٤	٢,١١	١,٦٣	٣,٣١	٢,٣٧	١,٦٠	١,١١
	الانحراف المعياري	٣,٠٠	١٣,٦٠	١٠,٢٥	٢٦,٤٠(شنوذ م)	١٣,٠٠	٢٠,٣٤	٩,٠٩
الربيع	الأدنى	١٨,٩٠	٣٠,٤٠	٢٢,٣١	٤٥,٧٠	٢٩,٤٠	٣٥,٤٣	١٥,٠١
	الأعلى	٩,٢٥	١٩,٤٠	١٣,٦٣	٣٤,٨٠	١٧,٩٠	٢٤,٦٩	١١,٣٢
	الربيع الأول	١٢,٠٠	٢١,٤٠	١٥,٧٥	٣٨,٠٠	٢٢,٠٠	٢٨,٢٣	١٢,٣٠
	الوسيط	١٤,٤٠	٢٤,٠٠	١٨,٤٠	٤٠,١٠	٢٥,٠٥	٣١,٥٣	١٣,١٨
	الربيع الثالث	١١,٩٧	٢١,٧٧	١٥,٨٤	٣٧,٢٩	٢١,٦٠	٢٨,٠٨	١٢,٢٢
	المتوسط	٣,٣٣	٣,٦٤	٢,٨٦	٤,٢٥	٤,١٠	٣,٨٤	١,٣٢
	الانحراف المعياري	١٢,٥٠(شنوذ م)	٢٢,٠٠	٢٠,٠٠	٣٦,٠٠	٢٧,٠٠(شنوذ م)	٣٢,٥٧	٩,٥١
الصيف	الأدنى	٢٥,٠٠	٣٠,٠٠	٢٦,٥٩	٤٥,٢٠	٣٤,٣٠	٣٧,٤٤(شنوذ م)	١٤,١٦
	الأعلى	١٩,١٠	٢٤,٨٠	٢٢,١٦	٣٨,١٥	٣٠,٧٠	٣٤,٣٤	١٠,٨٧
	الربيع الأول	٢١,٠٠	٢٦,٠٠	٢٣,٤٠	٣٩,٦٠	٣١,٦٠	٣٤,٩٠	١١,٥٢
	الوسيط	٢٢,٢٥	٢٧,٠٠	٢٤,٢٤	٤١,٥٥	٣٢,٥٠	٣٥,٥٧	١٢,٣١
	الربيع الثالث	٢٠,٦٤	٢٥,٨٠	٢٣,٢٧	٣٩,٩٧	٣١,٦٠	٣٤,٩٤	١١,٦٧
	المتوسط	٢,٣٠	١,٦٩	١,٤٦	٢,٢٢	١,٤٣	٠,٩٦	٠,٩٨
	الانحراف المعياري	٥,٠٠	١٧,٠٠	١٣,١٦	٢٦,٤٠	١٤,٦٠	٢٢,٣٠	٧,٧٦(شنوذ م)
الخريف	الأدنى	٢٢,٧٠	٢٨,٠٠	٢٤,٧٣	٤٢,٣٠	٣٣,٢٠	٣٥,٦٦	١٢,٣١
	الأعلى	١٢,٨٥	٢٠,٤٥	١٦,٥٠	٣٢,٣٠	٢٢,٠٠	٢٥,٩٣	٩,٦٥
	الربيع الأول	١٦,٩٠	٢٢,٨٠	١٩,٦٤	٣٥,٤٠	٢٥,٦٠	٣٠,٢٣	١٠,١٦
	الوسيط	١٩,١٥	٢٥,٠٠	٢١,٩١	٣٧,٧٠	٢٨,٩٥	٣٢,٨١	١٠,٨٠
	الربيع الثالث	١٥,٨٢	٢٢,٦٢	١٩,٣١	٣٥,٠٣	٢٥,٣٢	٢٩,٥٢	١٠,٢١
	المتوسط	٤,١٧	٢,٦٤	٣,١٤	٣,٧٤	٤,٢٧	٣,٥٩	١,٠٠
	الانحراف المعياري							

جدول (٤) الإحصاءات الاتجاهية الفصلية لمؤشرات شدة التطرف الحراري (١٩٩٠-٢٠٢٢) باستخدام Mann-Kendall Test & Theil-Sen Estimator

المستوى الزمني	العنصر	أبرد ليلة	أدفأ ليلة	متوسط الصغرى	أحر نهار	أبرد نهار	متوسط العظمى	المدى اليومي
الشتاء	Kendall's tau	٠,٤٩	٠,٢٧	٠,٥٧٨	٠,١٢	٠,٠٠٨-	٠,٢٤	٠,٥١-
	p-value	<٠,٠٠٠١	٠,٠٢٨	<٠,٠٠٠١	٠,٣٥	٠,٩٦	٠,٠٤٩	<٠,٠٠٠١
	Sen's slope	٠,١٨	٠,٠٩	٠,٠٧	٠,٠٥	-	٠,٠٣	٠,٠٥-
	مقدار التغير	٥,٦٣	٢,٨٨	٢,٣٧	١,٥٧	-	٠,٩٣	١,٤٧-
	alpha	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١
	Intercept	٣٤٧,٩-	١٦٩,٣-	١٣٨,٧-	٧٤,٥-	١٤	٣٨,٩٠-	١٠٠,٧٢
الربيع	Kendall's tau	٠,١٩	٠,٢٩	٠,٥٥	٠,١٣	٠,١٩	٠,٣١	٠,٣٤٨-
	p-value	٠,١٣	٠,٠٢	<٠,٠٠٠١	٠,٢٩	٠,١٣	٠,٠١١	٠,٠٠٥
	Sen's slope	٠,٠٤	٠,١٣	٠,٠٧	٠,٠٥	٠,٠٥	٠,٠٤	٠,٠٣-
	مقدار التغير	١,٣١	٤,١٣	٢,١٨	١,٧٦	١,٧٠	١,٣٤	٠,٨٧-
	alpha	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١
	Intercept	٧٤,٣-	٢٣٤,٦-	١١٩,٧-	٧٧,٧-	٨٨,٦٠-	٥٥,٩٠-	٦٦,٨٩
الصيف	Kendall's tau	٠,٣٨	٠,٣٥	٠,٧١	٠,١٧	٠,٢٤	٠,٤٨	٠,٧٢-
	p-value	٠,٠٠٢	٠,٠٠٤	<٠,٠٠٠١	٠,١٨	٠,٠٥	<٠,٠٠٠١	<٠,٠٠٠١
	Sen's slope	٠,١	٠,٠٨	٠,١٠	٠,٠٣	٠,٠٤	٠,٠٥	٠,٠٥-
	مقدار التغير	٣,٢	٢,٦٥	٣,١٣	٠,٩٦	١,٣٤	١,٥٣	١,٦٣-
	alpha	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١
	Intercept	١٨١-	١٤١-	١٧٢,٨-	٢٣,١-	٥٥,٠٠-	٦٠,٩٠-	١١٤,٣
الخريف	Kendall's tau	٠,٤٦	٠,٢٩	٠,٦١	٠,١٢-	٠,١٧	٠,٢٥	٠,٧٠١-
	p-value	<٠,٠٠٠١	٠,٠٢٤	<٠,٠٠٠١	٠,٣٦	٠,١٧	<٠,٠٠٠١	<٠,٠٠٠١
	Sen's slope	٠,١٦	٠,٠٦	٠,٠٩	٠,٠٤-	٠,٠٦	٠,٠٤٦	٠,٠٦-
	مقدار التغير	٥,١٥	١,٨٦	٢,٨٢	١,٣٨-	١,٨٩	١,٤٧	٢,٠٢-
	alpha	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١
	Intercept	٣١٢-	٩١-	١٥٦,٦-	١١٧,٣	٩٨,٥٠-	١٢,٨٠-	١٣٧,٣

- **مؤشر أدفأ ليلة TNx:**

يُعبر مؤشر أدفأ ليلة عن أكبر درجة حرارة دنيا مطلقة مسجلة خلال شهر، وهو – مع مؤشر أبرد ليلة – أحد أهم المؤشرات المستخدمة للدلالة على شدة التطرف الحراري خلال الليل، أي التطرف المرتبط بدرجة الحرارة الصغرى. وضح جدول (١) التباين السنوي لمؤشرات شدة التطرف الحراري في القاهرة خلال فترة الدراسة (١٩٩٠–٢٠٢٢م)، وظهر منه أن متوسط درجة الحرارة بمؤشر أدفأ ليلة خلال فترة الدراسة قد سجل أعلى درجات الحرارة الصغرى على الإطلاق، حيث وصل متوسط درجات الحرارة بالمؤشر إلى ٢٧,٤°س، والوسيط بمقدار ٢٧,٠°س. ما يشير إلى زيادة متوسط درجة الحرارة في هذا المؤشر عن المؤشر السابق بأكثر من ٢٣,٠°س كاملة. وهو فارق حراري كبير يشير إلى التباين والتذبذب الواضح في درجات الحرارة الصغرى بالمنطقة خلال فترة الدراسة. وقد تراوحت درجة الحرارة في مؤشر أدفأ ليلة بين ٢٤,٤–٣٠,٤°س، بمدى حراري يبلغ ٦,٠°س، وانحراف معياري قدره ١,٧°س. أي أن مقدار التباين الزمني في مؤشر أدفأ ليلة يقل عن مثيله في مؤشر أبرد ليلة، حيث شهد الأخير ضعف المدى الحراري (١١,٦°س) والانحراف المعياري (٢,٩°س) تقريبًا. وتشير الفوارق الحرارية الكبيرة في مؤشرات التطرف بدرجات الحرارة الصغرى إلى أهمية دراسة التطرف الحراري باعتباره يختلف بشكل جذري عن المتوسطات الحرارية المعتادة. وقد سجل المؤشر أعلى درجة حرارة صغرى في المحطة على مدار فترة الدراسة (١٩٩٠–٢٠٢٢)، حيث بلغت ٣٠,٤°س في فصل الربيع عام ٢٠١٦.

