

تقييم استخدام العناصر المائية والتشجير في الفراغات العامة لتحقيق الراحة الحرارية في المناطق الحارة الجافة

أحمد فتحي دراز^{1*}، عباس محمد الزعفراني²، حسام إبراهيم طاحون³

¹ماجستير، قسم التصميم العمراني، جامعة القاهرة

²أستاذ بقسم التصميم العمراني، جامعة القاهرة

³مدرس بقسم التصميم العمراني، جامعة القاهرة

* البريد الإلكتروني للباحث المسؤول بالمراسلة: Draz5@Yahoo.com

Received 17 June 2025; Received in revised form 31 July 2025; Accepted 25 August 2025;

Available online 29 August 2025, <https://doi.org/10.21608/jur.2025.393830.1194>

ملخص البحث

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير استخدام العناصر المائية والتشجير في الفراغات السكنية على تعزيز الراحة الحرارية في المناطق الحارة الجافة. تعتمد الدراسة على محاكاة المناخ المصغر باستخدام برنامج ENVI-met لتحليل تأثير المسطحات المائية الساكنة (مثل البحيرات الصناعية أو البرك) ودور التشجير عند دمجها على درجات الحرارة المحيطة والرطوبة النسبية. تم اختيار مدينة أكتوبر كنموذج لدراسة الحالة، حيث تم إجراء المحاكاة خلال يوم صيفي شديد الحرارة لتحديد تأثير التبريد الناتج عن هذه العناصر. أظهرت النتائج أن إضافة العناصر المائية بالكامل مع الغطاء النباتي تساهم بشكل ملحوظ في خفض درجات الحرارة المحيطة وتحسين مستوى الراحة الحرارية، لا سيما خلال ساعات الذروة الحرارية. توصي الدراسة بتطبيق استراتيجيات تصميمية تعتمد على دمج العناصر المائية مع التشجير في المناطق السكنية الحارة كطول بيئية مستدامة لتحسين الظروف المناخية الدقيقة. على الرغم من النتائج الإيجابية، توصي الدراسة بإجراء أبحاث إضافية لدراسة التأثيرات طويلة الأمد للعناصر المائية وتكاملها مع التشجير واختبار سيناريوهات مختلفة على مدار العام.

الكلمات المفتاحية: الراحة الحرارية - العناصر المائية - الفراغات العمرانية - المناطق الحارة الجافة - برنامج Envi-met

1/ المقدمة

شهدت العقود الأخيرة تحولاً ملحوظاً نحو التحضر السريع، مما أدى إلى تغييرات جوهرية في استخدام الأراضي على مستوى العالم، وأثر ذلك بشكل كبير على الأنظمة البيئية العالمية (Weng & Yang, 2004). أدت هذه الظاهرة إلى تفاقم التحديات المناخية في المناطق العمرانية، حيث تسهم الانبعاثات الحرارية الناتجة عن الأنشطة البشرية، مثل البناء والنقل، في زيادة درجات الحرارة المحلية، مما يُعرف بظاهرة الجزر الحرارية الحضرية (Dimoudi & UHI) (Nikolopoulou, 2003; Taha, 1997).

تتميز ظاهرة الجزر الحرارية الحضرية بتسجيل المناطق الحضرية درجات حرارة أعلى مقارنة بالمناطق الريفية المحيطة. يُعزى هذا الاختلاف إلى عدة عوامل، بما في ذلك كثافة المباني التي تمتص الإشعاع الشمسي، واستخدام مواد بناء ذات خصائص حرارية مرتفعة، ونقص المساحات الخضراء، وزيادة إنتاج الحرارة البشرية (Oke, 2009; Oke et al., 1991; Santamouris et al., 2011). في المناطق الحارة والجافة، تتفاقم هذه الظاهرة بشكل خاص خلال أشهر الصيف، مما يقلل من مستويات الراحة الحرارية للسكان ويزيد من الضغوط البيئية.

للتصدي لهذه التحديات، أثبتت المساحات الخضراء والعناصر المائية فعاليتها كأدوات تصميمية لتخفيف تأثيرات الجزر الحرارية وتحسين الظروف المناخية الدقيقة في المناطق الحضرية، حيث تُساهم المساحات الخضراء في تحسين الراحة الحرارية عبر توفير الظل وتعديل المناخ المحلي من خلال عمليات التبخر والنتح (Aram et al., 2020; Shashua-Bar et al., 2009; Taha, 1997).

كما أن هذه المساحات تُقلل من الضوضاء (Ozer et al., 2007; Van Renterghem et al., 2012) وتحسن جودة الهواء (Akbari et al., 2001; Jim & Chen, 2008; Nowak, 1994). إضافة إلى ذلك، يعتمد تأثيرها التبريدي على عوامل مثل مساحة الحديقة (Teferi & Abraha, 2017; C. Yang et al., 2017)، وأشكالها الهندسية (Alsonny et al., 2022; Zhou et al., 2023)، وأنواع الغطاء النباتي وتغطية الأرض (C. Yang et al., 2017).

كما أثبتت العناصر المائية تأثيرها كحلول تصميمية فعالة تساهم في تحسين الراحة الحرارية في الفراغات العمرانية. حيث تمتاز المياه بخصائص حرارية تمكنها من تخزين وإطلاق الحرارة ببطء، كما أن عملية التبخر تساهم في تبريد الهواء المحيط وزيادة الرطوبة النسبية، ما يعزز من الراحة الحرارية في تلك الفراغات (Cheng et al., 2022). تشير الدراسات إلى أن الفرق في درجات الحرارة بين المناطق المبنية والمساحات المائية قد يصل إلى 2-6 درجات مئوية (Perini & Magliocco, 2014) هذا الاختلاف في درجات الحرارة يجعل من العناصر المائية أداة فعالة في تخفيف حدة تأثير الجزر الحرارية الحضرية وتحسين الظروف المناخية المحلية. (Jandaghian & Colombo, 2024; Robitu et al., 2006; Steeneveld et al., 2014)

علاوة على ذلك، فإن دمج العناصر المائية مع التشجير والغطاء النباتي يمكن أن يعزز من قدرتها على تحسين المناخ المصغر. تم إثبات فعالية هذا التفاعل من خلال استخدام نماذج المحاكاة البيئية مثل ENVI-met، التي تُستخدم لدراسة التفاعلات المعقدة بين الغلاف الجوي والمباني والعناصر الطبيعية. على سبيل المثال، أظهرت دراسة (Ali-Toudert & Mayer, 2007) أن تصميم الشوارع وتوجيهاتها يؤثر بشكل كبير على درجة الحرارة المحيطة والراحة الحرارية للسكان، مما يبرز أهمية التصميم الجيد للفراغات العمرانية لتحسين الظروف البيئية. كما أظهرت دراسة (W. Yang et al., 2013) أن نموذج ENVI-met يمكنه محاكاة السلوك الحراري بدقة عالية، مما يتيح فهمًا أعمق لتأثير العناصر المائية والغطاء النباتي على درجات الحرارة والرطوبة في المناطق السكنية.

في هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير العناصر المائية في الفراغات السكنية في المناطق الحارة الجافة، مع التركيز على استخدام برنامج ENVI-met لمحاكاة التغيرات المناخية. سيتم تطبيق الدراسة على مدينة أكتوبر كنموذج تطبيقي، حيث سيتم تحليل تأثير استخدام البحيرات الصناعية في الفراغات السكنية بنسب مختلفة على الراحة الحرارية للسكان. تسعى الدراسة إلى تقديم حلول تصميمية مستدامة تستفيد من العناصر المائية لتحسين الظروف البيئية في المناطق السكنية الحضرية، مما يساهم في تخفيف الآثار السلبية لظاهرة الجزر الحرارية الحضرية ويعزز من جودة الحياة في هذه البيئات.

2/ منهجية البحث

تم تصميم هذه الدراسة كبحث تطبيقي يهدف إلى تحليل تأثير العناصر المائية في الفراغات السكنية على الراحة الحرارية في المناطق الحارة الجافة. تعتمد الدراسة على محاكاة المناخ المصغر باستخدام برنامج ENVI-met لتحليل تأثير العناصر المائية (بالتطبيق على البحيرات الصناعية)، على درجات الحرارة والرطوبة النسبية في الفراغات السكنية. تم اختيار مدينة أكتوبر كنموذج تطبيقي نظرًا لمناخها الحار الجاف الذي يعكس البيئة المستهدفة للدراسة. تتناول المنهجية الأيام التي تشهد درجات حرارة قصوى، مما يوفر إطارًا شاملاً لفهم كيفية تحسين الظروف الحرارية من خلال استخدام العناصر المائية.

3/ تصميم الدراسة

تتبنى هذه الدراسة منهجًا تجريبيًا قائمًا على المحاكاة، حيث يتم استخدام نماذج حاسوبية لتقييم تأثير العناصر المائية. تم اختيار الموقع ليعكس الخصائص البيئية والمناخية للمناطق الحارة الجافة، مما يوفر فرصة لفهم التفاعلات بين التصميم العمراني والعوامل المناخية.

4/ الأدوات المستخدمة

تم استخدام برنامج ENVI-met، وهو برنامج محاكاة متقدم لنمذجة المناخ المصغر على المستوى الحضري. يُستخدم هذا البرنامج على نطاق واسع لتحليل التأثيرات البيئية في الفراغات العمرانية، حيث يقوم بمحاكاة التفاعلات المعقدة بين الغلاف الجوي والعناصر الطبيعية والمبنية. المخرجات الرئيسية التي يتم قياسها من خلال البرنامج تشمل:

- درجة حرارة الهواء.
- درجة الحرارة الإشعاعية المتوسطة (MRT).
- مؤشر الراحة الحرارية المتوقعة (PMV).
- مؤشرات الرطوبة.
- سرعة الرياح واتجاهها.

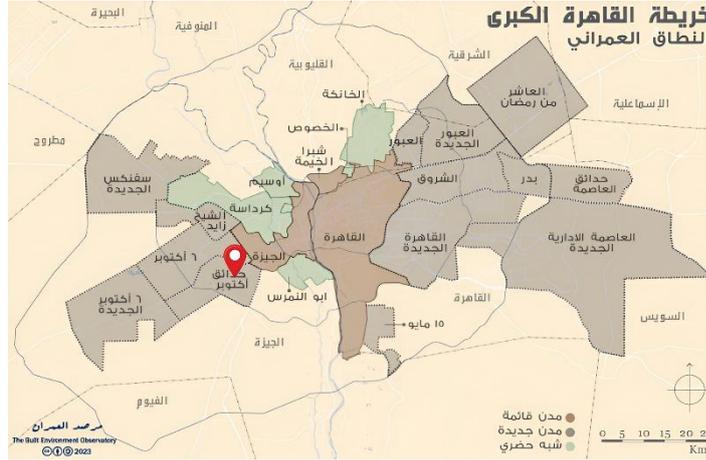
بالإضافة إلى برنامج ENVI-met، تم الحصول على بيانات الأرصاد الجوية المحلية لتغذية النماذج المناخية والتحقق من دقتها وضمان تمثيل الظروف الواقعية.

15 إجراءات جمع البيانات

تم تنفيذ جمع البيانات من خلال الخطوات التالي

1/5 اختيار موقع منطقة الدراسة

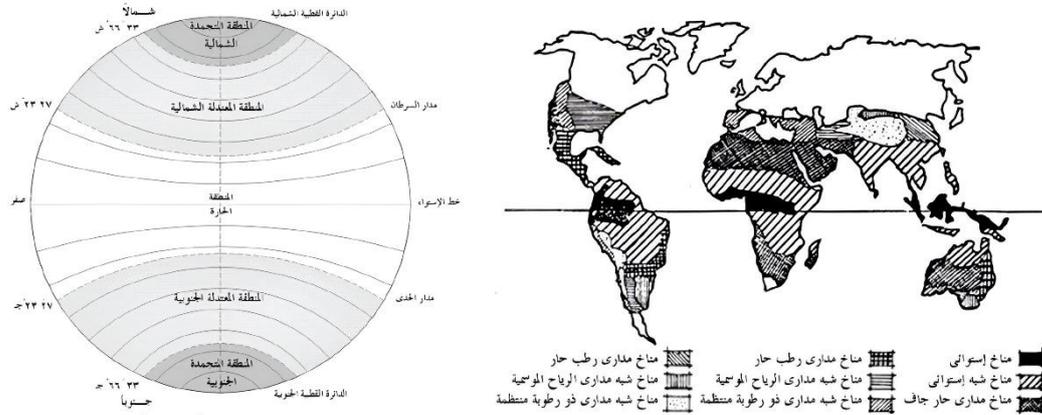
تم اختيار منطقة الدراسة في نطاق مدينة أكتوبر باعتبارها منطقة صحراوية كامتداد غربي للقاهرة الكبرى كما بالشكل 1. هذا الموقع يمثل نموذج للمناطق السكنية ذات كثافة عمرانية متوسطة كما أنه يحتوي على عناصر مائة مثل البحيرات الصناعية، مما يوفر بيئة مناسبة لتحليل التأثيرات المناخية للعناصر المائية.



