

التغيرات الزمانية والمكانية في مؤشر الاجهاد الحراري بالعراق

أ.م.د. أحمد لفتة حمد البديري ^{ID}

وزارة التربية / المديرية العامة لتربية واسط/ الكلية التربوية المفتوحة/ فرع الصويرة

ahmedlalbudeiri@gmail.com

07707991200

مستخلص البحث:

تُحلل هذه الدراسة الاتجاهات الزمانية-المكانية للإجهاد الحراري البشري في العراق خلال المدة (1980-2024) باستخدام مؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI) اعتماداً على بيانات ساعية من مجموعة ERA5-HEAT، وقد جرى اشتقاق القيم السنوية والفصلية الصغرى والمتوسطة والعظمى للمؤشر، وتحليل اتجاهاتها باستخدام اختبار مان-كندال المعدل (Modified Mann-Kendall) وطريقة ميل-سين (Sen's slope) لتقدير معدلات التغير، وقد أظهرت النتائج اتجاهات تصاعدية معنوية إحصائياً في معظم قيم UTCI، مما يشير إلى تزايد واضح في شدة الإجهاد الحراري خلال العقود الأربعة الأخيرة، وسُجل أعلى معدل زيادة في القيم الصغرى للمؤشر (0.62 م/عقد)، وهو ما يعكس تسارع الاحترار الليلي مقارنة بالفترات النهارية، كما كشفت الشذوذات الزمنية عن تحول واضح نحو ظروف حرارية أكثر دفئاً منذ أواخر تسعينيات القرن الماضي، وأظهر تحليل تكرار فئات UTCI انخفاضاً ملحوظاً في فئات الإجهاد البارد مقابل زيادة معنوية في فئات الإجهاد الحراري القوي والشديد جداً والمتطرف، لا سيما في القيم العظمى النهارية، كما بيّن التحليل المكاني أن فئة الإجهاد الحراري المتطرف سجلت اتجاهًا تصاعدياً في جميع المحطات المناخية، مع أعلى معدلات زيادة في النطاق الممتد من جنوب غرب العراق إلى شماله الغربي، حيث تراوحت الزيادة بين (6-10) أيام لكل عقد، في المقابل، تركزت أعلى تكرارات هذه الفئة في المناطق الوسطى والجنوبية، بعدد أيام سنوي يتراوح بين (80-150) يوماً، تعكس هذه النتائج اتساع نطاق التعرض للظروف الحرارية القصوى وتزايد تكرار موجات الحر الشديدة في العراق، مما يبرز أهمية دمج مؤشرات الإجهاد الحراري في استراتيجيات التكيف المناخي والتخطيط الحضري المستدام.

الكلمات المفتاحية: اختبار مان-كيندال، الإجهاد الحراري، تحليل الاتجاه، العراق، مؤشر المناخ الحراري الشامل.

المقدمة:

يشهد النظام المناخي العالمي خلال العقود الأخيرة تزايداً ملحوظاً في تكرار وشدة الظواهر المناخية المتطرفة، مثل موجات الحر والفيضانات والجفاف، نتيجة للتغيرات المتسارعة في مكونات الغلاف الجوي وارتفاع تركيزات الغازات الدفيئة (IPCC, 2012)، وتعدّ موجات الحر من بين أكثر هذه الظواهر تأثيراً على الإنسان والبيئة، لما تسببه من إجهاد حراري ينعكس مباشرة على صحة الإنسان من خلال زيادة معدلات الوفيات والإصابات المرتبطة بالحرارة (Guo et al., 2017)، فضلاً عن أثارها غير المباشرة المتمثلة في تدهور الإنتاج الزراعي وتهديد الأمن الغذائي والمائي (Kompas et al., 2024)، وتشير تقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ إلى أن الاحترار العالمي الناتج عن الأنشطة البشرية أدى إلى ارتفاع متوسط درجات الحرارة العالمية، الأمر الذي أسهم في زيادة تكرار موجات الحر وشدها في معظم مناطق العالم خلال العقود الأخيرة (IPCC, 2021)، وتعدّ منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا من أكثر مناطق العالم تعرضاً للظواهر الحرارية المتطرفة، حيث تشير العديد من الدراسات إلى أن معدلات الاحترار فيها تفوق المعدلات العالمية، مما دفع بعض الباحثين إلى وصفها بأنها بؤرة عالمية للأحداث الحرارية الشديدة

(M. M. Hamed et al., 2023)، ويُعدّ العراق من أكثر بلدان المنطقة تأثراً بهذه الظواهر، حيث سجّل خلال العقود الأخيرة ارتفاعاً حرارياً متسارعاً تراوح بين ضعفين إلى سبعة أضعاف المعدل العالمي (Salman et al., 2017)، ولا تقتصر آثار هذا الاحترار على الجوانب المناخية، بل تمتد لتشكّل تهديداً مباشراً للصحة العامة نتيجة ازدياد مخاطر الإجهاد الحراري، الأمر الذي يجعل دراسة مؤشرات الراحة الحرارية وتحليل تغيراتها الزمانية والمكانية ذات أهمية علمية وتطبيقية متزايدة، وفي هذا السياق، شهدت دراسات الراحة الحرارية البشرية تطوراً تدريجياً خلال القرن الماضي، إذ بدأت بمؤشرات بسيطة قائمة على الملاحظة التجريبية مثل درجة الحرارة الفعالة (ET) التي اقترحها Houghton عام 1923، وتلتها مؤشرات أخرى مثل مؤشر برودة الرياح (WCI) (Siple & Passel, 1945)، ودرجة حرارة المصباح الرطب والكرة الأرضية (WBGT) (Yaglou & Minaed, 1957)، ومؤشر درجة الحرارة-الرطوبة (THI) (Thom, 1959)، على الرغم من شيوع استخدام هذه المؤشرات لبساطتها وسهولة حسابها، إلا أن محدودية صيغها الرياضية لا تمكنها من تلبية المتطلبات الأساسية للتوافق بين قيمة المؤشر والحالة الفسيولوجية الحرارية للإنسان، مما يجعل نتائجها مقيدة زمانياً ومكانياً وغير قابلة للمقارنة على نطاق واسع (Höppe, 1999)، ومع التطور الكبير في علم الأرصاد الجوية الحيوية وتقنيات النمذجة الحاسوبية منذ ستينيات القرن الماضي، برزت نماذج أكثر تقدماً تعتمد على ميزانية الحرارة البشرية، مثل معدل التصويت المتوقع (PMV) ودرجة الحرارة المتصورة (PT) ودرجة الحرارة الفعالة القياسية (SET) ودرجة الحرارة الفسيولوجية المكافئة (PET) (Qi et al., 2023) وفي العقود الأخيرة ظهر مؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI) بوصفه أحد أكثر مؤشرات الإجهاد الحراري تطوراً وشمولاً، ويُعرّف هذا المؤشر بأنه درجة حرارة الهواء في الظروف المرجعية التي تُحدث الاستجابة الفسيولوجية نفسها التي تُحدثها الظروف الجوية الفعلية في جسم الإنسان، ويعتمد المؤشر على نموذج ديناميكي متقدم للتنظيم الحراري البشري مدمجاً مع نموذج متكامل للملابس، إذ يدمج المتغيرات الجوية الرئيسية مثل درجة حرارة الهواء والرطوبة وسرعة الرياح والإشعاع الشمسي مع العوامل الفسيولوجية كالعزل الحراري للملابس ومعدل الأيض، مما يتيح تقييماً أكثر دقة لمستويات الإجهاد الحراري في البيئات المناخية المختلفة (Blazejczyk et al., 2012; Jendritzky et al., 2012; Blazejczyk et al., 2013)، وهو مشتق في الواقع من نموذج فيالا متعدد العقد لتوازن حرارة الإنسان (Fiala et al., 2012). وعلى الرغم من الاستخدام المتزايد لمؤشر UTCI في تقييم الإجهاد الحراري في العديد من مناطق العالم، فإن الدراسات التي تناولت تطبيقه في منطقة الشرق الأوسط عموماً والعراق على وجه الخصوص ما تزال محدودة، خاصة تلك التي تحلل الاتجاهات طويلة الأمد والتباينات المكانية للإجهاد الحراري، وتبرز هذه الفجوة البحثية في ظل الخصائص المناخية المتباينة للعراق، حيث تسجل المناطق الوسطى والجنوبية درجات حرارة مرتفعة جداً خلال فصل الصيف، في حين تتميز المناطق الشمالية الجبلية بظروف مناخية أكثر اعتدالاً، الأمر الذي يجعل العراق حالة دراسية مهمة لفحص الأنماط المكانية والزمانية للإجهاد الحراري. تنطلق الدراسة من مشكلة تتمثل في محدودية المعرفة العلمية حول التغيرات الزمانية والمكانية للإجهاد الحراري في العراق باستخدام مؤشرات مناخية حيوية حديثة، في ظل تزايد موجات الحر وارتفاع درجات الحرارة خلال العقود الأخيرة، وقرّضت الدراسة أن العراق شهد خلال العقود الماضية اتجاهات تصاعدياً معنوياً في مستويات الإجهاد الحراري وفق مؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI)، مع وجود تباينات مكانية واضحة بين مناطق البلاد المختلفة، وتكمن أهمية الدراسة في أنها تسهم في سد فجوة معرفية في دراسات المناخ الحيوي في العراق، كما توفر أساساً علمياً يمكن الاستفادة منه في تقييم المخاطر الصحية المرتبطة بالحرارة ودعم استراتيجيات التكيف مع التغير المناخي والتخطيط الحضري المستدام.

وبناءً على ذلك، تهدف الدراسة إلى تحليل التغيرات الزمانية والمكانية لمؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI) في العراق خلال العقود الأخيرة، وتحديد اتجاهاته طويلة الأمد، ورسم الأنماط المكانية لفئات الإجهاد الحراري.

