تقييم الأداء الحراري والأثر البيئي لمراوح الرشاشات الرذاذية المستخدمة لتلطيف الهواء في ساحات المسجد الحرام والمسجد النبوي الشريف

عبدالرحمن مطلق الخطابي [١]، تركي محمد حبيب الله [٢]، فتحي فوزي شعبان [٢]، عصام عبد الحليم مرسي [٢] ، عبدالله دخيل الله المحمادي [٣]، عاصم نشوان [٤]

[١] وحدة العلوم والتقنية والابتكار بالرئاسة العامة لشؤون المسجد الحرام والمسجد النبوي

[٢] معهد خادم الحرمين الشريفين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة - جامعة أم القرى

[٣] إدارة التشغيل والصيانة بوكالة المسجد النبوي

[٤] استشاري إدارة التشغيل والصيانة بالمسجد الحرام

ملخص البحث:

نظراً لتواكب مواسم الحج في السنوات القادمة في مواسم الصيف والتي تتميز بارتفاع درجات الحرارة والرطوبة النسبية مما قد يتسبب في ازدياد فرص الإصابة بالإجهاد الحراري. ولتقليل وقوع هذه الحوادث فإنه يلزم التحكم بفترات تشغيل نظام الرشاشات الرذاذية وذلك لتقليل الزيادة المضطردة في قيم الرطوبة النسبية. لذلك تم إجراء القياسات المناخية (درجات الحرارة والرطوبة النسبية ومن ثم حساب الإجهاد الحراري) في الساحات الجنوبية والغربية بالمسجد الحرام من خلال شبكة منتظمة الأبعاد ٢٥ x ٢٥ متر خلال شهر رمضان والحج لعام ١٤٣٧هـ وساحات المسجد النبوي لحج عام ١٤٣٧هـ، بالإضافة إلى مقارنة تلك البيانات مع بيانات المحطتين المناخية القريبة من ساحات الحرمين. ومن خلال حساب الحمل التبريدي وكفاءة الترطيب وفرص الإصابة بالإجهاد الحراري، فقد أوضحت النتائج أنه بإمكان الرشاشات الرذاذية خفض درجات حرارة الهواء الخارجي إلى أكثر من ٩ درجات مئوية في المتوسط وقد يصل حمل التبريد خلالها إلى ٥٢ كيلوات لمروحة الرذاذ الواحدة المستخدمة في ساحات المسجد الحرام مع كفاءة تبريدية تجاوزت ٥٠%، وعند مراجعة كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة بواسطة الرشاشات الرذاذية وجد أنه تم توفير أكثر من ٧٠% من الطاقة الكهربائية مقارنة مع الطاقة الكهربائية التي يحتاجها نظام التبريد الإنضغاطي (الفريون) للحصول على نفس الحمل التبريدي، مما ساعد على انخفاض نسبة انبعاث ثاني أكسيد الكربون بمقدار ٨٠%. ويدل ذلك على أن هذا النظام يساعد بشكل كبير في خفض الطاقة الكهربائية المستهلكة لتوفير الراحة الحرارية والذي يعتبر صديق للبيئة. ومن خلال نتائج الدراسة فقد تبين وجود تأثير واضح لأبواب المسجد الحرام والمسجد النبوي الشريف، حيث إن فتح هذه الأبواب يساهم بدرجة ملحوظة في تلطيف درجة الحرارة مما يقلل فرص الإصابة بالإجهاد الحراري بمحيطهما، وبالتالي يساعد في تقليل حدوث إجهاد حراري بالساحات الجنوبية والغربية بالمسجد الحرام والساحات الجنوبية بالمسجد النبوي الشريف. لذلك أوصت الدراسة بتركيب حساسات بمحيط الرشاشات الرذاذية لوقف تشغيل تلك الرشاشات عند وصول الرطوبة النسبية الى ٤٠%، حيث إن زيادة الرطوبة النسبية عن ٤٠% سيزيد الشعور بالاجهاد الحراري. كما أوصى الباحثون بضرورة التنظيف الدائم والمستمر للرشاشات الرذاذية لزيادة معدل تدفق الرذاذ، وبالتالي زيادة محيط التأثير لتلك الرشاشات الرذاذية.

الكلمات الدالة: درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، الإجهاد الحراري، الرشاشات الرذاذية، الحمل التبريدي، كفاءة الترطيب.

المقدمة:

يعتبر التبريد وتكييف الهواء في الوقت الحاضر من المجالات الحيوية التي تتوسع باضطراد مستمر ،وتتطور أساليب وأنواع أجهزة التبريد والتكييف وتم تصنيع أول جهاز تبريد من قبل العالم الإنجليزي بيركز في ١٧٩٨ م. واخترع أول تكييف كهربائي حديث من قبل ويليس هافيلاند في سيراقوس في نيويورك عام ١٩٠٢م، فقد صمم هذا الجهاز لتحسين عملية التحكم في تصنيع وحدات الطبع، واختراعه للتحكم ليس فقط في درجة الحرارة وإنما أيضًا الرطوبة، وعلى مر الزمن استخدمت مكيفات الهواء في تحسين وسائل الراحة في المنازل والسيارات وحدث توسع كبير في المبيعات السكنية في الخمسينات.

