ISSN: 1994-4217 (Print) 2518-5586(online)

Journal of College of Education

Available online at: https://eduj.uowasit.edu.iq

Dr. Sattar Teref Razzaq

University of Wasit, College of Education for Human Sciences,

Email: s.taraf@uowasit.edu.iq

Keywords:

Thermal Comfort, Tourism, Karbala, PET, mPET, CTIS

Article info

Article history:

Received 20. Jun.2026

Accepted 10. Aug.2026

Published 10. Nov.2026

Assessment of Bioclimatic Comfort Thresholds in Karbala Governorate Using PET, mPET, and CTIS Indices

A B S T R A C T

In the context of the intensifying impacts of climate change and the increasing frequency of extreme heat waves, tourism in hot, arid cities such as Karbala (Iraq) has become increasingly vulnerable to heat stress, particularly seasonal religious tourism characterized by high population density. This study aims to provide a detailed analysis of human bioclimatic conditions in Karbala using the Physiological Equivalent Temperature (PET) index, the Modified PET (mPET) index, and the Climate–Tourism Information Transfer Scheme (CTIS), based on hourly climatic data for the period 2013–2024. The RayMan model was employed to calculate the relevant bioclimatic parameters at three representative times of day (07:00, 14:00, and 21:00 local time), and the results were analyzed in terms of daily and seasonal heat stress patterns. The results indicate that the highest levels of heat stress occur during midday hours in summer, whereas transitional seasons (spring and autumn) provide more favorable thermal conditions for tourism and religious activities ،particularly during the morning and evening periods. The main scientific contribution of this study lies in the development of the first integrated bioclimatological data sheet for the city of Karbala. This data sheet combines PET, mPET, and CTIS information in a simplified format tailored to the needs of local tourism planning. It serves as both a scientific and practical tool to support visitors and decision-makers in organizing tourism and religious activities in accordance with local climatic characteristics(K1). Owing to its clear visual presentation and ease of interpretation ،this tool has high applicability for climate adaptation strategies and climate-sensitive tourism management in Karbala.

© 2026 EDUJ, College of Education for Human Science, Wasit University

DOI: https://doi.org/10.31185/eduj.Vol65.Iss1.5463

تقييم حدود الرّاحة البايومناخية في محافظة كربلاء باستعمال مؤشرات الراحة (PET) و(mPET) و(CTIS)

م.د ستار ترف رزاق القريشي
جامعة واسط ـ كلية التربية للعلوم الإنسانية

الملخّص

في ظلّ تصاعد تأثيرات التغير المناخي وتزايد وتيرة موجات الحر الشديدة، أصبحت السياحة في المدن الحارة والجافة، كمحافظة كربلاء في العراق، أكثر عرضةً لمخاطر الإجهاد الحراري، ولا سيّما السياحة الدينية الموسمية التي تتسم بارتفاع الكثافة البشرية وتدفّق أعداد كبيرة من الزائرين خلال فترات زمنية محددة. تهدف هذه الدراسة إلى تقديم تحليل تفصيلي للظروف المناخية الحيوية الملائمة للإنسان في منطقة الدراسة، بالاعتماد على مؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية(PET) ، والمؤشر المعدّل لدرجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية(mPET) ، فضلا عن نظام نقل المعلومات المناخية–السياحية لمؤشر (CTIS)، من خلال معطيات بيانات مناخية ساعية تغطي المدة (٢٠١٣ –٢٠٢٤) وقد استُعمِلَ نموذج (RayMan) لحساب المؤشرات المناخية الحيوية ذات الصلة عند ثلاث مدد زمنية تمثل أوقاتاً مختلفة من اليوم، وهي الساعة (٠٧:٠٠ صباحاً، والساعة ١٤:٠٠ ظهراً، والساعة ٢١:٠٠ مساءً) بالتوقيت المحلي، ثم جرى تحليل النتائج للكشف عن أنماط الإجهاد الحراري اليومية والفصلية ومدى تأثيرها في الأنشطة السياحية والدينية. وأظهرت النتائج أن أعلى مستويات الإجهاد الحراري تُسجَّل في أثناء ساعات الظهيرة في فصل انقلاب الصيف الحار، وفي فصول الاعتدال (الربيعي والخريفي) أكثر ظروفا حراريا لممارسة النشاط السياحي المتمثل بالشعائر الدينية، وبخاصة أثناء أوقات الصباح والمساء. وتتمثل الإضافة العلمية لهذه الدراسة في إعداد أول ورقة علمية اعتمادا على البيانات المناخية الحيوية للمؤشرات الثلاثة: (PET) ،(mPET)، (CTIS) ضمن صيغة مبسطة وميسّرة، صُممت خصيصاً لتلبية احتياجات التخطيط السياحي المحلي. وتؤدي هذه الورقة وظيفة مزدوجة بوصفها أداة علمية وتطبيقية تسهم في دعم الزائرين ومتخذي القرار في تنظيم الأنشطة السياحية والدينية بما يتوافق مع الخصائص المناخية المحلية للمحافظة(K1). ونظراً لما تتميز به من عرض بصري واضح وسهولة في تفسير نتائجها، فهذه الأداة تمتلك قابلية تطبيقية عالية في دعم استراتيجيات التكيّف مع التغير المناخي وتعزيز إدارة السياحة الدينية الحساسة للمناخ في محافظة كربلاء.

الكلمات المفتاحية: الراحة الحرارية ، السياحة ، كربلاء، PET، mPET، CTIS.

١. المقدمة

يعد التزايد المستمر في تكرار الظواهر الجوية المتطرفة وشدتها أحد أبرز التحديات التي تواجه قطاع السياحة المعاصر، ولا سيما موجات الحر، وموجات البرد الشديد، والعواصف، وغيرها من الأخطار الطبيعية. فقد أكد تقرير حديث صادر عن المنظمة العالمية للأرصاد الجوية أن المؤشرات المناخية تسجِّل مستويات قياسية جديدة، وأن الأحداث المناخية المتطرفة تتسبب في آثار مدمرة (World Meteorological Organization, 2022)، وتنعكس هذه الأحداث سلباً على البنية التحتية للسياحة، وتهدد الموارد الطبيعية والثقافية، وقد تؤدي إلى اندلاع الحرائق، وتسارع عمليات تعرية التربة، وتعطيل شبكات النقل، الأمر الذي يؤثر بصورة مباشرة في سلامة المقاصد السياحية وسمعتها واستدامتها (Shantika & Bestari, 2024,p.104).

وعلى الرغم من أن موجات الحر لا تُصنّف عالمياً ضمن أكثر الأخطار الجوية فتكاً مقارنة بالأعاصير والعواصف، فإنها أصبحت تمثِّل تهديداً متزايد الخطورة على المستويين المحلي والإقليمي، ولا سيما في الأقاليم الحارة والجافة وشبه الجافة، بما في ذلك منطقة الشرق الأوسط (El Kenawy, 2024,p.2245) . وتبرز هذه الاتجاهات الحاجة المهمة إلى تبني مقاربات تخطيطية مكانية وسياحية مستدامة تدمج بين التنمية السياحية، والقدرة على التكيّف مع التغير المناخي، وحماية البيئة(Jarratt & Davies, 2020,p.2) .

وبحسب تقارير منظمة السياحة العالمية، يُعدّ الشرق الأوسط عموماً، والعراق ولاسيما منطقة الدراسة، من أهم المناطق السياحية في العالم، وخاصة في مجال السياحة الدينية التي تستقطب ملايين الزائرين سنوياً(Citaristi, 2022,p.37) وتشكل محافظة كربلاء مكانة متميزة ضمن هذه الوجهات؛ نظراً لما تتمتع به من أهمية دينية وروحية عالمية؛ إذ تستقبل أعداداً كبيرة من الزائرين على مدار العام، مع تسجيل ذروات واضحة خلال العام، إلا أن هذا النشاط السياحي المكثف يواجه تحديات متزايدة نتيجة التغير المناخي؛ إذ أنذرت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) منذ سنوات من ارتفاع درجات الحرارة وتزايد تكرار موجات الحر الشديدة (Scott, 2021,p.5 ؛ الفهداوي، ٢٠٢٤).

وقد أكّدت أحدث تقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، ولا سيما تقرير التغير المناخي للعام ٢٠٢١: الأساس العلمي الفيزيائي وتقرير التغير المناخي، وللعام ٢٠٢٤: التقرير التجميعي، أن التوقعات السابقة المتعلقة بارتفاع درجات الحرارة وتفاقم موجات الحر قد تحققت إلى حد كبير، وأن الظواهر الحرارية المتطرفة أصبحت أكثر تواتراً وشدة (Legg, 2021,p.45؛العتابي، ٢٠٢٣)، ويمثل هذا الواقع تهديداً مباشراً للمدن الواقعة ضمن الأقاليم الحارة، مثل محافظة كربلاء؛ إذ إن درجات الحرارة المرتفعة تهدّد صحة الزائرين، خلال مدة تعرضهم للهواء الطلق، وممارستهم الأنشطة السياحية والشعائر الدينية.

وتؤكد الدراسات الحديثة في تخطيط السياحة أن الطقس والمناخ ينبغي النظر إليهما بوصفهما عاملين أساسيين في تحديد الطلب السياحي وإدارة المقاصد السياحية(Jarratt & Davies, 2020 p.3) . وغالباً ما تتجاهل أساليب التخطيط التقليدية، القائمة على المتوسطات الشهرية، وتأثير التباين الجوي قصير الأمد في مستوى الراحة الحرارية اليومية للزوار، ومن خلال الدراسات التطبيقية، التي أُجريت في إقليم كاتالونيا الإسباني، أن دمج البيانات المناخية الموضوعية مع التفضيلات الذاتية للسياح يسهم في تطوير تصنيفات مناخية أكثر ملاءمة للاستخدامات السياحية–(Rodríguez Algeciras et al., 2020,p.1630)، وبوصف السياحة نشاطاً اقتصادياً متعدد القطاعات، فإنها تُعد من أكثر القطاعات حساسية للظروف الطبيعية والمناخية؛ الأمر الذي يجعلها شديدة التأثر بتداعيات التغير المناخي (Kapruwan et al., 2025,p.6).

ومن منظور الدراسة، يشير دي فريتاس (de Freitas, 2003) فيما يخص المناخ الحيوي إلى أن احتياجات المستخدمين النهائيين، سواء أكانوا سياحاً أم صنّاع قرار في القطاع السياحي، غالباً ما تُهمل في التحليلات المناخية التقليدية. ويدعو إلى تطوير مؤشرات مناخية–سياحية عملية وموثوقة تعكس بصورة أدق تجارب السياح وسلوكهم الفعلي (Lopes et al., 2021,p.1125). وفي هذا السياق، اكتسب توفير المعلومات المناخية والجوية أهمية متزايدة في السياحة الحديثة، سواء لأغراض التخطيط المسبق للرحلات أو لتعزيز سلامة الزوار وتحسين مستويات راحتهم الحرارية.

ويصنف ماتزاراكيس (Matzarakis, 2014) دراسة المعلومات المناخية المرتبطة بالسياحة إلى ثلاثة أنواع رئيسة، هي: البيانات المناخية، (المتوسطات الشهرية لدرجات الحرارة ، كميات تساقط الأمطار ساعات السطوع الشمسي الفعلية)؛ والمعلومات الجوية الآنية، للمؤشر الأشعة فوق البنفسجية وجودة الهواء؛ والمؤشرات المناخية الحيوية التي تقيس تأثير الظروف البيئية المختلفة في جسم الإنسان (Matzarakis, 2014,p.196). ولفهم تحسين عمليات التخطيط السياحي،

وتوجيه الزوار بصورة أكثر كفاءة، وتعزيز جودة التجربة السياحية، ولا سيما عند عرضها ضمن صيغ مبسطة وسهلة لفهم، التغيرات المناخية.

كما يؤكد سكوت ولميو (Scott & Lemieux,2012) الأهمية الاستراتيجية للمعلومات المناخية في القطاع السياحي، موضحين أنها تؤدي وظيفة مزدوجة بوصفها مورداً سياحياً من جهة، ومن ثمّ، يشددان على ضرورة تطوير خدمات مناخية مخصصة للقطاع السياحي، وتعزيز التعاون بين المؤسسات البحثية، وهيئات الأرصاد الجوية، وأصحاب القرار في صناعة السياحة (Scott & Lemieux, 2012,p.147).

وفي هذا الإطار، حظيت المؤشرات المناخية الحيوية باهتمام متزايد، نظراً لقدرتها على تقديم توصيف فهم التفسير لمستويات الراحة الحرارية والإجهاد الحراري التي يتعرض لها الإنسان. ويُعد مؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET)من أكثر المؤشرات استعمالا في الدراسات السياحية؛ لما يتميز به من سهولة تفسيره واعتماده على وحدات حرارية مألوفة لدى المستخدمين. وقد تعززت فاعلية هذه المؤشرات من خلال نظام تطبيق المعلومات المناخية–السياحية لمؤشر (CTIS)، الذي يوفر تمثيلاً بصرياً لتكرار الظروف المناخية الملائمة وغير الملائمة من الجوانب الحرارية والفيزيائية والجمالية المرتبطة بالأنشطة السياحية (Pecelj et al., 2025).

وتُعد محافظة كربلاء واحدة من أهم المدن الدينية في العالم الإسلامي، كما تمثل مقصداً للسياحة الدينية يتميز بكثافة سكانية مرتفعة وزيارات موسمية واضحة؛ الأمر الذي يجعلها أكثر عرضة لتأثيرات موجات الحر الجوية المتطرفة. وعلى الرغم من تنامي الاهتمام الدولي بدراسة التفاعلات بين المناخ والسياحة، فإن الدراسات المناخية الحيوية التكاملية التي تجمع بين المؤشرات (PET)، (mPET) ، (CTIS) لا تزال محدودة في السياق العراقي عموماً لمحافظة كربلاء على وجه الخصوص، ومن ثم فإن إجراء تقييم مناخي حيوي شامل لمحافظة كربلاء يُعد ضرورة علمية وتطبيقية لدعم التخطيط السياحي المستدام، وتعزيز المعلومات المناخية المقدمة للزوار ومتخذي القرار، وزيادة قدرة المحافظة على التكيف مع الظواهر الجوية المتطرفة في ظل التسارع المستمر للتغير المناخي.

تنطلق مشكلة البحث من التساؤل حول مدى ملاءمة الظروف المناخية الحيوية في محافظة كربلاء لراحة الإنسان، خاصة في ظل الزيادة الكبيرة في أعداد الزائرين خلال المواسم الدينية.

ويهدف البحث إلى:

١. تحليل خصائص الراحة الحرارية باستخدام مؤشرات PET و mPET
٢. تقييم ملاءمة المناخ السياحي باستخدام CTIS
٣. تحديد الفترات الزمنية الأكثر ملاءمة للراحة البشرية

ويفترض البحث أن هناك تبايناً زمنياً واضحاً في مستويات الراحة الحرارية، مع وجود إجهاد حراري مرتفع خلال فصل الصيف وانخفاضه خلال فصلي الربيع والخريف.

٢. المواد وطرائق البحث

اعتمدت هذه الدراسة منهجية تقوم على تحليل البيانات المناخية ونمذجة المؤشرات المناخية الحيوية، بهدف تقييم أنماط الإجهاد الحراري في محافظة كربلاء، وهي من المحافظات ذات الأهمية الدينية والسياحية البارزة، إذ تتميز بارتفاع الكثافة السكانية الموسمية نتيجة تدفق أعداد كبيرة من الزائرين، فضلاً عن وقوعها ضمن نطاق المناخ الحار والجاف

السائد في مناطق وسط العراق وجنوبه، وانطلقت هذه المنهجية من محاولة الربط بين الخصائص المناخية المحلية ومؤشرات الراحة الحرارية، ولا سيما بالنسبة للزائرين، ضمن إطار علمي يسهم في دعم التخطيط السياحي المستدام والتكيّف مع المتغيرات المناخية.

استند تحليل الراحة الحرارية إلى بيانات مناخية رصدية يومية وساعية للمدة (٢٠١٣ –٢٠٢٤)، للمتغيرات المناخية الأساسية المؤثرة في التوازن الحراري للإنسان، (درجة حرارة الهواء، والرطوبة النسبية، وسرعة الرياح، وكمية الغطاء السحابي) وقد استخرج البيانات المناخية معتمدا على ثلاث مدد زمنية تمثل أنماط النشاط البشري اليومية الأكثر شيوعاً، وهي (الساعة٠٧:٠٠ صباحاً، والساعة ١٤:٠٠ ظهراً، والساعة ٢١:٠٠ مساءً) بالتوقيت المحلي، بما أتاح تحليل التباينات اليومية والفصلية في مستويات الإجهاد الحراري والراحة الحرارية.