شكل (1) موقع منطقة الدراسة داخل الامتداد المستقبلي لمدينة القاهرة

المصدر: مرصد العمران

وللتعرف على الخصائص المناخية للقاهرة سيتم التعرف أولاً على موقع مصر ضمن التقسيم المناخي للعالم أليسوف حيث تقع مصر في الإقليم المناخي الحار الجاف كما بالشكل (2) (سليم, 2002).



شكل (2) A خطوط العرض شمالاً وجنوباً، B التقسيم المقترح للأقاليم المناخية للعالم أليسوف

المصدر: سليم, 2002

تم تقسيم مصر إلى ستة أقاليم مناخية (كما بالشكل 1)، وذلك للتعرف على الاحتياجات البيئية لكل إقليم، والتي يجب أن تنعكس على الحلول التخطيطية والفراغات العمرانية والمعمارية (سليم, 2002). تقع منطقة الدراسة في إقليم الدلتا والقاهرة الكبرى، الذي يتميز بالخصائص التالية:

- يمثل هذا الإقليم منطقة انتقالية بين إقليم الساحل الشمالي والإقليم الصحراوي، حيث يجمع بين شدة الحرارة صيفاً والاعتدال والبرودة شتاءً.
- تقع شهور الصيف في المجال شديد الحرارة، وتصل درجات الحرارة العظمى إلى 36 درجة مئوية.
- لا تقل متوسطات درجات الحرارة الصغرى عن 10 درجات مئوية في شهور الشتاء، ويُعتبر إقليمًا دافئًا نسبيًا. يستقبل هذا الإقليم كمية ضئيلة من الأمطار في فصل الشتاء.

2/5 يوم التقييم الرقمي وساعات التقييم

تم اختيار أول شهر يوليو باعتباره يوم صيفي حار جدًا، حيث تتجاوز درجة الحرارة 40 درجة مئوية، وانخفاض الرطوبة النسبية حيث تصل إلى 14% ومتوسط سرعة الهواء 2.8 م/ث باتجاه شمالي غربي، كفترة مرجعية للدراسة. هذا اليوم يضمن تحليل تأثير العناصر المائية تحت ظروف حرارية قاسية، مما يسمح بفهم أفضل لأقصى تأثيرات التبريد، لتحقيق أفضل النتائج باقي أيام الصيف.

تم تشغيل نماذج المحاكاة على مدار يوم كامل (24 ساعة) للحصول على تقديرات دقيقة لتأثيرات العناصر المائية. وتم تصدير النتائج على أربعة أوقات مختلفة من اليوم.

1/2/5 ساعات التقييم:

تم تحديد أربعة أوقات مختلفة من اليوم وهي الساعة الواحدة منتصف الليل والمشار إليها بـ (01:00) والساعة السابعة صباحًا والمشار إليها بـ (07:00) والساعة الواحدة منتصف الظهر والمشار إليها بـ (13:00) والساعة السابعة مساءً والمشار إليها بـ (19:00).

2/2/5 القياسات المناخية:

تم جمع بيانات الطقس المحلية، مثل درجة الحرارة، الرطوبة، وسرعة الرياح من محطة الأرصاد الجوية القريبة لتكون مدخلات لنموذج المحاكاة.

3/2/5 الخصائص المناخية لمنطقة الدراسة:

سيقوم الباحث بالتركيز على العوامل المناخية التي تؤثر على الراحة الحرارية كما بالجدول (1) وهي حركة الشمس ودرجة حرارة الهواء والرطوبة النسبية وسرعة واتجاه حركة الهواء وذلك بمنطقة القاهرة، حيث تم الاستعانة ببيانات الطقس لمطار القاهرة محطة WMO 62660 وهي على ارتفاع 74م من سطح البحر (E 31.4) (N 30.13) (American Society of Heating & Engineers, 2005; Fahmy, 2010)

جدول (1) البيانات المناخية لمنطقة الدراسة

| البيانات المناخية | |
|-------------------|------------------------------------|
| 35.09 درجة سليزية | درجة الحرارة |
| 2م/ث | سرعة الرياح (على ارتفاع 2 متر) |
| (10° جنوب غرب) | اتجاه الرياح |
| 24.75% | الرطوبة النسبية (على ارتفاع 2 متر) |

المصدر: الباحث

3/5 إعداد البدائل:

لتحليل تأثير العناصر المائية والتشجير على الراحة الحرارية في الفراغات السكنية بالمناطق الحارة الجافة، تم إعداد مجموعة من البدائل تعتمد على النسب المختلفة للعناصر المائية، وكذلك نسب البناء والانغلاق في الفراغات العمرانية، كما موضح بالشكل (3) مصفوفة النماذج المستخدمة في المحاكاة. تهدف هذه البدائل إلى توفير فهم شامل حول كيفية تحسين التصميم العمراني باستخدام هذه العناصر الطبيعية.

| Model | Water 0% | Water 18% | Water 33% | Water 51% |
|------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Space Ratio 30% | | | | |
| Space Ratio 50% | | | | |
| Space Ratio 70% | | | | |
| Space Ratio 100% | | | | |

شكل (3) مصفوفة النماذج المستخدمة في المحاكاة

المصدر: الباحث

تنقسم البدائل إلى ثلاثة محاور رئيسية:

1/3/5 اختبار نسب العناصر المائية:

يتم في هذه الدراسة اختبار تأثير أربع نسب مختلفة من العناصر المائية داخل الفراغات السكنية على مستويات الراحة الحرارية للسكان. تشير النسب المئوية المدروسة (W51، W33، W18، W00) إلى نسبة المسطح المائي مقارنة بإجمالي مساحة الفراغ العمراني المستخدم في المحاكاة. وفيما يلي تفصيل لهذه النسب:

1. W00 (0%): غياب تام للعناصر المائية من الفراغ العمراني.
 2. W18 (18%): وجود مسطح مائي يغطي 18% من مساحة الفراغ.
 3. W33 (33%): مسطح مائي متوسط الحجم يغطي 33% من مساحة الفراغ.
 4. W51 (51%): مسطح مائي كبير يغطي أكثر من نصف مساحة الفراغ (51%).
- يهدف هذا التحليل إلى تقييم تأثير التدرج في نسبة المسطحات المائية على خفض درجات الحرارة المحيطة وزيادة الرطوبة النسبية، بما يسهم في تعزيز الراحة الحرارية داخل البيئة العمرانية السكنية.
- اعتمدت هذه الدراسة على تمثيل المسطحات المائية الساكنة فقط، مثل البحيرات الصناعية أو البرك، لضمان ثبات النموذج وتقليل المتغيرات.

2/3/5 تحليل تأثير نسب الانغلاق العمراني:

بالتوازي مع اختبار نسب العناصر المائية، سيتم دراسة تأثير نسب الانغلاق أو البناء في الفراغات العمرانية (نسبة الإحاطة في الفراغ). تم دراسة أربع نسب للبناء سيتم اختبارها:

1. نسبة الإحاطة بالفراغ تمثل 30% (فراغ مفتوح نسبياً): فراغات مفتوحة نسبياً، مما يسمح بمرور الهواء بصورة كبيرة والمشار إليها بـ (S30).
 2. نسبة الإحاطة بالفراغ تمثل 50% (فراغ شبه مفتوح): مستوى متوسط من الانغلاق، حيث تمثل نسبة المباني نصف مساحة الفراغ والمشار إليها بـ (S50).
 3. نسبة الإحاطة بالفراغ تمثل 70% (فراغ شبه مغلق): فراغات ذات انغلاق أكبر، مما يحد من حركة الهواء ويزيد من تأثير الجزر الحرارية والمشار إليها بـ (S70).
 4. نسبة الإحاطة بالفراغ تمثل 100% (فراغ مغلق): انغلاق كامل، حيث تكون الفراغات محاطة تمامًا بالمباني دون وجود مناطق مفتوحة والمشار إليها بـ (S100).
- يهدف هذا المحور إلى تقييم مدى تأثير نسبة الانغلاق على تدفق الهواء وتوزيع درجات الحرارة، ومدى تفاعل العناصر المائية مع هذه النسب.

3/3/5 التأثير المشترك للعناصر المائية والتشجير:

لمزيد من تعميق الفهم حول كيفية تحسين الراحة الحرارية، سيتم تكرار البدائل السابقة مع إضافة التشجير إلى الفراغات العمرانية. يشمل هذا المحور دراسة التأثير المزدوج للعناصر المائية والغطاء النباتي، مما يتيح تحليل التفاعل بين تبريد المياه وتظليل النباتات. لدراسة التأثير المشترك بين العناصر المائية والتشجير سيتم دراسة البدائل التالية:

1. البدائل بدون تشجير: سيتم اختبار تأثير العناصر المائية بمفردها على الراحة الحرارية في مختلف نسب الانغلاق، والمشار إليها بـ (T00).
2. البدائل مع التشجير: سيتم دمج الأشجار والنباتات مع العناصر المائية لزيادة التبريد الطبيعي وتحسين جودة الهواء، مما يعزز من التفاعل الإيجابي بين المياه والنباتات في تحسين المناخ المحلي، والمشار إليها بـ (T01).

4/3/5 الهدف من البدائل:

من خلال هذه البدائل، تهدف الدراسة إلى تقديم تحليل دقيق وشامل لكيفية تحسين الراحة الحرارية باستخدام مزيج من العناصر المائية والتشجير في الفراغات العمرانية، مع مراعاة نسب البناء وتأثيرها على تدفق الهواء والحرارة في المناطق الحارة الجافة، مما يوفر إطارًا عمليًا لاستراتيجيات التصميم المستدام.

5/3/5 إنشاء نماذج المحاكاة:

تم بناء نماذج حاسوبية تمثل الفراغات السكنية بحالاتها المختلفة، مع دمج العناصر المائية بالنسب الموضحة.

6/3/5 توصيف نموذج المحاكاة:

- البرنامج المستخدم Envi-MET 5
- يوضح جدول (2) التالي الخصائص المستخدمة في المحاكاة باستخدام برنامج ENVI-met

جدول (2) الخصائص المستخدمة في المحاكاة

| | |
|--|------------------|
| يقع نموذج المحاكاة بمدينة السادس من أكتوبر كنموذج للمدن الجديدة التي تمثل المناخ الحار الجاف | موقع النموذج |
| 01 يوليو | يوم المحاكاة |
| 24 ساعة (بدءًا من الساعة 8:00 صباحًا) | مدة المحاكاة |
| شمالاً: 29.82° و شرقاً: 31.05° | إحداثيات النموذج |
| 100 متر * 100 متر * 20 متر | أبعاد النموذج |
| 10.000 متر | مساحة النموذج |
| 70 متر * 70 متر | أبعاد الفراغ |
| 4900 متر | مساحة الفراغ |
| 15 متر (تم تثبيت الارتفاع في جميع السيناريوهات لضمان ثبات تأثير الارتفاع والتركيز على نسبة الانغلاق الأفقي فقط) | ارتفاعات المباني |
| 5 متر | الدقة المكانية |

المصدر: الباحث

4/5 تحليل البيانات

سيتم تحليل المخرجات الناتجة لتقييم تأثير العناصر المائية على درجات الحرارة المحيطة، مع استخدام مؤشرات قياس الراحة الحرارية مثل متوسط درجة الحرارة الإشعاعية المتوسطة (MRT) ومؤشر الراحة الحرارية (PMV) لتحديد مستوى الراحة الحرارية. اعتمدت الدراسة على أدوات إحصائية لتحليل البيانات وربطها بعوامل بيئية مختلفة، مما يساعد على توضيح العلاقات بين العناصر المائية وتحسين الظروف المناخية.