على الرغم من الاستخدام الواسع لأنظمة التبريد التبخيري لتوفير الراحة الحرارية لضيوف الرحمن في وادي منى (مخيمات الحجاج، محطات قطار المشاعر، جسر الجمرات) وكذلك ساحات المسجد الحرام والمسجد النبوي لوحظ قلة الدارسات والأبحاث المرتبطة بتقييم وتطوير تلك التطبيقات.

ومن تلك الدراسات التطبيقية الدراسة التي قام بها العامري وآخرون (٢٠٠٢) والتي تهدف إلى تقييم أداء المكيفات الصحراوية لستين خيمة من مخيمات الحجاج في أربع مناطق بودي منى خلال يومي ١١ و١٢ من شهر ذو الحجة لعام ١٤٢٢، حيث قام الباحثون بتسجيل قراءات درجة حرارة الهواء الجافة والرطبة وكذلك الرطوبة النسبية لخيام فارغة وأخرى مكتظة بالحجاج لمعرفة تأثير عدد الحجاج بالخيمة الواحدة على المحتوى الرطوبة بالخيام. واتضح من تلك الدراسة زيادة في محتوي الرطوبة في الخيام المكتظة بالحجاج ويعود ذلك بسبب ما يطرحه جسم الإنسان من رطوبة بالحيز المراد تكييفه. ولكن لوحظ على تلك الدراسة أنه لم يؤخذ في الاعتبار كمية الهواء الذي تم تبريده أي الطاقة المفقودة لكل متر مكعب من الهواء والتي يعتمد عليها قدرة المكيف على تبريد حجم معين أو حيز من الهواء لذلك قام المشاط وآخرون (٢٠٠٥) باستخدام معادلة انتقال الطاقة كدلالة فعلية على كفاءة نظام التبريد في المكيف الصحراوي لتقييم كفاءة التبريد للمكيف التبخيري ذي رقائق الخشب (القش) بسمك ٣سم والمستخدم لتوفير الراحة الحرارية لمخيمات الحجاج في وادي منى.

تتم عملية التبريد التبخيري عن طريق تلامس الهواء غير مكتمل التشبع (رطوبة منخفضة) مع الماء مباشرة مثل رذاذ الماء أو سطح مبلل مثل رقاق الخشب (القش) والوسائد المسامية (لباد) درجة حرارته مساوية لدرجة الحرارة الرطبة للهواء، وتعمل الحرارة المحسوسة للهواء على تبخير الماء مما يؤدي إلي انخفاض درجة الحرارة الجافة للهواء وارتفاع محتوى الرطوبة. وتتناسب كمية التبخير تناسبا طرديا مع مساحة السطح حيث انه كلما زادت مساحة السطح زادت معها كمية التبخير. وكذلك كلما كانت سرعة الهواء عالية زادت كمية التبخير (المشاط واخرون، ٢٠٠٥).

في عام ١٤٢٥ (تركي حبيب الله) تم اقتراح استخدام مواد بديلة لرقائق الخشب (القش) المستخدمة في المكيفات التبخيريه بوادي منى للحصول على كفاءة تبريد أعلى للهواء الخارج من تلك المكيفات وذلك باستخدام مواد بديلة متوفرة محليًا وبسعر اقتصادي مثل مادة السلدك الكرتونية وثمرة اللوف الطبيعي، حيث أوضح الباحث أن الكفاءة التبريدية باستعمال مادة السلدك الكرتونية وصل إلى ٧٦% مع تدفق للهواء ١,٧٣م٣/ث المصاحب لمعدل انتقال الطاقة الحرارية والذي وصل إلى ٢٢,٨٣ كيلوجول/ث. وعند استعمال مادة اللوف الطبيعي وجد أن اللوف المقطع المضغوط بأبعاد (٢×٢×٣×٣سم) وكثافة ١٧٥ مجم/ سم٣ أكثر المواد ملاءمة من حيث السعر وكذلك الكفاءة التبريدية التي بلغت ٩٦% وبمعدل انتقال للطاقة الحرارية وتدفق للهواء مناسبين يقدران ١٧,٨٢ كيلوجول/ث ١,٠١ م٣/ث على التوالي.

قام (A.Balabel, ٢٠١٣) وآخرون بدراسة أداء الرشاشات الرذاذية الموزعة في ساحات المسجد الحرام لتلطيف الهواء حيث ركزت الدراسة على تطوير تصميم فتحات خروج رذاذ الماء ((NOZZELمن مراوح الرذاذ وذلك بمحاكاة النظام باستخدام المعادلات الرياضية والبرامج الحاسوبية واستنتج الباحثون أنه يمكن تحسين كفاءة مراوح الرذاذ إذا تم تحسين فتحات خروج رذاذ الماء (الضباب) بحيث يتم تكسير أكثر لقطرات الماء وتوزيع أفضل لرذاذ الماء ليشمل مساحات اكبر في ساحات المسجد الحرام.