اعتمادا على البيانات المناخية لمحطة مناخ كربلاء الرسمية، التي تمثل المصدر الأكثر موثوقية واستمرارية لرصد الخصائص المناخية طويلة الأمد في المحافظة. وتقع ضمن النطاق الحضري–شبه الحضري لمحافظة كربلاء؛ الأمر الذي يجعلها معبرة بدرجة مناسبة لمعرفة العناصر المؤثرة في راحة الإنسان. (Microclimatic Variability) ، فإن الاعتماد على محطة رصد واحدة ذات سجل طويل الأمد يُعد إجراءً منهجياً مقبولاً ذا موثوقية عالية في الدراسات المناخية الحيوية التي تُجرى على المستوى الحضري للمدينة (Matzarakis & Endler, 2010, p.481؛ Nastos & Matzarakis, 2019, p.5).

ويكون تقييم مستويات الراحة الحرارية والإجهاد الحراري، من خلال توظيف نموذج (RayMan) لحساب كل من مؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) ومؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّل(mPET) . وقد استندت الحسابات إلى المتغيرات المناخية المشار إليها آنفاً، مع اعتماد افتراضات معيارية تتعلق بالنشاط الأيضي للإنسان ومقاومة الملابس الحرارية، بما يتوافق مع الممارسات المعتمدة دولياً في بحوث المناخ الحيوي للإنسان (Matzarakis et al., 1999,p.78؛ Höppe, 1999,p.72).

ويُعد مؤشر(PET) من أكثر المؤشرات استعمالا في تقييم الراحة البايومناخية للإنسان، نظراً لسهولة تفسيره واعتماده على وحدة الدرجة المئوية، ولدرجة حرارة هواء لبيئة داخلية فسيولوجية يشعر بها الإنسان في البيئة الخارجية (Höppe, 1999,p.73). أما مؤشر (mPET)، فيمثل تطويراً أكثر تقدماً لمؤشر(PET) ؛ إذ يأخذ في الحسبان الخصائص الديناميكية للملابس وآليات التنظيم الحراري الفسيولوجي للإنسان بصورة أكثر واقعية؛ مما يجعله أكثر دقة في توصيف الاستجابات الحرارية البشرية تحت الظروف المناخية المتطرفة (Chen & Matzarakis, 2018,p.1277).

وجرى –فضلا عن ذلك– تطبيق لمؤشر البايومناخي المؤثر في العناصر المعلومات المناخية–السياحية(CTIS) ؛ بهدف توضيح التكرارات النسبية للظروف المناخية الملائمة وغير الملائمة من النواحي الحرارية والفيزيائية والجمالية (Matzarakis, 2014,p.197)، ويوفر هذا النظام تمثيلاً بصرياً مبسطاً يساعد على فهم مدى ملاءمة الظروف الجوية لمختلف الأنشطة السياحية، مع التركيز بصورة خاصة على متطلبات السياحة الدينية والتخطيط المكاني الحضري في محافظة كربلاء.

وانطلاقاً من البعد التطبيقي للدراسة، تم إعداد ورقة علمية لمعلومات مناخية حيوية بشرية خاصة بمحافظة كربلاء، وجرى تضمينها ضمن المواد التكميلية المرافقة للبحث لتكون متاحة للزائرين ومتخذي القرار، وقد اعتمدت هذه ورقة على تجميع وإعادة صياغة مخرجات مؤشرات (PET) ، (mPET) ، (CTIS) ضمن قالب مبسط وسهل التحليل، بما يتيح الاستفادة منها بوصفها أداة عملية تساعد الزائرين في اختيار المدد الزمنية الأنسب لأوقات الزيارة، كما تدعم المخططين

والجهات المعنية في تنظيم الأنشطة السياحية والشعائر الدينية بما يتوافق مع الخصائص المناخية المحلية، ذات الدقة العلمية والإطار التحليلي الذي استندت إليه الدراسة.

١.٢ منطقة الدراسة

تقع محافظة كربلاء في الجزء الأوسط من جمهورية العراق، على بُعد يقارب (100كم٢) إلى الجنوب الغربي من العاصمة بغداد، ضمن نطاق السهل الرسوبي، ومن الحافة الشرقية للهضبة الصحراوية الغربية (الشكل ١). وتمتد المحافظة فلكياً عند دائرة عرض تقارب (°32شمالاً– وخط طول °44شرقاً)؛ الأمر الذي يمنحها موقعاً انتقالياً بين البيئات الرسوبية الخصبة والمناطق الصحراوية الجافة، وهو ما ينعكس بصورة واضحة على خصائصها الطبيعية والمناخية (Jassim & Goff, 2006,p.3؛Al–Ansari, 2013 ؛عبد والزبيدي، ٢٠٢٢).

كما يتميز الموقع الجغرافي لكربلاء بأهمية استراتيجية كبيرة، لوقوعها على المحاور الرئيسة للنقل التي تربط العاصمة بغداد بمحافظات الفرات الأوسط وجنوب العراق؛ الأمر الذي عزز من وظيفتها بوصفها مركزاً دينياً وسياحياً محورياً، وفي المقابل، فإنَّ هذا الموقع، إلى جانب الكثافة البشرية المرتفعة أثناء مواسم الزيارات الدينية، يفرض ضغوطاً متزايدة على البنية التحتية الحضرية والخدمات العامة، بما في ذلك شبكات النقل والإيواء والخدمات الصحية والبلدية، خاصة أثناء مدد الذروة المرتبطة بالزيارات المليونية (Raeda & Asadi, 2020,p.1141؛ UNWTO, 2023 ؛جواد والمسعودي، ٢٠٢٦) وتؤكد هذه الظروف الحاجة إلى تبني مقاربات متكاملة للتخطيط الحضري والسياحي تأخذ في الحسبان التأثيرات المباشرة للبيئة المناخية القاسية التي تتسم بها المحافظة (Jarratt & Davies, 2020 p.4 ؛ الحسناوي والخفاجي, ٢٠٢٦).

وتُعد كربلاء مركزاً إدارياً مهماً؛ إذ تمثل بوصفها واحدة من أبرز المحافظات الدينية والسياحية في العراق، وتشير بيانات الجهاز المركزي للإحصاء العراقي إلى أن عدد سكان المحافظة ومحيطها الحضري تجاوز مليون نسمة خلال السنوات الأخيرة، مع تسجيل زيادات كبيرة في الكثافة السكانية في مواسم الزيارات الدينية السنوية نتيجة تدفق أعداد ضخمة من الزائرين من مختلف المحافظات العراقية، ومن خارج البلاد (وزارة التخطيط، ٢٠٢٥؛ Central Statistical Organization, 2024؛Saud Almasoudi et al., 2025,p.44).

وتكتسب محافظة كربلاء مكانتها الاستثنائية من أهميتها الدينية العالمية؛ إذ تحتضن مرقد الإمام الحسين بن علي، ومرقد أخيه أبي الفضل العباس (عليهما السلام)؛ مما جعلها واحدة من أهم مراكز السياحة الدينية في العالم الإسلامي، وتستقطب المحافظة ملايين الزائرين سنوياً من داخل العراق وخارجه، ولا سيما خلال شهري محرم وصفر، فضلاً عن مواسم الزيارات الدينية الأخرى، مثل زيارة النصف من شعبان، الأمر الذي يجعلها من أكثر المحافظات العراقية استقبالاً للزوار على مدار العام (المرسومي، ٢٠٢٥ ؛UNWTO, 2023؛ Saud Almasoudi et al., 2025,p.45).

وقد أسهمت هذه المكانة الدينية في ترسيخ دور كربلاء بوصفها مركزاً ثقافياً واقتصادياً نشطاً يعتمد بدرجة كبيرة على الأنشطة المرتبطة بالسياحة الدينية وخدمات الزائرين، بما في ذلك قطاعات الإيواء والنقل والتجارة والخدمات البلدية. وتشير الدراسات الحديثة إلى أن الاقتصاد المحلي للمحافظة يتأثر بصورة مباشرة بحركة الزائرين الموسمية التي توفر فرص عمل واسعة، وتسهم في تنشيط مختلف الأنشطة الاقتصادية والخدمية (مهدي، ٢٠٢٢؛ Saud Almasoudi et al., 2025,p.46؛UNWTO, 2023).

وفي المقابل، تفرض هذه التدفقات البشرية الموسمية تحديات متزايدة على البنية التحتية الحضرية وإدارة الموارد المحلية، ولا سيما في ظل الظروف المناخية القاسية التي تتسم بها المحافظة في أشهر الصيف الحار؛ إذ ترتفع درجات

الحرارة إلى مستويات قد تؤثر في صحة الزائرين وسلامتهم وقدرتهم على ممارسة الأنشطة الخارجية المدة طويلة، وتُعد هذه التحديات أكثر وضوحاً أثناء الزيارات المليونية التي تتزامن مع أشهر السنة الحارة؛ إذ يزداد خطر الإجهاد الحراري بين الزائرين، خصوصاً كبار السن والأطفال والأشخاص الذين يقضون ساعات طويلة في المسارات المفتوحة.

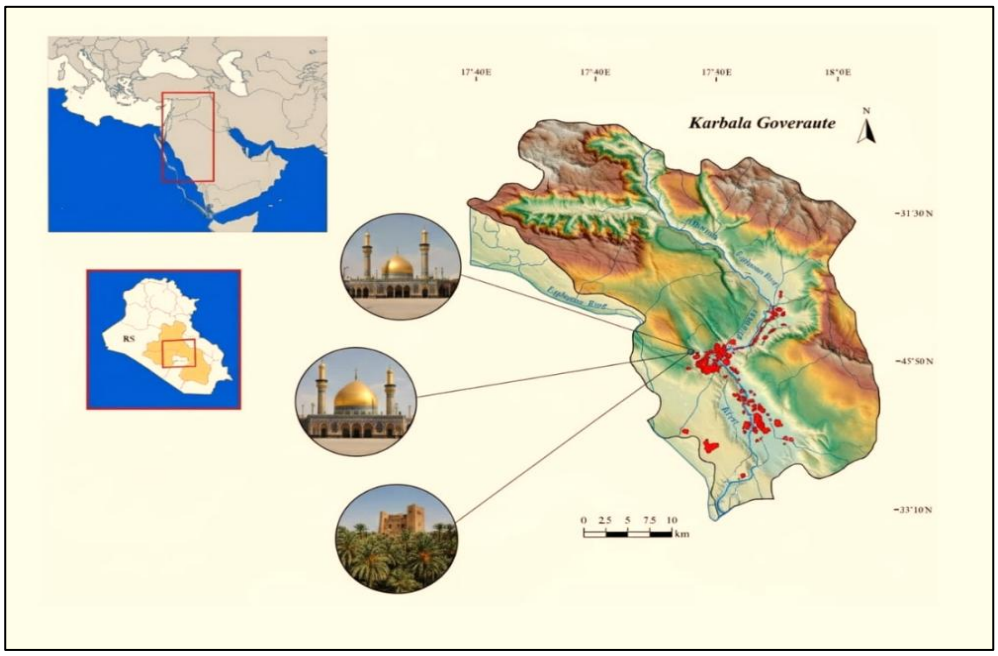
وتتميز كربلاء مناخياً بوقوعها ضمن نطاق المناخ الصحراوي الحار (BWh) وفقا لتصنيف كوبن–غيغر (Köppen–Geiger)؛ إذ تتصف بصيف طويل شديد الحرارة والجفاف، وشتاء معتدل نسبياً قليل الأمطار. ويُعد هذا النمط المناخي السائد في معظم مناطق وسط العراق وجنوبه، إذ ينعدم التساقط المطري في فصل الصيف الحار (العبيدي والشمري، ٢٠٢٢؛ Al–Ansari, 2013,p.670؛Peel et al., 2007,p.1635). كما تصل درجات الحرارة المرتفعة أحيانا إلى (50مْ)، وتشير السجلات المناخية طويلة الأمد إلى وجود تباين فصلي واضح في درجات حرارة الهواء الفصل الشتاء، ولا سيما في شهر كانون الثاني الذي تنخفض فيه درجات الحرارة الصغرى عادة إلى حدود (10–8م°)، بينما ترتفع بصورة حادة في فصل الصيف الحار لتبلغ ذروتها في شهري تموز وآب، إذ تتجاوز المتوسطات الشهرية لدرجات الحرارة (35م)° وهي من أبرز الخصائص المناخية المؤثرة في راحة الإنسان وصحته (عبد والزبيدي، ٢٠٢٢ ؛ Al–Kubaisi & Kadum & Al–Ali, 2022,p.56؛Aziz, 2018,p.2050).

وفي المقابل، تتسم كمية التساقط المطري بندرتها وتذبذبها الزماني، حيث يتركز معظم الهطول المطري في فصل الشتاء وبداية فصل الربيع، في حين يبلغ المجموع السنوي للتساقط المطري نحو (150–100ملم)، وهو ما يعكس الطبيعة الجافة للمناخ السائد في المنطقة (الحيدري وحسون، ٢٠٢٢ ؛Kadum & Al–Ali, 2022,p.58؛ Al–Ansari, 2013,p.671).

ولا سيما لدى الزائرين المشاركين في الأنشطة الدينية الخارجية التي تتطلب مددا طويلة من التعرض المباشر للظروف الجوية (جواد والمسعودي، ٢٠٢٦ ؛World Meteorological Organization, 2022؛ El Kenawy, 2024,p. 2251).

وبناءً على ما تقدم، فإن الخصائص الجغرافية والمناخية والدينية التي تتميز بها محافظة كربلاء تجعل منها منطقة دراسة مثالية لتطبيق مؤشرات المناخ الحيوي البشري وتطوير أدوات معلوماتية تسهم في دعم التخطيط السياحي المستدام، وتعزيز القدرة على التكيف مع التغيرات المناخية المتسارعة، وتحسين إدارة المخاطر المرتبطة بالإجهاد الحراري في المقاصد الدينية ذات الكثافة البشرية المرتفعة (عبد والزبيدي، ٢٠٢٢ ؛Jarratt & Davies, 2020 p.6؛ Scott & Lemieux, 2012,p.148). تمثل بيانات محطة كربلاء المناخية الخصائص العامة للمناخ في محافظة كربلاء، نظراً لمحدودية المحطات المناخية، مما يجعلها معبّرة عن الواقع المناخي للمحافظة بشكل عام.

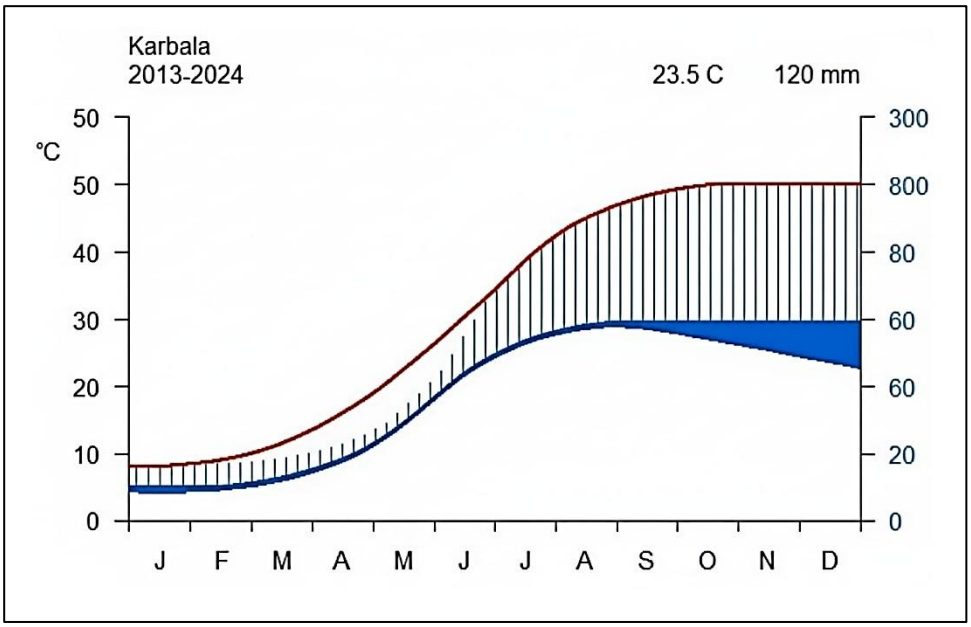
الشكل (١): الموقع الجغرافي لمحافظة كربلاء



تقع محافظة كربلاء ضمن منطقة طبوغرافية منبسطة نسبياً؛ إذ تتميز بغياب المظاهر الجبلية وسيادة السهول والرسوبيات الفيضية التي تشكل جزءاً من السهل الرسوبي العراقي. وتؤثر هذه الطبيعة السطحية المستوية في الخصائص المناخية المحلية للمحافظة، إذ تحدّ من كفاءة حركة الهواء وتجدد الكتل الهوائية؛ مما يسهم في زيادة الإحساس بالإجهاد الحراري، ولا سيما خلال أشهر الصيف الحارة (المرشدي، ٢٠٢٢– ٢٠٢٦ ؛ Abdelmohsen et al.,؛ Jassim & Goff, 2006).