يظهر شكل (٢) وجدول (٢) تحليل الاتجاه العام لمؤشرات شدة التطرف الحراري على المستوى السنوي. يبدو جليًا من الشكل والجدول وجود اتجاهًا عامًا قويًا نحو الاحترار في مؤشر أدفأ ليلة، وذلك بدلالة معنوية قوية (p–value<0.0001) ومستوى ثقة مرتفع (+٩٩٪) في كل النتائج والإحصاءات. وقد سجل معدل التغير السنوي في المؤشر ٠,١٢°س، أو نحو ١,٢°س/عقد. وهو ما يعني حدوث احترار كلي في مؤشر أدفأ ليلة بفترة الدراسة ككل (١٩٩٠–٢٠٢٢م) بمقدار ٣,٨°س. وتشير النتائج إلى أن الخطأ المحتمل لا يزيد عن ±٠,٠٢°س سنويًا، أي حولي ±٠,٦٤°س خلال فترة الدراسة ككل. يشير جدول (٢) أيضًا إلى أن معامل ارتباط كيندال قد حقق ٠,٦٥. وهو بذلك يعبر عن علاقة طردية متوسطة القوة بين الزمن ومؤشر أدفأ ليلة، تؤكد على اتجاه التزايد لدرجات الحرارة عبر الزمن في مؤشر أدفأ ليلة. وقد توافقت النتائج الحالية مع دراسة (Gamal, 2019) لمجمع القاهرة الكبرى، والتي أكدت على وجود اتجاهًا عامًا نحو الزيادة بمعدل ٠,٠٤°س، وذلك بالفترة الثانية من الدراسة، أي خلال الفترة ١٩٧٩–٢٠١٥م بالمحطات الأربع قيد الدراسة.

تشير النتائج المرتبطة بتحليل التباين الفصلي في شكل (٣) وجدول (٣) إلى توافق النمط العام للتباين الفصلي في مؤشر أدفأ ليلة مع مثيله في مؤشر أبرد ليلة. فنجد أن فصلي الاعتداليين (الخريف والربيع) هما أكثر الفصول تباينًا وتشتتًا في درجات الحرارة بمؤشر أدفأ ليلة. فقد بلغ متوسط درجة الحرارة في مؤشر أدفأ ليلة في فصل الخريف ٢٢,٦°س (الوسيط ٢٢,٨°س) بانحراف معياري هو الأكبر بين كل فصول (٣,٦٤°س) ومدى حراري فصلي يصل إلى ١١,٠°س. يلي ذلك فصل الربيع بمتوسط درجة حرارة لمؤشر أدفأ ليلة ٢١,٨°س (الوسيط ٢١,٤°س)، وانحراف معياري حراري يبلغ ٢,٦٤°س، أي في المرتبة الثانية بعد فصل الخريف. بينما سجل المدى الحراري الفصلي للربيع قيمة قياسية تبلغ ١٦,٨°س كفارق بين أقل (١٣,٦°س) وأكبر (٣٠,٤°س) درجات الحرارة المسجلة في الفصل. ويبدو هنا تأثر التطرف الحراري للمؤشر في الربيع بتسجل درجات حرارة قياسية بفعل رياح الخماسين الصحراوية شديدة الحرارة. على الجانب الآخر، ظهر فصل الصيف كأكثر الفصول تجانسًا فيما يتعلق بدرجات الحرارة لمؤشر أدفأ ليلة. فقد انخفض الانحراف المعياري لدرجات حرارة المؤشر إلى أدناه (١,٧°س) في متوسط درجة حرارة للمؤشر يبلغ ٢٥,٨°س، ووسيط يبلغ ٢٦,٠°س. ولم يتعد المدى الحراري لفصل الصيف ٨,٠°س (أدنى وأكبر قيمة ٢٢,٠، ٣٠,٠°س)، وهو الأدنى بين الفصول الأربعة. وجاء فصل الشتاء في المرتبة الثانية من حيث التجانس الحراري، بانحراف معياري ٢,١°س، ومدى حراري ١٠,٦°س لمتوسط ووسيط حراري بلغا ١٥,١°س و١٥,٠°س على الترتيب. وهو ما يتوافق مع ما تم بيانه في النمط الفصلي لتباين مؤشر أبرد ليلة. وقد شهد المؤشر حدوث شذوذ متوسط حار بقيمة ٢١,٦°س بفصل الشتاء عام ٢٠١٣، جدول (٣).

يتوافق ما سبق مع دراسة (El Kenawy et al., 2019)، حيث أشارت إلى حدوث ذروتين لأعلى درجات الحرارة بشكل عام منذ عام ٢٠١٠ حتى عام ٢٠١٥، وهي تقع بالذروة الثانية من فترة الدراسة. وقد تم تفسير ذلك في ضوء نشاط ظاهرة النينيو El NINO1[1] خلال عام ٢٠١٠ وفقًا للبيانات الصادرة عن الإدارة الوطنية الأمريكية للمحيطات والغلاف الجوي NOAA.

أثبتت نتائج تحليل الاتجاه العام الفصلي لدرجات الحرارة المتطرفة في مؤشر أدفأ ليلة، جدول (٤)، إلى وجود اتجاهًا عامًا نحو الارتفاع، بمعدل ٠,١٣، ٠,٠٩، ٠,٠٨، ٠,٠٦ °س/عام في فصول

(١) هي ظاهرة أو دورة تحدث في المحيط الهادئ يُطلق عليها "النينو" أو "التذبذب الجنوبي للنينو El Nino-Southern Oscillation (ENSO)". وهي دورة تتغير فيها الحالة الحرارية لمياه المحيط من الاحترار El NINO إلى البرودة لانينا La Nina. تحدث هذه الظاهرة في المحيط الهادئ بين قارة أمريكا الجنوبية وجنوب شرق وشرق قارة أستراليا. وهي دورة غير منتظمة تحدث خلال فترة تتراوح بين ٢-٧ عام. تؤثر هذه الظاهرة في الغلاف الجوي للأرض بشكل كامل، حيث تتسبب في حدوث الفيضانات والجفاف وغيرها من الأحداث المناخية المتطرفة التي تؤثر في الانسان ونشاطه، حيث تحمل الرياح التجارية الهواء الساخن منة فوق المحيط الهادئ غرب أمريكا الجنوبية وتتجه نحو جنوب شرق وشرق أستراليا (Van Oldenborgh et al., 2021).

الربيع والشتاء والصيف والخريف على الترتيب. وقد تحققت جميع النتائج بدلالة معنوية مرتفعة في فصل الصيف (p-value<0.01)، وبدلالة أقل في بقية الفصول. مما سبق يمكن حساب مقدار التغير أو الاحترار الكلي لمؤشر أدفأ ليلة، والذي وصلت أكبر قيمه إلى ٤,٢°س بفصل الربيع؛ يليه فصل الشتاء بنحو٢,٩°س، ثم الصيف بقيمة ٢,٦°س؛ وبالمرتبة الأخيرة فصل الخريف بقيمة ١,٩°س. أثبتت دراسة (El Kenawy et al., 2019) أن جميع التغيرات في مؤشرات التطرف البارد بمصر، تأخذ اتجاهًا صاعدًا بدون دلالة معنوية واضحة عدا مؤشر أدفأ ليلة، والذي أظهر اتجاهًا ايجابيًا ذو دلالة معنوية قوية، وبمعامل تحديد مقداره ٩٢٪، ومعنى ذلك وجود علاقة طردية قوية جدًا بين الزمن ومؤشر أدفأ ليلة.

- **مؤشر متوسط درجة الحرارة الصغرى TNm:**

يُعبر مقياس متوسط درجة الحرارة الصغرى عن المتوسط اليومي لدرجات الحرارة الدنيا المطلقة خلال شهر. ومن ثم فهو أعم المؤشرات تعبيرًا عن الظروف الحرارية خلال الليل بشكل يجعله مقياسًا للظروف الحرارية المعتادة (المناخ) أكثر منه مؤشرًا للتطرف البارد. لذا فهو المقياس الأكثر شيوعًا واستخدامًا في دراسة درجات الحرارة الصغرى على المستوى المناخي.