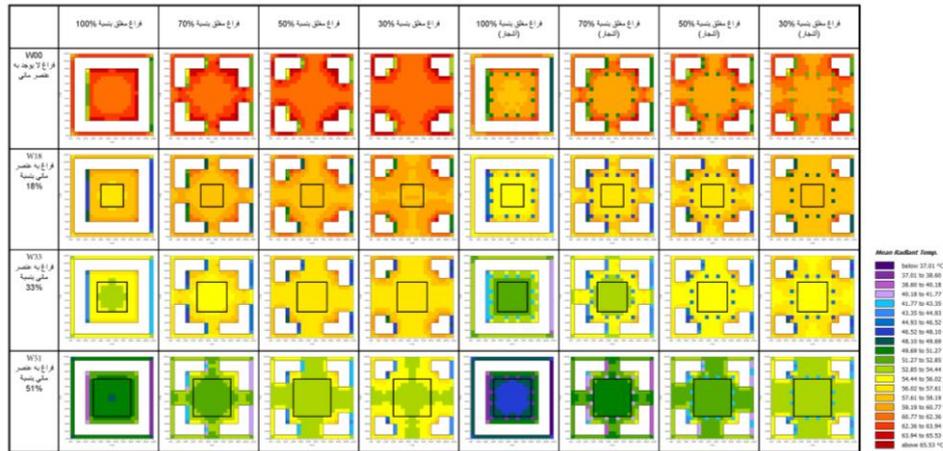
6/ النتائج**1/6 نتائج دراسة درجة الحرارة الإشعاعية (MRT)**

لتحليل تأثير العناصر التصميمية المختلفة على الراحة الحرارية في الفراغات العمرانية، تم استخدام مؤشر متوسط درجة الحرارة الإشعاعية (Mean Radiant Temperature - MRT) كأحد المؤشرات الأساسية.

1/1/6 نتائج دراسة درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) الساعة 13:00 ظهرا

تمثل الساعة 13:00 فترة الذروة الحرارية اليومية، حيث تصل قيم الإشعاع الشمسي إلى أعلى مستوياتها، مما يجعل تقييم أداء التصميم في خفض الحرارة من خلال الإحاطة والظل أمرًا بالغ الأهمية.

يوضح شكل (4) وجدول (3) نتائج دراسة متوسط درجة الحرارة الإشعاعية MRT للبدائل المختلفة، موزعة حسب نسب المياه في الفراغ ونسبة الانغلاق، وكذلك التشجير كما يمثل الشكل (5) التحليل البياني لنتائج الدراسة:



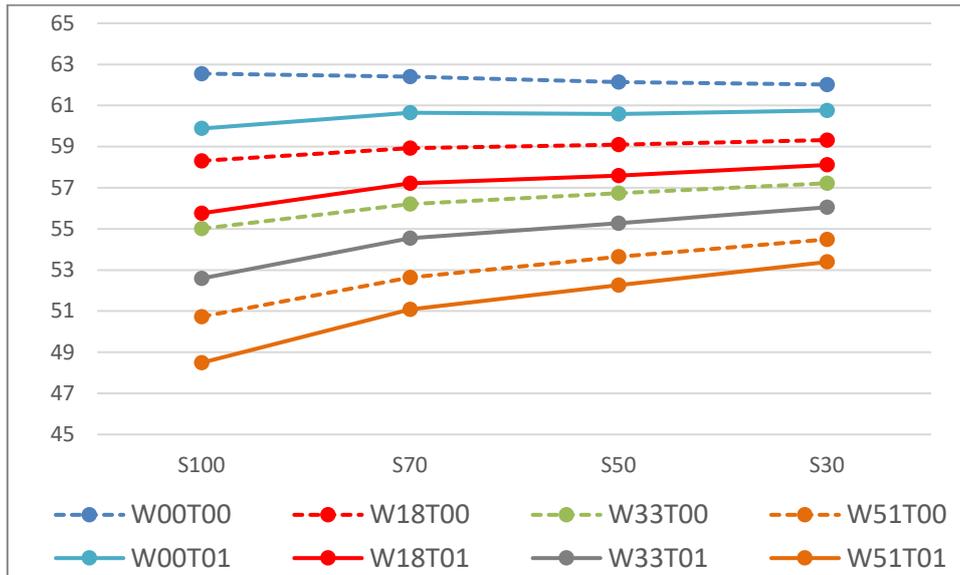
شكل (4) توزيع درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) في السيناريوهات عند الساعة 13:00 باستخدام برنامج ENVI-met

المصدر: الباحث

جدول (3) يوضح القيم المتوسطة لمؤشر MRT لجميع السيناريوهات عند الساعة 13:00

| MRT Median | S100 | S70 | S50 | S30 |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| W00T00 | 62.55 | 62.4 | 62.14 | 62.02 |
| W18T00 | 58.31 | 58.92 | 59.1 | 59.32 |
| W33T00 | 55.01 | 56.2 | 56.73 | 57.22 |
| W51T00 | 50.73 | 52.64 | 53.64 | 54.49 |
| W00T01 | 59.88 | 60.65 | 60.58 | 60.76 |
| W18T01 | 55.76 | 57.22 | 57.59 | 58.11 |
| W33T01 | 52.59 | 54.54 | 55.27 | 56.05 |
| W51T01 | 48.49 | 51.08 | 52.27 | 53.39 |

المصدر: الباحث



شكل (5) يمثل تغير متوسط درجة حرارة الإشعاع (MRT) لجميع السيناريوهات عند الساعة 13:00
المصدر: الباحث

1/1/1/6 تحليل مؤشر درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) – الساعة 13:00 ظهرًا:

تشير نتائج دراسة مؤشر درجة الحرارة الإشعاعية في الساعة 13:00 ظهرًا إلى أن زيادة نسبة العناصر المائية في الفراغ العمراني تؤدي إلى انخفاض واضح في متوسط درجة حرارة الإشعاع (MRT)، حيث يظهر التأثير الأكبر خلال هذه الفترة نتيجة ذروة الإشعاع الشمسي.

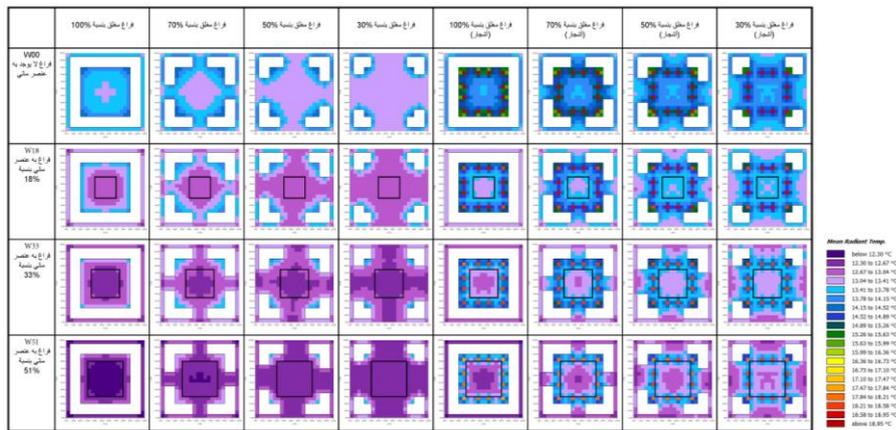
عند مقارنة السيناريوهات، يُلاحظ أن أعلى قيمة لمؤشر MRT بلغت 62.55°C في الحالة W00-S100-T00، في حين كانت أدنى قيمة 48.49°C في الحالة W51-S100-T01، أي بفارق انخفاض قدره 14.06 درجة مئوية، وهو أكبر فرق يُسجل على مدار اليوم.

تُسهم إضافة الأشجار في خفض قيمة مؤشر MRT بدرجات متفاوتة، حيث انخفضت MRT في السيناريو W00-S100 من 62.55°C إلى 59.88°C بفارق 2.67 درجة مئوية، ويصل الفارق في بعض السيناريوهات الأخرى إلى أكثر من 3 درجات، مما يعكس فاعلية الظل في الحد من الإشعاع الشمسي المباشر خلال فترات الذروة.

2/1/6 نتائج دراسة درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) الساعة 01:00 بعد منتصف الليل

تمثل الساعة 01:00 الفترة التي تقل فيها درجات الحرارة بشكل ملحوظ وتكون فيها الفروق بين السيناريوهات أقل، لكنها تظل مهمة لتقييم أداء التصميم في أقل حمل حراري.

يوضح شكل (6) وجدول (4) نتائج دراسة متوسط درجة الحرارة الإشعاعية MRT للبدائل المختلفة، موزعة حسب نسب المياه في الفراغ ونسبة الانغلاق، وكذلك التشجير كما يمثل الشكل (7) التحليل البياني لنتائج الدراسة:

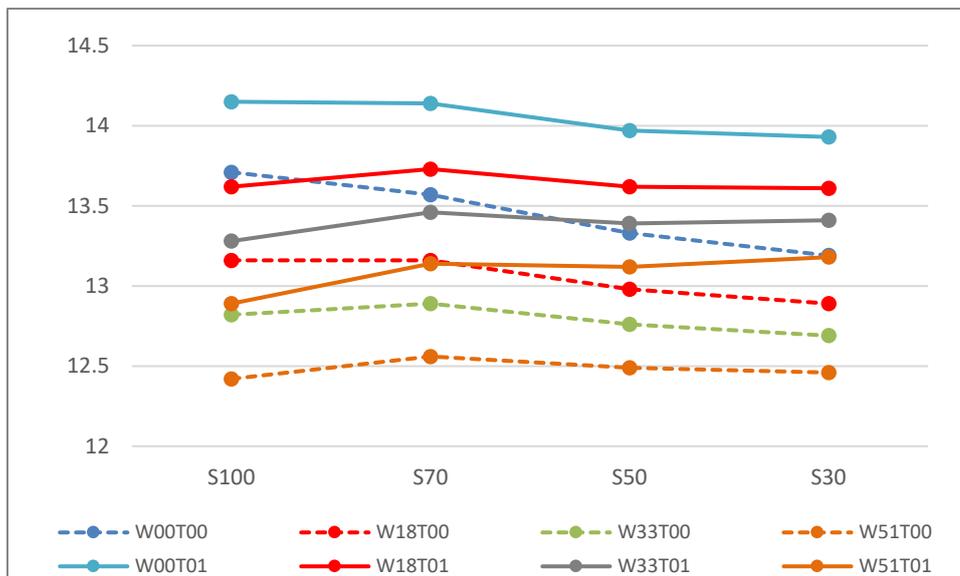


شكل (6) توزيع درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) في السيناريوهات عند الساعة 01:00 باستخدام برنامج ENVI-met
المصدر: الباحث

جدول (4) يوضح القيم المتوسطة لمؤشر MRT لجميع السيناريوهات عند الساعة 01:00

| MRT Median | S100 | S70 | S50 | S30 |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| W00T00 | 13.71 | 13.57 | 13.33 | 13.19 |
| W18T00 | 13.16 | 13.16 | 12.98 | 12.89 |
| W33T00 | 12.82 | 12.89 | 12.76 | 12.69 |
| W51T00 | 12.42 | 12.56 | 12.49 | 12.46 |
| W00T01 | 14.15 | 14.14 | 13.97 | 13.93 |
| W18T01 | 13.62 | 13.73 | 13.62 | 13.61 |
| W33T01 | 13.28 | 13.46 | 13.39 | 13.41 |
| W51T01 | 12.89 | 13.14 | 13.12 | 13.18 |

المصدر: الباحث



شكل (7) يمثل تغير متوسط درجة حرارة الإشعاع (MRT) لجميع السيناريوهات عند الساعة 01:00
المصدر: الباحث

1/2/1/6 تحليل مؤشر درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) - الساعة 01:00 بعد منتصف الليل:

تشير نتائج دراسة مؤشر درجة الحرارة الإشعاعية في الساعة 01:00 بعد منتصف الليل إلى أن زيادة نسبة العناصر المائية في الفراغ العمراني تؤدي إلى انخفاض واضح في متوسط درجة حرارة الإشعاع (MRT).