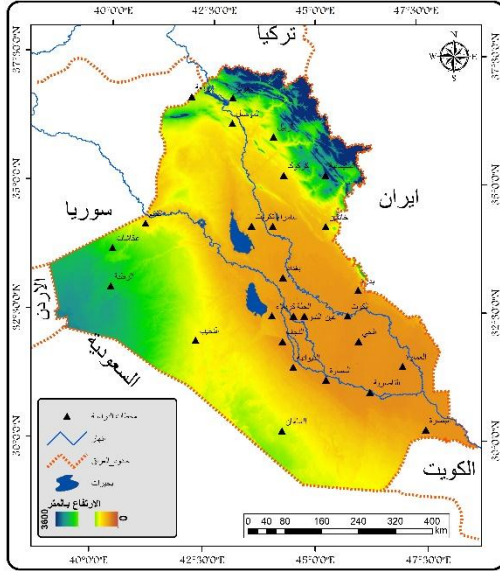
منطقة الدراسة

يقع العراق في الركن الشمالي الشرقي من الوطن العربي ضمن الجزء الجنوبي الغربي من قارة آسيا، بين دائرتي عرض (29.5°-37.22°) وخطي طول (38.45°-48.45°) شرقاً خريطة (1)، ويُعد خط عرض (35° شمالاً) من أبرز الخطوط العرضية المارة بالبلاد، إذ يمثل الحد الفاصل بين نطاق المناخ المعتدل والمناخ شبه المداري، ويقع نحو ثلثي مساحة العراق إلى الجنوب من هذا الخط ضمن النطاق شبه المداري، حيث يسود مناخ حار وجاف خلال الموسم الجاف من السنة، في حين يخضع الجزء الواقع شمال هذا الخط إلى نطاق المناخ المعتدل، يحد العراق ست دول هي: تركيا من الشمال، سوريا والأردن من الغرب، المملكة العربية السعودية من الجنوب الغربي، إيران من الشرق، والكويت والخليج العربي من الجنوب (Muslih & Abbas, 2024)، وتتباين تضاريسه الرئيسية إلى أربع وحدات جغرافية: السهول الفيضية في الوسط والجنوب الشرقي، منطقة الجزيرة الواقعة بين نهري دجلة والفرات، السلاسل الجبلية الممتدة على طول الحدود مع تركيا وإيران، فضلاً عن المنطقة الصحراوية غرب نهر الفرات (Al-Ansari, 2021).

بيانات الدراسة

اعتمدت الدراسة على قاعدة بيانات ERA5-HEAT (Human thermal comfort) التي طورها المركز الأوروبي للتنبؤات متوسطة المدى (ECMWF) ضمن إطار خدمة كوبرنيكوس لتغير المناخ (C3S)، وهي تمثل أحدث سلسلة زمنية عالمية شبكية لمؤشرات الضغط الحراري البشري، تتوافر البيانات بدقة مكانية مقدارها 0.25×0.25 ، وبفاصل زمني ساعي منذ عام 1940 وحتى الوقت الحالي، وتغطي جميع مناطق العالم باستثناء القارة القطبية الجنوبية، وتشمل المتغيرات الرئيسية درجة الحرارة الإشعاعية المتوسطة (MRT) والمؤشر المناخي الحراري الشامل (UTCI) المحسوب استناداً إلى الحرارة، الرطوبة، الرياح والإشعاع، في هذه الدراسة جرى استخدام بيانات UTCI الساعية للفترة (1980-2024) الخاصة بمنطقة العراق، والمستمدة من النسخة الأحدث (v1.1) المتاحة عبر منصة (Climate Data Store) التابعة لخدمة كوبرنيكوس (Di Napoli et al., 2021)، وجرى اعتماد سبعة وعشرين نقطة تمثل محطات الرصد المناخي الموزعة على مختلف أنحاء العراق، بهدف تمثيل التباين المكاني للظروف الحرارية، كما هو موضح في خريطة (1).

خريطة (1) موقع منطقة الدراسة
وتضاريسها مع المحطات المختارة



جدول (1) فئات مؤشر الإجهاد الحراري العالمي (UTCI) والحالات الفسيولوجية المقابلة لها

الإدراك الفسيولوجي	النطاق الحراري (م°)	فئة الإجهاد الحراري
بارد جداً	أقل من -13	إجهاد برودة شديد
برودة واضحة	0 إلى -13	إجهاد برودة متوسط
بارد	0 إلى 9	إجهاد برودة طفيف
مريح	9 إلى 26	عدم وجود إجهاد حراري
دافئ	26 إلى 32	إجهاد حراري متوسط
حار	32 إلى 38	إجهاد حراري شديد
حار جداً	38 إلى 46	إجهاد حراري شديد جداً
شديد الحرارة	أكبر من 46	إجهاد حراري متطرف

المصدر / اعتماد على نموذج الارتفاع الرقمي

منهجية الدراسة

حساب مؤشر UTCI وتصنيفاته

يُعد مؤشر UTCI أحد أبرز مؤشرات الراحة الحرارية وأكثرها اعتماداً، لكونه يدمج بين العوامل البيئية والفسيولوجية في تقييم الضغط الحراري البشري، وقد تم تطويره استناداً إلى معادلة تقريبية بالانحدار متعدد الحدود من الدرجة السادسة (Bröde et al., 2012)، ويُحسب باستخدام بيانات درجة حرارة الهواء على ارتفاع 2 م، ودرجة الحرارة الإشعاعية المتوسطة، والرطوبة النسبية، وسرعة الرياح. ورغم وجود أكثر من مئة مؤشر حراري، فقد تم اعتماد UTCI في هذه الدراسة نظراً لانتشاره وموثوقيته، ولملاءمته لظروف المناخ في المنطقة المدروسة، ووفقاً للاستجابة الفسيولوجية للجسم، تُصنّف قيمه عادةً إلى عشرة مستويات من الضغط الحراري (Ullah et al., 2022)، غير أنه تم الإقتصار هنا على ست فئات رئيسية تمثل الظروف الحرارية الحارة الأكثر شيوعاً في المنطقة جدول (1)، استخدمت قياسات UTCI الساعية لجميع المحطات المتاحة خلال 1980-2024. حُوّلت السلاسل الساعية إلى إحصاءات يومية

(UTCI_min, UTCI_mean, UTCI_max) ثم جُمعت إلى مقاييس سنوية وفصلية

(DJF, MAM, JJA, SON). ولاتساق المقارنة عبر الزمن، احتُسبت شذوذات UTCI مقابل فترة أساس 1981-2010 (طبّق ذلك على مقاييس UTCI، بينما حُلّت مؤشرات الإجهاد بقيمها المطلقة).

تحليل الاتجاهات:

استخدمت هذه الدراسة طريقة ميل-سين (Sen's slope) لتحديد الاتجاهات في بيانات السلاسل الزمنية، حيث تُقدّر هذه الطريقة الميل الوسيط للخطوط الواصلة بين أزواج النقاط العينية، وتُعد هذه الطريقة اللامعلمية قوية في معالجة القيم المتطرفة، والتوزيعات غير الطبيعية، مما يجعلها مناسبة لتحليل اتجاهات مؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI) (Sen, 1968)، ولتقييم الدلالة الإحصائية لهذه الاتجاهات، طُبّق اختبار مان-كندال المعدل (MMK) عند مستوى معنوية $(P < 0.05-0.001)$ (K. H. Hamed & Rao, 1998)، ويُعتبر هذا الاختبار اللامعلمي، القائم على ترتيب القيم بدلاً من استخدام مقاديرها المطلقة، فعالاً في الكشف عن الاتجاهات الرتيبة (monotonic trends) حتى في ظل وجود قيم متطرفة أو شاذة، تكمن ميزة اختبار MMK في تقليل اعتماده على الافتراضات التوزيعية، ما يجعله أداة قوية لتحليل البيانات المناخية غير الموزعة طبيعياً، إن الجمع بين طريقة سين واختبار مان-كندال المعدل يوفر دليلاً وثيقاً على وجود تغيرات زمنية جوهرية في السلاسل المناخية (Alashan, 2020)، وقد أنجزت جميع الحسابات في بيئة R بالاستعانة بحزمة (modifiedmk) لتطبيق اختبار MMK.

نتائج الدراسة

1. التغيرات الزمانية والمكانية في مؤشرات UTCI

يوضح الشكل (1) التباين الشهري في القيم العظمى والمتوسطة والصغرى لمؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI)، موضحاً الاختلافات الموسمية الكبيرة في مستويات الإجهاد الحراري، وتُسجل أدنى القيم في كانون الثاني (-4.7°م)، بينما تبلغ ذروتها في تموز (48.5°م)، وتُعد الفترة الممتدة من حزيران إلى آب الأخطر من الناحية المناخية والصحية، حيث تتجاوز القيم المتوسطة للـ UTCI عتبة الإجهاد الحراري القوي (أكبر أو يساوي 32) م، فيما ترتفع القيم العظمى إلى مستوى الإجهاد الحراري الشديد جداً (أكبر أو يساوي 46) م، كما تكشف القيم الصغرى المرتفعة خلال هذه الفترة (أكبر من 22) م عن محدودية التبريد الليلي، مما يزيد من تراكم الإجهاد الحراري ويضاعف المخاطر الصحية، في المقابل، يعكس اشهر الشتاء ظروفاً أكثر اعتدالاً، حيث تنخفض قيم UTCI إلى مستويات تقع غالباً ضمن نطاق الراحة الحرارية أو الإجهاد البارد الطفيف

الشكل (1) القيم الصغرى والمتوسطة والعظمى الشهرية لمؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI) للمدة (1980 - 2024)

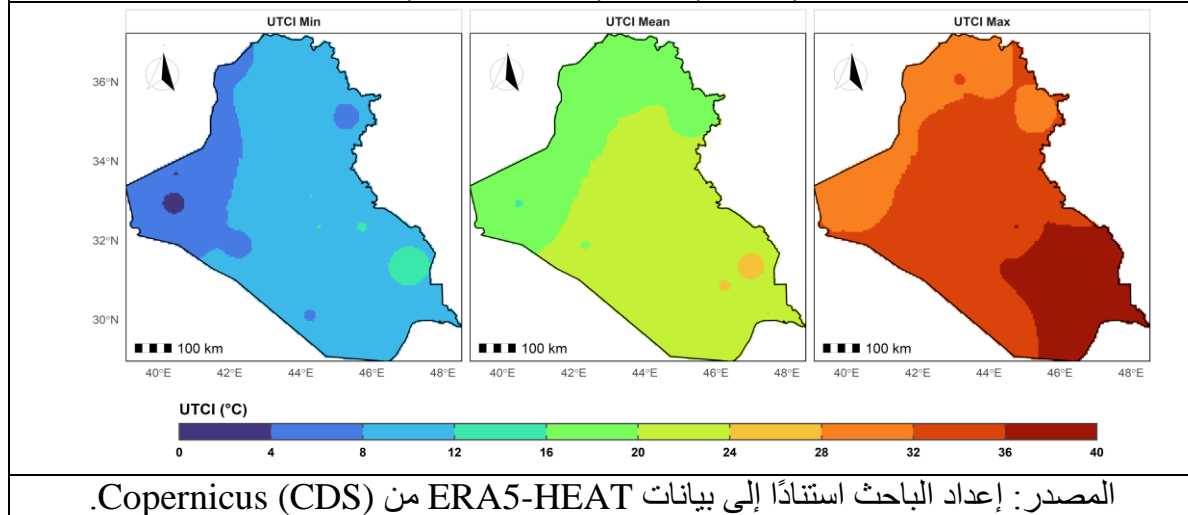
	UTCI (°C)											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
UTCI_max	18.5	20.8	25.9	33.0	39.6	45.2	48.5	48.3	43.8	36.2	26.4	20.3
UTCI_mean	5.4	7.4	12.7	20.2	27.2	32.6	36.0	35.6	30.5	23.1	13.6	7.4
UTCI_min	-4.7	-3.6	0.8	7.7	14.2	19.2	22.9	23.0	18.2	12.2	4.0	-2.1