أشار جدول (١) المُعبر عن التباين السنوي لشدة التطرف إلى أن المعدل السنوي لمتوسط درجة الحرارة الصغرى قد بلغ ١٧,٣°س، وبنفس القيمة تقريبًا للوسيط (١٧,٢°س). وقد تباينت درجات الحرارة الصغرى بانحراف معياري قيمته ١,٠°س تقريبًا، وبقيم حرارية تدرجت من ١٥,٦°س إلى ١٩,٤°س كأصغر وأكبر درجتي الحرارة المسجلتين على مدار فترة الدراسة (١٩٩٠-٢٠٢٢) في متوسط درجة الحرارة الصغرى. أي أن المدى الحراري لمتوسط درجة الحرارة الصغرى على مدار فترة الدراسة حقق قيمة ضئيلة لا تتعد ٣,٨°س. ومن ثم يمكن التأكيد على انخفاض التباين والتشتت الزمني في درجة الحرارة الصغرى عن مثيله في مؤشري أبرد ليلة وأدفأ ليلة، حيث شهد المؤشران قيم أكبر في الانحراف المعياري (٢,٩°س، ١,٧°س على الترتيب) والمدى الحراري على مدار الدراسة (١١,٦°س، ٦,٠°س على الترتيب). ويشير ذلك إلى أهمية دراسة شدة التطرف البارد خلال الليل مقارنة بمقياس متوسط درجة الحرارة الصغرى الذي يقدم صورة عامة للغاية عن التباين الحراري خلال الليل، ويخفي الكثير من تفاصيل التطرف الحراري التي تؤثر وبشكل جوهري في الإنسان ونشاطه.

تبين من شكل (٢) وجدول (٢) اتجاه متوسط درجة الحرارة الصغرى نحو الارتفاع مع مرور الزمن، وبدلالة معنوية قوية (p-value<0.001) عند مستوى ثقة مرتفع (+٩٩٪). وهو ما يتفق مع الارتفاع المرصود في الاتجاه العام لدرجات الحرارة في مؤشري أبرد ليلة وأدفأ ليلة. ولكن تُظهر المقارنة

أن معدل الاحترار السنوي في متوسط درجة الحرارة الصغرى بلغ ٠,٠٨°س، أي بمعدل احترار كلي وصل إلى ٢,٦°س خلال فترة الدراسة (١٩٩٠-٢٠٢٢). ومن ثم فهو أقل مما شهده مؤشر أبرد ليلة (٥,١°س) وأدفأ ليلة (٣,٨°س) من احترار كلي. ويؤكد ذلك مرة أخرى على ما يمكن أن تخفيه دراسة المتوسطات الحرارية من تفاصيل من الضروري الكشف عنها عبر استخدام مؤشرات التطرف الحراري. ولكن تجدر الإشارة إلى ظهور ارتباط كيندال بقوة أكبر في حالة مؤشر متوسط درجة الحرارة الصغرى (٠,٨٧) عن مؤشر أبرد ليلة (٠,٦٧) وأدفأ ليلة (٠,٦٥). ما يعني ظهور العلاقة الطردية بين متوسط درجة الحرارة والصغرى والزمن بشكل أقوى عن مثيله في مؤشري التطرف. وهو أمر طبيعي نتيجة انخفاض التباين في متوسط درجة الحرارة الصغرى عن درجات الحرارة في مؤشري أبرد وأدفأ ليلة. وفي ذات السياق، اتسم معدل التزايد في متوسط درجة الحرارة الصغرى بمعامل خطأ يبلغ ±٠,٠١°س، وهو الأقل مقارنَة بمثيله في مؤشر أبرد ليلة (٠,٠٤°س) ومؤشر أدفأ ليلة (٠,٠٢°س).

أظهر شكل (٣) وجدول (٣) توافق نمط التباين الفصلي لمتوسط درجة الحرارة الصغرى مع مثيله في مؤشري أبرد ليلة وأدفأ ليلة. فقد سجل الاعتدالان أكبر تباين فصلي، بانحراف معياري يبلغ ٣,١°س في الخريف (المتوسط ١٩,٣°س)، ٢,٩°س في الربيع (المتوسط ١٥,٨°س). وظهر الانقلابان بشكل أكثر تجانسًا على مستوى متوسط درجة الحرارة الصغرى، ليسجلا انحرافًا معياريًا قدره ١,٥°س في الصيف (المتوسط ٢٣,٣°س)، ١,٦°س في الشتاء (المتوسط ١٠,٧°س). وقد ظهرت بالمؤشر أقصى شذوذ متوسط بارد بقيمة ٥,٥°س في شتاء عام ١٩٩٩، وهي القيمة الأدنى على الإطلاق. وهو ما يتفق بنتائج دراسة (El Kenawy et al., 2019). وأبرزت نتائج تحليل الاتجاه العام على المستوى الفصلي، جدول (٤)، إلى وجود نمطًا من الاحترار في متوسط درجة الحرارة الصغرى بجميع الفصول، بقيم تزايد سنوي تبلغ ٠,١، ٠,٠٩، ٠,٠٧٤، ٠,٠٦٨°س، وقيم احترار كلية ٣,١، ٢,٨، ٢,٤، ٢,٢°س في فصول الصيف، الخريف، الشتاء، الربيع على الترتيب. وقد جاءت قيم الاحترار الفصلية في متوسط درجة الحرارة الصغرى مختلفة في نمطها عما شهدته مثيلتها في مؤشري أبرد وأدفأ ليلة.

٤-٢. التباين السنوي والفصلي لشدة التطرف الحار واتجاهه العام في القاهرة (١٩٩٠-٢٠٢٢م):

يتناول هذا المبحث دراسة للتباين الزمني وتحليل الاتجاه العام على المستوى الفصلي والسنوي لثلاثة من مؤشرات شدة التطرف الحراري في محطة القاهرة خلال النهار، وهي مؤشرات أبرد نهار، أحر نهار، ومتوسط درجة الحرارة العظمى.

- **مؤشر أبرد نهار TXn:**

يُعبر مؤشر أبرد نهار عن أقل درجة حرارة قصوى مطلقة مسجلة خلال شهر. وهو أحد أهم المؤشرات المستخدمة للدلالة على شدة التطرف الحراري خلال النهار، أي التطرف المرتبط بدرجة الحرارة العظمى. كشف جدول (١) أن المتوسط السنوي لدرجات حرارة مؤشر أبرد نهار في القاهرة قد بلغ ١٣,٣°س خلال فترة الدراسة (١٩٩٠-٢٠٢٢)، وبقيمة وسيطة حوالي ١٤,٠°س. ويتضح من الجدول أن هذا المؤشر هو ثاني أكثر مؤشرات شدة التطرف تباينًا بعد مؤشر أبرد ليلة، حيث بلغ انحرافه المعياري السنوي ٢,٠°س. وكان مؤشر أبرد ليلة صاحب أكثر تباين سنوي بين مؤشرات التطرف قيد الدراسة، بانحراف معياري ٢,٩°س. وقد تراوحت درجات الحرارة في مؤشر أبرد نهار بين ٨,١-١٦,٠°س خلال فترة الدراسة، بفارق حراري ٧,٩°س. ومن ثم فقد سجل مؤشر أبرد نهار أدنى درجات الحرارة العظمى على الإطلاق بالسلسة الزمنية للبيانات، والتي بلغت ٨,١°س. أما على مستوى تحليل الاتجاه العام السنوي لهذا المؤشر، فقد تبين من شكل (٢) وجدول (٢) وجود اتجاهًا عامًا نحو زيادة درجات الحرارة، ولكن بدون أي دلالة معنوية تصل (p-value=0.99). وقد ظهر ذلك بوضوح في تسجيل معامل ارتباط كيندال ومعامل التحديد قيمة صفرية، مشيرًا إلى انعدام الارتباط بين الزمن ودرجات الحرارة في مؤشر أبرد نهار. وقد تزايدت درجات الحرارة السنوية في هذا المؤشر بمعدل ٠,٠٠٦±٠,٠٤°س/عام، وهو أقل معدلات التزايد على الإطلاق من بين كل المؤشرات، وفي نفس الوقت، صاحب أكبر معدلات الخطأ المحتملة. ومن ثم لم يزد الاحترار الكلي للمؤشر على مدار فترة الدراسة بالكامل عن ٠,١٩°س.

شهد فصل الصيف أعلى قيم وسطى لمؤشر أبرد نهار، بمتوسط ووسيط قدرهما ٣١,٦°س. وظهر متوسط درجات الحرارة في المؤشر أدناه في فصل الشتاء بمتوسط ووسيط ١٥,١°س. وقد جاء متوسط درجات الحرارة في المؤشر خلال فصل الخريف (٢٥,٣°س) أعلى منه خلال فصل الربيع (٢١,٦°س). وقد كشف جدول (٣) وشكل (٣) أن درجات الحرارة في مؤشر أبرد نهار أكثر تباينًا خلال الاعتداليين عن الانقلابين، وهو نفس نمط التباين الفصلي الذي كان سائدًا في كل مؤشرات التطرف الليلية. يبدو من الجدول والشكل أن درجات الحرارة في المؤشر قد تباينت بشكل كبير في فصلي الخريف والربيع (الانحراف المعياري ٤,٣°س، ٤,١°س على الترتيب)، وظهرت أكثر تجانسًا في الصيف (الانحراف المعياري ١,٤°س) والشتاء (الانحراف المعياري ٢,٤°س). وعلى مستوى القيم المتطرفة، سجل المؤشر أقصى شذوذ متوسط بارد بقيمة ٨,١°س بفصل الشتاء عام ١٩٩٢، بالرغم من أن هذه الأعوام ليست الأبرد على الإطلاق، ولكنها يمكن أن تكون الأبرد بالنسبة لدرجات الحرارة العظمى. كما تدل النتائج على حدوث شذوذ متوسط بارد بمقدار ٢٧,٠°س في الصيف عام ١٩٩٠.