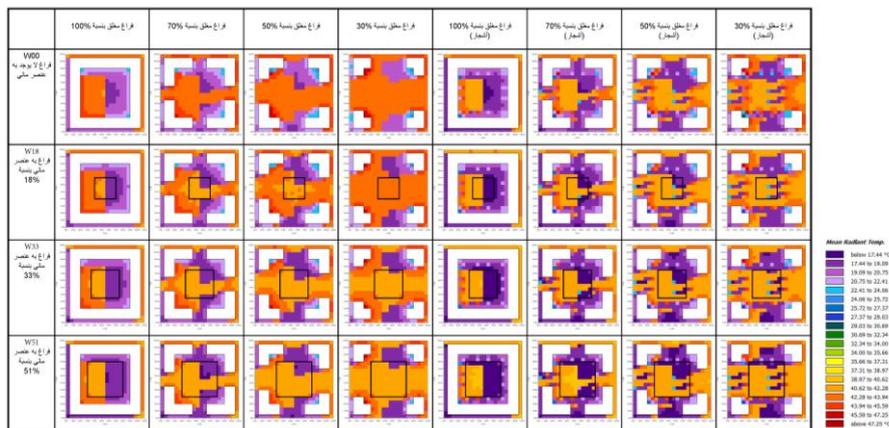
عند مقارنة السيناريوهات، يُلاحظ أن أعلى قيمة لمؤشر MRT بلغت 13.71 C° في الحالة W00-S100-T00، في حين كانت أدنى قيمة 12.42 C° في الحالة W51-S100-T00، أي بفارق انخفاض قدره 1.29 درجة مئوية بين السيناريوهين.

تُسهّم إضافة الأشجار في ارتفاع قيمة مؤشر MRT بدرجات طفيفة، حيث ارتفعت MRT في السيناريو W51-S100 من 12.42 C° إلى 12.89 C° بفارق 0.47 درجة مئوية، ويصل الفارق في بعض السيناريوهات الأخرى إلى نحو 0.5 درجة، مما يعكس محدودية تأثير الظل في غياب الإشعاع الشمسي المباشر خلال الليل.

3/1/6 نتائج دراسة درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) الساعة 07:00 صباحاً

تمثل الساعة 07:00 فترة بداية النشاط الصباحي، حيث تكون قيم الإشعاع الشمسي لا تزال منخفضة نسبياً، مما يسمح برصد تأثيرات الظل والإحاطة العمرانية بشكل واضح على درجات الحرارة الإشعاعية.

يوضح شكل (8) وجدول (5) نتائج دراسة متوسط درجة الحرارة الإشعاعية MRT للبدائل المختلفة، موزعة حسب نسب المياه في الفراغ ونسبة الانغلاق، وكذلك التشجير كما يمثل الشكل (9) التحليل البياني لنتائج الدراسة:



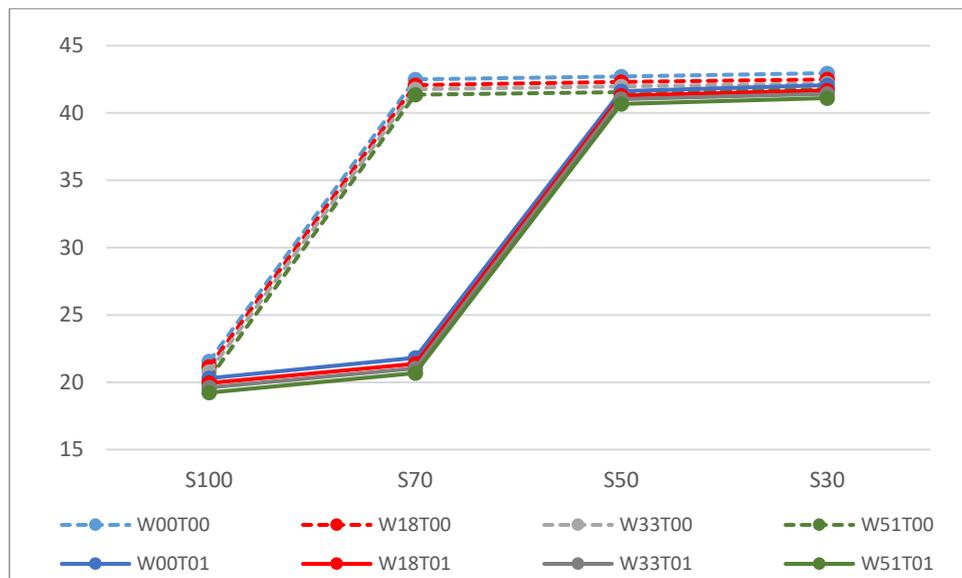
شكل (8) توزيع درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) في السيناريوهات عند الساعة 07:00 باستخدام برنامج ENVI-met

المصدر: الباحث

جدول (5) يوضح القيم المتوسطة لمؤشر MRT لجميع السيناريوهات عند الساعة 07:00

| MRT Median | S100 | S70 | S50 | S30 |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| W00T00 | 21.56 | 42.51 | 42.72 | 42.96 |
| W18T00 | 21.16 | 42.08 | 42.3 | 42.49 |
| W33T00 | 20.78 | 41.76 | 41.97 | 42.18 |
| W51T00 | 20.26 | 41.37 | 41.54 | 41.77 |
| W00T01 | 20.3 | 21.83 | 41.62 | 42.07 |
| W18T01 | 19.94 | 21.38 | 41.29 | 41.68 |
| W33T01 | 19.61 | 21.04 | 41.02 | 41.43 |
| W51T01 | 19.23 | 20.68 | 40.68 | 41.11 |

المصدر: الباحث



شكل (9) يمثل تغير متوسط درجة حرارة الإشعاع (MRT) لجميع السيناريوهات عند الساعة 07:00
المصدر: الباحث

تحليل مؤشر درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) – الساعة 07:00 صباحاً

تشير نتائج دراسة مؤشر درجة الحرارة الإشعاعية في الساعة 07:00 صباحاً إلى أن زيادة نسبة العناصر المائية في الفراغ العمراني تؤدي إلى انخفاض واضح في متوسط درجة حرارة الإشعاع (MRT)، وذلك نتيجة التبخر المبكر للمياه وتخفيف أثر الإشعاع الشمسي الأولي.

عند مقارنة السيناريوهات، يُلاحظ أن أعلى قيمة لمؤشر MRT بلغت 42.96°C في الحالة W00–S30–T00، في حين كانت أدنى قيمة 19.23°C في الحالة W51–S100–T01، أي بفارق انخفاض ملحوظ يبلغ 23.73 درجة مئوية، مما يعكس تأثيراً كبيراً للمياه والظل معاً.

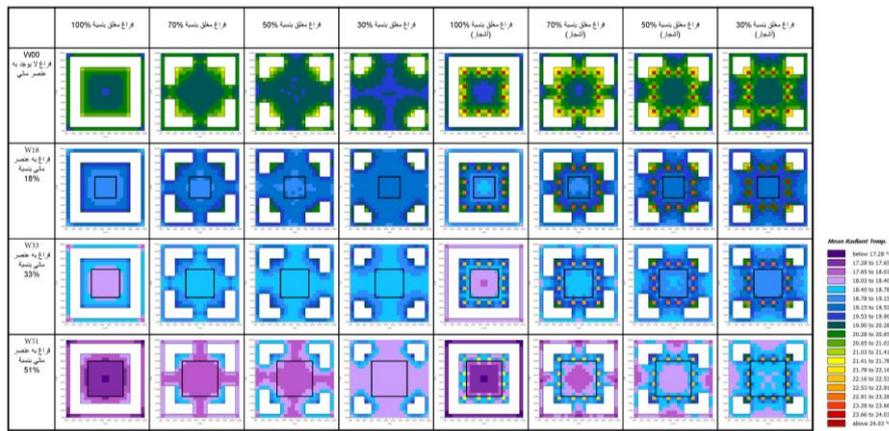
تُساهم إضافة الأشجار في خفض قيمة مؤشر MRT بدرجات متفاوتة، حيث انخفضت MRT في السيناريو W00–S100 من 21.56°C إلى 20.30°C بفارق 1.26 درجة مئوية، ويصل الفارق في بعض السيناريوهات الأخرى إلى أكثر من 2 درجة، مما يشير إلى فعالية الظل في تقليل ارتفاع درجات الحرارة الإشعاعية المبكرة في الصباح.

توضح نتائج MRT عند الساعة 07:00 صباحاً وجود تباين واضح بين السيناريوهات المختلفة، ويرجع ذلك إلى اختلاف مساحات الظل الناتجة عن زيادة درجة الانغلاق في الفراغات العمرانية. كلما زادت نسبة الانغلاق، ازدادت المساحات المظللة، مما يؤدي إلى انخفاض درجات الحرارة الإشعاعية في مناطق الظل مقارنة بالمناطق المكشوفة للشمس. هذا التباين بين المناطق المظللة والمفتوحة يفسر الفارق الكبير في قيم MRT بين السيناريوهات، حيث تعكس المناطق المظللة قدرة الظل على خفض الحرارة بشكل ملحوظ في الساعات الصباحية المبكرة.

4/1/6 نتائج دراسة درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) الساعة 19:00 مساءً

تمثل الساعة 19:00 بداية انخفاض الإشعاع الشمسي وبدء الانتقال إلى الفترات الليلية، مما يساعد في تقييم قدرة الفراغات المفتوحة على الاحتفاظ أو فقدان الحرارة بعد نهاية النهار.

يوضح شكل (10) وجدول (6) نتائج دراسة متوسط درجة الحرارة الإشعاعية MRT للبدائل المختلفة، موزعة حسب نسب المياه في الفراغ ونسبة الانغلاق، وكذلك التشجير كما يمثل الشكل (11) التحليل البياني لنتائج الدراسة:



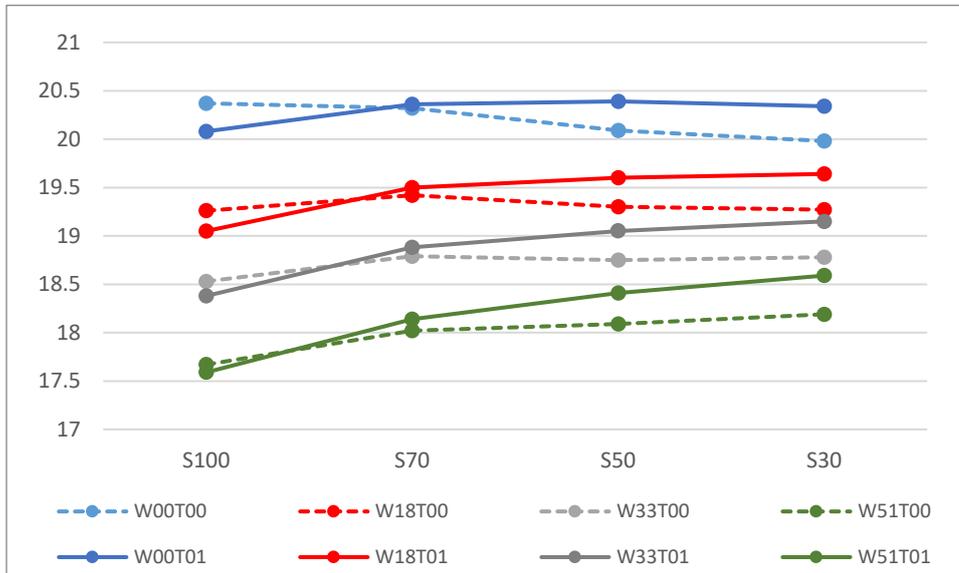
شكل (10) توزيع درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) في السيناريوهات عند الساعة 19:00 باستخدام برنامج ENVI-met

المصدر: الباحث

جدول (6) يوضح القيم المتوسطة لمؤشر MRT لجميع السيناريوهات عند الساعة 19:00

| MRT Median | S100 | S70 | S50 | S30 |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| W00T00 | 20.37 | 20.32 | 20.09 | 19.98 |
| W18T00 | 19.26 | 19.42 | 19.3 | 19.27 |
| W33T00 | 18.53 | 18.79 | 18.75 | 18.78 |
| W51T00 | 17.67 | 18.02 | 18.09 | 18.19 |
| W00T01 | 20.08 | 20.36 | 20.39 | 20.34 |
| W18T01 | 19.05 | 19.5 | 19.6 | 19.64 |
| W33T01 | 18.38 | 18.88 | 19.05 | 19.15 |
| W51T01 | 17.59 | 18.14 | 18.41 | 18.59 |

المصدر: الباحث



شكل (11) يمثل تغير متوسط درجة حرارة الإشعاع (MRT) لجميع السيناريوهات عند الساعة 19:00

المصدر: الباحث

تحليل مؤشر درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) – الساعة 19:00 مساءً:

تشير نتائج دراسة مؤشر درجة الحرارة الإشعاعية في الساعة 19:00 مساءً إلى أن زيادة نسبة العناصر المائية في الفراغ العمراني تؤدي إلى انخفاض واضح في متوسط درجة حرارة الإشعاع (MRT)، وذلك نتيجة الدور المستمر للمسطحات المائية في ترطيب الهواء وخفض حرارة الأسطح حتى بعد زوال الإشعاع الشمسي المباشر.