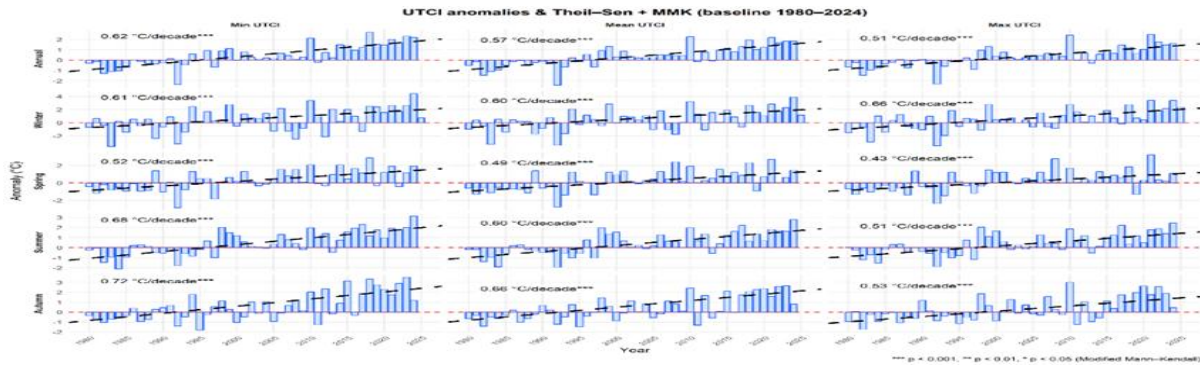
المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى بيانات ERA5-HEAT من Copernicus (CDS).

تبين الخريطة (2) التوزيع المكاني السنوي لمؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI) في العراق للقيم الصغرى، والمتوسطة، والعظمى، اذ ظهرت خريطة القيم الصغرى بنطاقين تراوح بين (4 - 8)°م في جزء من المناطق الغربية بينما الجزء الأكبر هو تراوح بين (8 - 12)°م، في حين سجلت خريطة القيم المتوسطة نطاقين أيضا تراوحت بين (16 - 20)°م توزعت في المناطق الشمالية والغربية من العراق، بينما الجزء الاغلب تراوحت القيم بين (20 - 24)°م تمثلت في المناطق الجنوبية والجنوبية الشرقية والجنوبية الغربية، اما خريطة القيم العظمى تمثلت في ثلاثة نطاقات النطاق الأول تراوح بين (28 - 32)°م، تمثلت في الشمالية والشمالية الشرقية والنطاق الثاني (32 - 36)°م، توزع في اغلب المناطق الوسطى والمناطق الجنوبية الغربية، والنطاق الثالث (36 - 40)°م ضم المناطق الجنوبية وبعض المناطق الجنوبية الشرقية اما الاتجاهات يوضح الشكل (2) الاتجاهات الزمنية لشذوذ مؤشر الإجهاد الحراري العالمي (UTCI) للمدة (1980-2024)، محسوبة باستخدام منحدر Theil-Sen واختبار Mann-Kendall المعدل عند مستويات دلالة مختلفة،

يتبين أن جميع القيم السنوية والفصلية لمعامل UTCI (القيم الصغرى، والمتوسطة، والقيم العظمى) تُظهر اتجاهًا تصاعديًا معنويًا إحصائيًا ($p < 0.001$)، مما يشير إلى ارتفاع واضح في الإجهاد الحراري عبر العقود الأربعة الأخيرة، بلغت أعلى معدلات الزيادة في فصل الخريف (0.72) درجة مئوية/عقد للحد الأدنى والصيف (0.68) درجة مئوية/عقد، في حين كانت أقل القيم خلال الربيع (0.43) درجة مئوية/عقد للحد الأقصى، بينما بلغ أعلى تزايد سنوي (0.62) درجة مئوية/عقد في القيم الصغرى، وتعكس هذه النتائج تزايد تكرار وشدة الإجهاد الحراري في المواسم الحارة أكثر من المواسم الباردة، وهو ما يتفق مع الاتجاهات العالمية.

خريطة (2) القيم الصغرى والمتوسطة والعظمى السنوية لمؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI) للمدة (1980 - 2024)

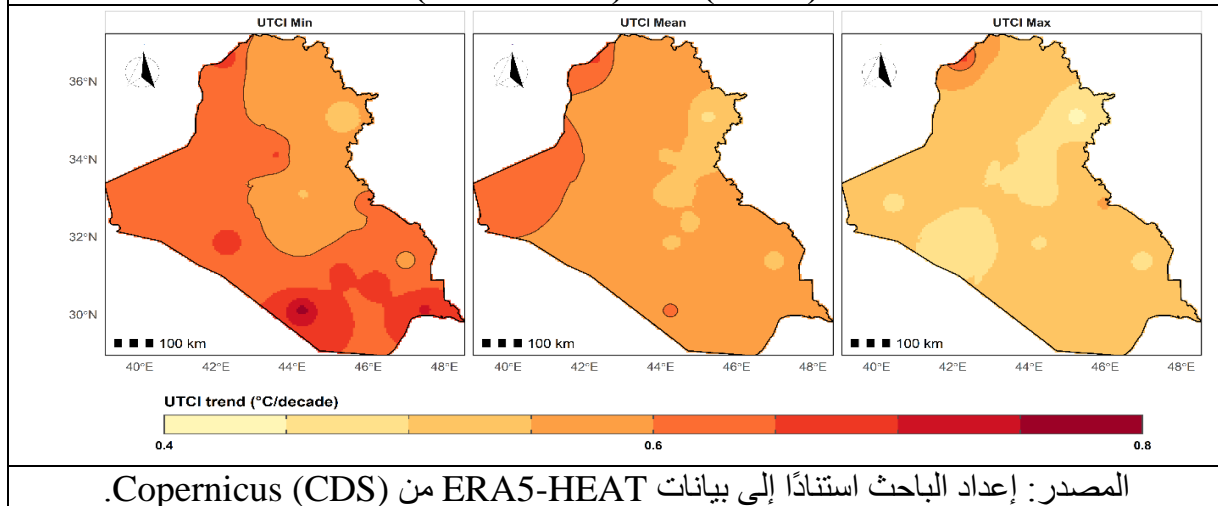




شكل (2) الاتجاهات السنوية والفصلية لشذوذ مؤشر الإجهاد الحراري الشامل (UTCI) للمدة (1980-2024)،

اما الخريطة (3) توضح لتوزيع المكاني لاتجاهات مؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI) في العراق (°م/عقد) للقيم الصغرى والمتوسطة والعظمى تشير جميعها في التزايد وبلغ مقدار التزايد بين (0.4 - 0.8) °م/عقد وتُظهر النتائج ارتفاعاً أوضح في القيم الصغرى توزعت في نطاقين الأول (0.6 - 0.65) °م/عقد في المناطق الشمالية والوسطى وبعض المناطق الشرقية ، والثاني تراوح مقدار التغير (0.65 - 0.70) °م/عقد اغلب مناطق العراق ، في حين شهدت القيم المتوسطة أيضاً نطاقين الأول (0.55 - 0.60) °م/عقد شملت اغلب مناطق العراق ، والنطاق الثاني تراوح مقدار التغير (0.60 - 0.65) °م/عقد توزع المناطق الغربية ، مع ظهور بعض المناطق تراوح مقدار التغير فيها (0.50 - 0.55) °م/عقد ، اما خريطة القيم الصغرى تراوح مقدار التغير (0.45 - 0.50) °م/عقد

خريطة (3) اتجاهات القيم الصغرى والمتوسطة والعظمى السنوية لمؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI) للمدة (1980 - 2024)

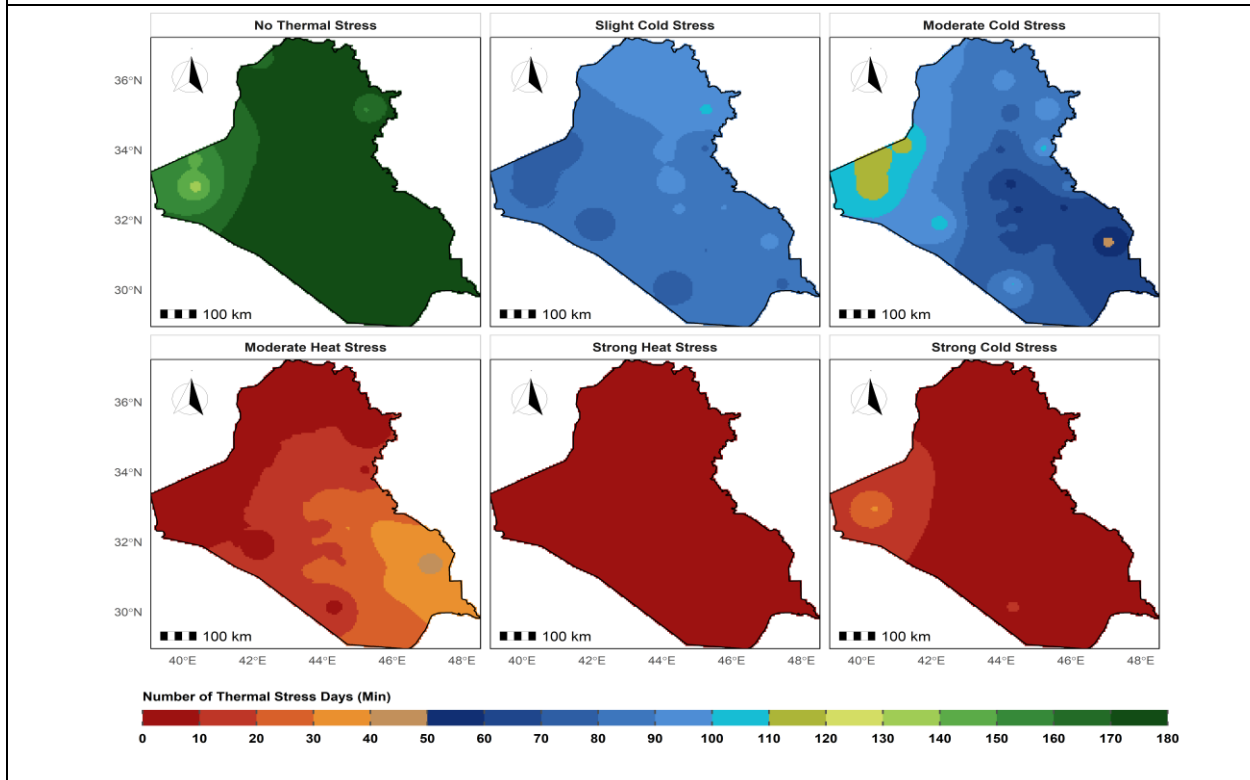


المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى بيانات ERA5-HEAT من Copernicus (CDS).