خلصت نتائج الاتجاه العام لدرجات الحرارة المسجلة بمؤشر أبرد نهار فصليًا، كما يعرضها جدول (٤)، إلى وجود اتجاهًا عامًا نحو الزيادة بدون دلالة معنوية واضحة. وقد وصل معدل التغير السنوي والكلي أقصاه في فصل الخريف (٠,٠٦°س، ١,٩°س على الترتيب)، يليه فصل الربيع (٠,٠٥°س، ١,٧°س على الترتيب). وقد حل فصل الصيف في المرتبة الثالثة بمعدل تغير سنوي ٠,٠٤°س، وتغير كلي ١,٣°س. وقد أظهرت درجات الحرارة لمؤشر أبرد نهار خلال فصل الشتاء ثباتًا زمنيًا، حيث لم يكشف تحليل الاتجاه العام عن أي تغير في السلسلة الزمنية للمؤشر. وتجدر الإشارة هنا إلى أنها المرة الأولى التي يحقق فيها الاعتداليين أعلى معدلات الاحترار في درجات الحرارة بدرجة أكبر من الانقلابين. وقد اجتمع في هذا المؤشر معًا أن الخريف والربيع هما الفصلين الأكثر تباينًا، وفي نفس الوقت، الأكثر احترارًا عبر الزمن.

- **مؤشر أحر نهار TXx:**

يقدم مؤشر أحر نهار أعلى درجات الحرارة العظمى بالسلسلة الزمنية للبيانات. وهو – مع مؤشر أبرد نهار – أحد أهم المؤشرات المستخدمة لدراسة شدة التطرف الحراري خلال النهار. أوضح جدول (١) أن درجات الحرارة السنوية المسجلة في مؤشر أحر نهار قد تأرجحت بين ٣٩,٠°س كأقل القيم، و٤٥,٧°س كأكبر القيم، بمتوسط ٤٢,٨°س (الوسيط ٤٢,٦°س). وقد حقق هذا المؤشر بذلك تباينًا حراريًا متوسطًا (انحراف معياري ١,٦°س ومدى حراري ٦,٧°س) يقترب من مثيله في مؤشر أدفأ ليلة (انحراف معياري ١,٧°س ومدى حراري ٦,٠°س)، ويقل عن ذلك المسجل في مؤشري أبرد ليلة (انحراف معياري ٢,٩°س ومدى حراري ١١,٦°س)، وأبرد نهار (انحراف معياري ٢,٠°س ومدى حراري ٧,٩°س). وهو ما يشير إلى أن مؤشرات البرودة غالبًا ما تسجل تباينًا حراريًا أكبر وأوضح من مؤشرات الاحترار. وقد رصد هذا المؤشر أعلى درجة حرارة مسجلة في المنطقة على مدار فترة الدراسة (١٩٩٠-٢٠٢٢)، وبلغت ٤٥,٧°س. وقد شهدت درجات الحرارة السنوية لمؤشر أحر نهار تزايدًا حراريًا ذو دلالة معنوية. وقد حقق المؤشر معدل تغير سنوي وصل إلى ٠,٠٢٩±٠,٥°س، بإجمالي احترار كلي نحو ١,٦°س. وقد سجل معامل ارتباط كيندال لهذا المؤشر ثاني أضعف ارتباط بعد مؤشر أبرد نهار، بمعامل ٠,٣٢ فقط، أي بمعامل تحديد لا يزيد عن ١٠٪. وهو ما يؤكد على عدم وضوح نمط التزايد الحراري في المؤشر عبر الزمن. وهو ما انعكس أيضا في ارتفاع قيمة معامل الخطأ المحتمل في الاتجاه العام للمؤشر (±٠,٢٩°س).

أما على مستوى التحليل الفصلي للمؤشر، جدول (٣)، فقد استمر الاعتدالان أكثر الفصول تباينا، حيث سجل الربيع والخريف أعلى انحراف معياري لدرجات الحرارة في المؤشر، بقيم ٤,٦°س (المتوسط ٣٧,٣°س) و٣,٧°س (المتوسط ٣٥,٠°س) على الترتيب. وظهر الصيف كأكثر الفصول تجانسا بانحراف معياري ٢,٢°س (المتوسط ٤٠,٠°س)، ثم فصل الشتاء بانحراف معياري ٣,٣°س (المتوسط ٢٦,٤°س). وقد كشف تحليل التباين باستخدام Box Plot لدرجات الحرارة في هذا المؤشر حدوث شذوذ متوسط حار بقيمة ٣٥,٠°س بفصل الشتاء عام ٢٠٢١؛ نظرًا لأن هذا العام يقع بالمرتبة السادسة للأعوام الأكثر دفئًا على مدار السجل الحراري (NASA & NOAA, 2022). ويتفق ذلك أيضًا مع دراسة (Abbas & Hamdi, 2022)، والتي أوضحت أن عام ٢٠٢١ كان الأكثر دفئًا بدلتا النيل على مستوى درجة حرارة النهار.

تشير مخرجات التحليل الإحصائي للاتجاه العام الفصلي اكتشاف اتجاهًا عامًا موجبًا في مؤشر أحر نهار بجميع الفصول، عدا فصل الخريف، حيث أظهر اتجاهًا عامًا نحو الانخفاض. وقد جاءت كل مخرجات تحليل الاتجاه العام للفصول الأربعة ذي دلالة معنوية كما يوضحه جدول (٤). ويظهر من الجدول تحقق أعلى معدل زيادة في درجات الحرارة بمؤشر أحر نهار خلال فصل الربيع بقيمة تبلغ ٠,٠٥٥°س/عام (التغير الكلي ١,٨°س)، يليه فصل الشتاء بمعدل تغير ٠,٠٤٩°س/عام (التغير الكلي ١,٦°س)، وأخيرًا فصل الصيف بمعدل تغير سنوي بلغ ٠,٣°س (التغير الكلي ١,٠°س تقريبًا). أما فصل الخريف، فقد شهد مؤشر أحر نهار خلاله تناقصًا حراريًا بمقدار -٠,٠٤٣°س/عام، محققا تبريدًا كليًا بمقدار -١,٤°س خلال فترة الدراسة. وتجدر الإشارة هنا إلى أن هذا الاتجاه العام الهابط لمؤشر أحر نهار خلال فصل الخريف هو النمط التبريدي الوحيد المرصود خلال الدراسة في الاتجاه العام من بين المؤشرات الستة الرئيسية للتطرف الحراري نهارًا وليلًا، حيث لم يشهد أي من هذه المؤشرات الستة خلال أي من الفصول الأربعة اتجاهًا عامًا هابطًا. ويستثنى من ذلك بالطبع مؤشر المدى الحراري اليومي، باعتباره يعبر عن الفروق الحرارية وليس عن درجات الحرارة المرصودة.

- **مؤشر متوسط درجات الحرارة العظمى TXm:**

يعبر مقياس متوسط درجة الحرارة العظمى عن المتوسط اليومي لدرجات الحرارة القصوى المطلقة خلال شهر. ومن ثم فهو أعم المؤشرات تعبيرًا عن الظروف الحرارية خلال النهار بشكل يجعله مقياسًا للظروف الحرارية المعتادة (المناخ) أكثر منه مؤشرًا للتطرف الحار. لذا فهو المقياس الأكثر

شيوعًا واستخدامًا في دراسة درجات الحرارة العظمى على المستوى المناخي. ورغم ذلك فهو أحد مؤشرات شدة التطرف الحار الذي تبناه مشروع التعاون المناخي Climdex.

يشير جدول (١) إلى التباين السنوي لمتوسط درجة الحرارة العظمى، ومنه يظهر أن هذا المؤشر صاحب أقل تباين حراري بين المؤشرات الستة لشدة التطرف الحراري نهارًا وليلًا. فقد حقق متوسط درجة الحرارة العظمى أقل انحراف معياري بين تلك المؤشرات (٠,٦٣°س). وهو يشبه متوسط درجة الحرارة الصغرى في أن كليهما يتسم بتباين حراري أقل من مؤشرات شدة التطرف ليلًا ونهارًا. ومن ثم يوكد ذلك على حقيقة أن المقاييس المتوسطة لدرجات الحرارة الصغرى والعظمى أقل تباينًا من مؤشرات التطرف خلال الليل (أبرد ليلة وأدفأ ليلة) وخلال النهار (أبرد نهار وأحر نهار). وقد بلغ متوسط درجة الحرارة العظمى خلال فترة الدراسة ٢٨,٢°س (الوسيط ٢٨,١°س)، بقيم تراوحت بين ٢٦,٨-٢٩,٨°س. ومن ثم لم يتعد المدى الحراري لمتوسط درجة الحرارة العظمى حاجز ٣,٠°س، وهو أيضًا الأقل بين مؤشرات التطرف الستة.