عند مقارنة السيناريوهات، يُلاحظ أن أعلى قيمة لمؤشر MRT بلغت $20.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ في الحالة W00-S100-T00، في حين كانت أدنى قيمة $17.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ في الحالة W51-S100-T01، أي بفارق انخفاض بلغ 2.78 درجة مئوية.

تُسهّم إضافة الأشجار في خفض قيمة مؤشر MRT بدرجات محدودة، حيث انخفضت MRT في السيناريو W00-S100 من $20.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ إلى $20.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ بفارق 0.29 درجة مئوية، ويصل الفارق في بعض السيناريوهات الأخرى إلى قرابة 0.4 درجة، مما يعكس استمرار دور الأشجار في خفض حرارة الفراغ بعد غروب الشمس.

5/1/16 التحليل العام لنتائج دراسة درجة الحرارة الإشعاعية (MRT)

تشير النتائج العامة لتحليل مؤشر درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) إلى وجود فروق واضحة بين السيناريوهات المختلفة، تتأثر بعنصرين رئيسيين: نسبة المياه داخل الفراغات العمرانية، ووجود الغطاء النباتي (الأشجار).

تؤكد البيانات أن زيادة نسبة المياه أدت إلى انخفاض ملموس في قيم MRT خلال مختلف ساعات اليوم، خصوصًا في فترات النهار، حيث بلغ الفارق بين السيناريوهات الأكثر جفافًا (W00) والأعلى في نسبة المياه (W51) أكثر من 12 درجة مئوية في بعض الحالات. ويُعزى هذا الانخفاض إلى فعالية التبريد التبخيري للمياه، التي تعمل على امتصاص الحرارة وتقليل التأثير المباشر للإشعاع الشمسي.

أما تأثير الأشجار، فكان أكثر وضوحًا خلال ساعات النهار، خاصة عند الساعة $13:00$ ظهرًا، حيث ساهمت في خفض قيم MRT بمعدلات تراوحت بين 2 إلى 3 درجات مئوية، نتيجة لتوفير الظل المباشر وتقليل التعرض للإشعاع الشمسي. بينما تراجع هذا التأثير ليلاً، حيث أصبح تأثير التظليل محدودًا، بينما استمر تأثير المياه بشكل أكبر.

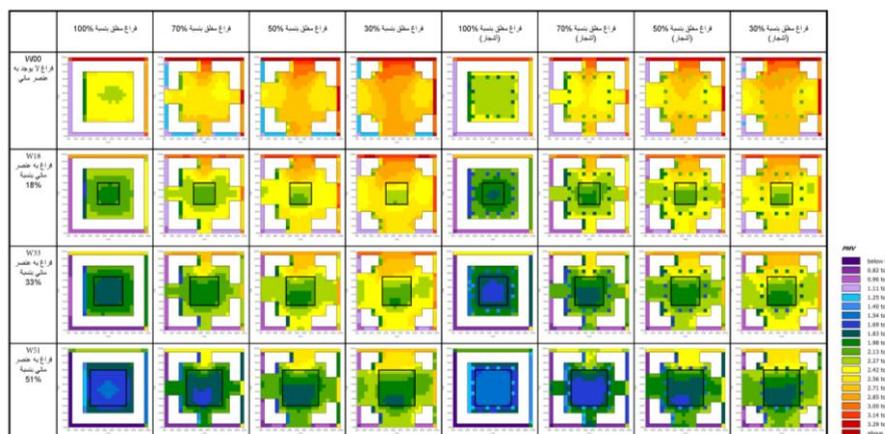
بالمجمل، يُظهر التحليل أن الدمج بين المسطحات المائية والغطاء النباتي هو العامل الأكثر فاعلية في خفض درجة الحرارة الإشعاعية، خصوصًا في الفترات الحرجة من اليوم، مما يدعم توجه التصميم البيئي المستدام في تفعيل الحلول الطبيعية لتحسين جودة المناخ المحلي في الفراغات الحضرية.

2/6 نتائج دراسة مؤشر الراحة الحرارية (PMV)

1/2/6 نتائج دراسة مؤشر الراحة الحرارية (PMV) الساعة 13:00 ظهرًا

تم تحليل مؤشر الراحة الحرارية (PMV) في الساعة $13:00$ ظهرًا عبر مختلف السيناريوهات. يوضح الجدول التالي المتوسطات المحسوبة لـ PMV عبر مختلف نسب المياه في الفراغات ونسب انغلاق الفراغات بالإضافة إلى تأثير وجود الأشجار.

يوضح شكل (12) وجدول (7) نتائج دراسة متوسط درجة الحرارة الإشعاعية MRT للبدائل المختلفة، موزعة حسب نسب المياه في الفراغ ونسبة الانغلاق، وكذلك التشجير كما يمثل الشكل (13) التحليل البياني لنتائج الدراسة:

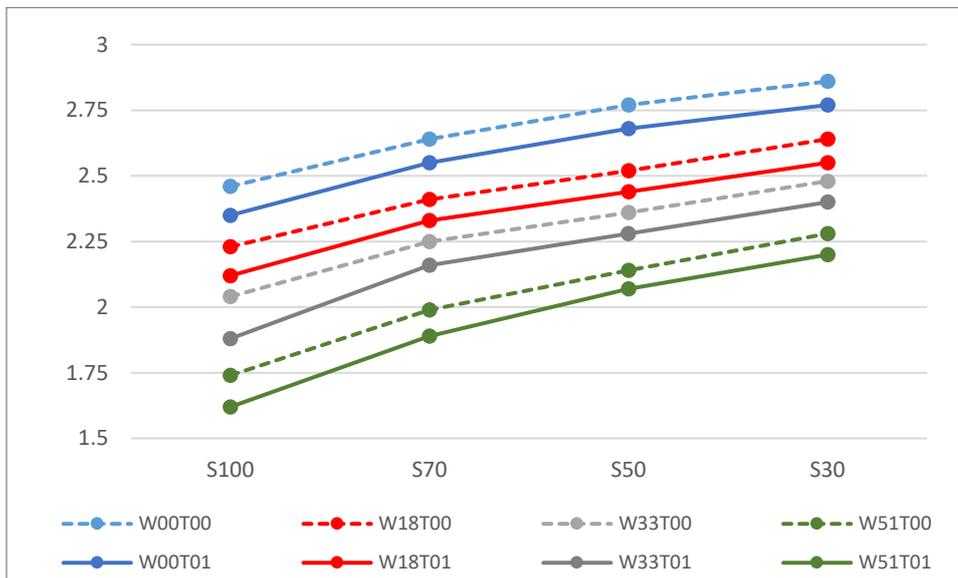


شكل (12) توزيع مؤشر الراحة الحرارية (PMV) في السيناريوهات عند الساعة 01:00 باستخدام برنامج ENVI-met

جدول (7) يوضح القيم المتوسطة لمؤشر PMV لجميع السيناريوهات عند الساعة 13:00

| PMV Median | S100 | S70 | S50 | S30 |
|------------|------|------|------|------|
| W00T00 | 2.46 | 2.64 | 2.77 | 2.86 |
| W18T00 | 2.23 | 2.41 | 2.52 | 2.64 |
| W33T00 | 2.04 | 2.25 | 2.36 | 2.48 |
| W51T00 | 1.74 | 1.99 | 2.14 | 2.28 |
| W00T01 | 2.35 | 2.55 | 2.68 | 2.77 |
| W18T01 | 2.12 | 2.33 | 2.44 | 2.55 |
| W33T01 | 1.88 | 2.16 | 2.28 | 2.4 |
| W51T01 | 1.62 | 1.89 | 2.07 | 2.2 |

المصدر: الباحث



شكل (13) يمثل تغير متوسط مؤشر الراحة الحرارية (PMV) لجميع السيناريوهات عند الساعة 13:00

المصدر: الباحث

1/1/2/6 تحليل مؤشر الراحة الحرارية (PMV) – الساعة 13:00 ظهرًا

تشير نتائج دراسة مؤشر الراحة الحرارية المتوقعة في الساعة 13:00 ظهرًا إلى أن زيادة نسبة العناصر المائية في الفراغ العمراني تؤدي إلى انخفاض واضح في مؤشر PMV ، بفعل التبخر القوي وتبريد الهواء المحيط خلال فترات الذروة.

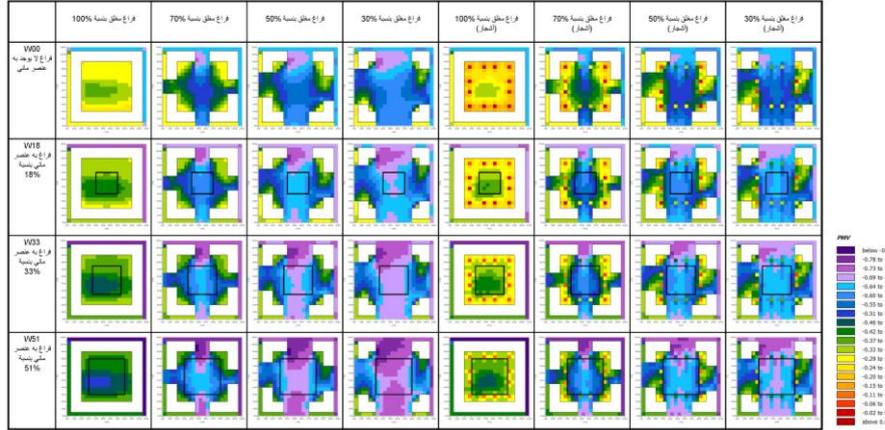
عند مقارنة السيناريوهات، يُلاحظ أن أعلى قيمة لمؤشر PMV بلغت 2.86 في الحالة W00–S30–T00، في حين كانت أدنى قيمة 1.62 في الحالة W51–S100–T01، أي بفارق انخفاض بلغ 1.24 نقطة.

تُساهم إضافة الأشجار في خفض قيمة مؤشر PMV بدرجات متفاوتة، حيث انخفضت PMV في السيناريو W00–S100 من 2.46 إلى 2.35 بفارق 0.11 نقطة، ويصل الفارق في بعض السيناريوهات الأخرى إلى أكثر من 0.2 نقطة، مما يبرز دور التظليل في الحد من الإحساس بالإجهاد الحراري.

2/2/6 نتائج دراسة مؤشر الراحة الحرارية (PMV) الساعة 01:00 بعد منتصف الليل

تُمثل الساعة 01:00 الفترة الأكثر برودة خلال اليوم، حيث لا يوجد إشعاع شمسي على الإطلاق، ويعتمد الأداء الحراري للفراغات بالكامل على الحرارة المُخزنة خلال النهار، وخصائص المواد المحيطة، ووجود عناصر تبريدية كالمياه والنباتات.