ولإظهار الخصائص المناخية الحديثة للمحافظة، جرى تمثيل بيانات المدة ٢٠١٣–٢٠٢٤ باستخدام مخطط والتر–ليث المناخي (Walter–Lieth Climate Diagram) كما هو موضح في الشكل (٢)، الذي يعرض المتوسطات الشهرية لدرجة حرارة الهواء (المحور الرأسي الأيسر، المنحنى الأحمر) ومجاميع الأمطار الشهرية (المحور الرأسي الأيمن، الأعمدة الزرقاء)، فضلاً عن المتوسط السنوي لدرجة الحرارة الذي يبلغ نحو 23.5°م وإجمالي الأمطار السنوية. ويوضح المخطط بصورة جلية سيادة الظروف الجافة في معظم أشهر السنة، وامتداد فصل صيف طويل يتسم بإجهاد حراري شديد ومستمر. كما تشير البيانات الحديثة إلى وجود اتجاه واضح نحو زيادة شدة موجات الحر في أشهر الانقلاب الصيفي الحار وطول مدتها مقارنة بالمدد المناخية؛ الأمر الذي يؤدي إلى تفاقم التحديات المناخية الحيوية، ويؤثر بصورة مباشرة في مستويات الراحة الحرارية وفي الأنشطة السياحية والدينية بمحافظة كربلاء.

الشكل (٢): مخطط والتر–ليث (Walter–Lieth) المناخي لمحافظة كربلاء للمدة(2013–2024)



الشكل (٢): مخطط والتر–ليث المناخي لمحافظة كربلاء للفترة .(2013–2024) يوضح المحور الرأسي الأيسر (باللون الأحمر) متوسطات درجات حرارة الهواء الشهرية، بينما تمثل القيم السوداء متوسط درجات الحرارة العظمى والصغرى اليومية في مدة الدراسة كلها. أما المحور الرأسي الأيمن (باللون الأزرق) فيمثل المجاميع الشهرية للأمطار، في حين تُظهر الأعمدة الزرقاء كميات الهطول المطري لكل شهر. وفي الزاوية العلوية اليمنى، تشير القيم السوداء إلى متوسط درجة الحرارة السنوي وإجمالي كمية الأمطار السنوية للفترة المدروسة.

تشير الدراسات المناخية الحديثة إلى أنَّ مناطق وسط العراق، بما في ذلك محافظة كربلاء، تُعد من بين أكثر المناطق تأثراً بظاهرة الاحترار العالمي؛ إذ سُجلت زيادة ملحوظة في متوسط درجات الحرارة، فضلاً عن ارتفاع أعداد الأيام شديدة الحرارة والليالي المدارية في العقود الأخيرة (الخفاجي، ٢٠٢٥ ؛Hassan et al., 2023,p.313؛ Salman et al., 2022,p.3440؛IPCC, 2023) . كما بينت تحليلات الاتجاهات العناصر المناخية في العراق وجود تزايد مستمر في شدة موجات الحر وتكرارها، إلى جانب اتساع مدتها الزمنية، ولا سيما في المناطق الوسطى والجنوبية من البلاد (الزبيدي والتميمي، ٢٠٢٦؛ Al-Ansari et al., 2021,p.672؛ World Meteorological Organization 2022).

علاوة على ذلك، تشير إسقاطات التغير المناخي الصادرة عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC)، ولا سيما ضمن سيناريو الانبعاثات المرتفعة (RCP8.5)، إلى أن منطقة الشرق الأوسط والعراق قد تشهد ارتفاعاً إضافياً في درجات الحرارة يتراوح (5–4مْ) بحلول نهاية القرن الحادي والعشرين، يترافق مع انخفاض في كميات الأمطار، وتزايد في تواتر موجات الحر الشديدة وحدتها (IPCC, 2021؛Ali et al., 2024,p.220 ؛ Zittis et al., 2021).

وتترك هذه الظروف المناخية القاسية آثاراً سلبية مباشرة في مستويات الراحة الحرارية للزائرين، ولا سيما في مواسم الزيارات الدينية الصيفية التي تصادف ذروتها في أشهر الصيف الحار التي ترافق ارتفاع درجات الحرارة، وارتفاع الإشعاع الشمسي، واستمرار فترات الجفاف، فضلاً عن الارتفاع النسبي في الرطوبة الجوية في بعض الأحيان نتيجة تأثير الكتل

الهوائية الرطبة الوافدة من الجنوب التي يرافقها المنخفض الهندي الموسمي (الحيدري والشمري، ٢٠٢٥ ؛ El Kenawy, 2024,p. 2253؛Al-Kubaisi & Aziz, 2018 p.2051)، ويؤكد هذا الواقع أهمية توظيف المؤشرات المناخية الحيوية، مثل مؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) ومؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّل (mPET)، بوصفها أدوات علمية دقيقة لتقييم مستويات الإجهاد الحراري في البيئات الحضرية. كما توفر هذه المؤشرات قاعدة معرفية مهمة لدعم تخطيط السياحة الدينية، وتحسين إدارة الحشود البشرية، وتكييف الأنشطة السياحية مع الظروف المناخية الحالية والمتوقعة مستقبلاً في محافظة كربلاء.

٢.٢. مؤشرا درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) ودرجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة(mPET)

يعدُّ مؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET)، من أكثر المؤشرات الثرموفسيولوجية استعمالا في دراسات المناخ الحيوي البشري والسياحة، لتقييم الظروف المناخية الحيوية البشرية في منطقة الدراسة، ويستند هذا المؤشر إلى نموذج ميونخ لتوازن الطاقة لدى الإنسان (Munich Energy Balance Model for Individuals: MEMI)، وهو نموذج ثنائي التركيب (Two-node Model) لتنظيم حرارة جسم الإنسان، ويحظى المؤشر باعتراف رسمي من قبل جمعية المهندسين الألمان (VDI 3787، الجزء الثاني) بوصفه أداة معيارية لتقييم البيئات الحرارية الخارجية المؤثرة على راحة الإنسان (Havenith & Fiala, 2011,p.256؛Höppe, 1999,p.75).

يعد (PET) من أكثر المؤشرات سهلة التطبيق معتمدا على بيانات الأرصاد الجوية المتمثلة بـ (درجة حرارة الهواء، والرطوبة النسبية، وسرعة الرياح، ومتوسط درجة الحرارة الاشعاعية) (Mean Radiant Temperature: Tmrt)، المؤثرة على الإنسان من ناحية الجنس والنشاط البدني و (معدل الايض)، وقيم العزل الحراري للملابس، ومن خلال دمج المعطيات التي ذكرت تعطي تحليلا شاملا لمستويات الإجهاد الحراري للبايومناخي الذي يتحكم في توازن حرارة جسم الإنسان. (Matzarakis et al., 1999,p.79؛Matzarakis & Amelung, 2008,p.162 ؛ Höppe, 1999,p.77). وتم تعديل مؤشر (PET) التقليدي بالمؤشر بدرجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (mPET) بوصفه بديلاً أكثر واقعية من الجانب الفسيولوجي، ولا سيما تحت ظروف الحرارة الشديدة التي تميز أشهر الصيف في المناطق الجافة والحارة مثل محافظة كربلاء. (المرعب، ٢٠٢٤ ؛Chen & Matzarakis, 2018,p.1278)، ويُعد مؤشر (mPET) تطويراً متقدماً لمؤشر(PET) ، الذي يعد أكثر دقة في محاكاة الديناميكية لعمليات التنظيم الحراري في جسم الإنسان (Chen & Matzarakis, 2018,p.1279).

وعلى الرغم من أن كلا المؤشرين يعتمدان على نموذج MEMI، فإنَّ مؤشرmPET يتضمن نموذجاً متعدد التركيب لنقل الحرارة (Multinode Heat Transfer Model) يعادل النموذج الذي طوّره فيالا (Fiala Model,2011)، الذي يسمح بوصف أكثر تفصيلاً للتبادل الحراري بين أجزاء الجسم المختلفة (Havenith & Fiala, 2011,p.257) . كما يشتمل على نموذج متعدد الطبقات للملابس ذاتية التكيف يأخذ بالحسبان مقاومة بخار الماء داخل طبقات الملابس وتأثيرها في عمليات فقدان الحرارة والتبريد التبخيري (Chen & Matzarakis, 2018,p.1279؛ Zafarmandi & Matzarakis, 2025,p.19).

ويتميز مؤشر(mPET) بقدرته على احتساب التغيرات الزمنية في العزل الحراري للملابس ودرجة حرارة مركز الجسم؛ مما يسمح بتمثيل أكثر واقعية للاستجابات الفسيولوجية للإنسان تحت ظروف بيئية متغيرة، وهي إحدى النقاط التي تشكل محدودية نسبية في مؤشر (PET) التقليدي (Chen & Matzarakis, 2018,p.1280). وتسهم هذه التحسينات في تمثيل آليات التكيف الحراري للإنسان لحالات الإجهاد الحراري، وخاصة خلال حالات الإجهاد الحراري الشديد؛ الأمر الذي

يؤدي في كثير من الأحيان إلى تصنيف مستويات الإجهاد الحراري بدرجات أقل حدة مقارنة بتلك التي يقدمها مؤشر (PET).

وبناءً على ذلك، يوفر مؤشر(mPET) تقييماً أكثر دقة للراحة الحرارية البايومناخية، من خلال تمثيله الواقعي للتأثيرات الفعلية للملابس والظروف المحلية المحيطة بالإنسان، بما في ذلك تأثير مقاومة بخار الماء وآلية التنظيم الحراري المختلفة (Zafarmandi & Matzarakis, 2025,p.19).

أما القيم الحدود الحرارية (Thermal Thresholds) الخاصة بمؤشري (mPET،PET)، فقد تم عرضها في الجدول (1)، وهي مستمدة من المعايير الدولية المعترف بها، ولا سيما الدليل الإرشادي لجمعية المهندسين الألمان (VDI 3787، الجزء الثاني)، وتُستخدم على نطاق واسع في تقييم مستويات الراحة الحرارية والإجهاد الحراري في البيئات الخارجية المرتبطة بالأنشطة السياحية والترفيهية (Matzarakis et al., 1999,p.79؛VDI, 1998).

الجدول (١): قيم الحدود الحرارية لمؤشري (PET ، mPET) وفئات الراحة الحرارية المقابلة لها.

درجة الإجهاد الحراري	الإدراك الحراري	PET / mPET (°م)
إجهاد برد شديد جداً	شديد البرودة	أقل من ٤
إجهاد برد شديد	بارد	4–8
إجهاد برد متوسط	مائل إلى البرودة	8–13
إجهاد برد طفيف	بارد قليلاً	13–18
لا يوجد إجهاد حراري	مريح حرارياً	18–23
إجهاد حراري طفيف	دافئ قليلاً	23–29
إجهاد حراري متوسط	دافئ	29–35
إجهاد حراري شديد	حار	35–41
إجهاد حراري شديد جداً	شديد الحرارة	أكثر من ٤١

المصدر :أُعدّ الجدول بالاعتماد على التصنيفات القياسية لمؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) الواردة في كل من,(1999) Höppe و,(1999) .Matzarakis et al والدليل الإرشادي لجمعية المهندسين الألمان (VDI, VDI 3787 Part II (1998كما تُستخدم هذه الحدود الحرارية على نطاق واسع في الدراسات التطبيقية الخاصة بمؤشر mPET لتقييم الراحة الحرارية في البيئات الخارجية (Zafarmandi & Matzarakis, 2025؛Chen & Matzarakis, 2018).

٣.٢ نموذج RayMan

استعمال نموذج (RayMan) في هذه الدراسة لحساب كل من مؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) ومؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّل (mPET) ويُعد (RayMan) أحد النماذج المتخصصة في تحليل تدفقات الإشعاع الحراري وتقييم مستويات الراحة الحرارية الإنسان في البيئات الحضرية والطبيعية على حد سواء، وقد طُوِّر خصيصاً لدراسة التفاعلات المعقدة بين الإنسان والعناصر المناخية المحيطة به (Matzarakis et al., 2016,p.690) ويولي النموذج اهتماماً خاصاً لحساب متوسط درجة الحرارة الإشعاعية(Tmrt) ، التي تُعد من أهم المتغيرات المؤثرة في تحديد مستويات الإجهاد الحراري التي يتعرض لها الإنسان في البيئات الخارجية(Matzarakis et al., 2007,p.330) .

ويتيح نموذج (RayMan) إمكانية محاكاة المتغيرات المناخية البسيطة والمعقدة من خلال دمج البيانات الجوية مع مجموعة من المعطيات البيئية، مثل التظليل، وانعكاسية الأسطح(Albedo) ، واتجاه الموقع، والخصائص الهندسية للبيئة الحضرية، ويؤدي هذا التكامل إلى توفير تقييم واقعي لتأثير البيئة المبنية والمفتوحة في الراحة الحرارية البشرية، ولا سيما في المدن ذات الكثافات السكانية المرتفعة أو المناطق التي تشهد نشاطاً سياحياً مكثفاً، كما هو الحال تطبيقة في محافظة كربلاء.

ويعتمد النموذج في بنيته المنهجية على المعايير التي وضعتها جمعية المهندسين الألمان (VDI 3787 الجزء الثاني) لتقييم المناخ الحيوي البشري، كما أُدرج ضمن الإرشادات الخاصة بأساليب التقييم المناخي الحيوي المستخدمة في تخطيط المناخ الحضري والإقليمي وجودة الهواء (Benz et al., 2023,p.485؛VDI, 1998)، وقد طُوِّر نموذج (RayMan) في الأصل بهدف الربط بين علم المناخ الحضري (Urban Climatology) والمناخ الحيوي البشري (Human Biometeorology)، إلا أنه أثبت كفاءة عالية في العديد من المجالات التطبيقية، ومنها دراسات السياحة والترفيه؛ إذ أسهم في نجاح تقييم الراحة الحرارية للزوار، ودعم عمليات التخطيط السياحي المستدام (Matzarakis et al., 2010؛ Lin et al., 2011,p.493).

ونظراً لقدرة النموذج على تمثيل التفاعلات المعقدة بين العوامل المناخية والبيئية والبشرية، فإنّه يوفر أداة علمية موثوقة وعملية لتحليل الإجهاد الحراري وتقييم قدرة البيئات الحضرية والسياحية، في منطقة الدراسة، والتكيف مع الظروف المناخية الحالية والمتوقعة مستقبلاً. كما تسهم مخرجاته في تحديد الممد الزمنية الأكثر ملاءمة لممارسة الأنشطة الخارجية ذات القرار في تطوير استراتيجيات التكيف المناخي وإدارة الحشود السياحية والدينية في ظل تصاعد تأثيرات التغير المناخي (Scott & Lemieux, 2012,p.149؛Chen & Matzarakis, 2018,p.1281).

٤.٢ نظام نقل المعلومات المناخية–السياحية لمؤشر(CTIS)

من أجل عرض نتائج الدراسة وتفسيرها بصورة واضحة ومختصرة، جرى اعتماد نظام نقل المعلومات المناخية–السياحية (Climate–Tourism Information Scheme: CTIS)بوصفه إطاراً منهجياً يعمل على تحليل البيانات المناخية المعقدة إلى صيغة مبسطة وسهلة التفسير يمكن الاستفادة منها من قبل السياح والمخططين ومتخذي القرار، ويُعد هذا النظام من أكثر الأدوات استعمالا في تقييم مدى ملاءمة الظروف المناخية لمختلف الأنشطة السياحية، ولا سيما في المدن ذات الأهمية الدينية والسياحية، مثل مدينة كربلاء.

ويعتمد مؤشر CTIS على دمج مجموعة من العناصر المناخية الرئيسة التي تؤثر بصورة مباشرة في جودة التجربة السياحية ومستويات الراحة لدى الزوار، وتشمل ما يأتي:

١. الراحة الحرارية :(Thermal Comfort) وتُستمد من مستويات الإجهاد الحراري المحسوبة باستخدام مؤشري درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) ودرجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة(mPET) ؛ مما يسمح بتحديد الفترات الزمنية الملائمة أو غير الملائمة للأنشطة الخارجية (Matzarakis et al., 1999,p.80؛ Chen & Matzarakis, 2018,p.1282) .

٢. الظروف الجمالية أو الإدراكية :(Aesthetic Conditions) وتشمل تكرار الأيام المشمسة أو الضبابية ومدى صفاء الأجواء، وهي عناصر تؤثر في إدراك الزوار لجودة البيئة السياحية ورضاهم عن التجربة السياحية (de Freitas,2003,p.51، 2003؛ Matzarakis، 2007) .

٣. الظروف الجوية الفيزيائية :(Physical Weather Conditions) وتتضمن: (سرعة الرياح، والهطول المطري، والرطوبة النسبية)، والشعور بعدم الراحة الحرارية (Sultriness) ، بوصفها عوامل قد تحد من ممارسة الأنشطة السياحية أو تؤثر في سلامة الزائرين وراحتهم.