وعلى نفس المستوى الزمني السنوي، يوضح جدول (٢) وشكل (٢) الاتجاه العام لمؤشر متوسط درجات الحرارة العظمى. ويبدو جليًا أن المتوسط السنوي لدرجة الحرارة العظمى قد أظهر اتجاهًا عامًا نحو الزيادة بدلالة معنوية قوية جدًا (p-value<0.0001) وبمستوى من الثقة يزيد عن ٩٩٪. ويؤكد ذلك وجود علاقة طردية بين الزمن ومؤشر متوسط درجات الحرارة العظمى، حيث وصل ارتباط كيندال إلى ٠,٥٩. وقد وصل معدل التغير السنوي في متوسط درجات الحرارة العظمى ٠,٠٣٨±٠,٠١°س، بإجمالي احترار بلغ ١,٢°س. وهو الأقل على الإطلاق بين مؤشرات التطرف النهارية والليلية. ومنه يظهر أن المؤشرات الحرارية المتوسطة (متوسط الحرارة العظمى ومتوسط الحرارة الصغرى) دائمًا أقل في مقدار التغير (الاحترار) من المؤشرات الحرارية المطلقة للتطرف. وقد تشابهت نتائج هذا المؤشر مع دراسة (محمد عبد العال، ٢٠١٨) للدلتا المصرية، حيث توصلت الدراسة إلى اتجاهًا عامًا نحو الزيادة بمقدار ٠,١°س لكل عقد، وبمقدار ٠,٣°س بفصل الصيف وهو أعلى معدل للزيادة بين الفصول الأخرى.

أما على المستوى الفصلي، فقد أوضحت النتائج بجدول (٣) وشكل (٣) اتساق النمط الفصلي للتباين في متوسط درجات الحرارة العظمى مع مثيله في بقية المؤشرات. فقد سجل الاعتدالان أكبر تباين حراري، بانحراف معياري بلغ ٣,٨°س (المتوسط ٢٨,١°س، والوسيط ٢٨,٢°س) في فصل الربيع، و٣,٦°س (المتوسط ٢٩,٥°س، والوسيط ٣٠,٢°س) في فصل الخريف. وظهر فصل الصيف - الأكثر حرارة (متوسط درجة الحرارة العظمى ٣٥,٠°س، ووسيط ٣٤,٩°س) - صاحب أعلى تجانس حراري

بانحراف معياري ١,٠°س، يليه فصل الشتاء الأقل حرارة (متوسط درجة الحرارة العظمى ٢٠,١°س، ووسيط ٢٠,٣°س) بانحراف معياري ١,٦°س. وقد جاء الفارق الحراري بين أعلى وأدنى القيم الفصلية لمتوسط درجة الحرارة العظمى مؤكدًا على نمط التباين الحراري الفصلي السابق. فقد وصل الفارق الحراري بين أعلى وأدني قيم متوسط درجة الحرارة العظمى خلال فترة الدراسة إلى أقصاه في فصل الربيع بمقدار ١٥,١°س، يليه فصل الخريف بقيمة ١٣,٤°س. بينما انخفض هذا الفارق الحراري لأقل من نصف القيم السابقة، حيث بلغ ٧,٥°س في الشتاء، ونحو ٤,٨°س فقط في الصيف. وقد أوضحت نتائج تحليل Box Plot المبينة في شكل (٣) وجدول (٣) حدوث أقصى شذوذ متوسط حار بقيمة ٢٤,٣°س في فصل الشتاء عام ٢٠١٠، وبقيمة ٣٧,٤°س في فصل الصيف عام ٢٠٢١. ويتفق ذلك مع ما أشارت إليه دراسة (El Kenawy et al., 2019) من حدوث الشذوذ في درجات الحرارة العظمى في أعوام ١٩٩٤، ١٩٩٥، ٢٠١٠، ٢٠١٢.

أبرزت النتائج بجدول (٤) الاتجاه العام على المستوى الفصلي لمتوسط درجات الحرارة العظمى. ويبدو منها وجود اتجاهًا عامًا نحو الارتفاع، وذلك بدلالة معنوية قوية واضحة بقيم أقل من قيمة alpha (٠,٠١) في فصلي الصيف والخريف، وبدون دلالة بقيم أعلى من قيمة alpha (٠,٠١) في فصلي الشتاء والربيع. بلغ معدل الزيادة في متوسط درجات الحرارة العظمى في فصلي الصيف ٠,٠٥، ٠,٠٥، ٠,٠٤، ٠,٠٣°س/عام، في فصول الصيف والخريف فالربيع والشتاء على الترتيب. ما يشير إلى أن مقدار التغير الكلي خلال فترة الدراسة قد بلغ أقصاه في فصل الصيف (١,٥٣°س)، يليه فصل الخريف بقيمة ١,٤°س، وأخيرًا الربيع (١,٣°س) والشتاء (٠,٩°س).

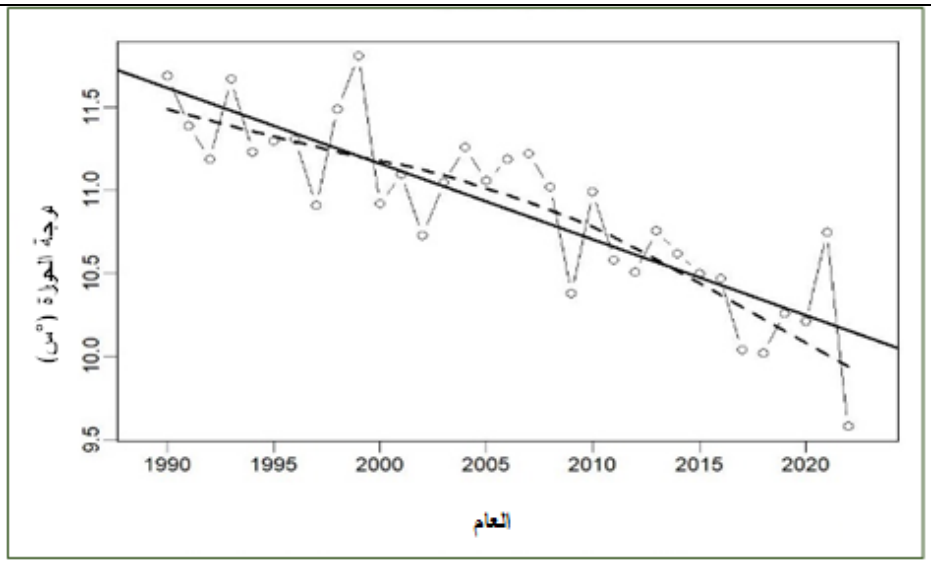
٤-٣. التباين السنوي والفصلي للمدى الحراري اليومي واتجاهه العام في القاهرة (١٩٩٠-٢٠٢٢م):

يتناول هذا المبحث دراسة للتباين الزمني وتحليل الاتجاه العام على المستوى السنوي والفصلي للمدى الحراري اليومي في محطة مطار القاهرة خلال الفترة ١٩٩٠-٢٠٢٢. ويمثل التباين والاتجاه العام لهذا المقياس اليومي نتاجًا ومحصلة للعلاقة بين التباين والاتجاه العام في مجموعة مؤشرات شدة التطرف الحراري الليلية ومجموعة شدة التطرف الحراري النهارية. ويرتبط بالمدى الحراري اليومي مجموعة من أهم المؤشرات التي تقيس مدى التغير في التطرف الحراري، من خلال حساب الفرق بين درجة الحرارة العظمى ودرجة الحرارة الصغرى. ومن أمثلة مؤشرات التغير مؤشر المدى السنوي الداخلي للتطرف الحراري (Intra-annual Extreme Temperature Range (INTR، وهو الفرق بين أعلى درجة حرارة عظمى وأدنى درجة حرارة صغرى في العام (El Kenawy et al., 2019). ومن ناحية أخرى، يرتبط التغير

الزمني لمؤشرات قياس التغير في الأساس بمدى تغير درجات الحرارة. فعلى سبيل المثال، يتجه المدى الحراري اتجاهًا عامًا نحو الزيادة والصعود إذا كان التغير في درجات الحرارة العظمى أكبر من التغير في درجات الحرارة الصغرى والعكس صحيح. مما برهنته العديد من الدراسات بحوض الكاريات (Bartholy & Pongrácz, 2007)، وشمال إسبانيا (El Kenawy et al., 2011)، والسعودية (Almazroui et al., 2014)، ومصر (El Kenawy et al., 2019).

أشارت نتائج تحليل مؤشر المدى الحراري اليومي على المستوى السنوي بجدول (١) إلى أن المتوسط السنوي للمدى الحراري اليومي في منطقة الدراسة قد بلغ ١٠,٩°س (الوسيط ١١,٠°س). وقد تباينت درجات الحرارة في المؤشر بين ٩,٦-١١,٨°س كأقل وأكبر قيمة، وهو ما ينم عن تباين حراري منخفض للغاية في المدى الحراري السنوي، حيث لم يتعد مجال تغيره ٢,٢°س. ويؤكد على تلك الحقيقة انخفاض الانحراف المعياري لمؤشر المدى الحراري اليومي، حيث لم يزد عن ٠,٥٢°س، وهو أقل انحراف معياري سجلته المؤشرات السبعة قيد الدراسة، جدول (١).