يوضح شكل (14) وجدول (8) نتائج دراسة متوسط درجة الحرارة الإشعاعية MRT للبدائل المختلفة، موزعة حسب نسب المياه في الفراغ ونسبة الانغلاق، وكذلك التشجير كما يمثل الشكل (15) التحليل البياني لنتائج الدراسة:



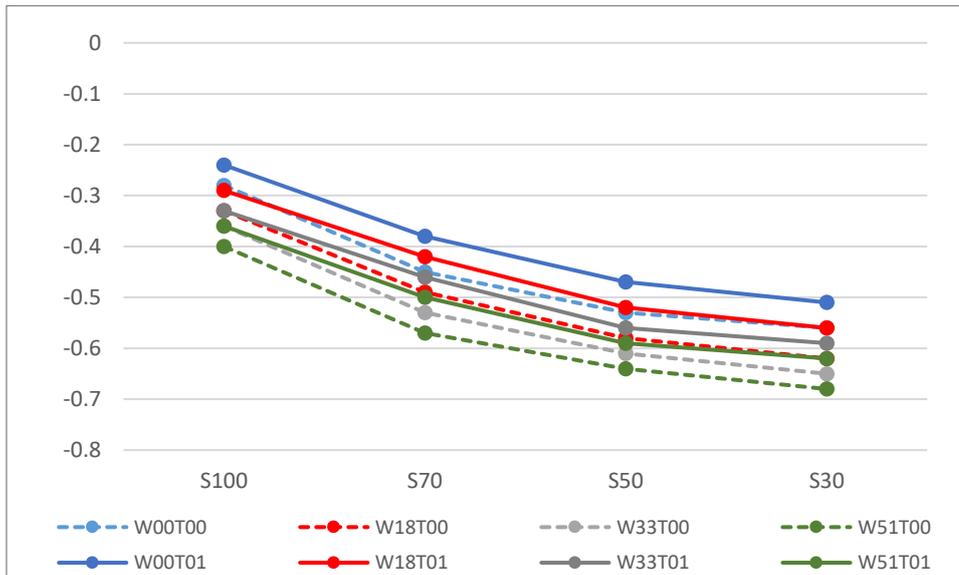
شكل (14) توزيع مؤشر الراحة الحرارية (PMV) في السيناريوهات عند الساعة 01:00 باستخدام برنامج ENVI-met

المصدر: الباحث

جدول (8) يوضح القيم المتوسطة لمؤشر PMV لجميع السيناريوهات عند الساعة 01:00

| PMV Median | S100 | S70 | S50 | S30 |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| W00T00 | -0.28 | -0.45 | -0.53 | -0.56 |
| W18T00 | -0.33 | -0.49 | -0.58 | -0.62 |
| W33T00 | -0.36 | -0.53 | -0.61 | -0.65 |
| W51T00 | -0.4 | -0.57 | -0.64 | -0.68 |
| W00T01 | -0.24 | -0.38 | -0.47 | -0.51 |
| W18T01 | -0.29 | -0.42 | -0.52 | -0.56 |
| W33T01 | -0.33 | -0.46 | -0.56 | -0.59 |
| W51T01 | -0.36 | -0.5 | -0.59 | -0.62 |

المصدر: الباحث



شكل (15) يمثل تغير متوسط مؤشر الراحة الحرارية (PMV) لجميع السيناريوهات عند الساعة 01:00
المصدر: الباحث

تحليل مؤشر الراحة الحرارية (PMV) – الساعة 01:00 بعد منتصف الليل:

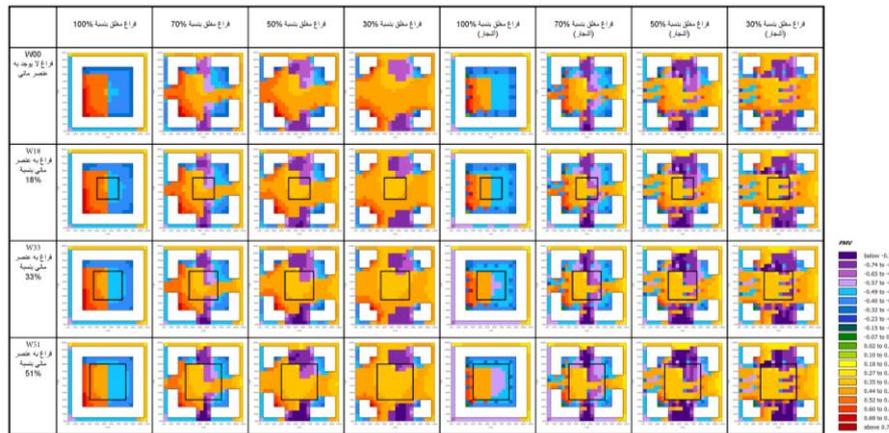
تشير نتائج دراسة مؤشر الراحة الحرارية المتوقعة في الساعة 01:00 بعد منتصف الليل إلى أن زيادة نسبة العناصر المائية في الفراغ العمراني تؤدي إلى انخفاض إضافي في قيمة PMV ، نتيجة تأثير التبريد التبخيري الليلي واستمرار فقد الحرارة من خلال المسطحات المائية.

عند مقارنة السيناريوهات، يُلاحظ أن أعلى قيمة لمؤشر PMV بلغت -0.24 في الحالة W00-S100-T01 ، في حين كانت أدنى قيمة -0.68 في الحالة W51-S30-T00 ، أي بفارق انخفاض بلغ 0.40 نقطة.

تُساهم إضافة الأشجار في ارتفاع قيمة مؤشر PMV بشكل طفيف في هذا التوقيت، حيث ارتفعت القيمة في السيناريو W00-S100 من -0.28 إلى -0.24 بفارق 0.04 نقطة، بينما في بعض السيناريوهات الأخرى بلغ التأثير حوالي 0.06 نقطة، ما يعكس دور الأشجار في تخفيف البرودة المفرطة خلال الليل.

3/2/6 نتائج دراسة مؤشر الراحة الحرارية (PMV) الساعة 07:00 صباحا

يوضح شكل (16) وجدول (9) نتائج دراسة متوسط درجة الحرارة الإشعاعية MRT للبدائل المختلفة، موزعة حسب نسب المياه في الفراغ ونسبة الانغلاق، وكذلك التشجير كما يمثل الشكل (17) التحليل البياني لنتائج الدراسة:



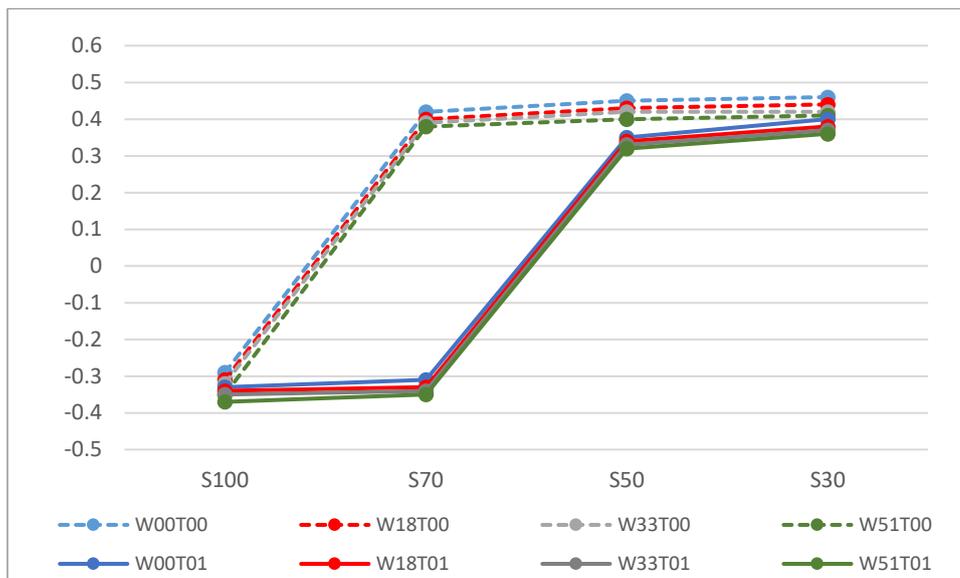
شكل (16) توزيع مؤشر الراحة الحرارية (PMV) في السيناريوهات عند الساعة 07:00 باستخدام برنامج ENVI-met

المصدر: الباحث

جدول (9) يوضح القيم المتوسطة لمؤشر PMV لجميع السيناريوهات عند الساعة 07:00

| PMV Median | S100 | S70 | S50 | S30 |
|------------|-------|-------|------|------|
| W00T00 | -0.29 | 0.42 | 0.45 | 0.46 |
| W18T00 | -0.31 | 0.4 | 0.43 | 0.44 |
| W33T00 | -0.32 | 0.39 | 0.42 | 0.42 |
| W51T00 | -0.35 | 0.38 | 0.4 | 0.41 |
| W00T01 | -0.33 | -0.31 | 0.35 | 0.4 |
| W18T01 | -0.34 | -0.33 | 0.34 | 0.38 |
| W33T01 | -0.35 | -0.34 | 0.33 | 0.37 |
| W51T01 | -0.37 | -0.35 | 0.32 | 0.36 |

المصدر: الباحث



شكل (17) يمثل تغير متوسط مؤشر الراحة الحرارية (PMV) لجميع السيناريوهات عند الساعة 07:00
المصدر: الباحث

تحليل مؤشر الراحة الحرارية (PMV) - الساعة 07:00 صباحاً:

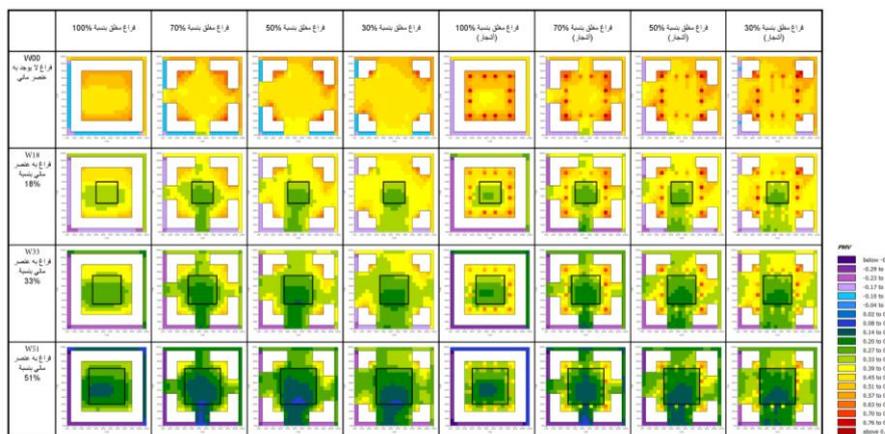
تشير نتائج دراسة مؤشر الراحة الحرارية المتوقعة في الساعة 07:00 صباحاً إلى أن زيادة نسبة العناصر المائية في الفراغ العمراني تؤدي إلى تحسّن في قيم PMV من خلال تثبيت درجات الحرارة في النطاق المقبول.

عند مقارنة السيناريوهات، يُلاحظ أن أعلى قيمة لمؤشر PMV بلغت 0.46 في الحالة W00-S30-T00، في حين كانت أدنى قيمة -0.37 في الحالة W51-S100-T01، أي بفارق انخفاض بلغ 0.83 نقطة.

تُسهم إضافة الأشجار في خفض قيمة مؤشر PMV بدرجات ملحوظة، حيث انخفضت PMV في السيناريو W00-S100 من 0.29 إلى -0.33 بفارق 0.62 نقطة، بينما وصلت الفروق في بعض الحالات إلى 0.75 نقطة، مما يعكس التأثير القوي للظل في تقليل الشعور بالحرارة خلال الفترة الصباحية.