2-التغيرات الزمانية والمكانية في فئات الاجهاد الحراري للقيم الصغرى

الاعتماد على مؤشر الإجهاد الحراري العالمي (UTCI)، توضح الخريطة (4) التوزيع المكاني لفئات الإجهاد الحراري في العراق، مبيّنة وجود تباين واضح في شدة الإجهاد بين مناطق البلاد إذ تسود فئة عدم الإجهاد الحراري في معظم المحطات، ولا سيما في المناطق الشمالية و الوسطى والجنوبية، حيث تراوحت قيمها بين (140 - 180 يوماً)، مما يعكس سيادة الظروف المناخية الليلية المعتدلة خلال معظم أيام السنة، في المقابل، تظهر فئة الإجهاد البارد الطفيف في المناطق الشمالية، حيث تتراوح بين (70 - 100 يوم) نتيجة لانخفاض درجات الحرارة واعتدال المناخ في تلك الأقاليم، أما فئة الإجهاد البارد المعتدل فتغطي سبع نطاقات حرارية تمتد من الجنوب الشرقي نحو الشمال الغربي، بقيم تراوحت بين (50 - 110 يوماً)، وهو ما يشير إلى تأثيرات انتقالية بين الأقاليم الحرارية. كما تُظهر الخريطة تموضع فئة الإجهاد الحار المعتدل في أربع نطاقات متفرقة، تتراوح بين (10 - 40) يوماً، وتتركز غالباً في المناطق الوسطى والجنوبية المتأثرة بارتفاع درجات الحرارة خلال فصل الصيف. في حين اقتصرت فئة الإجهاد الحار الشديد على عدد محدود من الأيام يتراوح بين (0 - 10 أيام)، وتتركز في الأجزاء الجنوبية والغربية ذات الحرارة المرتفعة، بينما ظهرت فئة الإجهاد البارد الشديد في ثلاث نطاقات ضعيفة تراوحت بين (0 - 30 يوماً)، تركزت في الأجزاء الشمالية المرتفعة من البلاد نتيجة لانخفاض درجات الحرارة خلال فصل الشتاء. ويُبرز هذا التوزيع المكاني تدرجاً حرارياً واضحاً من الشمال إلى الجنوب، يعكس الخصائص المناخية العامة للعراق ضمن النطاق شبه الجاف الحار.

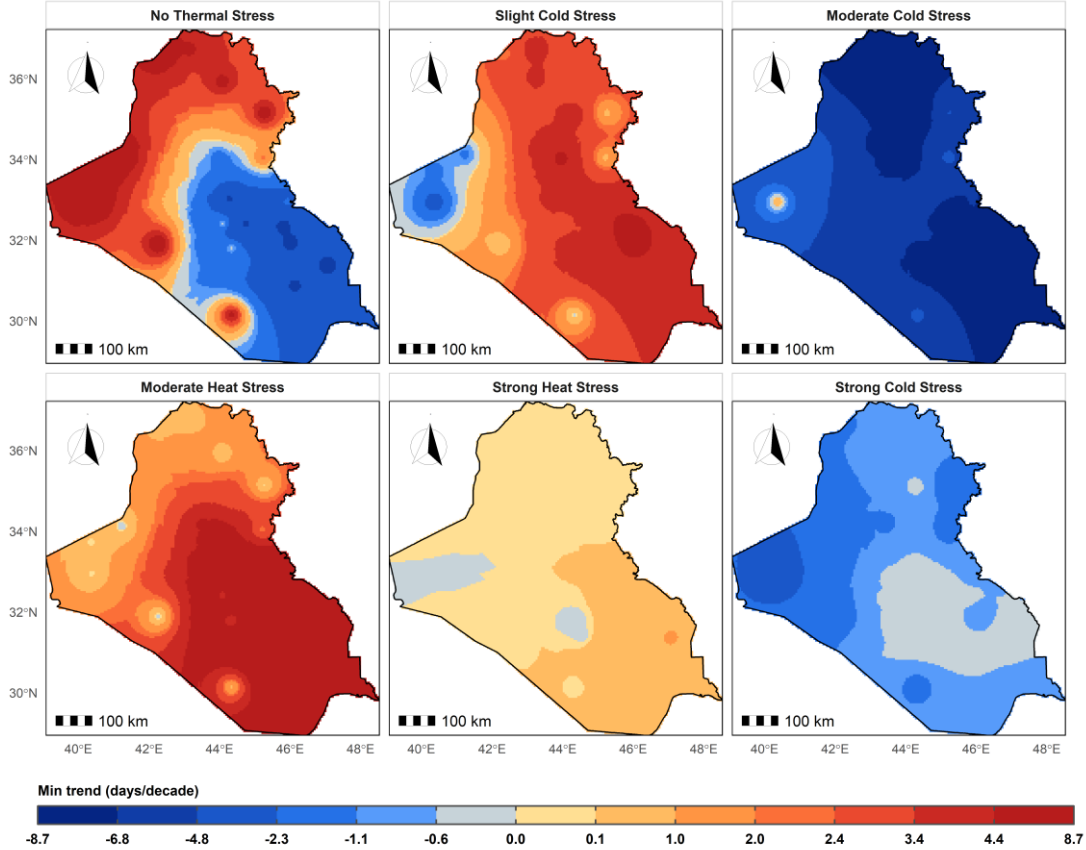
خريطة (4) التوزيع المكاني لفئات الإجهاد الحراري في للقيم الصغرى للمدة (1980 - 2024)



المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى بيانات ERA5-HEAT من Copernicus (CDS).

3- الاتجاهات الزمانية والمكانية لعدد فئات الإجهاد الحراري في العراق (القيم الصغرى)
تُظهر الخريطة (5) التوزيع المكاني لاتجاهات فئات الإجهاد الحراري في العراق، مبيّنة تبايناً مكانياً واضحاً في شدة واتجاه التغيرات الحرارية خلال العقود الماضية، فقد تبين أن فئة عدم الإجهاد الحراري تشهد تبايناً ملحوظاً بين الارتفاع والانخفاض، إذ سجّلت المناطق الوسطى والجنوبية، والجنوبية الشرقية اتجاهاً تنازلياً واضحاً تراوح بين (-0.6 - -8.7) يوم لكل عقد، مما يشير إلى تراجع في عدد الأيام المريحة حرارياً، في المقابل، أظهرت المناطق الشمالية والشمالية الشرقية والغربية، إضافة إلى أجزاء من المنطقة الوسطى وبعض مناطق السماوة، اتجاهاً متزايداً تراوح بين (1 - 8.7) يوم لكل عقد، ما يعكس تحسناً نسبياً في الظروف الحرارية المعتدلة، أما فئة الإجهاد البارد الطفيف فقد اتسمت باتجاه متزايد في معظم أنحاء العراق، إذ تراوح مقدار التغير بين (0.0 - 8.7) يوم لكل عقد، وسُجّلت أعلى معدلات الزيادة في المناطق الجنوبية والجنوبية الغربية بواقع (3.4 - 8.7) يوم لكل عقد، بينما أظهرت أجزاء من المنطقة الغربية انخفاضاً محدوداً تراوح بين (-0.6 - -6.8) يوم لكل عقد، وشهدت فئة الإجهاد البارد المعتدل اتجاهاً تنازلياً واضحاً، متوزعاً في أربعة نطاقات مكانية، تراوح مقدار التغير فيها بين (-1.1 - -8.7) يوم لكل عقد، وكانت أعلى قيم الانخفاض في المناطق الجنوبية الشرقية والشمالية بمقدار (-8.7) يوم لكل عقد، مما يدل على تراجع في شدة الإجهاد البارد، في حين أظهرت فئة الإجهاد الحار المعتدل اتجاهاً متصاعداً في عموم مناطق العراق، إذ بلغ في المناطق الشمالية والغربية تزايداً طفيفاً تراوح بين (0.0 - 1) يوم لكل عقد، بينما كان أكثر وضوحاً في المناطق الجنوبية، والجنوبية الشرقية، والجنوبية الغربية، وبعض المناطق الوسطى، حيث تراوح مقدار الزيادة بين (2.4 - 8.7) يوم لكل عقد، مما يعكس اتساع نطاق الإجهاد الحراري المعتدل نتيجة ارتفاع درجات الحرارة، أما فئة الإجهاد الحار الشديد فقد أظهرت تغيرات محدودة ضمن ثلاثة نطاقات مكانية تراوحت بين (-0.6 إلى 1) يوم لكل عقد، في حين سجلت فئة الإجهاد البارد الشديد اتجاهاً تنازلياً عاماً، متوزعة في أربعة نطاقات مكانية تراوحت بين (0.0 إلى -2.3) يوم لكل عقد، ما يشير إلى تراجع حالات الإجهاد البارد الشديد مع مرور الزمن، وتبرز هذه النتائج مجتمعة تحولاً حرارياً تدريجياً نحو ظروف أكثر حرارة في معظم أنحاء العراق، مع انحسار واضح لفئات الإجهاد البارد، وهو ما ينسجم مع الاتجاهات المناخية العالمية المرتبطة بظاهرة الاحترار المناخي وتأثيراتها الإقليمية.

خريطة (5) التوزيع المكاني لاتجاهات فئات الإجهاد الحراري للقيم الصغرى للمدة (1980 - 2024)