يبدو من شكل (٤) وجدول (٢) أن مؤشر المدى الحراري اليومي قد شهد اتجاهًا عامًا نحو الهبوط على المستوى السنوي، بدلالة معنوية قوية جدًا (p-value<0.0001). وبذلك يكون المدى الحراري اليومي هو المؤشر الوحيد الذي شهد اتجاهًا هابطًا خلال فترة الدراسة من بين المؤشرات السبعة قيد الفحص. وهو هبوطًا مبررًا في ضوء الاتجاه الصاعد لمؤشرات شدة التطرف البارد ليلًا (٥,١°س، ٣,٨°س، ٢,٦°س في مؤشرات أبرد ليلة، أدفأ ليلة، ومتوسط درجات الحرارة الصغرى على الترتيب) بدرجة أكبر من الارتفاع المُقدر في مؤشرات شدة التطرف الحار خلال النهار (٠,٢°س، ١,٦°س، ١,٢°س في مؤشرات أبرد نهار، أحر نهار، ومتوسط درجات الحرارة العظمى على الترتيب). وقد سجل المؤشر معدل هبوط في درجة الحرارة بلغ -٠,٠٤٥±٠,٠٠٥°س/عام، بتناقص كلي خلال فترة الدراسة يصل إلى -١,٥°س. وقد حقق المؤشر علاقة عكسية قوية مع الزمن، بلغت على ارتباط كيندال - ٠,٨٤، في إشارة إلى تناقص المدى الحراري مع مرور الزمن. وقد تماثلت نتائج المؤشر بالدراسة الحالية ونتائج دراسة (محمد عبد العال، ٢٠١٨)، والتي توصلت إلى وجود اتجاهًا عامًا نحو النقصان بمقدار ٠,١°س لكل عقد في دلتا نهر النيل. وقد لوحظ وجود نمطًا مكانيًا يتدرج بوجه عام نحو الانخفاض من شمال الدلتا وحتى أجزائها الجنوبية والجنوبية الشرقية.



شكل (٤) التغير السنوي والاتجاه العام للمدى الحراري اليومي بالقاهرة (١٩٩٠-٢٠٢٢م)

سجل فصل الربيع أعلى قيم لمؤشر المدى الحراري اليومي بمتوسط ١٢,٢°س (الوسيط ١٢,٣°س). بينما وصلت قيم المؤشر لأدناها في فصل الشتاء بمتوسط ووسيط ٩,٤°س. وقد لوحظ الانخفاض الطفيف في قيم المؤشر بفصل الصيف عنها بفصل الربيع، حيث بلغ المتوسط ١١,٧°س (الوسيط ١١,٥°س). في حين انخفضت أكثر في فصل الخريف، بمتوسط ووسيط ١٠,٢°س. ويوضح كلًا من جدول (٣) وشكل (٣) أن قيم مؤشر المدى الحراري اليومي أكثر تشتتًا وتباينًا في فصلي الربيع والشتاء بانحراف معياري ١,٣°س، ١,١°س على الترتيب. بينما ظهر فصلا الصيف والخريف أكثر تجانسًا بانحراف معياري بلغ ١,٠°س تقريبًا لكل منهما. وقد تمثلت القيم الشاذة في المؤشر في أدنى شذوذ متوسط بارد على الإطلاق بقيمة ٦,٩°س بفصل الشتاء عام ٢٠٢١؛ نظرًا للارتفاع الشديد في درجات الحرارة بشكل عام، مما أدى إلى الانخفاض الشديد في الفارق بين درجات الحرارة العظمى والصغرى. بالإضافة إلى شذوذ قياسي بارد بقيمة ١٤,٢°س بفصل الشتاء عام ١٩٩٩؛ نتيجة للانخفاض الشديد في درجات الحرارة بتلك الفترة كما ذُكر سلفًا. وقد كشفت النتائج الخاصة بالتحليل على المستوى الفصلي، والموضحة بجدول (٤)، إلى الاتجاه العام الهابط لمؤشر المدى الحراري اليومي في كل الفصول بدلالة معنوية قوية. فقد بلغ معدل التغير الفصلي -٠,٠٦، -٠,٠٥، -٠,٠٥، -٠,٠٣°س/عام، بفصول الخريف والصيف فالشتاء والربيع على الترتيب. وبذلك فقد بلغ إجمالي مقدار الهبوط الكلي -٢,٠، -١,٦، -١,٥، -٠,٩°س بنفس ترتيب الفصول السابق.

استنتجت دراسة (El Kenawy et al., 2009)، وجود انخفاض في المدى الحراري السنوي بليبيا خلال النصف الثاني من القرن العشرين، ويتوافق ذلك بشكل رئيسي مع الارتفاع الكبير في درجات

الحرارة الصغرى بالنسبة للانخفاض بدرجات الحرارة العظمى. كما أكدت عدة دراسات عالمية إلى اعتماد المدى الحراري اليومي في الأساس على درجة الحرارة الصغرى، باعتبار أنها تتغير بشكل أسرع من درجة الحرارة العظمى (Easterling et al.,1997; IPCC, 2001)؛ ويمكن تفسير ذلك في ضوء أن درجات الحرارة العظمى تقاوم الارتفاع في القيم القياسية لدرجات الحرارة عكس درجات الحرارة الصغرى، كما تؤكده نتائج العديد من الدراسات بدول جنوب حوض البحر المتوسط مثل دراسة (El Kenawy et al., 2009).

في ختام المعالجة والاستعراض السابق لنتائج المباحث الثلاثة، يمكن القول إن مؤشرات شدة التطرف الحراري والمدى الحراري اليومي قد أظهرت أن أكبر التغيرات السنوية حدثت في المؤشرات الخاصة بشدة التطرف البارد (ليلًا) بقيم وصلت إلى نحو ٥,١°س، ٣,٨°س، ٢,٦°س بمؤشر أبرد ليلة، وأدفأ ليلة، ومتوسط درجات الحرارة الصغرى على التوالي. من ناحية أخرى، ارتفعت درجات الحرارة العظمى وظهر معدل التغير الكلي خلال فترة الدراسة بشكل واضح بمؤشرات شدة التطرف الحار (نهارًا)، بقيم بلغت ٠,٢°س، ١,٦°س، ١,٢°س في مؤشرات أبرد نهار، أحر نهار، ومتوسط درجات الحرارة العظمى على الترتيب. بمعنى آخر، فقد ارتفعت درجات الحرارة الصغرى كما ارتفعت أيضًا درجات الحرارة العظمى، ولكن اختلف معدل هذا الارتفاع، فكان أكثر وضوحًا وقوة خلال الليل عن النهار. ويأتي الاتساق بين نتائج الدراسة الحالية والعديد من الدراسات الأخرى مؤكدًا على كون هذا النمط من التغير عالميًا، وإن ظهر التأثير المحلي بشكل واضح في ملامح هذا التغير. ويبدو هذا التوافق مع دراسات عالمية (Easterling et al. 1997; Frich et al., 2002)، وأخرى على مستوى محلي، مثل مصر (Hasanean & Basset, 2006; Mostafa et al., 2019)، والسودان (Elagib, 2010)، والهند (Bhardwaj et al., 2020). وعلى النقيض مما سبق، تجدر الإشارة إلى بعض الدراسات في أوروبا والشرق الأوسط، والتي التي ظهر خلالها نمطًا مغايرًا من التغير في شدة التطرف الحراري، حيث بدا التغير بشكل أقوى في مؤشرات التطرف الحار بالنسبة للتغيرات في مؤشرات التطرف البارد (Bartholy & Pongrácz, 2007; El Kenawy et al., 2011; Almazroui et al., 2014; El Kenawy et al., 2019).

٥. الاستنتاجات والتوصيات:

سعت الدراسة إلى تكوين صورة شاملة ومكتملة عن سمات التغير الزمني (التباين والاتجاه العام) لشدة التطرف الحراري في مدينة القاهرة خلال ٣٣ عامًا (١٩٩٠-٢٠٢٢) على المستويات السنوية والفصلية واليومية. وقد تطلب ذلك تحليل السجل اليومي (٢٤ ألف قيمة) لبيانات درجتي الحرارة الدنيا المطلقة والقصوى المطلقة خلال تلك الفترة في محطة مطار القاهرة الدولي كنموذجًا. وقد انتهجت الدراسة

مسلكًا يعتمد على اشتقاق وتحليل سبعة مؤشرات مناخية من بيانات الرصد الجوي، سواء مؤشرات التطرف البارد خلال الليل (أبرد ليلة، أدفأ ليلة، متوسط درجة الحرارة الصغرى)، ومؤشرات التطرف الحار خلال النهار (أبرد نهار، أحر نهار، متوسط درجة الحرارة العظمى)، أو المؤشر اليومي للمدى الحراري.