4/2/6 نتائج دراسة مؤشر الراحة الحرارية (PMV) الساعة 19:00 مساءً

يوضح شكل (18) وجدول (10) نتائج دراسة متوسط درجة الحرارة الإشعاعية MRT للبدائل المختلفة، موزعة حسب نسب المياه في الفراغ ونسبة الانغلاق، وكذلك التشجير كما يمثل الشكل (19) التحليل البياني لنتائج الدراسة:



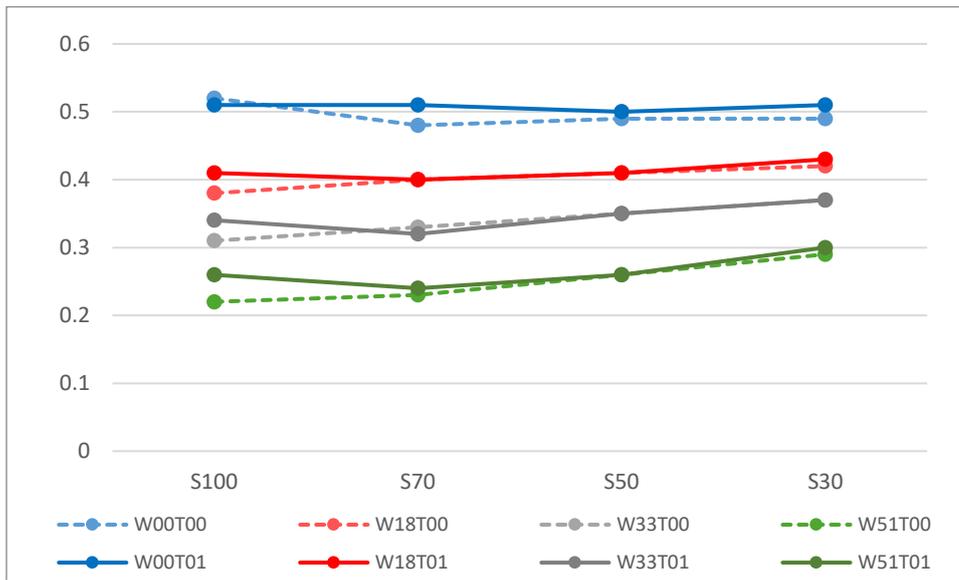
شكل (18) توزيع مؤشر الراحة الحرارية (PMV) في السيناريوهات عند الساعة 19:00 باستخدام برنامج ENVI-met

المصدر: الباحث

جدول (10) يوضح القيم المتوسطة لمؤشر PMV لجميع السيناريوهات عند الساعة 19:00

| PMV Median | S100 | S70 | S50 | S30 |
|------------|------|------|------|------|
| W00T00 | 0.52 | 0.48 | 0.49 | 0.49 |
| W18T00 | 0.38 | 0.4 | 0.41 | 0.42 |
| W33T00 | 0.31 | 0.33 | 0.35 | 0.37 |
| W51T00 | 0.22 | 0.23 | 0.26 | 0.29 |
| W00T01 | 0.51 | 0.51 | 0.5 | 0.51 |
| W18T01 | 0.41 | 0.4 | 0.41 | 0.43 |
| W33T01 | 0.34 | 0.32 | 0.35 | 0.37 |
| W51T01 | 0.26 | 0.24 | 0.26 | 0.3 |

المصدر: الباحث



شكل (19) يمثل تغير متوسط مؤشر الراحة الحرارية (PMV) لجميع السيناريوهات عند الساعة 19:00

المصدر: الباحث

تحليل مؤشر الراحة الحرارية (PMV) – الساعة 19:00 مساءً

تشير نتائج دراسة مؤشر الراحة الحرارية المتوقعة في الساعة 19:00 مساءً إلى أن زيادة نسبة العناصر المائية في الفراغ العمراني تؤدي إلى انخفاض تدريجي في مؤشر PMV، نتيجة التبريد المستمر للمياه بعد نهاية النهار وتراجع تأثير الإشعاع الشمسي.

عند مقارنة السيناريوهات، يُلاحظ أن أعلى قيمة لمؤشر PMV بلغت 0.52 في الحالة W00–S100–T00، في حين كانت أدنى قيمة 0.22 في الحالة W51–S100–T00، أي بفارق انخفاض بلغ 0.30 نقطة.

تُسهّم إضافة الأشجار في خفض قيمة مؤشر PMV بدرجات محدودة، حيث انخفضت PMV في السيناريو W00–S100 من 0.52 إلى 0.36 بفارق 0.16 نقطة، ويصل الفارق في بعض السيناريوهات الأخرى إلى 0.2 نقطة تقريباً، مما يدل على استمرار تأثير الظل النباتي في تعزيز الراحة الحرارية خلال ساعات المساء.

5/2/6 التحليل العام لنتائج مؤشر الراحة الحرارية (PMV):

تُظهر نتائج تحليل مؤشر الراحة الحرارية المتوقعة (PMV) تفاوتاً ملحوظاً بين السيناريوهات تبعاً لاختلاف نسبة المياه والغطاء النباتي داخل الفراغات العمرانية.

بصورة عامة، ساهمت زيادة نسبة المياه في خفض قيم PMV في معظم السيناريوهات، وخاصة في التوقيتات النهارية، حيث انخفضت القيم بين W00 و W51 بفارق وصل إلى 1.24 نقطة عند الساعة 13:00 ظهرًا. ويُعزى هذا الانخفاض إلى دور المياه في ترطيب الهواء وتخفيض درجة الحرارة المحسوسة من خلال التبخر.

من ناحية أخرى، كان لتأثير الأشجار دور مهم في تحسين مؤشر الراحة الحرارية، خاصةً خلال الفترات التي تشهد إشعاعًا شمسيًا مباشرًا. حيث ساهمت الأشجار في خفض قيمة PMV بمقدار تراوح بين 0.1 إلى 0.7 نقطة، اعتمادًا على التوقيت ونسبة انغلاق الفراغ. أما في الفترات الليلية، فقد كان تأثير الغطاء النباتي محدودًا نسبيًا، في حين استمر تأثير المسطحات المائية بشكل واضح، مما ساعد على استقرار قيم المؤشر.

تشير هذه النتائج إلى أن الاستراتيجية التصميمية المتكاملة التي تعتمد على دمج المياه والغطاء النباتي تُعد الأكثر فاعلية في تعزيز الراحة الحرارية للمستخدمين، سواء خلال النهار أو بعد الغروب، وتبرز أهمية الحلول الطبيعية في تحقيق بيئات خارجية أكثر توازنًا وصحة في المناخات الحارة الجافة.

17 المناقشة

تتناول هذه المناقشة تحليل تأثير العناصر الطبيعية التصميمية —وتحديدًا المسطحات المائية والغطاء النباتي (الأشجار) على مؤشري درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) والراحة الحرارية المتوقعة (PMV) ضمن سيناريوهات متنوعة من الانغلاق العمراني، عبر أربع فترات زمنية مختلفة. وتُفسر النتائج في ضوء المبادئ البيئية الحرارية المعروفة، مع مقارنتها بنتائج دراسات سابقة في السياقات المناخية المشابهة.

1/7 تأثير المسطحات المائية

تشير نتائج الدراسة إلى أن زيادة نسبة المسطحات المائية داخل الفراغ العمراني أدت إلى انخفاض كبير في MRT و PMV، لا سيما خلال ساعات الذروة الحرارية. فعند الساعة 13:00 ظهرًا، بلغ الفارق أكثر من 11 درجة مئوية في MRT (بين W00-S100-T00 و W51-S100-T00)، وحوالي 0.72 نقطة في PMV.

تتوافق هذه النتائج مع ما أوردته (Shashua-Bar et al., 2009)، حيث وجدت أن المسطحات المائية في بيئة حضرية جافة تقلل درجات الحرارة الإشعاعية بمعدل 2-6 درجات مئوية خلال ساعات النهار، وأن تأثير التبخر يبقى قائمًا حتى بعد الغروب.

علاوة على ذلك، تدعم نتائج (Robitu et al., 2006) فكرة استمرار التبخر الليلي في خفض درجات الحرارة، حيث وجدت أن المسطحات المائية تخفض MRT ليلاً من خلال إطلاق الحرارة المخزنة نهارًا، وأكد (Steenefeld et al., 2014) أن المسطحات المائية المفتوحة تساهم في تخفيض الجزر الحرارية ليلاً، مما يساهم في انخفاض "حرارة التخزين" وتحسين الراحة الحرارية.

2/7 تأثير الأشجار (الظل النباتي)

أثبتت الدراسة أن وجود الأشجار والظل النباتي قلل MRT بحوالي 2-3 درجات مئوية خلال الظهيرة، فضلًا عن خفض PMV بما يصل إلى 0.7 نقطة. يدعم هذا ما أظهرته (Shashua-Bar et al., 2009) حول دور الظل النباتي في تخفيض الإشعاع المباشر في المناخات الجافة، وتحقيق تلطيف حراري فعال.

بالإضافة إلى ذلك، أوضح (Ali-Toudert & Mayer, 2007) أن الأشجار تقلل مؤشر PMV بنحو 0.2-0.5 نقطة في الشوارع الحضرية، بفضل التأثير التظليلي على جسر الإشعاع المباشر، وقد أظهرت دراسة (Wang et al., 2015)، من خلال جولات قياس ميدانية ونماذج ENVI-met، أن إضافة الأشجار في الفضاءات العمرانية تقلل متوسط درجة الحرارة المحيطة بنسبة ملحوظة، خصوصًا في النهار، عبر تخفيف الإشعاع المباشر وتعديل توزيع درجات الحرارة الإشعاعية. كما أكد استعراض (Xiao et al., 2023) أن الأشجار تساعد في تعديل الإشعاع، وتعزز التبريد بالتبخر، وتُخفّف تدفق الرياح، مما يعزز الراحة الحرارية لدى المستخدمين.

3/7 أثر درجة الانغلاق العمراني

تُظهر النتائج أن الفراغات المغلقة تمامًا (S100) تقدم أداءً حراريًا أفضل عند دمجها مع المسطحات المائية والظل، نظرًا لتقليل الانكشاف المباشر وتحكمها في تيارات الهواء. بينما الفراغات المفتوحة (S30) أظهرت تباينًا أكبر في النتائج بتأثيرها المباشر بالإشعاع والرياح.

يدعم هذا ما وصفه (Johansson & Emmanuel, 2006) بأن التصميم الفراغي (نسبة الانغلاق/الانكشاف) يلعب دورًا حاسمًا في ضبط الراحة الحرارية، إذ أن الشوارع الضيقة والمظللة بمحاذاة الرياح السائدة تحقق أفضل النتائج في خفض MRT و PMV.

كما تشير دراسة (Perini & Magliocco, 2014) إلى أن توزيع المباني والكتل العمرانية يؤثر على حركة الهواء وتداخل الظل، ما يؤكد أن الانغلاق يجب أن يُوظف بتوازن مع المسطحات المائية والغطاء النباتي لضمان تحقيق أعلى درجات الراحة الحرارية.

4/7 العلاقة بين MRT و PMV

رغم اختلاف طبيعة المؤشرين — حيث أن مؤشر MRT يقيس البعد الفيزيائي للإشعاع، ومؤشر PMV يُعبر عن الشعور الحراري البشري — فقد أظهرت النتائج تقاربًا ملحوظًا بين الاتجاهين. إذ إن انخفاض MRT في معظم السيناريوهات ارتبط بانخفاض مواز في PMV، بما يدعم ما وجدته (Ali-Toudert & Mayer, 2007) بأن خفض MRT يترجم مباشرة إلى خفض PMV.

5/7 النموذج التصميمي الإرشادي لتحديد النسبة المثلى من العناصر المائية والتشجير وفق خصائص الفراغ العمراني
بناءً على نتائج المحاكاة الرقمية لمؤشري الراحة الحرارية (PMV) و (MRT)، تم تطوير مصفوفة قرار تصميمي كما بالجدول (11) توضح العلاقة بين درجة الانغلاق العمراني، وتوفر التشجير، والنسبة المثلى للمساحات المائية التي تحقق الأداء الأفضل.

يعتمد هذا النموذج على تحليل القيم الكمية الدقيقة المستخرجة من المحاكاة، ويُظهر بوضوح كيفية اختلاف الاستجابة الحرارية للفراغات العمرانية باختلاف نسب المياه والانفتاح، مع أو بدون تشجير.

ويساعد هذا النموذج المصممين في اتخاذ قرارات تصميمية فعالة ومدروسة، تتوافق مع خصائص كل فراغ من حيث الانفتاح ودرجة التشجير، مما يساهم في تحسين الراحة الحرارية ورفع الكفاءة البيئية للتصميم.