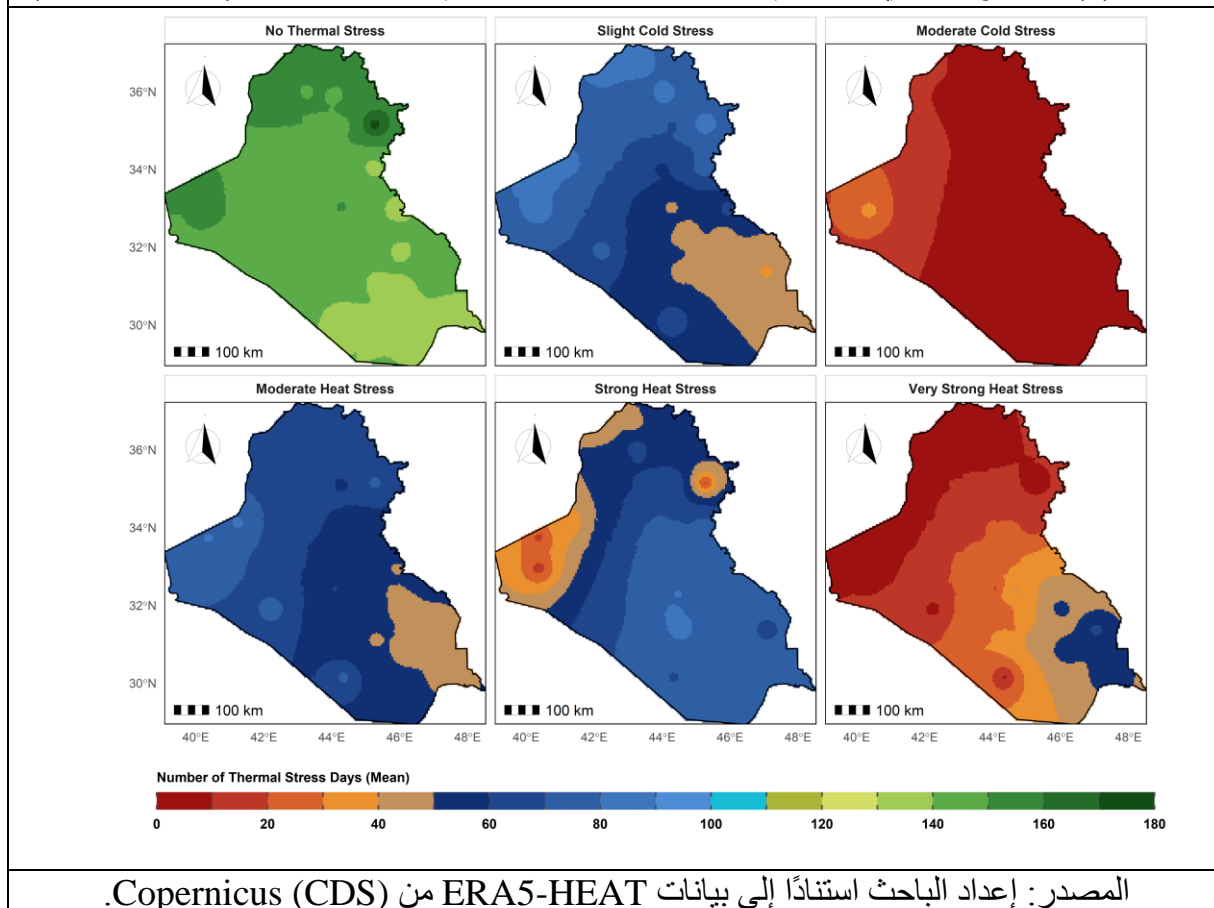


المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى بيانات ERA5-HEAT من Copernicus (CDS).

4- التغيرات الزمانية والمكانية في عدد أيام فئات الإجهاد الحراري (للقيم المتوسطة)

تُظهر الخريطة (6) التوزيع المكاني لفئات الإجهاد الحراري في العراق استناداً إلى القيم المتوسطة، ويتضح أن فئة عدم الإجهاد الحراري توزعت في ثلاث نطاقات مكانية، تراوح عدد أيامها بين (130 - 170) يوماً، وتمتد تدريجياً من الجنوب نحو الشمال، أما فئة الإجهاد البارد الطفيف فقد توزعت في أربع نطاقات مكانية تراوحت بين (40 - 80) يوماً، في حين بلغت أيام فئة الإجهاد البارد المعتدل بين (5 - 30) يوماً، وتوزعت في ثلاثة نطاقات مكانية، وكان أوسعها نطاقاً ممتداً من الشمال إلى الجنوب في الجهة الشرقية، بعدد أيام تراوح بين (5 - 10) أيام، أما فئة الإجهاد الحراري المعتدل فقد تراوحت بين (40 - 80) يوماً، وظهرت في أربعة نطاقات مكانية، وسُجلت أعلى القيم في المناطق الشمالية والغربية بمقدار (60 - 80) يوماً، بينما تراوحت فئة الإجهاد الحراري الشديد بين (20 - 80) يوماً، وتركزت أعلى القيم في المناطق الجنوبية والجنوبية الشرقية بحدود (70 - 80) يوماً، في حين سُجلت فئة الإجهاد الحراري الشديد جداً بعدد أيام تراوح بين (1 - 60) يوماً، وتوزعت في خمسة نطاقات مكانية، حيث بلغت أعلى قيمها في بعض المناطق الجنوبية، ولا سيما في محطات البصرة، والعمارة، والناصرية، والحي بمقدار (50 - 60) يوماً.

خريطة (6) التوزيع المكاني لعدد ايام فئات الإجهاد الحراري للقيم المتوسطة للمدة (1980 - 2024)

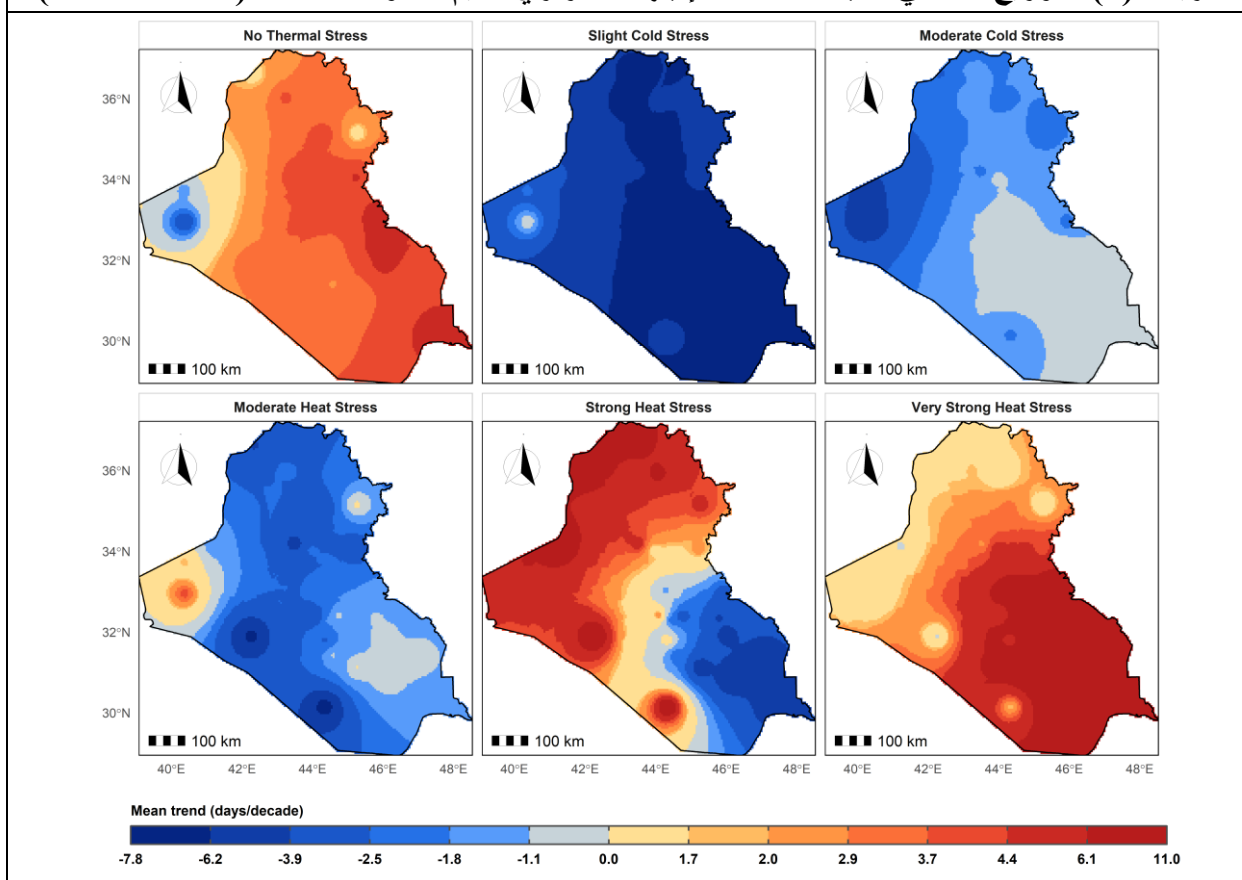


المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى بيانات ERA5-HEAT من Copernicus (CDS).

5- الاتجاهات الزمانية والمكانية لعدد ايام فئات الإجهاد الحراري في العراق (القيم المتوسطة)
تُظهر الخريطة (7) التوزيع المكاني لاتجاهات فئات الإجهاد الحراري في العراق، اوضح التباين المكاني في شدة واتجاه التغيرات الحرارية خلال العقود الماضية، فقد تبين أن فئة عدم الإجهاد الحراري تراوح مقدار التغير (6.1 - 4) يوم لكل عقد، اذ تُظهر اتجاهاً تصاعدياً في عدد الأيام في معظم مناطق العراق، ممتدة من الجنوب الى الشمال، مما يدل على زيادة عدد الأيام التي يسود فيها شعور الراحة الحرارية بمقدار (1.7 - 6.1) يوم، في حين تتركز الاتجاهات السالبة المحدودة في المنطقة الغربية متمثلة بمحطتي (عكاشات، الرطبة)، أما فئة الإجهاد البارد الطفيف فقد تناقصت في جميع محطات العراق وتراوح مقدار التناقص (-2.5 - -7.8) يوم لكل عقد، وسجلت فئة الإجهاد البارد المعتدل أيضاً في جميع المحطات اتجاهاً تنازلياً تراوح بين (0.0 - -6) يوم لكل عقد اعلى تناقص بلغ في محطة عكاشات بمقدار (-6) يوم لكل عقد ، بينما شهدت المناطق الجنوبية تناقص طفيف ، في حين سجلت فئة الإجهاد الحراري المعتدل أيضاً اتجاهاً تنازلياً طفيف وتراوح مقدار التغير (0.0 - -6.2) يوم لكل عقد ،وسجلت اعلى محطة بالانخفاض هي محطتي (السلمان ، النخيب) بمقدار (-7.7 ، -7) يوم لكل عقد على التوالي بالمقابل شهدت المنطقة الغربية اتجاهاً معاكساً وبلغ مقدار التزايد وتراوح مقدار التغير (0.0 - 4) يوم لكل عقد وكان اعلى مقدار للتزايد في محطة (الرطبة) ، بينما جاءت فئة الإجهاد الحراري الشديد بتباين واضح بين الشمال والجنوب حيث سجلت المناطق الجنوبية والجنوبية الشرقية الشرقية تناقص واضح وبلغ مقدار التناقص (-1.1 - -6.2) يوم

لكل عقد ، بالمقابل سجلت المناطق الشمالية والشمالية الشرقية والشمالية الغربية والمناطق الغربية وجزء من المنطقة الجنوبية اتجاه تصاعدي وبلغ مقدار التزايد (0.0 - 11) يوم لكل عقد ، وكانت المناطق الأكثر تزايد هي المناطق الشمالية والغربية وتراوح مقدار التغير (9 - 11) يوم لكل عقد متمثلة بمحطات (الرطبة ، النخيب ، ربيعة) في حين سجلت فئة الاجهاد الحراري الشديد جدا تزايد واضح في جميع انحاء العراق وكانت المناطق الجنوبية هي الأكثر تزايد قد بلغت الزيادة (4.4 - 11) يوم لكل عقد بالمقابل سجلت المناطق الشمالية والغربية ارتفاع اقل بمقدار (0.0 - 2) يوم

خريطة (7) التوزيع المكاني لاتجاهات فئات الإجهاد الحراري للقيم المتوسطة للمدة (1980 - 2024)