تبين من تحليل التباين والتجانس الحراري سنويًا وفصليًا باستخدام أسلوب Box Plot ظهور فوارق حرارية كبيرة جدًا وتذتذب في مؤشرات التطرف بدرجات الحرارة الصغرى أعلى من تلك التي ظهرت في مؤشرات التطرف بدرجات الحرارة العظمى. كما ظهر التباين الحراري بشكل أقوى في مؤشرات القيم الدنيا (أبرد ليلة وأبرد نهار) عن مؤشرات القيم القصوى (أدفأ ليلة وأحر نهار). وقد ظهر التباين الحراري لمؤشرات التطرف خلال النهار والليل معًا بشكل أقوى عن مثيله في متوسطي درجة الحرارة العظمى والصغرى. وهو ما يؤكد على أهمية دراسة التطرف الحراري (القيم المطلقة) باعتباره يختلف بشكل جذري عن المتوسطات الحرارية المعتادة. وقد سجل مؤشر أبرد ليلة أدنى درجات الحرارة خلال فترة الدراسة (-١,٧°س في فصل الشتاء ١٩٩٨)، بينما سجل مؤشر أدفأ ليلة أعلى درجات الحرارة الصغرى (٣٠,٤°س في فصل الربيع ٢٠١٦). وقد سجل مؤشر أحر نهار أعلى درجات الحرارة على الإطلاق (٤٥,٧°س في فصل الربيع ٢٠١٩)، بينما تحققت أقل درجات الحرارة العظمى في مؤشر أبرد نهار بقيمة ٨,١°س في فصل الشتاء ١٩٩٢. وقد بدا واضحًا أن درجات الحرارة في كل مؤشرات شدة التطرف أكثر تباينًا خلال الاعتداليين؛ نظرًا لتقلبات الكتل الهوائية الباردة من العروض العليا (خاصة خلال فصل الربيع)، والاضطرابات الهوائية الساخنة من رياح الخماسين والمنخفض الهندي الموسمي، وأعلى تجانسًا خلال الانقلابين. وظهر المدى الحراري اليومي كأقل المقاييس تباينًا وأكثرها تجانسًا على المستويين الفصلي والسنوي.

خلصت الدراسة أيضًا إلى أن مدينة القاهرة قد شهدت زيادة واضحة في شدة التطرف الحراري خلال العقود الثلاثة المنصرمة على كل المستويات الزمنية، ليلًا ونهارًا، سنويًا وفصليًا على حدٍ سواء، عدا الاتجاه الهابط لمؤشر أحر نهار في فصل الخريف دون دلالة معنوية. وهو ما يدعم وبقوة الآراء والنظريات والدراسات التي تبنت الاحترار العالمي كنمط لاتجاه التغير في درجة حرارة الكرة الأرضية، ويخالف نظرية التبريد أو التوازن الحراري للغلاف الجوي. كما أظهر التحليل اتساق نمط الاتجاه العام في مؤشرات التطرف نهارًا وليلًا مع متوسطات درجات الحرارة العظمى والصغرى، حيث شهدت جميع المؤشرات اتجاهًا عامًا نحو التزايد. ولم يتم رصد أي تناقض بين الاتجاه العام لمؤشرات التطرف من

ناحية، وبين مقاييس متوسط درجة الحرارة من ناحية أخرى، فيما عدا مؤشر أحر نهار في فصل الخريف كما سبق بيانه.

وقد كشفت النتائج عن حدوث أكبر التغيرات بمؤشرات شدة التطرف البارد (خلال الليل) وبدلالة معنوية قوية، حيث شهدت مؤشرات أبرد ليلة، أدفأ ليلة، ومتوسط درجات الحرارة الصغرى اتجاهًا عامًا صاعدًا بنحو ٥,١°س، ٣,٨°س، ٢,٦°س على الترتيب، مشيرًا إلى ما يطلق عليه الاحترار الليلي Nighttime warming، وهي ظاهرة تؤثر بشكل كبير في الصحة البشرية والنظم البيئية والممارسات الزراعية واستهلاك الطاقة وغيرها. على الجانب الآخر، وبالمقارنة مع نتائج شدة التطرف البارد فقد أظهرت النتائج تغيرًا ضئيلًا في مؤشرات شدة التطرف الحار (خلال النهار)، بقيم تغير كلي بلغت ٠,٢°س، ١,٦°س، ١,٢°س في مؤشرات أبرد نهار، أحر نهار، ومتوسط درجات الحرارة العظمى على الترتيب، ولكن بدون دلالة معنوية واضحة، عدا المؤشر الأخير. وهو ما أدى بشكل واضح إلى انخفاض في المدى الحراري اليومي بالمدينة نتيجة زيادة درجات الحرارة الصغرى بدرجة أكبر من درجات الحرارة العظمى. ومن ثم فإن تقييم هذا النمط من الاحترار ما بين الليل والنهار وتناقص المدى الحراري اليومي يبرهن على أهمية المؤثرات المحلية في زيادة شدة التطرف الحراري بمدينة القاهرة، بجانب المتغيرات الإقليمية والعالمية الضابطة لتغير الغلاف الجوي عبر الزمن. ومن ثم يمكن القول إن الاحترار الحضري المتسارع بالقاهرة هو نتاج مكونين رئيسيين، أحدهما محلي والآخر إقليمي/عالمي، وهو ما يجب أن يؤخذ في الاعتبار عند صياغة استراتيجيات مواجهة التطرف الحراري، سواء على مستوى التخفيف Mitigation أو التكيف Adaptation أو التعديل Adjustment. وتوصي الدراسة أيضًا بأهمية تحليل ومعالجة التطرف في درجات الحرارة، دون الاقتصار على تحليل المعدلات والمتوسطات الحرارية، لما تخفيه الأخيرة من تفاصيل بالغة الأهمية تؤثر بشكل كبير في دقة النتائج، وهو ما لا يمكن تصوره أو بيانه إلا بأخذ القيم المتطرفة والشاذة في الاعتبار.

٦. مصادر البيانات:

الهيئة العامة للأرصاد الجوية المصرية (٢٠٢٣) الأرصاد اليومية لدرجتي الحرارة القصوى المطلقة والدنيا المطلقة في محطة مطار القاهرة الدولي خلال الفترة ١٩٩٠-٢٠٢٢. تم التحميل من الموقع الرسمي لـ "الإدارة الوطنية للغلاف الجوي والمحيطات National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA"، https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/، (تاريخ الوصول ٢٠٢٣/٩/١٥).

٧. المراجع العربية:

- رباب عبد الحكيم إبراهيم (٢٠٢١) التطرفات الحرارية وتأثيرها على بعض الآثار المصرية القديمة "دراسة في المناخ التطبيقي"، رسالة ماجستير، كلية الآداب، جامعة المنصورة.
- محمد عبد العال إبراهيم (٢٠١٨) الاتجاهات طويلة الأمد لتطرفات الحرارة اليومية في الدلتا المصرية خلال الفترة ١٩٦٠-٢٠١٠ (دراسة مناخية)، سلسة بحوث جغرافية، الجمعية الجغرافية المصرية، العدد ١١١، ص ص ٥-٧٨، https://doi.org/10.21608/agj.2021.200043.
- وليد عباس عبد الراضي (٢٠٠٩) التغير في بعض عناصر المناخ بدلتا النيل خلال القرن العشرين- دراسة باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب، جامعة عين شمس.

٨. المراجع الأجنبية:

Abbas W, Hamdi I. Satellite-Based Discrimination of Urban Dynamics-Induced Local Bias from Day/Night Temperature Trends across the Nile Delta, Egypt: A Basis for Climate Change Impacts Assessment. Sustainability. 2022; 14(21):14510. https://doi.org/10.3390/su142114510.

Abu-Lughod, L., & AL Sayyad, N. (2022). Cairo. Encyclopedia Britannica.

Abutaleb, K., Ngie, A., Darwish, A., Ahmed, M., Arafat, S., & Ahmed, F. (2015). Assessment of urban heat island using remotely sensed imagery over Greater Cairo, Egypt. Advances in Remote Sensing, 04(01), 35–47. https://doi.org/10.4236/ars.2015.41004.

Alexander, L. V. (2015). Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: A review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond. Weather and Climate Extremes, 11, 4–16. https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.10.007.

Almazroui, M., Dambul, R., Islam, Md. N., & Jones, P. D. (2015). Atmospheric circulation patterns in the Arab region and its relationships with Saudi Arabian surface climate: A preliminary assessment. Atmospheric Research, 161–162, 36–51https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.03.014.

BARTHOLY, J., & PONGRACZ, R. (2007). Regional Analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. Global and Planetary Change, 57(1–2), 83–95. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.002.

Chang, M., Dereczynski, C., Freitas, M. A., & Chou, S. C. (2014). Climate change index: A proposed methodology for assessing susceptibility to future climatic extremes. American Journal of Climate Change, 03(03), 326–337. https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.33029. Zhang, X. and Yang, F. (2004) RClimDex (1.0)—User Manual. Climate Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario.

Easterling, D. R., Horton, B., Jones, P. D., Peterson, T. C., Karl, T. R., Parker, D. E., Salinger, M. J., Razuvayev, V., Plummer, N., Jamason, P., & Folland, C. K. (1997). Maximum and minimum temperature trends for Globe. Science, 277(5324), 364–367. https://doi.org/10.1126/science.277.5324.364.

El-Asrag, A. M. (1999) Climate Change over Egypt and Its Relevance to Global Change. The Fourth Conference-Meteorology And Sustainable Development To 21 St Century 7-9 March, the Egyptian Meteorology Authority, pp. 85-114.

El Kenawy, A. M., Lopez-Moreno, J. I., McCabe, M. F., Robaa, S. M., Domínguez-Castro, F., Peña-Gallardo, M., Trigo, R. M., Hereher, M. E., Al-Awadhi, T., & Vicente-Serrano, S. M. (2019). Daily temperature extremes over Egypt: Spatial patterns, temporal trends, and driving forces. Atmospheric Research, 226, 219–239. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.04.030.

El Kenawy, A. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., & Mekld, M. S. (2009). Temperature trends in Libya over the second half of the 20th century. Theoretical and Applied Climatology, 98(1–2), 1–8. https://doi.org/10.1007/s00704-008-0089-2.