وتُقيَّم البيانات المدخلة إلى النظام، سواء أكانت بيانات أرصادية أم مؤشرات مناخية، بالاعتماد على قيم الحدود محددة سابقا (الجدول ٢)؛ الأمر الذي يسمح بتصنيف الظروف المناخية إلى فئات مختلفة تبعاً لمدى ملاءمتها للأنشطة السياحية، وتُعرض هذه الفئات بصرياً باستعمال تدرج لوني يعكس مستويات الراحة أو الإجهاد الحراري؛ مما يجعل المعلومات سهلة الفهم والتفسير حتى بالنسبة لغير المتخصصين في العلوم المناخية .

ويمتاز معطيات نظام CTIS بدرجة عالية من المرونة؛ إذ يمكن تكييف نتائج مخرجاته بما يتناسب مع الخصائص المناخية المحلية وأنماط النشاط السياحي السائدة، سواء تعلق الأمر بالسياحة الدينية الموسمية، أو الزيارات الجماعية المكثفة، أو الأنشطة الخارجية المرتبطة بأوقات زمنية محددة. وكما هو حال محافظة كربلاء، يوفر هذا النظام أداة فعالة لإدارة السياحة الدينية بتحديد الأوقات المثلى للزيارة وتقليل المخاطر الصحية المرتبطة بالإجهاد الحراري، ولا سيما في أشهر الصيف ومواسم الزيارات المليونية التي تشهد كثافات سكانية عالية.

الجدول (٢): معايير نظام نقل المعلومات المناخية–السياحية (CTIS) وقيم الحدود المستعملة في تقييم الظروف المناخية الحيوية.

التفسير السياحي	القيمة الحرارية	المتغير	مكونات نظامCTIS
مريح (لا يوجد إجهاد حراري)	° 23–18م	PET / mPET	الراحة الحرارية
دافئ قليلاً	° 29–23م	PET / mPET	الراحة الحرارية
إجهاد حراري متوسط	° 35–29م	PET / mPET	الراحة الحرارية
إجهاد حراري شديد إلى شديد جداً	° 35 <م	PET / mPET	الراحة الحرارية
إجهاد برد طفيف	° 18–13م	PET / mPET	الراحة الحرارية
إجهاد برد متوسط إلى شديد البرودة	° 13 >م	PET / mPET	الراحة الحرارية
ملائم جداً	5 <ساعات/يوم	مدة سطوع الشمس	الظروف الجمالية
ملائم	5–3ساعات/يوم	مدة سطوع الشمس	الظروف الجمالية
غير ملائم	3 >ساعات/يوم	مدة سطوع الشمس	الظروف الجمالية
غير ملائم	أيام ضبابية	الضباب	الظروف الفيزيائية
ملائم	1 >ملم/يوم	الهطول المطري	الظروف الفيزيائية
متوسط الملاءمة	5–1ملم/يوم	الهطول المطري	الظروف الفيزيائية
غير ملائم	5 <ملم/يوم	الهطول المطري	الظروف الفيزيائية
ملائم	5 >م/ثا	سرعة الرياح	الظروف الفيزيائية
متوسط الملاءمة	8–5م/ثا	سرعة الرياح	الظروف الفيزيائية
غير ملائم	8 <م/ثا	سرعة الرياح	الظروف الفيزيائية
غير ملائم	ارتفاع ضغط بخار الماء	الشعور بالكتم (الرطوبة)	الظروف الفيزيائية

المصدر :أُعدّ الجدول بالاعتماد على المعايير الأصلية لنظام نقل المعلومات المناخية–السياحية (CTIS) كما وردت في أعمال Matzarakis(2007,2014)، مع توظيف حدود مؤشري PET و mPET المستندة إلى تصنيف VDI 3787 Part II ونتائج الدراسات الحديثة الخاصة بالمناخ الحيوي البشري (Matzarakis et al., 1999؛ Chen & Matzarakis, 2018).

ومن خلال توظيف إطار المؤشر(CTIS)، تسهم هذه الدراسة في سد الفجوة بين التحليل العلمي المتخصص في المناخ الحيوي والتطبيق العملي في القطاع السياحي، عبر توفير قاعدة معرفية موثوقة تدعم التخطيط السياحي المستدام، وتعزز استراتيجيات التكيف مع التغير المناخي، ومن خلال تحسين إدارة الحشود والأنشطة الدينية في محافظة كربلاء في ظل تزايد التحديات المناخية المعاصرة.

٣. النتائج

يعرض هذا القسم تقييماً شاملاً للظروف الحرارية والمناخية السائدة في محافظة كربلاء خلال المدة (٢٠١٣– ٢٠٢٤)، مع التركيز على تأثيراتها في مستويات الراحة الحرارية للإنسان والأنشطة السياحية، ولا سيما السياحة الدينية التي تمثل أحد أبرز الأنماط السياحية لمنطقة الدراسة، وقد استند التحليل إلى مؤشرات المناخ الحيوي البشري ونظام نقل المعلومات المناخية– السياحية بهدف تقديم فهم متكامل للعلاقة بين الظروف المناخية المحلية وملاءمتها للأنشطة السياحية المختلفة.

وتكتسب هذه النتائج أهمية خاصة في ضوء التحديات التي تفرضها التغيرات المناخية العالمية، وما يرتبط بها من ازدياد في شدة وتواتر موجات الحر في المناطق الجافة وشبه الجافة منها العراق؛ الأمر الذي ينعكس بصورة مباشرة على صحة الزوار وسلوكهم المكاني والزمني وأنماط استخدامهم للفضاءات المفتوحة، ومن هذا المنطلق فإن تقييم الإجهاد الحراري لا يقتصر على كونه مؤشراً بيئياً، بل يمثل أداة تطبيقية مهمة لدعم التخطيط السياحي المستدام، وتعزيز قدرة الوجهات الدينية على التكيف مع الظروف المناخية المتغيرة.

واعتمد تحليل النتائج في هذه الدراسة على أربعة محاور رئيسة، تمثلت فيما يأتي:

١. تحليل التوزيع التكراري لفئات الإجهاد الحراري وفقاً لمؤشري درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) ودرجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة(mPET) ، وذلك خلال الأوقات المختلفة من اليوم وعبر فصول السنة، بهدف تحديد الأوقات الأكثر تعرضاً للإجهاد الحراري وكذلك توفر مستويات أفضل من الراحة الحرارية.

٢. دراسة الأنماط الموسمية للتساقط المطري وتحليل تأثيرها في ملاءمة الظروف البيئية لممارسة الأنشطة الخارجية، مع التركيز على الأنشطة السياحية والدينية التي تعتمد بدرجة كبيرة على الفضاءات المفتوحة .

٣. تحليل التباينات اليومية والفصلية في قيم مؤشري (PET، mPET) وبيان مدى انعكاس هذه التغيرات على مستويات الإجهاد الحراري، من خلال تحديد الاختلافات بين ساعات الصباح والظهيرة والمساء، وكذلك بين الفصول المناخية المختلفة .

٤. تقييم الظروف المناخية الملائمة للسياحة باستعمال نظام نقل المعلومات المناخية–السياحية(CTIS) ، وذلك لتحديد المدة الزمنية الأكثر ملاءمة للزيارة وممارسة الأنشطة السياحية في المحافظة، فضلاً عن تشخيص الأوقات التي تتطلب إجراءات وقائية أو تدابير تكيفية للحد من المخاطر المناخية المرتبطة بالإجهاد الحراري .

ومن معطيات التحليل العلمي من خلال دمج نتائج البيانات المناخية الحيوية التي تم تطبيقها لمحافظة كربلاء، (Bioclimatology Information Sheet)، صُمِّمت لتكون أداة عملية مبسطة تدعم التخطيط السياحي المستجيب للمناخ، وتساعد الزوار ومتخذي القرار والجهات المعنية بإدارة الزيارات الدينية على تنظيم الأنشطة السياحية بما يتوافق مع التباينات المناخية والحرارية التي شهدتها المحافظة خلال مدة الدراسة. وتمثل هذه الورقة إحدى المخرجات التطبيقية

الرئيسة للدراسة؛ إذ تسهم في تحويل البيانات العلمية المعقدة إلى معلومات قابلة للاستعمال المباشر في إدارة الوجهات السياحية الدينية وتعزيز قدرتها على التكيف مع التغير المناخي .

١.٣ تكرارات مؤشري (PET) ، (mPET) في محافظة كربلاء

من أجل تقديم صورة شاملة للظروف الحرارية السائدة في محافظة كربلاء خلال ثلاثة أوقات يومية (الصباح، الظهيرة، والمساء) للمدة (٢٠١٣-٢٠٢٤)، تم إعداد مخططات للتوزيع التكراري لتسع فئات من الإجهاد الحراري استناداً إلى مؤشري درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) ودرجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة(mPET) ، وذلك على وفق أوقات زمنية متتابعة كل منها (١٠ ايام)، كما هو موضح في الشكل (3) ويُعد هذا الأسلوب التحليلي ضرورياً للكشف عن التغيرات الدقيقة في مستويات الراحة الحرارية على مدار العام، ولا سيما في محافظة تشهد كثافات سكانية عالية في ذروة موسم الزيارات الدينية المليونية.

وبالتركيز على القياسات المسجلة خلال أوقات الظهيرة (الساعة ١٤:٠٠ بالتوقيت المحلي)، والممثلة في العمود الأوسط من الشكل(3) ، يتضح أن فئة الراحة الحرارية تظهر بتكرارات منخفضة نسبياً، خاصة خلال فصلي الصيف والشتاء؛ إذ تنخفض نسبة تكرارها إلى أقل من (10%) خلال أشهر الصيف، مشكِّلةً نسبة (5%) في فصل الشتاء، ويعكس هذا النمط تأثير المناخ الصحراوي الحار ذي الطابع القاري الذي يميز محافظة كربلاء، فضلاً عن ارتفاع مستويات الإشعاع الشمسي وقلة الغطاء السحابي خلال معظم أشهر السنة (Al-Kubaisi & Aziz p.2052،2018 ؛ El Kenawy, 2024,p. 2255).

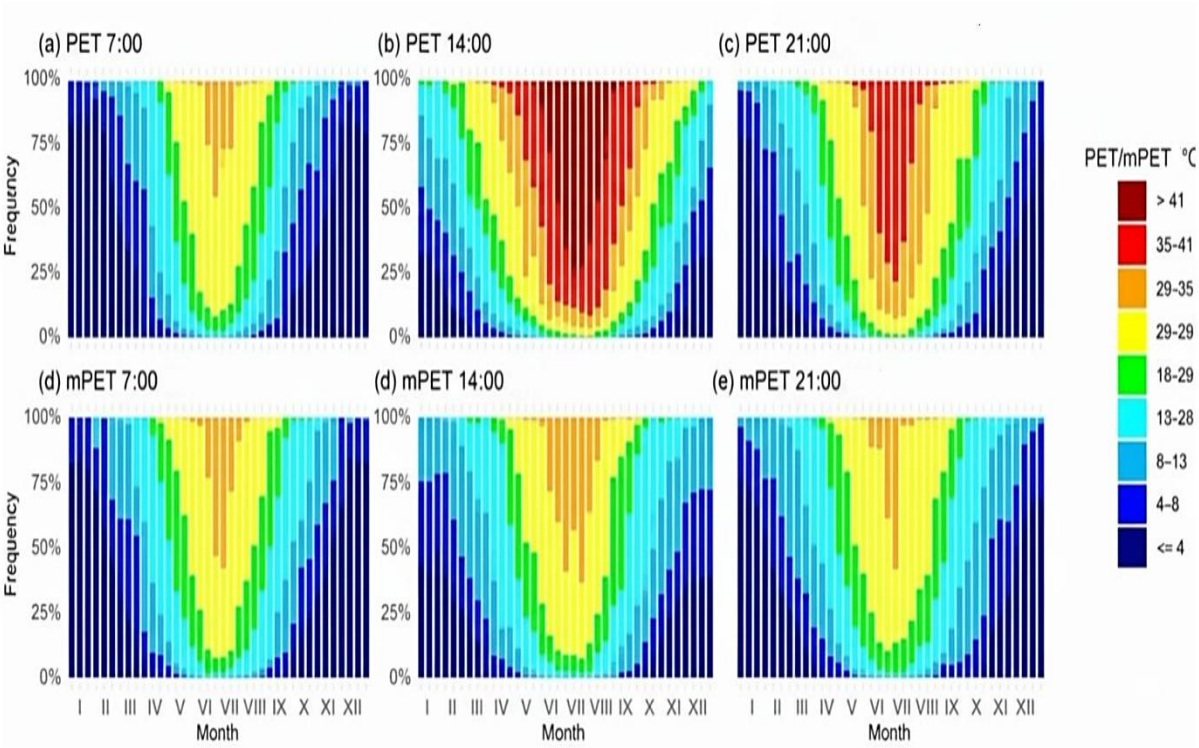
أما في الفصول الاعتدال (الربيعي والخريفي)، فتزداد وتيرة تكرار الظروف الحرارية الملائمة مقارنة بالفصل الحار جدا والفصل البارد؛ إذ تتراوح نسب تكرارها بين نحو (٥٪) في أوائل شهر أيلول لتصل إلى حوالي (45–40%) في أوائل شهر تشرين الثاني، وتشير النتائج إلى أن الظروف المريحة حرارياً، في المتوسط، فصل الربيع مقارنة بفصل الخريف الأكثر شيوعاً حرارياً، وهو ما يرتبط بالطبيعة التدريجية لارتفاع درجات الحرارة في الربيع مقابل الانخفاض السريع نسبياً في درجات الحرارة خلال الخريف.

وتُظهر النتائج أن الإجهاد الحراري يكون في أدنى مستوياته لشهري (كانون الأول وكانون الثاني) أبرد شهور فصل الشتاء، إلا أنه يبدأ بالظهور بصورة واضحة اعتباراً من أواخر شهر نيسان حتى منتصف شهر تشرين الأول، ويظهر شدة الإجهاد الحراري لفصل الصيف الحار من منتصف شهر حزيران إلى بداية شهر أيلول، يسجل الإجهاد الحراري نسب تكرار تتجاوز (90 %) بعض الأيام مع سيطرة مؤشري الإجهاد الحراري الشديد والشديد جداً خلال أوقات الدراسة، وتمثل هذه الظروف تحدياً سلبيا مباشراً على حركة الزائرين في ممارسة الأنشطة الخارجية لساعات النهار في محافظة كربلاء، ولا سيما مواسم الزيارات الدينية التي تتزامن مع أشهر الصيف.

كما تبين النتائج أن الإجهاد الحراري خلال ساعات الظهيرة يكون أكثر وضوحاً خلال فصل الاعتدال الخريفي مقارنة بالفصل الربيعي، ويُعزى ذلك إلى استمرار تأثير درجات الحرارة المرتفعة نسبياً خلال الخريف، على الرغم من انخفاض زاوية سقوط الإشعاع الشمسي، ومن جهة أخرى، يسود الإجهاد البارد خلال المدة من أواخر شهر تشرين الثاني الى منتصف شهر آذار؛ إذ تتكرر فئتا الإجهاد البارد نسبيا والمتوسط بصورة أكبر، وتبقى حالات الإجهاد البارد الشديد محدودة ونادرة الحدوث. ويعكس هذا النمط الاعتدال النسبي لفصل الشتاء في كربلاء مقارنة بالمناطق الأبرد في العروض العليا أو المناطق الجبلية.

وتؤكد هذه النتائج أهمية استعمال مؤشري (mPET، PET) لتقييم مستويات الراحة الحرارية لدى الزائرين، ولا سيما في سياق التخطيط للسياحة الدينية واسعة النطاق، كما تشير بوضوح إلى أن ساعات المساء والليل خلال فصل الصيف الحار، تمثل الأوقات الأكثر ملاءمة لممارسة الأنشطة الدينية والسياحية الخارجية .وتتوافق هذه الملاحظات مع الاستنتاجات المستخلصة من تطبيق نظام نقل المعلومات المناخية–السياحية (CTIS) في محافظة كربلاء، التي أبرزت تفوق الأوقات المسائية والانتقالية من حيث ملاءمتها المناخية للزيارة، وتقليل المخاطر الصحية المرتبطة بالإجهاد الحراري المؤثر على راحة الإنسان.

الشكل (٣): التوزيع التكراري لفئات الإجهاد الحراري وفقاً لمؤشري درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) ودرجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة (mPET) في محافظة كربلاء خلال المدة (2013–2024)، معروضاً على شكل فترات زمنية متعاقبة مقدار كل منها عشرة أيام، وذلك عند ثلاثة أوقات يومية هي :الساعة ٠٧:٠٠ صباحاً، والساعة ١٤:٠٠ ظهراً، والساعة ٢١:٠٠ مساءً بالتوقيت المحلي.



المصدر :من إعداد الباحث اعتماداً على بيانات محطة كربلاء المناخية للفترة (٢٠١٣–٢٠٢٤)، وباستخدام نموذج RayManلحساب مؤشري PETو mPET وفق المعايير المعتمدة في تقييم المناخ الحيوي البشري (Matzarakis et al., 1999؛ Chen & Matzarakis, 2018).