جدول (11) مصفوفة القرار التصميمي للسيناريو الأمثل لتحقيق الراحة الحرارية وفق نسبة الانفتاح والتشجير بناءً على مؤشري PMV و MRT

| أفضل سيناريو للراحة الحرارية | | نسبة الإحاطة بالفراغ (نسبة الانفتاح) |
|------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| وجود التشجير | أفضل نسبة للمساح المائي | |
| مع تشجير | 51% | S100 (فراغ مغلق) |
| مع تشجير | 51% | S70 (فراغ شبه مغلق) |
| مع تشجير | 33% | S50 (فراغ شبه مفتوح) |
| بدون تشجير | 33% | S30 (فراغ مفتوح نسبيًا) |

المصدر: الباحث

يعكس جدول القرار التصميمي العلاقة بين درجة انفتاح الفراغ العمراني وأفضل سيناريو لتحقيق الراحة الحرارية، بناءً على النسبة المثلى للمساحات المائية ووجود التشجير. وقد أظهرت النتائج ما يلي:

الفراغات المغلقة (S100) وشبه المغلقة (S70) حققت الأداء الأفضل باستخدام نسبة مياه مرتفعة (51%) مع وجود تشجير، نتيجة لضعف حركة الهواء وحاجة هذه الفراغات لعناصر تبريد إضافية.

الفراغات متوسطة الانفتاح (S50) أظهرت النتائج أن النسبة المثلى هي 33% مع وجود تشجير، مما يدل على أن الزيادة عن هذا الحد لا تعني بالضرورة تحسناً إضافياً في الراحة الحرارية.

الفراغات المفتوحة: (S30) حققت أفضل أداء عند استخدام 33% من المياه دون تشجير، بسبب الاستفادة الطبيعية من التهوية وتعزيز تأثير المياه دون تدخل إضافي.

تؤكد هذه النتائج أهمية موازنة الحلول البيئية مع الخصائص العمرانية لكل فراغ، وعدم الاكتفاء بفرض نسب موحدة دون تحليل دقيق لطبيعة الموقع وظروفه المناخية.

6/7 التوصيات المستقبلية

بناءً على ما سبق، يُوصى بأن يتم دمج المسطحات المائية والغطاء النباتي بشكل مدروس في تصميم الفراغات العامة بالمدن الحارة، مع مراعاة درجة الانغلاق ومسارات الرياح المحلية.

كما يُقترح توسيع نطاق البحث ليشمل مؤشرات إضافية مثل درجة حرارة سطح المواد، والرطوبة النسبية، وسرعة الرياح، وكذلك إجراء دراسات ميدانية طويلة الأجل لتقييم الاستدامة الفعلية للحلول التصميمية المقترحة.

فضلاً عن ذلك، سيكون من المفيد مستقبلاً دمج المحاكاة الحرارية مع تحليل سلوكي واجتماعي للمستخدمين، لفهم الأثر النفسي والوظيفي للراحة الحرارية على جودة الاستخدام اليومي للفراغات العمرانية.

كما يُوصى بإجراء دراسات مستقبلية لدراسة تأثير العناصر المائية الديناميكية، مثل النوافير والشلالات، لما لها من قدرة تبريدية أعلى وإسهام أعمق في تحسين المناخ المصغر داخل الفراغات العامة.

8/ الخلاصة

تسلط هذه الدراسة الضوء على أهمية دمج العناصر الطبيعية—وخاصة المسطحات المائية والغطاء النباتي (الأشجار)— في تصميم الفراغات العمرانية لتحقيق الراحة الحرارية في المناخات الحارة الجافة. ومن خلال إجراء سلسلة من المحاكاة باستخدام برنامج ENVI-met، تم تقييم تأثير هذه العناصر على مؤشري درجة الحرارة الإشعاعية (MRT) والراحة الحرارية المتوقعة (PMV) عبر أربعة أوقات مختلفة من اليوم، وفي ظل تباينات في درجة الانغلاق العمراني ونسب توزيع المياه.

وقد كشفت النتائج أن زيادة نسبة المياه داخل الفراغات تُعد العامل الأهم في خفض القيم الحرارية، إذ ساهمت في تقليل MRT بما يزيد عن 12 درجة مئوية، و PMV بأكثر من 1.2 نقطة في بعض السيناريوهات. كما ثبت أن وجود الأشجار يساهم في خفض المؤشرين خاصة خلال فترات النهار، بمعدلات مؤثرة تعزز من الإحساس بالراحة وتقليل التعرض للإجهاد الحراري. أما درجة الانغلاق العمراني، فقد تبين أنها تُعزز الأداء الحراري عندما تُدمج مع عناصر بيئية فعّالة.

تُظهر هذه النتائج بوضوح أن التكامل بين الحلول الطبيعية والعمرانية لا يُعد خياراً تصميمياً تجميلاً، بل استراتيجية فعّالة لتحسين جودة البيئة الحضرية. كما تؤكد الدراسة على أهمية مراعاة العوامل الزمنية (تغير الإشعاع على مدار اليوم) في تصميم المساحات الخارجية، بما يضمن تكيفاً مرئياً مع الظروف المناخية المتغيرة.

وتوصي الدراسة بمزيد من الأبحاث التي تجمع بين النمذجة الحرارية والتحليل السلوكي للمستخدمين، إلى جانب توسيع نطاق الدراسة لتشمل تأثير المواد، والتهوية، والتوزيع المكاني للعناصر الطبيعية في بيئات حضرية واقعية. إن هذا التوجه البحثي يُسهم في دعم رؤية تصميم حضري مستدام يستجيب للمناخ ويعزز جودة الحياة في المدن المستقبلية.

المراجع

- سليم، ف. خ. (2002). العمارة والبيئة في المناطق الصحراوية الحارة. الدار الثقافية للنشر.
- Fajjal, K. S. (2002). Architecture and Environment in Hot Desert Areas. Cultural House for Publishing.
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. Solar Energy, 70(3), 295–310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2007). Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. Solar Energy, 81(6), 742–754. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.10.007>

- Alsonny, Z., Ahmed, A. M., & Hamdy, O. (2022). Studying the effect of urban green spaces location on urban heat island in cities using remote sensing techniques: 6th October City as a case study. *International Design Journal*, 12(2), 243–252.
<https://doi.org/10.21608/idj.2022.110635.1030>
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2005). *ASHRAE Handbook — Fundamentals (SI)*. ASHRAE.
- Aram, F., Solgi, E., Baghaee, S., Higuera García, E., Mosavi, A., & Band, S. S. (2020). How parks provide thermal comfort perception in the metropolitan cores: A case study in Madrid (Mediterranean climatic zone). *Climate Risk Management*, 30, 100245. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100245>
- Cheng, Y., Liu, X., Zeng, Z., Liu, S., Wang, Z., Tang, X., & He, B.-J. (2022). Impacts of water bodies on microclimates and outdoor thermal comfort: Implications for sustainable rural revitalization. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 940482.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.940482>
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: Microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69–76.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00081-6)
- Fahmy, M. A. R. (2011). *Interactive urban form design of local climate scale in hot semi-arid zone (Doctoral dissertation)*. University of Sheffield, School of Architecture.
<https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/15120/>
- Jandaghian, Z., & Colombo, A. (2024). The role of water bodies in climate regulation: Insights from recent studies on urban heat island mitigation. *Buildings*, 14(9), 2945.
<https://doi.org/10.3390/buildings14092945>
- Jim, C. Y., & Chen, W. Y. (2008). Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou (China). *Journal of Environmental Management*, 88(4), 665–676. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.035>
- Johansson, E., & Emmanuel, R. (2006). The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Biometeorology*, 51(2), 119–133. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0047-6>
- Nowak, D. (1994). Air pollution removal by Chicago's urban forest. In McPherson, E.G., Nowak, D.J., Rowntree, R.A. (Eds.), *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project* (pp. 63–81). United States Department of Agriculture.
- Oke, T. R. (2009). *Boundary layer climates* (2nd ed.). Routledge.
- Oke, T. R., Johnson, G. T., Steyn, D. G., & Watson, I. D. (1991). Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night — part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 56(4), 339–358.
<https://doi.org/10.1007/BF00119211>
- Ozer, S., Irmak, M., & Yilmaz, H. (2007). Determination of roadside noise reduction effectiveness of *Pinus sylvestris* L. and *Populus nigra* L. in Erzurum, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 144(1–3), 191–197.
<https://doi.org/10.1007/s10661-007-9978-6>
- Perini, K., & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), 495–506.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003>
- Robitu, M., Musy, M., Inard, C., & Groleau, D. (2006). Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy*, 80(4), 435–447.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.015>

- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085–3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2009). The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning*, 92(3), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005>
- Steeneveld, G., Koopmans, S., Heusinkveld, B., & Theeuwes, N. (2014). Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect. *Landscape and Urban Planning*, 121, 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.09.001>
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2), 99–103. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00999-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00999-1)
- Teferi, E., & Abraha, H. (2017). Urban heat island effect of Addis Ababa city: Implications of urban green spaces for climate change adaptation. In W. Leal Filho, S. Belay, J. Kalangu, W. Menas, P. Munishi, K. Musiyiwa (eds), *Climate Change Adaptation in Africa*. Climate Change Management. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49520-0_33
- Van Renterghem, T., Botteldooren, D., & Verheyen, K. (2012). Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth. *Journal of Sound and Vibration*, 331(10), 2404–2425. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.01.006>
- Wang, Y., Bakker, F., de Groot, R., Wortche, H., & Leemans, R. (2015). Effects of urban trees on local outdoor microclimate: Synthesizing field measurements by numerical modelling. *Urban Ecosystems*, 18(4), 1305–1331. <https://doi.org/10.1007/s11252-015-0447-7>
- Weng, Q., & Yang, S. (2004). Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. *Journal of Environmental Management*, 70(2), 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2003.11.006>
- Xiao, T., Sheng, L., Zhang, S., Zheng, L., & Shui, T. (2023). Thermal comfort improvement strategies for outdoor spaces in traditional villages based on ENVI-Met: Shimengao Village in Chizhou City. *Sustainability*, 15(15), 11785. <https://doi.org/10.3390/su151511785>
- Yang, C., He, X., Wang, R., Yan, F., Yu, L., Bu, K., Yang, J., Chang, L., & Zhang, S. (2017). The effect of urban green spaces on the urban thermal environment and its seasonal variations. *Forests*, 8(5), 153. <https://doi.org/10.3390/f8050153>
- Yang, W., Wong, N. H., & Jusuf, S. K. (2013). Thermal comfort in outdoor urban spaces in Singapore. *Building and Environment*, 59, 426–435. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.008>
- Zhou, W., Yu, W., Zhang, Z., Cao, W., & Wu, T. (2023). How can urban green spaces be planned to mitigate urban heat island effect under different climatic backgrounds? A threshold-based perspective. *Science of the Total Environment*, 890, 164422. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164422>

Evaluation of the Use of Water Elements and Vegetation in Public Spaces to Achieve Thermal Comfort in Hot Arid Regions

Ahmed Draz^{1*}, Abbas Al-Zaafarany², Hossam Tahoon³

¹ Master's Student, Department of Urban Design, Cairo University

² Professor, Department of Urban Design, Cairo University

³ Assistant Professor, Department of Urban Design, Cairo University

*Corresponding author email: Draz5@Yahoo.com

ABSTRACT

This study aims to evaluate the impact of using water elements in residential spaces on improving thermal comfort in hot arid regions. The study relies on microclimate simulation using the ENVI-met software to analyze the effects of water features, such as artificial lakes and fountains, on ambient temperature and relative humidity. October City was selected as a case study model, where the simulation was conducted during an extremely hot summer day to determine the cooling effect of these elements. The results showed that the addition of water elements significantly contributes to reducing ambient temperatures and enhancing thermal comfort levels, especially during peak heat hours. The study recommends implementing design strategies that integrate water elements into hot residential areas to achieve sustainable improvements in thermal conditions. Despite the positive results, the study advises conducting further research to investigate the long-term effects of water elements and to test different scenarios throughout the year.

KEYWORDS

Thermal Comfort – Water Elements – Urban Spaces – Hot Arid Regions – ENVI-met