El Kenawy, A., López-Moreno, J. I., & Vicente-Serrano, S. M. (2011). Recent trends in daily temperature extremes over northeastern Spain (1960–2006). Natural Hazards and Earth System Sciences, 11(9), 2583–2603. https://doi.org/10.5194/nhess-11-2583-2011.

El Kenawy, A., McCabe, M., Vicente-Serrano, S., Robaa, S., & Lopez-Moreno, J. (2016). Recent changes in continentality and aridity conditions over the Middle East and North Africa region, and their association with circulation patterns. Climate Research, 69(1), 25–43. https://doi.org/10.3354/cr01389.

Elagib, N. A. (2010). Erratum to: Exploratory analysis of rain days in Central Sudan. Meteorology and Atmospheric Physics, 110(1–2), 85–85. https://doi.org/10.1007/s00703-010-0107-7.

El-Magd, I. A., Ismail, A., & Zanaty, N. (2016). Spatial variability of urban heat islands in Cairo City, Egypt using time series of landsat satellite images. International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS, 5(1), 1618–1638. https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.48.

Fontaine, B., Janicot, S., & Monerie, P. (2013). Recent changes in air temperature, heat waves occurrences, and atmospheric circulation in northern Africa. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(15), 8536–8552. https://doi.org/10.1002/jgrd.50667.

Frich, P., Alexander, L., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A., & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the Twentieth Century. Climate Research, 19, 193–212. https://doi.org/10.3354/cr019193.

Gamal, G. (2019). Historical and future extreme temperature indices of Greater Cairo region, Egypt. Bulletin de La Société de Géographie d'Egypte, 92(1), 40–52. https://doi.org/10.21608/bsge.2019.90372.

Hasanean, H. M., & Basset, H. A. (2006). Variability of summer temperature over Egypt. International Journal of Climatology, 26(12), 1619–1634. https://doi.org/10.1002/joc.1321.

Imran, H., Kala, J., Uddin, S., Islam, A. S., & Acharya, N. (2022). Spatiotemporal analysis of temperature and precipitation extremes over Bangladesh using a novel gridded observational dataset. Weather and Climate Extremes, 39, 100544. https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100544.

IPCC (1995) Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Cambridge.

IPCC (1997) The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. Cambridge.

IPCC (2001) Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge.

IPCC (2007) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge.

IPCC (2012) Glossary of terms. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation.

IPCC (2014a) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.

IPCC (2014b) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.

IPCC (2022) Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge.

Jones, P. D., New, M., Parker, D. E., Martin, S., & Rigor, I. G. (1999). Surface air temperature and its changes over the past 150 years. Reviews of Geophysics, 37(2), 173–199. https://doi.org/10.1029/1999rg900002.

Kostopoulou, E., & Jones, P. D. (2005b). Assessment of climate extremes in the Eastern Mediterranean. Meteorology and Atmospheric Physics, 89(1–4), 69–85. https://doi.org/10.1007/s00703-005-0122-2.

Kosmopoulos, P., Kazadzis, S., El-Askary, H., Taylor, M., Gkikas, A., Proestakis, E., Kontoes, C., & El-Khayat, M. (2018). Earth-observation-based estimation and forecasting of particulate matter impact on solar energy in Egypt. Remote Sensing, 10(12), 1870.https://doi.org/10.3390/rs10121870.

Li, Q., Li, W., Si, P., Xiaorong, G., Dong, W., Jones, P., Huang, J. and Cao, L. (2010) Assessment of Surface Air Warming in Northeast China, With Emphasis on The Impacts of Urbanization, Theoretical and Applied Climatology, Vol. 99, pp. 469–478 (www.springerlink.com).

May, J. O., & Looney, S. W. (2022). On sample size determination when comparing two independent spearman or kendall coefficients. Open Journal of Statistics, 12(02), 291–302. https://doi.org/10.4236/ojs.2022.122020. Kendall, M.G. (1975) Rank Correlation Methods. 4th Edition, Charles Griffin, London.

McCarthy, J. J. (2001). Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.

Mostafa, A. N., Wheida, A., El Nazer, M., Adel, M., El Leithy, L., Siour, G., Coman, A., Borbon, A., Magdy, A. W., Omar, M., Saad-Hussein, A., & Alfaro, S. C. (2019). Past (1950–2017) and future (−2100) temperature and precipitation trends in Egypt. Weather and Climate Extremes, 26, 100225. https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100225.

NOAA National Centers for Environmental Information, Monthly Global Climate Report for Annual 2021, published online January 2022, https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202113.

Paeth, H., Born, K., Girmes, R., Podzun, R., & Jacob, D. (2009). Regional climate change in tropical and northern Africa due to greenhouse forcing and land use changes. Journal of Climate, 22(1), 114–132. https://doi.org/10.1175/2008jcli2390.1.

Peterson, T.C., Gallo, K.P., Lawrimore, J., Owen, T.W., Huang, A. and McKittrick, D.A. (1999) Global Rural Temperature Trends, Geophysical Research Letters, Vol. 26, No. 3, pp. 329-332 (http://digitalcommons.unl.edu).

Soltani, M., Laux, P., Kunstmann, H., Stan, K., Sohrabi, M. M., Molanejad, M., Sabziparvar, A. A., Ranjbar SaadatAbadi, A., Ranjbar, F., Rousta, I., Zawar-Reza, P., Khoshakhlagh, F., Soltanzadeh, I., Babu, C. A., Azizi, G. H., & Martin, M. V. (2015). Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran. Theoretical and Applied Climatology, 126(3–4), 775–795. https://doi.org/10.1007/s00704-015-1609-5.

Stephenson, D. B. (2008). Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events. Climate Extremes and Society, 11–23. https://doi.org/10.1017/cbo9780511535840.004.

Thomas, D. (1997) Sand seas and aeolian bedforms. In: Thomas D (ed) Arid Zone Geomorphology: Processes, Form and Change in Dry lands, 2nd edn. John Wiley, Chichester, pp 413–412 UNESCO (1977) World Distribution of Arid Regions. Paris.

Van Oldenborgh, G. J., Hendon, H., Stockdale, T., L'Heureux, M., Coughlan de Perez, E., Singh, R., & van Aalst, M. (2021). Defining El Niño indices in a warming climate. Environmental Research Letters, 16(4), 044003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe9ed.

Temporal Changes of Temperature Extremes in Cairo City (1990-2022)

Sawsan Abdulmonsef Abdulazeem [(1)], Abd-Elaziz Abd-Ellatif Youseef [(2)]

Waleed Abbas Abd-Elrady Hassan [(3)]

Abstract:

Extreme weather events have become among the most essential research scopes in atmospheric sciences, especially with the observed increase in the man-made concentration of greenhouse gases, leading to a magnification in intensity, frequency, and duration of extreme spells. Climate extremes indicate numerous phenomena, e.g., thermal extremes, heat/cold waves, hurricanes, floods, and droughts. Despite their significance, systematic investigation of extremes has been hindered by some impediments, primarily the unavailability of meteorological observations. The current study relied on daily temperature measurements from Cairo International Airport Station to infer the temporal change in the intensity of temperature extremes in Cairo City during the period 1990-2022 (33 years). The data were processed using RClimDEX application on annual/seasonal scales to derive seven indices of thermal extremes and analyze their general trend. The Mann-Kendall test and Theil-Sen slope were employed to calculate the tendency, change rate, and gross change of the time series. Furthermore, the Box Plot technique was used to detect thermal extremes and outliers. It was revealed that both minimum and maximum temperatures have increased, indicating a general warming trend, not just a change in absolute minimum and maximum temperature. cold indices (nighttime extremes) showed the largest changes. The indices of coldest night, warmest night, and average minimum temperatures exhibited a statistically significant upward trend by about 5.1°C, 3.8°C, and 2.6°C, respectively (p-value < 0.01). On the other hand, non-significantly slight increases in the hot indices (daytime extremes) were detected. The gross changes of 0.2°C, 1.6°C, and 1.2°C were unveiled in the indices of the coolest day, hottest day, and average maximum temperatures, respectively. The investigation concluded that Cairo has experienced a remarkable warming in the intensity of temperature extremes over the past three decades, with an observed greater intensification during the night than the day. The detected day/night pattern of warming led to a decrease in the daily temperature range. These findings provided evidence of the occurrence of local signals in the city's atmospheric warming, i.e., the role of urban sprawl around the meteorological stations, in conjunction with the macro-scale effects associated with the regional/global climate system. Accordingly, it is arguable that the accelerated urban warming in Cairo is a resultant of both local and regional/global constituents. It is recommended that this binary nature of urban warming should be considered when formulating the confrontation strategies of thermal extremes, whether at the level of mitigation, adaptation, or adjustment.

Keywords:

Temperature Extreme Events; RClimDEX Software; Box Plot; Mann-Kendall Test; Theil-Sen Estimator; General Trend; Cairo City.

(1) *Demonstrator, Department of Geography and GIS, Faculty of Arts, Ain Shams University.*

(2) *Professor of Physical Geography, Department of Geography & GIS, Faculty of Arts, Ain Shams University.*

(3) *Associate Professor of Climatology and RS & GIS Applications, Department of Geography and GIS, Faculty of Arts, Ain Shams University.*