استناداً إلى قياسات الأوقات الصباحية (٠٧:٠٠)، المسائية (٢١:٠٠)، لم تُسجل أي من فئات الإجهاد الحراري الشديد الأوقات الدراسة خلال شهر نيسان إلى نهاية شهر تشرين الأول؛ مما يشير إلى أن الظروف الحرارية والأوقات الصباحية والمسائية اليوم تكون في أقل شدة مقارنة بساعات الظهيرة، في الفصل الصيف الحار، وتكاد الظروف لم تسجل الإجهاد الحراري، أكثر شيوعاً؛ إذ سجلت الساعات المسائية مقارنة بساعات الصباح التي بلغت نسب تكرارها وفقاً لمؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة (mPET) نحو (48.06%) في الساعات المسائية، ونسبة شكلت

(44.19)%في الساعات الصباحية، ويعكس تأثيره الانخفاض التدريجي في درجات الحرارة بعد غروب الشمس وتراجع الحمل الإشعاعي على جسم الإنسان؛ الأمر الذي يؤدي إلى تحسن نسبي في مستويات الراحة الحرارية خلال أوقات المساء.

وخلال فصلي الاعتدال الربيعي والخريفي سجلت النتائج أن الظروف الحرارية الملائمة خلال أوقات الصباح كانت أكثر شيوعاً، ولوحظ أن هناك اتجاها معاكسا خلال الأوقات المسائية؛ إذ بدت ظروف الإجهاد الحراري لفصل الخريف أكثر اعتدالاً وملاءمة للأنشطة الخارجية، ويمكن تفسير هذا النمط بالاختلافات الموسمية في معدلات التسخين والتبريد؛ إذ ترتفع درجات الحرارة تدريجياً خلال فصل الربيع، بينما تحتفظ البيئة الحضري بجزء من الكتل الهوائية المكتسبة خلال فصل الصيف الحار؛ مما يعكس اتجاهات إيجابية للراحة الحرارية للأوقات المسائية.

كما بينت النتائج أن الحدود الحرارية للإجهاد البارد سجلت بدرجات مختلفة خلال مدة (١٠) أيام خلال مدة الدراسة لكل سنة، ولوحظ أن هناك ارتفاعا طفيفا في تكرارها من شهر أيلول حتى شهر أيار، وظهرت أشد فئات الإجهاد البارد خلال أوقات الصباح والمساء، المتمثلة بالإجهاد البارد الشديد والإجهاد البارد الشديد جداً، وقد سُجِّل ذلك من منتصف شهري تشرين الثاني حتى نهاية شهر آذار؛ ويعكس ذلك الطبيعة الشتوية المعتدلة نسبياً لمحافظة كربلاء؛ إذ تسود حالات البرودة الخفيفة والمتوسطة لأوقات أطول مقارنة بحالات البرودة الشديدة التي تبقى محدودة زمنياً.

أما فيما يتعلق بالإجهاد الحراري، فقد اقتصرت الحالات المسجلة خلال الأوقات الصباحية والمسائية على الفئتين الأدنى من فئات الإجهاد الحراري، في حين كانت فئة الإجهاد الحراري الطفيف هي الأكثر سيادة. وسُجل الإجهاد الحراري الصباحي خلال المدة الممتدة من بداية شهر آيار حتى أواخر شهر آب، بينما امتدت مدة الإجهاد الحراري المسائي من منتصف شهر أيار حتى منتصف شهر أيلول، وعلى الرغم من أن الأوقات المسائية استمرت لمدة زمنية أطول نسبياً، فإن التحليل التكراري أوضح أن الإجهاد الحراري كان أكثر وضوحا خلال أوقات الصباح مقارنة بأوقات المساء، وهو ما قد يُعزى إلى التأثير المشترك لارتفاع درجات الحرارة المبكر والتعرض المباشر للإشعاع الشمسي خلال ساعات الصباح المتأخرة، مقابل التحسن التدريجي للظروف الحرارية بعد غروب الشمس.

وتبرز هذه النتائج أهمية مراعاة التوقيت اليومي للأنشطة السياحية والدينية في محافظة كربلاء؛ إذ تشير بوضوح إلى أن الأوقات المسائية خلال أشهر الصيف الحار تعد أفضل مستويات من الراحة الحرارية مقارنة بالأوقات الصباحية؛ مما يجعلها أكثر ملاءمة لتنظيم الزيارات الدينية والأنشطة الخارجية واسعة النطاق، كما تؤكد الحاجة إلى اعتماد استراتيجيات إدارة زمنية للزيارات خلال الأوقات فصل الصيف الحار؛ مما يسهم في تقليل المخاطر الصحية المرتبطة بالإجهاد الحراري وتحسين جودة التجربة السياحية للزائرين. أظهرت نتائج مؤشر mPET تبايناً واضحاً بين الفصول، حيث سجلت أعلى قيم الإجهاد الحراري خلال فصل الصيف، في حين انخفضت القيم خلال فصل الشتاء، بينما سادت ظروف معتدلة خلال فصلي الربيع والخريف.

٢.٣ تكرار الهطول التساقط المطري في محافظة كربلاء

يشكل مجموع التساقط المطري السنوي في محافظة كربلاء خلال المدة بين (2013–2024) نحو (247ملم)؛ مما يعكس الطبيعة المناخية الجافة إلى شبه الجافة التي تسود في منطقة الدراسة؛ إذ يتركز معظم الهطول خلال الفصول والربيع الخريف والشتاء، وشكل مجموع كمية التساقط المطري (82ملم) وفي الشتاء، (٦٥ ملم) الربيع، (٥٥ ملم) في الخريف؛ إذ سجل شهر كانون الثاني أعلى كمية للتساقط المطري بمتوسط بلغ (35 ملم)، إذ ترتبط الأمطار بالمنخفضات

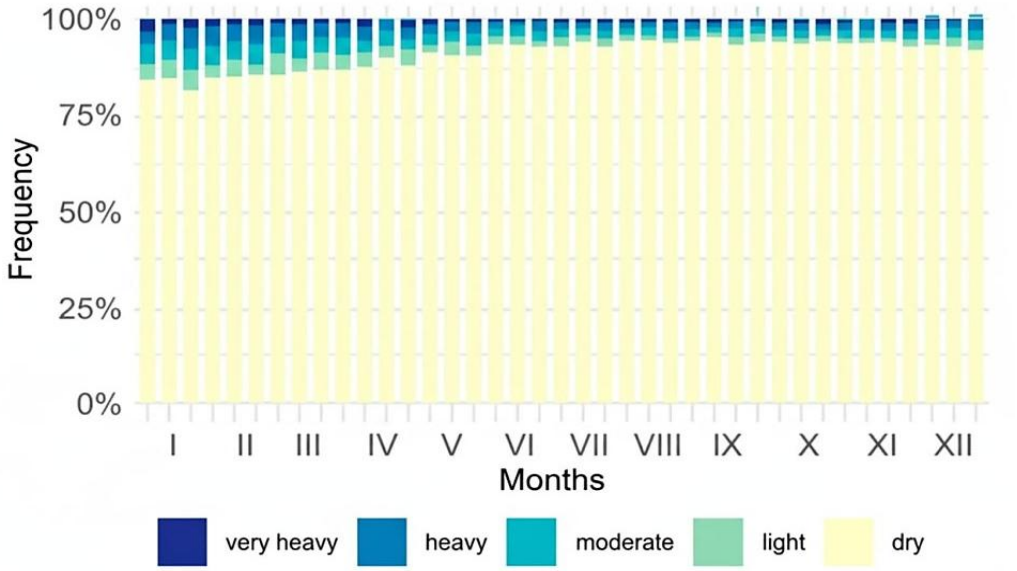
الجوية الشتوية القادمة من البحر المتوسط والبحر الأحمر وأمّا الصيف الحار في شهري تموز وآب فيعدُّ الأكثر جفافاً، تكاد تكون كميات التساقط المطري معدومة فيه، بينما تسود خلال فصل الصيف ظروف الاستقرار الجوي والامتداد شبه المداري الجاف، ويتوافق هذا التوزيع مع الخصائص العامة للمناخ الصحراوي الحار السائد في وسط العراق (العبادي والساعدي، ٢٠٢٣ ؛Kadum & Al-Ali, 2022,p.60؛Al-Kubaisi & Aziz, 2018 p.2054).

كما يوضح الشكل(4) نسب تكرار الهطول المطري (22%) لشهر شباط، وفي المقابل شكلت نسبة الأيام الجافة التي يقل فيها التساقط المطري لمدة الدراسة بـ (٧٨٪) من مجموع أيام السنة؛ وهو ما يعكس بوضوح السمات الجافة وشبه الصحراوية لمحافظة كربلاء، وتزداد احتمالية تساقط الأمطار خلال الأشهر الأولى من السنة، ولا سيما خلال المدة من شهر كانون الثاني إلى شهر أيار؛ إذ تتجاوز نسب التكرار (٢٠٪)، وظهر انخفاض واضح في بقية أشهر السنة لتتراوح غالباً بين (15–10%) وأقل من هذا.

أمّا فيما يتعلق بشدة تساقط الهطول المطري، فقد أظهرت النتائج أن كمية التساقط المطري المتوسطة سجلت (٥–١٠ ملم) وهي تمثل النمط الأكثر شيوعاً على مدار السنة؛ إذ تبقى كمية الأمطار الغزيرة (٢٠–٥٠ ملم) والغزيرة جداً (أكثر من ٥٠ ملم) محدودة الحدوث نسبياً، وقد سجلت أعلى نسبة لتكرار التساقط المطري الشديدة خلال المدة من شهر كانون الأول إلى شهر آذار؛ إذ شكلت نسبتها بين (3%) في شهر آذار، ونسبة (4%) لشهر كانون الثاني؛ ويعكس ذلك التأثير الموسمي للاضطرابات الجوية الشتوية التي قد تؤدي أحياناً إلى هطولات مطرية مركزة خلال الأوقات الزمنية القصيرة التي تؤثر على تدفق حركة الزوار خلال أوقات التساقط المطري(العبادي والساعدي، ٢٠٢٣؛ Salman et al., 2022,p.3441).

وتشير هذه النتائج إلى أن الجفاف يُعد السمة المناخية الغالبة في محافظة كربلاء؛ الأمر الذي يستوجب أخذه بالحسبان عند التخطيط للأنشطة السياحية، كما توضح أن فصلي الشتاء والربيع يمثلان أكثر الأوقات ملاءمة للأنشطة المرتبطة بالهطول المطري والفضاءات الخارجية، سواء من حيث تحسن الظروف البيئية أو انخفاض مخاطر الإجهاد الحراري مقارنة بأشهر الصيف الحار، ويسهم انعدام التساقط المطري في أشهر فصل الصيف الحار في تعزيز تأثيرات الحرارة الشديدة والجفاف؛ مما يزيد من أهمية تبني استراتيجيات تكيف مناخي مناسبة في إدارة السياحة الدينية والأنشطة الخارجية في المحافظة.

الشكل(4) : التوزيع التكراري المتوسط لفئات الهطول المطري اليومي في محافظة كربلاء خلال المدة (2024–2013)، معروضاً على هيئة فترات زمنية متتابعة مقدار كل منها عشرة أيام على مدار السنة، بما يوضح التباين الموسمي في احتمالات حدوث الأمطار وشدة الهطول.



المصدر :من إعداد الباحث بالاعتماد على بيانات محطة كربلاء المناخية للفترة.(2013–2024)

٣.٣ التوزيع الحراري اليومي لمؤشري (PET) و (mPET) في محافظة كربلاء

يوضح الشكل (٥) التوزيع اليومي لقيم مؤشري درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) ودرجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة (mPET) في محافظة كربلاء، مبيناً أنماط الإجهاد الحراري من أوقات الصباح حتى المساء، واعتمد التحليل على أوقات زمنية متعاقبة مقدار كل منها (١٠ أيام) خلال مدة الدراسة (2013–2024)، مع المحافظة على ثباتها خلال أوقات الراصدات اليومية للأوقات المختلفة؛ مما يسمح بتتبع التغيرات الحرارية اليومية الفصول بصورة دقيقة.

أظهرت النتائج أن أشد الظروف الحرارية البايومناخية أكثر شدة لشهري تموز وآب ، ولا سيما خلال الأوقات الساعة(١٢:٠٠ والساعة ١٦:٠٠) بالتوقيت المحلي؛ إذ تجاوزت قيم مؤشري(PET , mPET) حاجز (35مْ)، وهو ما يشير إلى التعرض إلى مستويات إجهاد حراري شديد وفق التصنيفات المعتمدة دولياً (VDI 3787 Part II) وهو ما يعكس التأثير المشترك لارتفاع درجات حرارة الهواء، وزيادة الإشعاع الشمسي المباشر، وارتفاع متوسط درجة الحرارة الإشعاعية (Tmrt)، إلى جانب قلة تأثير الرياح في التخفيف من العبء الحراري على جسم الإنسان (Matzarakis et al., Höppe, 1999,p.78؛1999,p.81).

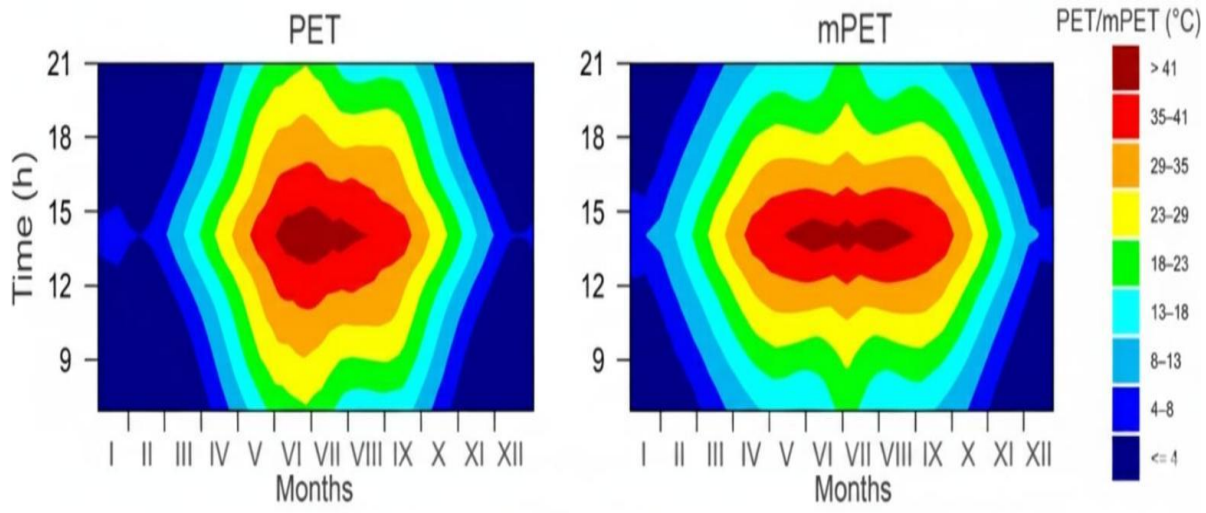
كما تبين أن الظروف الحارة (≤٣٥م°) تسود ساعات النهار لمنتصف شهر حزيران حتى أواخر شهر آب؛ إذ سجلت حالات الإجهاد الحراري الشديد جداً، التي تجاوزت فيها القيم (41م°)، خلال شهر آب وبشكل خاص عند الساعة(١٤:٠٠ ظهراً)، وذلك وفقاً لمؤشر (PET) بصورة رئيسة، وتشير هذه النتائج إلى أن ساعات الظهيرة خلال ذروة الصيف تمثل الفترات الأعلى خطورة بالنسبة للأنشطة الخارجية، وخاصة بالنسبة للزائرين المشاركين في التجمعات الدينية واسعة النطاق.

وخلال المدة من شهر حزيران الى نهاية شهر آب، اتسمت ساعات الصباح الباكر والمساء بظروف حرارية أكثر اعتدالاً والطفيف نسبياً؛ إذ سادت حالات الراحة الحرارية أو الإجهاد الحراري ولم تسجل أي فئات للإجهاد البارد، ويعكس ذلك الأثر الإيجابي لانخفاض الإشعاع الشمسي في بداية اليوم ونهايته؛ مما يؤدي إلى تحسن نسبي في مؤشرات الراحة الحرارية مقارنة بساعات الظهيرة.

وعلى النقيض من ذلك، فقد سُجلت قيم الحدود الحرارية (PET)، (mPET) التي تقل عن(13م°) خلال الأوقات الصباحية والمسائية ابتداءً من أواخر شهر أيلول الى أوائل شهر أيار، كما شكلت هذه القيم خلال ساعات النهار في المدة من بداية شهر تشرين الثاني إلى أواخر شهر آذار؛ إذ سجلت القيم إلى سيادة فئات الإجهاد البارد الطفيف إلى المتوسط خلال موسم الشتاء، بما يتوافق مع الاعتدال النسبي للمناخ الشتوي في كربلاء.