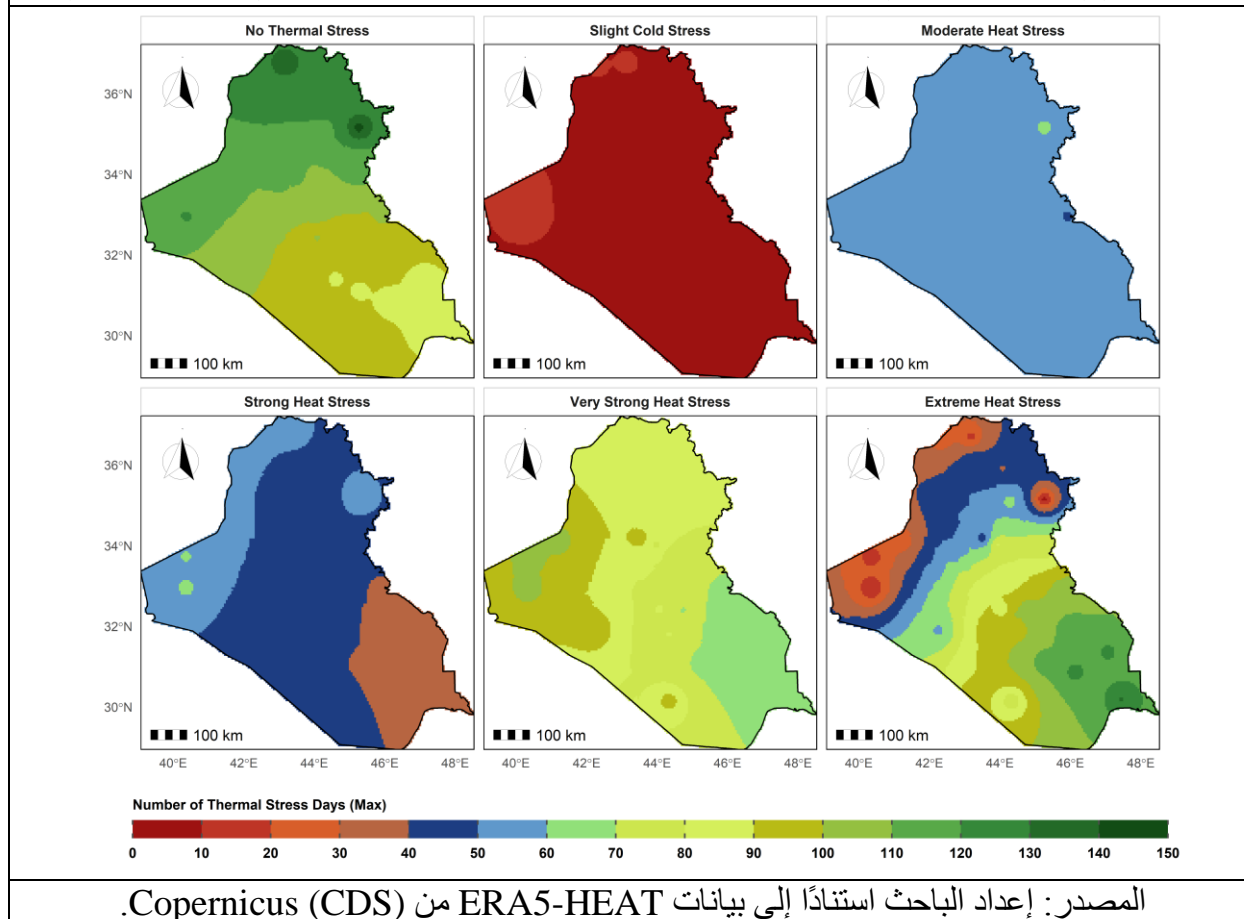


المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى بيانات ERA5-HEAT من Copernicus (CDS).

6- التغيرات الزمانية والمكانية في عدد أيام فئات الإجهاد الحراري (للقيم العظمى)
يتضح من الخريطة (8) التوزيع المكاني لفئات الإجهاد الحراري للقيم العظمى في العراق، حيث تظهر فئة عدم الإجهاد الحراري بتباين مكاني واضح، إذ تراوح عدد أيامها بين (85-144) يوم، وتوزعت ضمن خمسة نطاقات مكانية متدرجة من الجنوب نحو الشمال، وسُجلت أعلى القيم في المناطق الشمالية، ولا سيما في محطتي (السليمانية ودهوك) بواقع (144 و138) يوماً على التوالي، في حين انخفضت إلى أدنى قيمها في المناطق الجنوبية بمقدار (85-100) يوم، أما فئة الإجهاد البارد الطفيف فقد تراوح عدد أيامها بين (2-16) يوم، وتوزعت ضمن نطاقين مكانيين: الأول شمل أغلب محطات العراق بقيم تراوحت بين (2-10) أيام، في حين ظهر النطاق الثاني بقيم أعلى بلغت

(10-16) يوماً في محطتي (دهوك والرطبة)، وفيما يتعلق بفئة الإجهاد الحراري المعتدل، فقد سجلت تقارباً ملحوظاً في عدد أيامها عبر جميع المحطات، حيث تراوحت بين (50-60) يوماً، باستثناء محطة (السليمانية) التي سجلت أعلى قيمة بلغت (62) يوماً، أما فئة الإجهاد الحراري الشديد فقد تراوحت أيامها بين (37-62) يوماً، وتوزعت في ثلاثة نطاقات مكانية: النطاق الأول بلغ (37-40) يوماً وتركز في أجزاء من المناطق الجنوبية الشرقية، في حين امتد النطاق الثاني بقيم (40-50) يوماً من الجنوب الغربي نحو الشمال الشرقي، بينما تمثل النطاق الثالث بقيم أعلى بلغت (50-60) يوماً في بعض المناطق الغربية والشمالية الغربية، إضافة إلى محطة (السليمانية)، في حين سجلت محطتا عكاشات والرطبة أعلى القيم بواقع (61 و62) يوماً على التوالي، وتُظهر فئة الإجهاد الحراري الشديد جدّاً نطاقاً واسعاً من التوزيع المكاني، إذ تراوح عدد أيامها بين (60-105) يوم، وتوزعت ضمن أربعة نطاقات مكانية: الأول في المناطق الغربية بقيم مرتفعة بلغت (90-105) يوم، والثاني شمل معظم المناطق الشمالية بقيم (80-90) يوم، في حين امتد النطاقان الثالث والرابع إلى المناطق الوسطى والجنوبية بقيم تراوحت بين (60-80) يوم، أما فئة الإجهاد الحراري المتطرف، التي تميزت بأوسع نطاق تذبذب، فقد تراوح عدد أيامها بين (10-130) يوم، وتوزعت في عدة نطاقات مكانية، حيث تمثل النطاق الأول الأدنى بقيم (10-24) يوم في محطات (السليمانية، الرطبة، ربيعة، دهوك، القائم، عكاشات)، في حين امتدت النطاقات الوسطى (الثاني والثالث والرابع) بشكل شريط من الغرب نحو الشمال الشرقي بقيم تراوحت بين (40-70) يوماً، بينما سجلت النطاقات الأعلى في المناطق الوسطى والجنوبية بعدد أيام تراوح بين (80-150) يوماً، وكانت أعلى القيم للإجهاد الحراري المتطرف في المناطق الجنوبية من البلاد، ما يعكس تزايد حدة التطرف الحراري فيها مقارنةً ببقية المناطق.

خريطة (8) التوزيع المكاني لعدد ايام فئات الإجهاد الحراري للقيم العظمى للمدة (1980 - 2024)



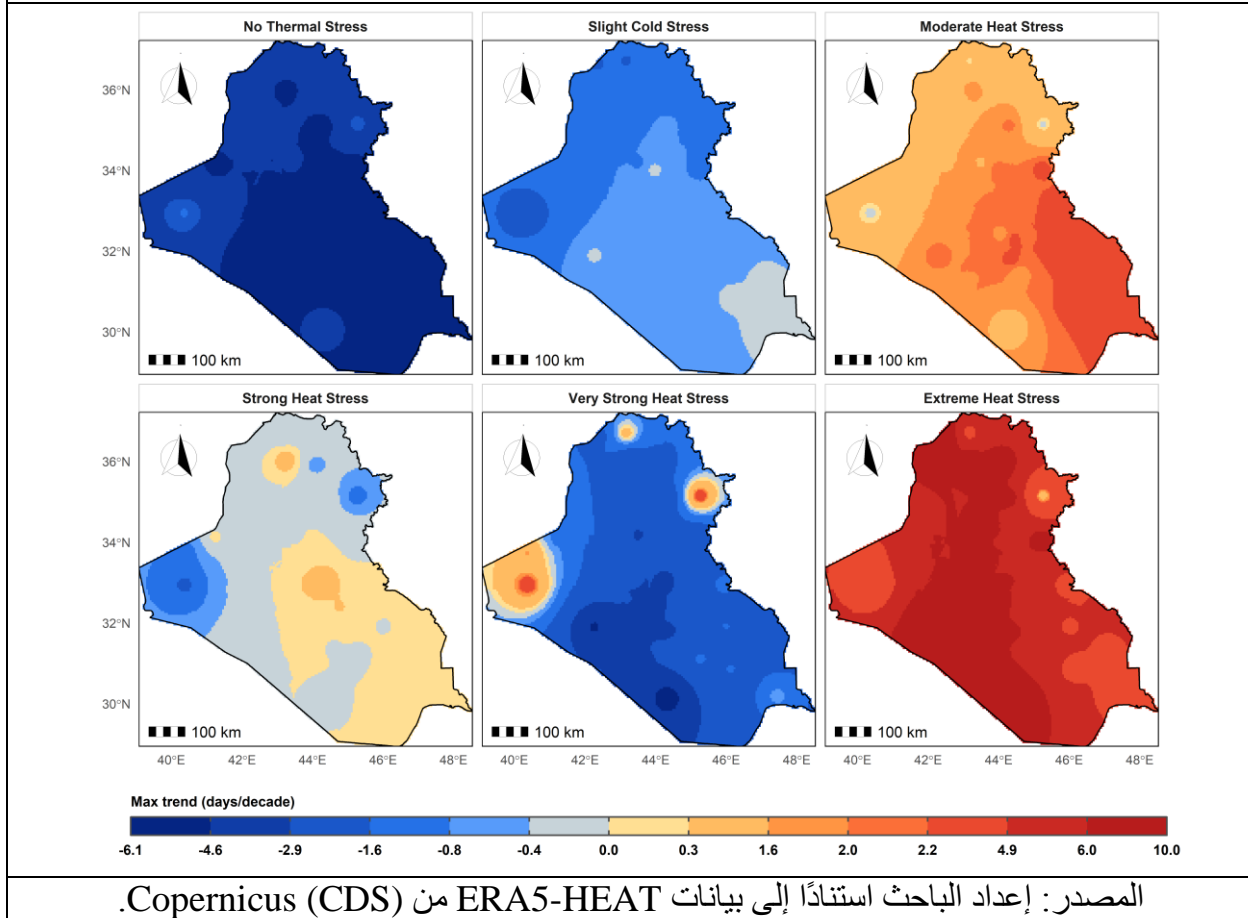
7- الاتجاهات الزمانية والمكانية لعدد ايام فئات الإجهاد الحراري في العراق (القيم العظمى)
يتضح من الخريطة (9) التوزيع المكاني لاتجاهات فئات الإجهاد الحراري للقيم العظمى في العراق، إذ سجلت فئة عدم الإجهاد الحراري اتجاهًا تناقصيًا في جميع المحطات، وتراوح مقدار التغير بين (-1.3 - 6.0) يوم لكل عقد، وتوزعت هذه القيم ضمن ثلاث نطاقات مكانية، وكان أعلى انخفاض متركزًا في المناطق الوسطى والجنوبية بمقدار تراوح بين (-4.6 - 6.1) يوم لكل عقد، بينما أظهرت فئة الإجهاد البارد الطفيف اتجاهًا تنازليًا طفيفًا في جميع المحطات، إذ تراوح مقدار التغير بين (-0.2 - 2.6) يوم لكل عقد، وسُجل أعلى انخفاض في محطة الرطبة، في المقابل، سجلت فئة الإجهاد الحراري المعتدل اتجاهًا تصاعديًا في جميع المحطات باستثناء محطتي (السليمانية والرطبة)، إذ تراوح مقدار الزيادة بين (0.2 - 2.9) يوم لكل عقد، وكانت أعلى القيم متركزة في المناطق الجنوبية الشرقية بمقدار تراوح بين (2.2 - 2.9) يوم لكل عقد، أما فئة الإجهاد الحراري الشديد فقد أظهرت تباينًا في الاتجاهات بين التزايد والتناقص، وتراوح مقدار التغير بين (-1.9 - 1.0) يوم لكل عقد؛ إذ سجلت كل من محطتي الموصل وبغداد أعلى الاتجاهات الموجبة بمقدار (0.8 - 1.0) يوم لكل عقد على التوالي، في حين سُجل أعلى انخفاض في محطات (عكاشات والسليمانية والرطبة) بمقادير بلغت (-1.1) و(-1.2) و(-1.9) يوم لكل عقد على التوالي، كما اتضح أن فئة الإجهاد الحراري الشديد جدًا سجلت اتجاهًا تناقصيًا في أغلب المحطات، إذ تراوح مقدار التناقص بين (-1.0 - 6.1) يوم لكل عقد، وكان أعلى انخفاض في محطة السلطان، في حين سجلت كل من محطات (عكاشات والسليمانية