وتعكس هذه الخصائص المناخية اليومية العامة للمناخ القاري الحار الذي يميز محافظة كربلاء؛ إذ تتسم التباينات الحرارية اليومية باتساع واضح بين أوقات النهار والليل، كما تؤكد النتائج أهمية أخذ التغيرات اليومية في مستويات الإجهاد الحراري بالحسبان عند التخطيط للأنشطة السياحية، ولا سيما الزيارات الدينية الجماعية التي تعتمد بصورة كبيرة على الحركة في الفضاءات المفتوحة، ومن ثم، فإن أوقات ممارسة الأنشطة اليومية يمثل عاملاً حاسماً في الحد من التعرض للإجهاد الحراري وتحسين مستويات الراحة والسلامة الصحية للزائرين؛ إذ ينبغي تجنب جدولة الفعاليات الكبرى خلال أوقات الظهيرة، أو اتخاذ تدابير وقائية مناسبة تشمل توفير مناطق مظللة، ونقاطا لتوزيع المياه، وخدمات الإسعاف السريع، بما يعزز قدرة المحافظة على إدارة الحشود الدينية في بيئات مناخية شديدة الحرارة.

الشكل (٥): المسار السنوي لمتوسط القيم الحرارية لمؤشري درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) في الجانب الأيسر، ودرجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة (mPET) في الجانب الأيمن، في محافظة كربلاء خلال الفترة (2024–2013)، وذلك عند ثلاث فترات يومية ثابتة هي: الساعة ٠٧:٠٠ صباحاً، والساعة ١٤:٠٠ ظهراً، والساعة ٢١:٠٠ مساءً بالتوقيت المحلي.



المصدر: من إعداد الباحث اعتماداً على بيانات محطة كربلاء المناخية للفترة (٢٠١٣–٢٠٢٤)، وباستخدام نموذج RayMan لحساب قيم مؤشري PET وmPET عند أوقات الرصد المحددة.ومن الجدير بالملاحظة أنه عند مقارنة نتائج مؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) المبينة في الشكل (٥) مع نتائج مؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة (mPET) في الشكل (٥)، يتبين أن قيم الحرارية (mPET) تُظهر بصورة عامة مستوى أعلى من الاعتدال الحراري؛ مما يعكس انخفاض احتمالية التعرض لفئات الإجهاد الحراري المتطرفة مقارنة بما تشير إليه قيم (PET) ويعزى ذلك إلى أن مؤشر (mPET) يأخذ في الحسبان بصورة أكثر تفصيلاً الآليات الفسيولوجية والسلوكية التي يعتمدها جسم الإنسان للتكيف مع الظروف المناخية المتغيرة؛ إذ يستند مؤشر (PET) إلى افتراضات أكثر ثباتاً فيما يتعلق بعزل الملابس واستجابات التنظيم الحراري الجسم الإنسان (Chen & Matzarakis, 2018,p.1283؛ Havenith & Fiala, 2011,p.259).

فعلى سبيل المثال، خلال أشهر الشتاء وأثناء ساعات الصباح والمساء، تظهر الحالات التي تنخفض فيها القيم الحرارية لمؤشر (PET) إلى أقل من (4م°) بتكرارات أعلى مقارنة بمؤشر (mPET)؛ مما يشير إلى حساسية أكثر من مؤشر (PET) بسبب ظروف البرودة الشديدة؛ ويعكس هذا الاختلاف قدرة مؤشر (mPET) على تمثيل التغيرات الديناميكية في عزل الملابس ودرجة حرارة الجسم الأساسية؛ الأمر الذي يؤدي إلى تقليل المبالغة في تقدير شدة الإجهاد البارد الذي قد يشعر به الأفراد في الواقع (Havenith & Fiala, 2011,p.260).

وفي المقابل، وخلال أشهر الصيف الحار، أظهرت أن القيم الحرارية لـ (PET) سجلت عند أوقات الظهيرة وقوعها ضمن الحدود الإجهاد الحراري الشديد جداً الذي يتجاوز أكثر من (41مْ)، في شهري تموز وآب، أمّا القيم الحرارية (mPET،) فنادراً ما بلغت هذا المستوى من الشدة؛ إذ بقيت في الغالب ضمن نطاق الإجهاد الحراري المتوسط إلى الشديد، دون الانتقال المتكرر إلى الفئة القصوى للإجهاد الحراري، وتؤكد هذه النتائج أن مؤشر (mPET) يوفر تمثيلاً أكثر واقعية للإحساس الحراري الفعلي الذي يختبره الإنسان في البيئة الحارة الجافة لمحافظة كربلاء، نظراً لدمجه عناصر التكيف الفسيولوجي والسلوكي التي تحد من المبالغة في تقدير شدة الإجهاد الحراري الناتجة عن المؤشرات التقليدية (المرعب، ٢٠٢٤؛ Chen & Matzarakis, 2018,p.1284؛ Zafarmandi & Matzarakis, 2025,p.20).

وتكتسب هذه المعلومات أهمية تطبيقية كبيرة في مجال التخطيط السياحي وإدارة المخاطر الصحية المرتبطة بالحرارة؛ إذ إن الاعتماد الحصري على مؤشر (PET) قد يؤدي إلى تقدير أكثر تشدداً لمستويات الإجهاد الحراري، بينما يوفر (mPET)أساساً علمياً أكثر دقة لتقييم الظروف الحرارية التي يواجها الزوار فعلياً، ولا سيما مواسم الزيارات الدينية الكبرى في محافظة كربلاء؛ إذ إنَّ استعمال المؤشرين بصورة تكاملية يتيح فهماً أكثر شمولاً للبيئة الحرارية، ويدعم اتخاذ قرارات أكثر كفاءة فيما يتعلق بتوقيت الأنشطة الخارجية، وإدارة الحشود، وتطوير استراتيجيات التكيف مع موجات الحر المتزايدة في ظل التغير المناخي.

وتشير النتائج الحالية إلى أن مؤشر (mPET) قد يكون أكثر ملاءمة لتقييم الراحة الحرارية في المدن الحارة والجافة المحافظة كربلاء؛ لأنه يعكس بصورة أفضل قدرة الإنسان على التكيف مع الظروف البيئية المحلية، ويشكل مؤشر (PET)أداة فعالة لرصد التغيرات القصوى والتنبيه المبكر لاحتمالات التعرض للإجهاد الحراري الشديد؛ لذا فإن الجمع بين المؤشرين يوفر إطاراً تحليلياً متكاملاً يمكن توظيفه في الدراسات المناخية الحيوية المستقبلية، وفي تطوير خدمات معلومات مناخية موجهة خصيصاً لقطاع السياحة الدينية.

٤.٣ مخططات نظام المعلومات المناخية–السياحية(CTIS)

توضح مخططات نظام المعلومات المناخية–السياحية المؤشر (CTIS) موضحاً في الشكل (٦) التكامل بين الجوانب الحرارية والفيزيائية استناداً إلى البيانات المناخية الخاصة بمحافظة كربلاء خلال المدة (٢٠١٣–٢٠٢٤)، وقد صُممت هذه المخططات بهدف تبسيط عرض البيانات المناخية الحيوية المعقدة وتحويلها إلى معلومات واضحة وسهلة الفهم يمكن الاستفادة منها من قبل الزوار والمخططين ومتخذي القرار، ولا سيما في مجال السياحة الدينية وإدارة الزيارات المليونية التي تتكرر عليها لكل عام.

ومن أجل تقديم النتائج بدرجة أعلى وأكثر دقة وتفصيل، ومن خلال إعداد مخططات الرسم المؤشر CTIS باعتماد أعلى ثلاثة أوقات للرصد اليومي هي: (الصباحية، الظهيرة، المسائية)، وباستعمال صيغتين مختلفتين للعرض الرسم البياني تكمل إحداهما الأخرى في تفسير النتائج.

ففي المرحلة الأولى، شكلت (النسب المئوية) لكل عنصر من العناصر المناخية التي خضعت للتقييم على أساس الرسم البياني متتابعة كل (١٠ أيام)؛ إذ دمجها بالتمثيل بياني بصري على المستوى الشهري، كما هو موضح في الشكل (6) من الجانب الأيسر، ويتيح هذا الأسلوب تتبع التغيرات الزمنية الدقيقة في تكرار عناصر الراحة الحرارية والظروف الجوية المصاحبة، مع إبراز التباين الموسمي الذي يميز المناخ المحلي في كربلاء.

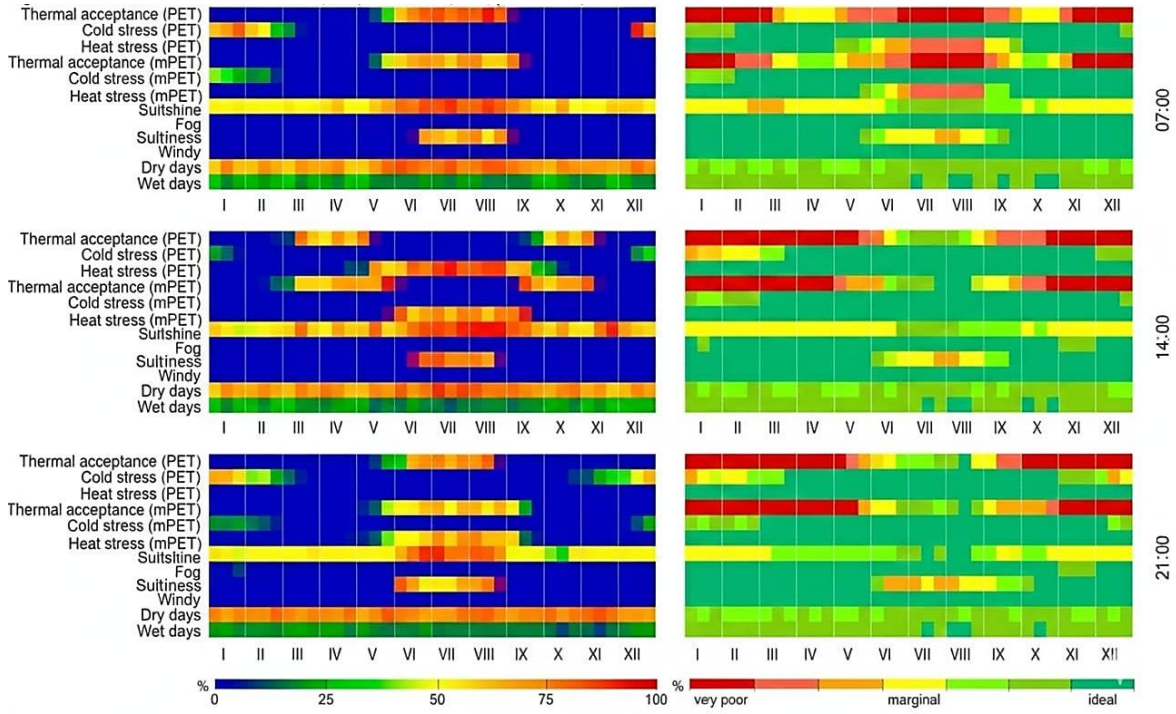
وأمّا في المرحلة الثانية، فقد تم تصنيف العناصر المناخية المقيمة إلى فئات ملائمة وغير ملائمة سياحياً استناداً إلى تكراراتها النسبية، كما يظهر من الشكل (٦) من الجانب الأيمن، ويسهم هذا التصنيف في تحديد الفترات الزمنية الأكثر ملاءمة لممارسة الأنشطة السياحية المختلفة، ولا سيما الزيارات الدينية الكبرى، من خلال الدمج بين مؤشرات الراحة الحرارية (mPET،PET)، والظروف المناخية بـ(التساقط المطري، وسرعة الرياح)، فضلاً عن العوامل الجمالية المرتبطة بصفاء السماء وتكرار الأيام المشمسة (Zaninović & Matzarakis, 2009؛deFreitas,2003,p.53,).

وتشير نتائج مخططات (CTIS) إلى وجود تباين واضح في درجة ملاءمة الظروف المناخية للسياحة على مدار السنة؛ إذ تُظهر فصول الاعتدال الربيعي والخريفي، أعلى مستويات الظروف الملائمة للأنشطة الخارجية مقارنة بفصل الصيف، الذي يتسم بسيادة فئات الإجهاد الحراري المرتفع خلال أوقات النهار، كما تبرز الأوقات المسائية بوصفها الأكثر ملاءمة خلال أشهر الصيف؛ نتيجة انخفاض العبء الحراري وتحسن مؤشرات الراحة الحرارية؛ الأمر الذي يمنحها أهمية خاصة في تنظيم الشعائر الدينية والزيارات الجماعية واسعة النطاق.

وتؤكد هذه النتائج أن مخططات CTIS تمثل أداة فعالة لتقييم الملاءمة المناخية للسياحة في محافظة كربلاء؛ إذ توفر قاعدة معلومات تطبيقية تدعم عمليات التخطيط السياحي المستدام وإدارة الحشود خلال أوقات الذروة للزيارة الدينية. كما تساعد الجهات المعنية على اتخاذ قرارات تستند إلى الأدلة العلمية فيما يتعلق بتحديد أوقات الزيارة المثلى، وتوجيه الزوار، وتطوير إجراءات التكيف مع موجات الحر المتزايدة، بما يسهم في تعزيز السلامة الصحية وتحسين جودة التجربة السياحية في المحافظة.

ومن الناحية التطبيقية، تمثل مخططات CTIS ربطا بين المعرفة المناخية المتخصصة ومتطلبات الإدارة السياحية العملية؛ إذ تحول المؤشرات المناخية الحيوية إلى رسائل بصرية مبسطة وقابلة للتفسير المباشر، وهذا ما يجعلها أداة ذات قيمة كبيرة في المدن الدينية ذات الكثافات السكانية العالية، مثل محافظة كربلاء؛ إذ تتطلب إدارة الزيارات الموسمية مراعاة دقيقة للتقلبات المناخية وتأثيراتها المحتملة في صحة الزوار وسلامتهم.

الشكل (٦): مخطط نظام المعلومات المناخية–السياحية (CTIS) لمحافظة كربلاء خلال المدة (2013–2024)عند ثلاث فترات رصد يومية هي :الساعة ٠٧:٠٠ صباحاً، والساعة ١٤:٠٠ ظهراً، والساعة ٢١:٠٠ مساءً بالتوقيت المحلي.



المصدر :من إعداد الباحث اعتماداً على بيانات محطة كربلاء المناخية للفترة (2013–2024)، وباستخدام إطار (CTIS) لتقييم الملاءمة المناخية للسياحة.

تشير الكثافة المرتفعة للون الأخضر في مخططات نظام المعلومات المناخية–السياحية (CTIS) موضحاً في الشكل (٦) الجانب الأيسر إلى ارتفاع مستوى الملاءمة المناخية في محافظة كربلاء، ولا سيما خلال الأوقات الانتقالية من السنة، وتعكس هذه النتيجة توفر ظروف مناخية مناسبة نسبياً لممارسة الأنشطة السياحية والدينية في الهواء الطلق خلال أجزاء واسعة من العام، على الرغم من التأثير الواضح للظروف الحرارية المتطرفة خلال بعض الفصول.

وفيما يتعلق بالإجهاد البارد الشديد، لم تُسجل حالات الإجهاد البارد الشديد جداً (PET/mPETم° < 0) خلال الراصدات عند الظهيرة، بينما سجلت بشكل محدود ونادر خلال الأوقات الصباحية والمسائية. ووفقاً لمؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية(PET) ، استمرت حالات الإجهاد البارد الصباحي والمسائي، التي تجاوز تكرارها (٢٠٪) من الأيام من دون أن تصل إلى (٦٠٪)، خلال الأوقات من بداية شهر تشرين الأول حتى نهاية شهر آذار، وفقاً لمؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدلة (mPET) ، فقد تقلصت هذه الحالات ضمن أوقات أقصر نسبياً امتدت من أواخر شهر تشرين الثاني حتى أوائل شهر آذار، وهذا الاختلاف مرة أخرى لمؤشرالذي (mPET) يقدم تقديراً أكثر اعتدالاً للظروف الحرارية الباردة نتيجة أخذه بالحسبان التكيفات الفسيولوجية والسلوكية للإنسان.

(Havenith & Fiala, 2011,p.261؛Chen & Matzarakis, 2018,p.1285).

وعلى النقيض من ذلك، سجل الإجهاد الحراري الشديد (PET/mPETم° > 35) بصورة واضحة خلال أوقات الظهيرة؛ إذ امتد وفقاً لمؤشر (PET) من بداية شهر أيار حتى نهاية شهر أيلول، بينما اقتصر وفقاً لمؤشر (mPET) على الأوقات في أواخر شهر أيار ومنتصف شهر أيلول. وخلال شهري حزيران وآب، أثّر الإجهاد الحراري الشديد أكثر من (٧٥٪) في

بعض أيام الظهيرة؛ الأمر الذي يعكس شدة الظروف الحرارية السائدة خلال فصل الصيف الحار في محافظة كربلاء، ويؤكد الحاجة إلى اتخاذ تدابير وقائية خاصة أثناء مواسم الزيارات الدينية الكبرى.