والرطوبة) اتجاهاً تصاعدياً بلغ (1.7) و(3.1) و(3.3) يوم لكل عقد على التوالي، أما فئة الإجهاد الحراري المتطرف، فقد أظهرت اتجاهاً تصاعدياً في جميع المحطات، وتراوح مقدار الزيادة بين (1) و(10) أيام لكل عقد، وكانت أعلى القيم متركزة في نطاق ممتد من المناطق الجنوبية الغربية إلى الشمالية الغربية، وبمقدار تراوح بين (6) و(10) يوم لكل عقد.

المناقشة:

أظهرت نتائج الدراسة أن العراق يتعرّض لإجهاد حراري بشري مرتفع ومتزايد، مع تباين موسمي ومكاني واضح في مؤشرات المناخ الحراري الشامل (UTCI)، إذ تسجّل أشهر الصيف، ولا سيما تموز وأب، أعلى قيم UTCI، بما يعكس سيادة ظروف إجهاد حراري قوي إلى شديد جداً، في حين تنخفض القيم خلال أشهر الشتاء، لتقع غالباً ضمن نطاق الراحة الحرارية أو الإجهاد البارد الطفيف، ويتوافق هذا النمط الموسمي مع الخصائص المناخية للعروض شبه المدارية الجافة، كما ينسجم مع نتائج دراسات إقليمية وعالمية حديثة (السبهاني، 2017) (Ullah et al., 2024)، من الناحية المكانية، تُظهر الأجزاء الجنوبية الشرقية من العراق أعلى قيم مؤشرات UTCI، مما يدل على مستوى مرتفع من الهشاشة المناخية تجاه موجات الحر الشديدة وطويلة الأمد، ويُعزى هذا النمط إلى تداخل عدة عوامل جغرافية ومناخية، أبرزها الموقع ضمن النطاق

خريطة (9) التوزيع المكاني لاتجاهات فئات الإجهاد الحراري للقيم العظمى للمدة (1980 – 2024)



شبه المداري الجاف، وسيادة درجات حرارة مرتفعة وقلة في التساقط المطري، فضلاً عن الخصائص الطبوغرافية للسهل الرسوبي المنبسط، التي تعزز التسخين السطحي وتحدّ من كفاءة التبريد الناتج عن التبخر-التنح (Muslih & Abbas, 2024)، أما من الناحية الديناميكية، فتخضع المنطقة خلال فصل الصيف لتأثير الامتداد الغربي للمنخفض الحراري الهندي الموسمي، بالتزامن مع سيطرة مرتفع شبه مداري قوي في المستويات العليا من الغلاف الجوي، وتؤدي هذه المنظومة إلى هبوط هوائي واسع النطاق مصحوب باحترار انضغاطي ملحوظ، ما يحدّ من تطور الحمل الحراري ويقلل من تشكّل الغيوم، ويزيد من كمية الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض، وتسهم هذه الظروف في رفع درجات الحرارة الفعلية والمحسوسة، وتفاقم شدة الإجهاد الحراري خلال أشهر الصيف، كما تلعب رياح الشمال (الشمالية-الشمالية الغربية) دوراً مهماً في تنظيم الإجهاد الحراري في العراق من خلال تعزيز التهوية والتبريد الطبيعي، غير أن ضعف هذه الرياح أو تراجع تكرارها في جنوب شرق البلاد، نتيجة التغيرات في التدرج الضغطي السطحي أو التأثيرات الدورانية واسعة النطاق، يؤدي إلى انخفاض كفاءة التهوية الجوية (AL-Shamarti et al., 2025)، ما يسمح بتراكم الحرارة وارتفاع قيم (UTCI) ويزداد وضوح هذا التأثير خلال فترات موجات الحر، عندما تسود أنماط دورانية شبه ثابتة، إضافة إلى ذلك، يسهم القرب الجغرافي من الخليج العربي ووفرة المسطحات المائية، ولا سيما الأهوار، في رفع مستويات الرطوبة النسبية خلال فصل الصيف، حيث تعمل المنخفضات الثانوية فوق الخليج على دفع كتل هوائية رطبة نحو جنوب شرق العراق (الذبي و جواد، 2008)، ويؤدي هذا التفاعل الحراري - الرطوبي إلى تضخيم الإحساس الحراري ورفع قيم مؤشر UTCI، إذ تقل كفاءة تبريد الجسم البشري في ظل الرطوبة المرتفعة، ما يجعل هذه المناطق أكثر عرضة للإجهاد الحراري المتطرف مقارنة ببقية أنحاء البلاد، على المدى الطويل، تُظهر الاتجاهات الزمنية لمؤشرات UTCI زيادات معنوية إحصائياً في معظم مناطق العراق، ولا سيما في المراكز الحضرية الرئيسية، ويُعزى هذا الاتجاه إلى تفاعل العوامل المناخية الطبيعية مع العوامل البشرية، بما في ذلك النمو السكاني والتوسع الحضري السريع، الذي عزز تأثير الجزيرة الحرارية الحضرية من خلال تغيير خصائص السطح وتقليص فرص التبريد الليلي، كما أظهرت النتائج نمطاً غير متجانس للاحترار، تمثل في ارتفاع أسرع للقيم الصغرى (UTCI_min) مقارنة بالقيم المتوسطة والعظمى، وهو ما يرتبط بالزيادة الملحوظة في درجات الحرارة الصغرى الليلية، التي وثقتها دراسات سابقة في العراق، خاصة في المناطق الجنوبية (Muslih & Błażejczyk, 2017) (البديري، 2021)، وتُظهر الشذوذات الزمنية طويلة الأمد لمؤشرات UTCI اتجاهات تصاعدياً واضحاً منذ أواخر تسعينيات القرن الماضي، بما يشير إلى تحوّل تدريجي نحو مناخ أكثر تطرفاً وإجهاداً حرارياً، ويتماشي هذا الاتجاه مع التقارير العالمية التي تؤكد أن العقدين الأخيرين (2001-2020) كانا الأشد حرارة في السجل المناخي العالمي (Organization, 2023)، وتشير العديد من الدراسات إلى وجود اتجاه عالمي متصاعد في مستويات الإجهاد الحراري وفقاً لمؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI)، مع تباينات مكانية واضحة بين الأقاليم المناخية. فقد أظهرت تحليلات طويلة الأمد ارتفاعاً في متوسط قيم المؤشر بنحو 2.5°م في أجزاء واسعة من أمريكا الشمالية وأوروبا وآسيا (M. M. Hamed et al., 2024)، وعلى المستوى الإقليمي، سجلت منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا زيادات تراوحت بين (0.1-0.7)°م لكل عقد، ترافق معها ارتفاع في عدد أيام الإجهاد الحراري القوي (Kyaw et al., 2022). كما أكدت دراسات أخرى استمرار هذا الاتجاه التصاعدي في مناطق مختلفة من العالم مثل روسيا والبرازيل وجنوب أفريقيا (Yang et al., 2024; Roffe et al., 2023)، وهو ما يتوافق مع الاتجاهات التي أظهرتها نتائج هذه الدراسة في العراق، وقد تناولت الدراسة تكرار واتجاهات فترات الإجهاد الحراري السنوي، حيث أظهر تحليل تكرار فترات UTCI تحوُّلاً واضحاً في بنية الإجهاد

الحراري في العراق على مستويات القيم الصغرى والمتوسطة والعظمى، فعلى مستوى القيم الصغرى، يهيمن نطاق عدم الإجهاد الحراري بعدد كبير من الأيام السنوية، إلا أن اتجاهه الزمني يكاد يكون ثابتاً، في مقابل تسجيل زيادات في فئات الإجهاد الحراري المعتدل وتراجع ملحوظ في فئات الإجهاد البارد، ولا سيما الإجهاد البارد المعتدل، ما يعكس تقلص فترات البرودة الليلية وتنامي ظروف الدفء الليلي. أما على مستوى القيم المتوسطة، فتشير النتائج إلى تراجع فئات الإجهاد البارد مقابل تزايد فئات الإجهاد الحراري القوي والشديد جداً، ما يعكس انتقالاً تدريجياً في متوسط الظروف الحرارية اليومية من نطاق الراحة الحرارية نحو نطاقات إجهاد حراري أعلى، خاصة في المناطق الحضرية، وتزداد حدة هذا النمط عند تحليل القيم العظمى، حيث يُلاحظ تزايد واضح في عدد أيام الإجهاد الحراري المتطرف، مقابل تراجع أيام عدم الإجهاد الحراري، ما يدل على تصاعد شدة الإجهاد الحراري خلال ساعات الذروة اليومية، والتي تمثل الخطر الأكبر على صحة الإنسان خلال موجات الحر الشديدة، وهذا يتوافق مع دراسة (M. M. Hamed et al., 2023) ودراسة (M. M. Hamed et al., 2024) وبصورة عامة، تكشف هذه النتائج عن تحول واضح يتمثل في تراجع فئات الإجهاد البارد مقابل تزايد فئات الإجهاد الحراري القوي والشديد والمتطرف، مما يشير إلى تصاعد الضغوط الحرارية على السكان من حيث الشدة وعدد أيام التعرض، وهو ما يزيد من احتمالية المخاطر الصحية المرتبطة بالحرارة.