أما ظروف الراحة الحرارية خلال الساعات الظهيرة، المتمثلة بالقيم الحرارية الواقعة ضمن المجال (١٨م° < PET < 29م°)، فسجلت أعلى احتمالية لحدوثها خلال شهري تشرين الأول، نيسان ؛ مما يشير إلى أن هذين الشهرين يمثلان الأوقات الأكثر ملاءمة لممارسة الأنشطة السياحية الخارجية. وفي المقابل، سادت ظروف الإجهاد الحراري المعتدل خلال الأوقات الصباحية والمسائية ما بين منتصف شهر آيار حتى منتصف شهر أيلول.

وتتميز محافظة كربلاء بسيادة الظروف بشدة ساعات السطوع الشمسي الفعلي لأكثر أشهر السنة، ولا سيما خلال الأوقات من شهر أيار إلى شهر تشرين الأول؛ إذ تجاوزت احتمالية صفاء السماء، المتمثلة بانخفاض الغطاء السحابي إلى أقل من (٥٠٪)، شكلت هذه الظروف عاملاً جمالياً إيجابياً يعزز من جاذبية الوجهة السياحية، إلا أنها في الوقت ذاته تسهم في زيادة ارتفاع درجات الحرارة مع زيادة الحمل الإشعاعي وارتفاع مستويات الإجهاد الحراري خلال أشهر الصيف.

وبشكل آخر يشهد شهر نيسان حتى منتصف شهر أيلول، ارتفاعا في مستويات الرطوبة النسبية المسببة للشعور بالاختناق الحراري (Sultriness) بصورة ملحوظة؛ إذ تراوحت نسب تكرارها بين (٢٠٪ ،٧٠٪). وقد أدى ذلك إلى انخفاض ملاءمة الظروف الجوية خلال الأوقات الصباحية والمسائية، فضلاً عن زيادة الشعور بعدم الارتياح خلال راصدات ساعات الظهيرة، نتيجة التأثير المشترك لارتفاع درجات الحرارة والرطوبة على قدرة الجسم على التخلص من الحرارة الزائدة.

أما الضباب فيشكل واحدا من العناصر المناخية المهمة، ويكون بعد التساقط المطري في الخريف والشتاء والربيع ، إذ لم تتجاوز نسبة حدوثه (٢٠٪) خلال الساعات الصباحية، وكان أكثر وضوحاً في فصل الخريف، كما ظهر بمعدلات أعلى في الفترة الصباحية مقارنة بالفترة المسائية، وبالرغم من محدودية تأثيره، فإن الضباب يؤثر في حجب الرؤية الأفقية وسهولة التنقل خلال بعض الأوقات من السنة.

وفيما يخص التساقط المطري ظهر بشكل واضح في الأيام الجافة؛ إذ ينعدم في معظم أيام السنة خلال فصل الصيف الحار، أما في فصلي الاعتدال الربيعي والانقلاب الشتوي، فقد سجل في بعض الأوقات أكثر من (٦٠٪) ربما تصل إلى أكثر من (٧٠٪) لشهر كانون الأول ، وشهر أيار، وهذا ما يؤكد أن منطقة الدراسة ضمن المناخ الجاف؛ مما يؤثر سلبا على الأنشطة السياحية الدينية.

أما سرعة الرياح والرطوبة النسبية لها دور واضح على راحة الإنسان خلال أيام الزيارات الدينية لمنطقة الدراسة؛ إذ شكلت نسبة أقل من ٥٪ على طول أيام الدراسة، وبصورة عامة، تؤكد نتائج الرسم البياني(CTIS) الفصول الانتقالية، الربيع والخريف، التي شهدت خلال الأيام أوقات الراصدات أكثر الأوقات ملاءمة للسياحة الدينية في محافظة كربلاء. يبين مخطط CTIS أن الظروف المناخية في محافظة كربلاء تكون ملائمة للنشاط السياحي خلال فصلي الربيع والخريف، في حين تنخفض ملاءمتها خلال فصل الصيف نتيجة ارتفاع درجات الحرارة.

٥.٣ النشرة المعلوماتية للمناخ الحيوي البشري

دعماً لتفسير نتائج الدراسة وتعزيز إمكانية توظيفها عملياً، تمّ تحليل معلومات المناخ الحيوي المؤثر على راحة الإنسان لمنطقة الدراسة، وأُدرجت بوصفها مادة تكميلية مرافقة لهذا البحث. وقد صُممت هذه الورقة العلمية على هيأة ملصق علمي (Scientific Poster)يجمع أبرز نتائج الدراسة في دليل بصري كما هو في الشكل K1: النشرة المعلوماتية للمناخ الحيوي. الهدف الأساسي لتفصيل أبرز النتائج العلمية المعقدة وتحويلها إلى معلومات واضحة وسهلة الفهم وقابلة للتطبيق، بما يخدم احتياجات الزوار والمخططين ومتخذي القرار على حد سواء.

وتدمج هذه الورقة العلمية البصرية أهم المخرجات المستخلصة من تحليلات مؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) ومؤشر درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة(mPET) ، إلى جانب مخططات نظام المعلومات المناخية–السياحية .(CTIS) ويتيح هذا التكامل الجمع بين التفسير العلمي والتطبيق العملي، من خلال تقديم ورقة شاملة للتباينات اليومية والموسمية في مستويات الراحة الحرارية والعناصر البايومناخية. وقد عُرضت المعلومات بأسلوب واضح وسهل الاستخدام؛ الأمر الذي يجعلها مناسبة لشريحة واسعة من الجهات المعنية بإدارة السياحة الدينية في محافظة كربلاء، بما في ذلك المؤسسات السياحية، والدوائر المحلية، والجهات الصحية، والهيئات المسؤولة عن تنظيم الزيارات المليونية.

ولا تقتصر أهمية هذه الورقة العلمية على عرض النتائج فحسب، بل تمتد لتقديم توصيات عملية قابلة للتنفيذ تستند إلى الأدلة العلمية المستخلصة من الدراسة، ومن أبرز هذه التوصيات تشجيع تنظيم الزيارات والأنشطة الدينية خلال فصول الانقلاب الصيفي والشتوي والاعتدال الربيعي والخريفي؛ لما تتميز به من ظروف حرارية أكثر ملاءمة مقارنة بفصل الصيف الحار، كما توصي النشرة بتطوير بنى تحتية متكيفة مع الظروف المناخية، مثل إنشاء أنظمة وقائية في مسارات الزائرين، وتوفير مرافق التبريد ونقاط توزيع مياه الشرب، وزيادة المساحات الخضراء في المواقع ذات الكثافات البشرية المرتفعة، فضلاً عن تنظيم تدفقات الزوار وفق الفترات الزمنية التي تحقق أعلى مستويات الراحة الحرارية.

وتستند هذه التوصيات إلى تحليل مناخي حيوي متين اعتمد على مؤشرات معترف بها عالميا وطرائق قياس ونمذجة موثوقة؛ الأمر الذي يمنح الورقة العلمية مصداقية علمية عالية، ويجعلها مرجعاً تطبيقياً لدعم التخطيط المستدام وإدارة السياحة الدينية في ظل تزايد التقلبات المناخية، وتسارع آثار التغير المناخي، وقد أكدت العديد من الدراسات الحديثة أهمية تطوير خدمات معلومات مناخية موجهة خصيصاً لقطاع السياحة؛ لما لها من أثر في تعزيز قدرة الوجهات السياحية على التكيف مع المخاطر المناخية وتحسين تجربة الزائرين.

وتكمن الأهمية التطبيقية لهذه الورقة العلمية في قدرتها على تحويل البيانات المناخية الحيوية المعقدة إلى أداة تواصل فعالة وسهلة الاستعمال والتطبيق، يمكن توظيفها في الحملات التوعوية، والمواقع الإلكترونية السياحية، ومراكز الإرشاد الخاصة بالزائرين، فضلاً عن اعتمادها في الخطط التشغيلية للجهات المنظمة للفعاليات الدينية الكبرى، وتسهم في رفع مستوى الوعي بالمخاطر المرتبطة بالإجهاد الحراري الذي يتعرض لها السائح خلال أيام الزيارة للعتبات الدينية لمنطقة الزيارة، وتوجيه الزوار نحو أفضل أوقات الزيارة وأكثرها أماناً، بما يعزز الصحة العامة وجودة التجربة السياحية.

وبناءً على ذلك، يمكن النظر إلى الورقة العلمية المعلوماتية للمناخ الحيوي بوصفها إحدى المخرجات العلمية الرئيسة والمبتكرة لهذه الدراسة؛ إذ تمثل أول دليل بايومناخي حيوي متكامل خاص بمحافظة كربلاء يجمع بين مؤشرات (PET ، mPET، CTIS)، ورسم بياني ضمن إطار بصري موحد، وتشكل أداة استراتيجية لإدارة السياحة الواعية بالمناخ في منطقة الدراسة في كربلاء، ولا سيما فيما يتعلق بتنظيم المناسبات الدينية الكبرى، مثل زيارة الأربعين وزيارة عاشوراء، اللتين تشهدان أكبر التجمعات البشرية في المحافظة.

إن تطوير مثل هذه الأدوات المؤشرات يتوافق مع التوجهات الدولية الحديثة الداعية إلى دمج المعرفة المناخية في التخطيط السياحي وإدارة المخاطر، وتحويل نتائج البحوث العلمية إلى منتجات معرفية قابلة للاستعمال المباشر من قبل المجتمع وصناع القرار.

٤. المناقشة

هدفت هذه الدراسة إلى إجراء تحليل شامل للظروف المناخية الحيوية في محافظة كربلاء باستخدام مؤشري درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) ودرجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة(mPET) ، إلى جانب نظام المعلومات المناخية–السياحية(CTIS) ، المدة (٢٠١٣– ٢٠٢٤)، وقد اعتمد على تحليل بيانات مناخية يومية ونمذجة مناخية حيوية لتقييم ظروف الراحة الحرارية عند ثلاثة أوقات رئيسة من اليوم، هي: (الصباحية، الظهيرة، والمسائية). وعُرضت النتائج من خلال مخرجات بصرية متعددة، شملت رسوما بيانية (CTIS) والورقة المعلوماتية للمناخ الحيوي، التي صُممت خصيصاً لدعم الزوار والمخططين ومتخذي القرار.

ركزت الدراسة على تحديد الأنماط الموسمية واليومية للإجهاد الحراري والبارد، وتحليل انعكاساتها على الأنشطة السياحية، ولا سيما السياحة الدينية البشرية، وأظهرت النتائج أن هناك تباينات موسمية واضحة تؤثر بصورة مباشرة في القدرة الاستيعابية المناخية لمحافظة كربلاء؛ إذ تبين أن فصل الصيف، ولا سيما خلال أوقات من منتصف شهر حزيران إلى أوائل شهر أيلول، يتسم بمستويات مرتفعة جداً من الإجهاد الحراري، فقد تجاوزت حدود مؤشر (PET) حاجز (٣٥م°) بصورة متكررة خلال أوقات الظهيرة، ووصلت في بعض الحالات إلى مستويات الإجهاد الحراري الشديد جداً (41<م°). وتتوافق هذه النتائج مع دراسات سابقة أجريت في المدن الداخلية الحارة في الشرق الأوسط وشبه الجزيرة العربية، والتي أشارت إلى أن الحرارة الشديدة تمثل القيد المناخي الرئيس أمام الأنشطة الخارجية والأنشطة المرتبطة بالسياحة.

وفي المقابل، وفرت فصول الاعتدال ولا سيما الربيع والخريف، ظروفاً مناخية حيوية أكثر ملاءمة، اتسمت بتحسن مستويات الراحة الحرارية وانخفاض معدلات الإجهاد الحراري. ومن ثم، فإن هذه الفصول تمثل الفترات المثلى لتنظيم المناسبات الدينية الكبرى والأنشطة السياحية المصاحبة لها، وتكتسب هذه النتيجة أهمية خاصة في محافظة كربلاء؛ إذ تتزامن العديد من الزيارات الدينية الرئيسة مع الفترات الانتقالية؛ مما يتيح فرصاً لتطبيق تخطيط سياحي حساس للمناخ، يسهم في تقليل المخاطر الصحية وتحسين تجربة الزائرين.

وأظهرت مخططات (CTIS) أن محافظة كربلاء تتمتع بعدد كبير نسبياً من الأيام الملائمة مناخياً للسياحة خلال فصلي الاعتدال (الربيع والخريف)، والتي تتسم بدرجات حرارة معتدلة وظروف جمالية مناسبة، مثل صفاء السماء وارتفاع مدة سطوع الشمس. وفي المقابل، كشفت هذه المخططات عن تكرار مرتفع لحالات الإجهاد الحراري الشديد خلال أوقات الظهيرة في فصل الصيف الحار، التي غالباً ما تترافق مع ارتفاع مستويات الشعور بالاختناق الحراري(Sultriness) ، وتفرض هذه الظروف ضرورة إعادة جدولة وتنظيم الأنشطة الخارجية بما يحد من التعرض أوقات الذروة الحرارية، أوضحت النتائج بصورة جلية أن الأوقات الصباحية المبكرة والمسائية توفر ظروفاً أكثر اعتدالاً؛ الأمر الذي يؤكد أهمية ملاءمة الشعائر الدينية، والخدمات المساندة، ومسارات المشاة، وجداول الفعاليات مع هذه الفترات الزمنية الأقل إجهاداً حرارياً(Matzarakis, 2014,p.199,p.81) .

وفي هذا السياق، تبرز الحاجة إلى تبني مجموعة من إجراءات التكيف المناخي، مثل التوسع في إنشاء المظلات، وزيادة المساحات الخضراء الحضرية، وتحسين التهوية الطبيعية، واستعمال مواد بناء عالية الانعكاسية، فضلاً عن توفير محطات للتبريد وتوزيع المياه على امتداد مسارات الزائرين. وقد أثبتت مثل هذه التدخلات فاعليتها في العديد من البيئات الحضرية الحارة التي ترتفع فيها الكثافة السكانية. كما توصي الدراسة بقوة بدمج أنظمة الإنذار المبكر لموجات الحر ضمن استراتيجيات إدارة الزيارات المليونية؛ لما لها من أثر مهم في الحد من المخاطر الصحية المرتبطة بالإجهاد الحراري الشديد.

وتمثل الورقة المعلوماتية للمناخ الحيوي، المقدمة على هيأة ملصق علمي المواد التكميلية، الشكل(K1) ، أداة عملية ومبتكرة لدعم إدارة السياحة والتخطيط السياحي المستند إلى المعلومات المناخية، فمن خلال تحويل التحليلات العلمية المعقدة إلى معلومات واضحة وسهلة الوصول، يمكن توظيف هذه الأداة بكفاءة من قبل صناع السياسات، ومقدمي الخدمات، والزوار. كما أن دمجها ضمن المنصات الرقمية، ومراكز معلومات الزائرين، وتطبيقات الهواتف الذكية من شأنه أن يعزز الوصول الفوري إلى المعلومات المناخية، بما يسهم في تحسين سلامة الزوار ورفع مستويات الراحة الحرارية لديهم.

ويتوافق هذا التوجه مع الاتجاهات الحديثة في أبحاث دراسة المناخ السياحي، التي تؤكد أهمية توفير معلومات مناخية دقيقة ومتاحة في جميع مراحل التجربة السياحية، بدءاً من التخطيط للرحلة وانتهاءً باتخاذ القرارات أثناء الزيارة. كما تدعم النتائج الحالية دمج المعلومات المناخية الحيوية ضمن استراتيجيات التسويق السياحي في كربلاء، بما يشجع على التنويع الموسمي للزيارات، ويحد من التوافد خلال فترات الإجهاد الحراري الشديد. وتشير الدراسات الحديثة أيضاً إلى أن التغير المناخي أصبح عاملاً متزايد التأثير في اختيار الوجهات السياحية، خاصة فيما يتعلق باعتبارات الاستدامة والصحة والسلامة (Gössling et al., 2023).

وعلى الرغم من الطبيعة الشاملة لهذا التحليل، ينبغي الإقرار بعدد من محددات الدراسة، فقد اعتمدت الدراسة على بيانات محطة أرصاد جوية رئيسة واحدة، وهو ما لا يمكن أن يعكس بصورة كاملة التباينات المكانية للظروف المناخية داخل البيئة الحضرية في كربلاء، ولا سيما خلال أوقات الذروة التي تشهد كثافات بشرية مرتفعة جداً. كما أن مؤشري (PET و mPET) يعتمدان افتراضات معيارية تتعلق بمستويات النشاط البدني وعزل الملابس، وهو ما قد لا يعكس التنوع الكبير في سلوكيات الزوار وأنماط ملابسهم ضمن سياق السياحة الدينية. فضلا عن أنه على الرغم من أن نظام (CTIS) يوفر ملخصاً مفيداً للمعلومات المناخية، فإنه يبسط بالضرورة بعض التفاعلات المناخية المعقدة والتصورات الذاتية للراحة الحرارية البايومناخي.

ولذلك، ينبغي أن تتجه الدراسات المستقبلية إلى توسيع نطاق التحليل ليشمل تقييمات مناخية حيوية على مستوى الأحياء الحضرية ومسارات الزيارات الدينية، مع دمج القياسات المناخية الدقيقة والدراسات الميدانية الخاصة بالإدراك الحراري للزوار. كما أن إشراك أصحاب الاختصاص المحليين، بمن فيهم الجهات الدينية، ومقدمو الخدمات، والمخططون الحضريون، يعد أمراً أساسياً لضمان أن تكون استراتيجيات التكيف المناخي مقبولة مجتمعياً ومتوافقة مع الخصائص الثقافية والدينية للمحافظة.

وبصورة عامة، تؤكد نتائج هذه الدراسة أن اعتماد مؤشرات المناخ الحيوي، كذلك نظام المعلومات المناخية–السياحية (CTIS)والورقة المعلوماتية للمناخ الحيوي، يمثل ركيزة أساسية لتحقيق إدارة مستدامة للسياحة الدينية في محافظة كربلاء في ظل الضغوط المتزايدة الناجمة عن التغير المناخي. كما تسهم هذه المؤشرات في تعزيز قدرة المحافظة على التكيف مع الظروف المناخية المستقبلية، وتحسين جودة الخدمات المقدمة للزوار، ودعم اتخاذ القرار القائم على الأدلة العلمية.

٥. الاستنتاجات

توصلت هذه الدراسة أول تقييم متكامل للمناخ الحيوي في محافظة كربلاء بالاعتماد على مؤشري درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET) ودرجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة(mPET) ، وبالدمج مع نظام المعلومات المناخية–السياحية(CTIS) ، المدة (٢٠١٣ – ٢٠٢٤)، وقد أتاح هذا الإطار التحليلي المتكامل إجراء تقييم شامل وموثوق

للظروف الحرارية السائدة، مع الأخذ بالحسبان الخصائص المناخية والأهمية الوظيفية لمحافظة كربلاء بوصفها إحدى أهم وجهات السياحة الدينية ذات الكثافة البشرية المرتفعة؛ التي تشهدها خلال الزيارات الميلونية.

وأظهرت النتائج أن الظروف المناخية خلال أشهر الانقلاب الصيفي، ولا سيما أثناء أوقات الظهيرة، تشكل تحدياً كبيراً أمام الأنشطة السياحية والدينية نتيجة المستويات المرتفعة من الإجهاد الحراري. فقد أشارت قيم مؤشري (PETو mPET) بصورة متكررة إلى وجود مستويات مرتفعة إلى مرتفعة جداً من الإجهاد الحراري المؤثر على راحة الإنسان، وفي المقابل، وفّرت فصول الاعتدال (الربيعي والخريفي)، بوصفها الأوقات الأكثر ملاءمة مناخياً، مستويات أفضل من الراحة الحرارية؛ الأمر الذي يجعلها الأوقات الأنسب لتنظيم المناسبات الدينية الكبرى وتعزيز الأنشطة السياحية المرتبطة بها.

وتمثل الورقة العلمية المعلومات المتمثلة بـ (بايوميناخي) التي طورتها هذه الدراسة أداة عملية مبتكرة لدعم اتخاذ القرار في مجال إدارة السياحة الدينية في محافظة كربلاء، وخلال الجمع بين التحليل العلمي الدقيق والعرض البصري الواضح وسهل الفهم، وبوجه عام، تؤكد الدراسة أهمية ملاءمة استراتيجيات السياحة الدينية مع الواقع المناخي الحيوي للمحافظة، من خلال إعطاء الأولوية للفترات التي تتميز بمستويات أعلى من الراحة الحرارية، وإعادة تنظيم توقيت الأنشطة والفعاليات، وإدماج تدابير التكيف المستدام ضمن سياسات التخطيط الحضري والسياحي. وتتوافق هذه النتائج مع ما أشارت إليه الدراسات الحديثة التي تؤكد أن توفير المعلومات المناخية الدقيقة وإدماجها في إدارة الوجهات السياحية يسهم في تعزيز القدرة على التكيف مع التغيرات المناخية وتحسين جودة الخدمات السياحية (Scott & Lemieux, 2012,p.150؛ Gössling et al.,2023).

وفي ضوء التوقعات المستقبلية التي تشير إلى استمرار ارتفاع درجات الحرارة وتزايد تواتر موجات الحر في منطقة الشرق الأوسط والعراق على وجه الخصوص (IPCC،2023 ؛2024 El Kenawy,p. 2256)، فإن دمج المعلومات المناخية الآنية، وتطوير أنظمة الإنذار المبكر لموجات الحر، واعتماد التخطيط التشاركي الذي يضم الجهات الدينية ومقدمي الخدمات والجهات المحلية ذات العلاقة، يمثل متطلباً أساسياً لبناء نظام سياحة دينية أكثر مرونة واستدامة في محافظة كربلاء .

وأخيراً، لا تقتصر أهمية هذه الدراسة على تقديم فهم علمي متقدم للظروف المناخية الحيوية في كربلاء، بل تتجاوز ذلك لتوفير نموذج تطبيقي قابل للتكرار في المدن الدينية الأخرى التي تواجه تحديات مناخية مشابهة .وعليه، فإن توظيف أدوات المناخ الحيوي، مثل مؤشري (PET و mPET) ومخططات (CTIS) والنشرات المعلوماتية المناخية، يمكن أن تشكل أساساً لتطوير سياسات سياحية مستدامة قائمة على الأدلة العلمية، وتسهم في تحقيق التوازن بين متطلبات التنمية السياحية والحفاظ على صحة الإنسان ورفاهيته في ظل مناخ عالمي سريع التغير.

المصادر

الفهداوي، عباس طراد ساجت. (٢٠٢٤). الظروف المناخية وأثرها في حركة السياحة الدينية الوافدة في محافظة كربلاء المقدسة . مجلة الأربعين العلمية المحكمة، ٢(٣).

العتابي، أزهار فرحان منثر .(2023) .تأثير التغير المناخي في الخصائص المناخية لأيام الانقلابات والاعتدالات الفصلية في العراق (أطروحة ماجستير غير منشورة). كلية التربية للعلوم الإنسانية، جامعة واسط.

عبد، حسين فاضل، والزبيدي، سندس محمد علوان. (٢٠٢٢). تحليل جغرافي لخصائص المناخ في محافظة كربلاء .مجلة الباحث للعلوم الإنسانية، كلية التربية للعلوم الإنسانية، جامعة كربلاء، (العدد الخاص بالمؤتمر).

جواد، محمد علي، والمسعودي، حسنين علي. (٢٠٢٦). نحو تكامل منظومات النقل الحضري في مدينة كربلاء لخدمة الزيارات المليونية: رؤية نظرية في التصميم الحضري المستدام .مجلة الأربعين العلمية المحكمة، مركز كربلاء للدراسات والبحوث، ٤(١).

الحسناوي، حيدر شمس الدين، والخفاجي، أثير محمد عبيس. (٢٠٢٦). دور زيارة الأربعين في إعادة تشكيل الفضاء الجغرافي: منظور تنموي والتحديات المصاحبة للبنى التحتية في العراق .مجلة مركز كربلاء للدراسات والبحوث، ١٢(٢).

وزارة التخطيط .(2025) .النتائج النهائية للتعداد العام للسكان والمساكن في جمهورية العراق: التوزيع السكاني والبيئي لمحافظة كربلاء المقدسة .هيئة الإحصاء ونظم المعلومات الجغرافية، جمهورية العراق .

المرسومي، أحمد. (٢٠٢٥). المناخ وأثره على السياحة الدينية في محافظة كربلاء (زيارة الأربعين أنموذجاً) .مجلة الأربعين العلمية المحكمة، مركز كربلاء للدراسات والبحوث، ٢(٣).

مهدي، ناجحة هادي .(2022) .السياحة الدينية وأسس استدامتها في محافظة كربلاء المقدسة .مجلة أهل البيت عليهم السلام، (31).

العبيدي، أحمد جاسم، والشمري، حيدر محمد. (٢٠٢٢). أثر التغيرات المناخية والتطرف الحراري على الأنشطة البشرية والاقتصادية في الفرات الأوسط .مجلة المستنصرية للدراسات العربية والدولية، ١٩(٧٥).

الحيدري، رغد مؤيد، وحسون، علي حسين .(2022) .تحليل المعطيات المناخية كعامل دال على التغيرات المناخية في وسط وجنوب العراق: محطة كربلاء حالة دراسية .المجلة العراقية للعلوم، ٦٣(١٢).

المرشدي، مؤيد خلف. (٢٠٢٦). الخصائص الطبيعية لمحافظة كربلاء وأهميتها للدولة العراقية .مجلة كربلاء للعلوم الإنسانية، ١٢(٢).

الزبيدي، حيدر علي، والتميمي، عمار جاسم .(2026) .التغيرات المكانية والزمانية لمؤشر الإجهاد الحراري في العراق .مجلة مستنصرية للدراسات العربية والدولية، ٢٣(١).

العبادي، أيسر طعمة، والساعدي، رياض جاسم. (٢٠٢٣). التحليل التكراري لظواهر الهطول المطري في مدينة كربلاء باستخدام نظريات التوزيع الاحتمالي .مجلة الهندسة والتنمية المستدامة، ٢٧(٤).

Abdelmohsen، M.، Matzarakis، A.، & Bleta، A. (2022). Assessment of urban bioclimatic conditions in riverine environments under hot arid climates. Sustainable Cities and Society، 82.

Al-Kubaisi، A. A.، & Aziz، F. H. (2018). Climatic characteristics of central Iraq and their environmental implications. Iraqi Journal of Science، 59(4A).

Association، W. M. O. (2022). WMO Provisional State of the Global Climate 2022. World Meteorological Organization.

Benz، A.، Matzarakis، A.، & Endler، C. (2023). Human biometeorological assessment methods for urban and regional planning according to VDI guideline 3787. Atmosphere، 14(3).

Chen، L.، & Matzarakis، A. (2018). Modified physiologically equivalent temperature—Basics and applications for western European climate. Theoretical and Applied Climatology، 132(3–4).

Citaristi، I. (2022). International tourism trends in the Middle East region. In UNWTO World Tourism Barometer (Vol. 20). World Tourism Organization.

de Freitas، C. R. (2003). Tourism climatology: Evaluating environmental information for decision making and business planning in the recreation and tourism sector. International Journal of Biometeorology، 48(1).

El Kenawy، A. M. (2024). Heatwave hazards and climate extremes in the Middle East and North Africa region. International Journal of Climatology. Advance online publication.

Gössling، S.، Scott، D.، & Hall، C. M. (2023). Tourism and climate change impacts، adaptation and mitigation: A review. Journal of Sustainable Tourism، 31(2).

Havenith، G.، & Fiala، D. (2011). Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress. Comprehensive Physiology، 6(1).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte et al.، Eds.). Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. IPCC.

Jarratt، D.، & Davies، N. J. (2020). Planning for climate change in tourism destinations. Tourism Management، 77.

Kadum، M. H.، & Al-Ali، A. A. (2022). Rainfall variability and drought characteristics in central Iraq. Iraqi Geological Journal، 55(2E).

Kapruwan، P.، Smith، K.، & Jones، T. (2025). Tourism vulnerability under changing climate conditions: A systematic review. Tourism Geographies. Advance online publication.

Legg، S. (2021). IPCC، 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Interaction، 49(4).

Lopes، A.، Matzarakis، A.، & de Freitas، C. R. (2021). Advances in tourism climatology and user-oriented climate information. International Journal of Biometeorology، 65(6).

Loughnan، M.، Carroll، M.، & Tapper، N. (2015). The relationship between housing and heat wave resilience in older people. International Journal of Biometeorology، 59(9).

Matzarakis، A. (2014). Transfer of climate data for tourism applications: The Climate–Tourism Information Scheme (CTIS). Sustainable Development، 22(3).

Matzarakis، A.، & Amelung، B. (2008). Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. In K. Thomson et al. (Eds.)، Seasonal Forecasts، Climatic Change and Human Health (pp. 161–172). Springer.

Matzarakis، A.، Fröhlich، D.، Bermon، S.، & Adami، P. E. (2016). Quantifying thermal stress for sport events—The RayMan model. International Journal of Biometeorology، 60(5).

Pecelj، M.، Matzarakis، A.، & Bleta، A. (2025). Climate-tourism information transfer schemes in tourism climatology: Recent developments and applications. International Journal of Biometeorology. Advance online publication.

Raeda، H. M.، & Asadi، A. (2020). Urban infrastructure challenges during religious mass gatherings in Karbala. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

Rodríguez-Algeciras، J.، Matzarakis، A.، & Crespi-Vallbona، M. (2020). Climate preferences of

tourists in Catalonia and implications for tourism climate indices. International Journal of Biometeorology، 64(9).

Saud Almasoudi، S.، Al-Hamdani، M.، & Al-Tamimi، A. (2025). Population dynamics and pilgrimage pressure in Karbala Governorate. Iraqi Journal of Geography. Advance online publication.

Scott، D. (2021). Climate change and tourism: Recent advances and future directions. Journal of Sustainable Tourism، 29(1).

Scott، D.، Hall، C. M.، & Gössling، S. (2019). Global Tourism Vulnerability to Climate Change: Frameworks and Resilience Strategies. Bristol: Channel View Publications.

Scott، D.، & Lemieux، C. (2012). Weather and climate information for tourism. Procedia Environmental Sciences، 1.

Shantika، B.، & Bestari، R. (2024). Impacts of extreme weather events on tourism destinations and infrastructure resilience. Tourism Review. Advance online publication.

Zafarmandi، A.، & Matzarakis، A. (2025). Evaluating thermal comfort using modified physiological equivalent temperature (mPET) under extreme climates. Atmosphere. Advance online publication.

Zaninović، K.، & Matzarakis، A. (2009). The bioclimatological leaflet as a means of conveying climatological information to tourists and the tourism industry. International Journal of Biometeorology، 53(4).

Nastos, P. T., & Matzarakis, A. (2019). Present and future climate—tourism conditions in Milos Island, Greece. Atmosphere.

Matzarakis, A., & Endler, C. (2010). Climate change and thermal bioclimate in cities: Impacts and options for adaptation in Freiburg, Germany. International Journal of Biometeorology, 54(4).

Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature—a universal index for the bioclimate assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology, 43(2).

Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. International Journal of Biometeorology, 43(2).

Jassim, S. Z., & Goff, J. C. (Eds.). (2006). Geology of Iraq. Dolin, Prague and Moravian Museum, Brno.

Al-Ansari, N. (2013). Management of water resources in Iraq: Perspectives and prognoses. Engineering, 5(8).

Peel et al., 2007 هو: Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth System Sciences, 11(5).

Ali, A. H., et al. (2024). Comprehensive air quality analysis in Karbala: Investigating the relationships between meteorological factors and pollutants across different landscapes. Journal of Agricultural Meteorology, 60(4).

Zittis, G., Al-Maawali, A., Al-Sarihi, A., Al-Jeneid, S., Fnais, M. S., Francis, D., ... & Lelieveld, J. (2022). Climate change and weather extremes in the Eastern Mediterranean and Middle East. Reviews of Geophysics, 60(3).

Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. International Journal of Biometeorology, 51(4).

Lin, T. P., & Matzarakis, A. (2011). Tourism climate information based on human thermal perception in Taiwan and Eastern China. Tourism Management, 32(3).

Salman, S. A., Shahid, S., Afan, H. A., Shiru, M. S., Al-Ansari, N., & Yaseen, Z. M. (2020). Changes in climatic water availability and crop water demand for Iraq region. Sustainability, 12(8), 3437.

Hassan, A. A., Al-Ansari, N., & Al-Jawad, S. B. (2023). Trends, forecasting and adaptation strategies of climate change in the middle and west regions of Iraq. SN Applied Sciences, 5(11).

المواد التكميلية

تتوفر المواد التكميلية الداعمة لهذه الدراسة عبر الإنترنت من خلال الرابط الآتي:(K1)

وتتضمن هذه المواد الشكل(K1) ، الذي يعرض النشرة المعلوماتية للمناخ الحيوي التي تم تطويرها خصيصاً لخدمة الزوار والمخططين ومتخذي القرار، وقد صُممت هذه النشرة لتقديم مخرجات الدراسة المتعلقة بمؤشري درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية (PET)ودرجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية المعدّلة(mPET) ، بالإضافة إلى نظام المعلومات المناخية–السياحية(CTIS) ، ضمن قالب بصري مبسط وسهل التفسير، بما يسهم في دعم التخطيط السياحي المستجيب للظروف المناخية وتعزيز إدارة السياحة الدينية في محافظة كربلاء.