الاستنتاجات:

كلت هذه الدراسة الاتجاهات المكانية والزمانية لمؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI) في العراق، وأظهرت نتائج الدراسة اتجاهات تصاعدية واضحة في مؤشر المناخ الحراري الشامل (UTCI) في العراق خلال الفترة (1980-2024)، حيث ارتفع المتوسط اليومي للمؤشر بمعدل تراوح بين (0.4-0.8) °م لكل عقد للقيم الصغرى والمتوسطة والعظمى، ما أسهم في تراجع تدريجي في أيام الإجهاد البارد، مقابل زيادة معنوية في أيام الإجهاد الحراري القوي والشديد جداً والمتطرف، وأظهر التحليل المكاني أن أعلى معدلات الزيادة في أيام الإجهاد الحراري المتطرف قد تركزت في المناطق الجنوبية الغربية إلى الشمالية الغربية (6-10 أيام لكل عقد)، بينما سجلت المناطق الوسطى والجنوبية أعلى تكرارات سنوية لهذه الفئة (80-150 يوماً). تعكس هذه النتائج تأثير الاحترار المناخي المتزايد في العراق، لا سيما في المناطق الحضرية الجنوبية، مع مضاعفة المخاطر الصحية المرتبطة بالإجهاد الحراري، وتؤكد هذه النتائج الحاجة إلى تطوير استراتيجيات فعّالة للتكيف المناخي وتعزيز أنظمة الرصد والإنذار المبكر، إلى جانب اعتماد سياسات تخطيط حضري وحركي أكثر حساسية للحرارة، وتوصي الدراسة بأن تركز البحوث المستقبلية على تحديد العوامل المناخية المحركة لهذه التغيرات وتقييم فعالية استراتيجيات التكيف في ظل سيناريوهات المناخ المستقبلية.

المصادر

- البديري، أحمد لفته حمد. (2021). تحليل مؤشرات تطرفات درجات الحرارة اليومية في العراق. مجلة لارك للفلسفة واللسانيات والعلوم الاجتماعية، 4(43)، 902-922.
<https://doi.org/10.31185/lark.Vol4.Iss43.2057>
- السبهاني، خميس دحام مصلح. (2017). مؤشر المناخ الحراري العالمي UTCI: المبادئ الأساسية وإمكانية التطبيق ضمن البيئات الجافة الدافئة (العراق حالة دراسية). مجلة الآداب، (123)، 354-321.
<https://doi.org/10.31973/aj.v0i123.1952>
- الذبيبي، سالار علي خضر، وجواد، بشرى أحمد. (2008). موجات الرطوبة الصيفية في العراق - دراسة في المناخ الشمولي. مجلة الآداب، (83)، 414-382.
<https://doi.org/10.31973/aj.v0i83.3338>
- Al-Ansari, N. (2021). Topography and climate of Iraq. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 11(2), 1-13.
- AL-Shamarti, H., Rupp, P., & Birner, T. (2025). Circulation Aspects Associated With Heatwave Events Over Iraq. *International Journal of Climatology*, 45(12), e70017.
- Alashan, S. (2020). Combination of modified Mann-Kendall method and Şen innovative trend analysis. *Engineering Reports*, 2(3), e12131.
- Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 515-535. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>
- Błazejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., & Kampmann, B. (2013). An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI). *Geographia Polonica*, 86(1), 5-10. <https://doi.org/10.7163/GPol.2013.1>
- Bröde, P., Fiala, D., Błazejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., & Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 481-494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>
- Di Napoli, C., Barnard, C., Prudhomme, C., Cloke, H. L., & Pappenberger, F. (2021). ERA5-HEAT: A global gridded historical dataset of human thermal comfort indices from climate reanalysis. *Geoscience Data Journal*, 8(1), 2-10. <https://doi.org/10.1002/gdj3.102>
- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., & Jendritzky, G. (2012). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 429-441.
- Guo, Y., Gasparri, A., Armstrong, B. G., Tawatsupa, B., Tobias, A., Lavigne, E., De Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M., Pan, X., Kim, H., Hashizume, M., Honda, Y., Leon Guo, Y. L., Wu, C. F., Zanobetti, A., Schwartz, J. D., Bell, M. L., Scortichini, M., Michelozzi, P., Punnasiri, K., ...

- Tong, S. (2017). Heat wave and mortality: A multicountry, multicomunity study. *Environmental Health Perspectives*, 125(8), 1–11. <https://doi.org/10.1289/EHP1026>
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1–4), 182–196.
- Hamed, M. M., Alasow, A. A., & Shahid, S. (2024). Global Trends in Human Thermal Stress: A Spatiotemporal Analysis from 1940 to 2020. *Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00537-3>
- Hamed, M. M., Kyaw, A. K., Nashwan, M. S., & Shahid, S. (2023). Spatiotemporal changes in Universal Thermal Climate Index in the Middle East and North Africa. *Atmospheric Research*, 295(May). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107008>
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75.
- IPCC. (2012). National systems for managing the risks from climate extremes and disasters. In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 9781107025). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.009>
- 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*, 2(1), 2391.
- Jendritzky, G., De Dear, R., & Havenith, G. (2012). UTCI—why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421–428.
- Kompas, T., Che, T. N., & Grafton, R. Q. (2024). Global impacts of heat and water stress on food production and severe food insecurity. *Scientific Reports*, 14(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65274-z>
- Kyaw, A. K., Hamed, M. M., & Shahid, S. (2022). Spatiotemporal Changes in Universal Thermal Climate Index Over South Asia. *SSRN Electronic Journal*, August. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4192604>
- Muslih, K. D., & Abbas, A. M. (2024). Climate of Iraq. In *The Geography of Iraq* (pp. 19–47). Springer.
- Muslih, K. D., & Błażejczyk, K. (2017). The inter-annual variations and the long-term trends of monthly air temperatures in Iraq over the period 1941–2013. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1–2), 583–596. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1915-6>
- Organization, W. M. (2023). *The global climate-2011–2020: A decade of accelerating climate change*. WMO Report.

- Qi, J., Yang, Z., Han, F., He, B., & Ma, X. (2023). Spatial–Temporal Characteristics of Human Thermal Comfort in Xinjiang: Based on the Universal Thermal Climate Index from 1981 to 2019. *Land*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/land12101864>
- Roffe, S. J., van der Walt, A. J., & Fitchett, J. M. (2023). Spatiotemporal characteristics of human thermal comfort across southern Africa: An analysis of the Universal Thermal Climate Index for 1971–2021. *International Journal of Climatology*, 43(6), 2930–2952. <https://doi.org/10.1002/joc.8009>
- Salman, S. A., Shahid, S., Ismail, T., Chung, E.-S., & Al-Abadi, A. M. (2017). Long-term trends in daily temperature extremes in Iraq. *Atmospheric Research*, 198, 97–107.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
- Siple, P. A., & Passel, C. F. (1945). Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89(1), 177–199.
- Thom, E. C. (1959). The discomfort index. *Weatherwise*, 12(2), 57–61.
- Ullah, S., Aldossary, A., Ullah, W., & Ghamdi, S. G. Al. (2024). Augmented human thermal discomfort in urban centers of the Arabian Peninsula. *Scientific Reports*, 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54766-7>
- Ullah, S., You, Q., Wang, G., Ullah, W., Sachindra, D. A., Yan, Y., Bhatti, A. S., Abbas, A., & Jan, M. A. (2022). Characteristics of human thermal stress in South Asia during 1981-2019. *Environmental Research Letters*, 17(10), 104018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8fa6>
- Yaglou, C. P., & Minaed, D. (1957). *Control of heat casualties at military training centers*.
- Yang, Z., Peng, J., Liu, Y., Jiang, S., Cheng, X., Liu, X., Dong, J., Hua, T., & Yu, X. (2024). GloUTCI-M: a global monthly 1gkm Universal Thermal Climate Index dataset from 2000 to 2022. *Earth System Science Data*, 16(5), 2407–2424. <https://doi.org/10.5194/essd-16-2407-2024>

Spatiotemporal Changes in Heat Stress Index in Iraq

Asst. Prof. Ahmed Lafta Hamad Al-Budeiri (PhD) 

Ministry of Education-Wasit Education

Open Educational College/Al- Suwairah Branch

ahmedalbudeiri@gmail.com

Abstract:

This study analyzes the spatiotemporal trends of human heat stress in Iraq during the period (1980–2024) using the Universal Thermal Climate Index (UTCI), based on hourly data from the ERA5-HEAT dataset. Annual and seasonal minimum, mean, and maximum UTCI values were derived and their trends were examined using the Modified Mann–Kendall (MMK) test and Sen’s slope estimator to quantify rates of change. The results reveal statistically significant increasing trends in most UTCI metrics, indicating a marked intensification of heat stress over the past four decades. The highest rate of increase was observed in the minimum UTCI values (0.62 °C per decade), reflecting an accelerated rise in nighttime warming compared with daytime conditions. Long-term temporal anomalies also show a clear shift toward warmer thermal conditions since the late 1990s. Furthermore, the frequency analysis of UTCI categories indicates a notable decline in cold-stress categories alongside a significant increase in strong, very strong, and extreme heat-stress categories, particularly in daytime maximum conditions. Spatial analysis further demonstrates that the extreme heat-stress category exhibits a consistent upward trend across all meteorological stations, with the highest rates of increase occurring in a belt extending from southwestern to northwestern Iraq, where the rise ranges between 6–10 days per decade. In contrast, the highest annual frequencies of this category are concentrated in central and southern regions, reaching approximately 80–150 days per year. These findings highlight the expanding exposure to extreme thermal conditions and the increasing frequency of severe heat waves in Iraq, underscoring the importance of integrating heat-stress indicators into climate adaptation strategies and sustainable urban planning.

Keywords: Modified Mann–Kendall test; heat stress; trend analysis; Iraq; Universal Thermal Climate Index (UTCI).