من نتائج الدراسات السابقة يتضح أهمية التبريد التبخيري في توفير الراحة الحرارية للإنسان وخصوصًا في الأماكن المفتوحة مع توفير للطاقة الكهربائية المستهلكة وانخفاض لانبعاث ثاني أكسيد الكربون مقارنة مع الأنظمة التبريدية الأخرى. ولأنه لم يتم التطرق في الدراستين السابقتين والمرتبطة بمراوح الرذاذ في ساحات المسجد الحرام إلى مدى انخفاض درجة الحرارة وارتفاع لرطوبة النسبية ركزت هذه الدراسة على رصد درجات الحرارة والرطوبة النسبية في ساحات المسجد الحرام والمسجد النبوي والمشتملة على مجموعة لمراوح الرذاذ وذلك لحساب الأداء الحراري والأثر البيئي لها.

نظم التبريد الحالية بساحات المسجد الحرام والمسجد النبوي الشريف:

تستخدم مراوح الرذاذ لتلطيف الهواء في الأماكن المفتوحة (الهواء الطلق) كماء في الشكل (١) وتعتبر من التبريد التبخيري المباشر حيث يضخ الماء تحت ضغط مرتفع بواسطة مضخة عالية الضغط (لا يقل عن ٤٢ كجم/سم٢) في أنابيب خاصة بالضغط العالي يوزع فيها فوهات متناهية الصغر بحجم (٢ إلى ١ ميكرون) يخرج منها الماء على شكل ضباب بارد (آلاف ذرات المياه الباردة) لامتصاص الطاقة الحرارية من الهواء الخارجي لخفض درجة حرارته.

شكل (١): مراوح الرذاذ في ساحات المسجد النبوي

يعتبر مشروع خادم الحرمين الشريفين لتلطيف الهواء في ساحات المسجد النبوي من أضخم مشاريع الترطيب في العالم، وبما أن مناخ المدينة المنورة حار وجاف فيعتبر هذا النظام الأمثل لترطيب الهواء الخارجي وجعله الأنسب لراحة المصلين (الوكالة، ١٤٣٧هـ)، حيث تم تركيب هذا النظام لترطيب الجو من خلال امتصاص الطاقة الحرارية في الهواء.

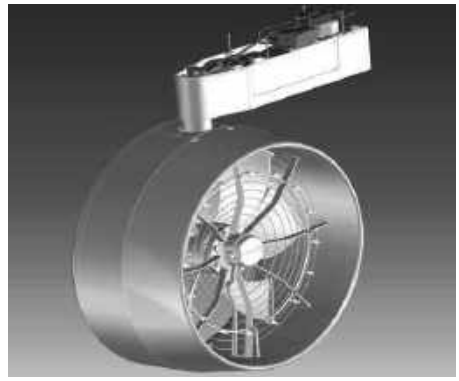
وفيما يلي الخصائص الفنية لشبكة الرذاذات بالمسجد الحرام والمسجد النبوي الشريف:-

المسجد النبوي الشريف:

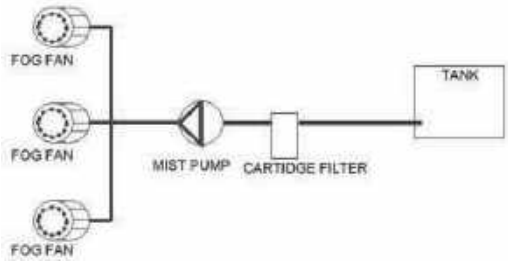
- يحتاج إلى ٢٠٠ لتر مياه معالجة في الساعة عند كل عمود.
- وتحتوي الشبكة على ٤٣٦ مروحة (مروحتان لكل عامود)،
- وعدد محطتين لتنقية المياه وأنابيب بالإضافة الى ٢١٨ وحدة ضخ عالية الضغط.
- ويتم تجهيز كميات المياه المطلوبة عن طريق محطتين محطة لتغذية الجهتين الشمالية والشرقية وتغذي ١٣٢ مظلة، ومحطة لتغذية الجهتين الغربية والجنوبية وتغذي ٨٦ مظلة تقوم بتنقية المياه من البكتيريا والأملاح وغيرها من الشوائب لضمان جودة مياه الرذاذ وذلك للحفاظ على صحة المصلين والحفاظ على عمر النظام،
- يتم تغذية شبكة الأنابيب الفرعية للمراوح عبر أنابيب ذات مقاومة للتفاعلات الكيميائية عن طريق شبكة الأنابيب الرئيسة ، وقد تم اختيار أقطار جميع الأنابيب لتوفير سرعة تدفق للمياه، كافية لمنع تراكم البكتيريا داخل الأنابيب وتزويد كل عمود بالكمية المطلوبة.
- تحتوي كل مروحة على ١٦ فتحة للرذاذ والتي صممت بطريقة تمنع تساقط الماء ،وعند إيقاف التشغيل تدور المروحة بزاوية ١٨٠ درجة خلال ٣١ ثانية ويبلغ عدد الريش ٧ ريش لكل مروحة، قطر المروحة ٨٠ سم وعرضها ٣٨ سم ويبلغ وزنها التقريبي ١٢٠ كغم وتتكون من ذراع التحريك (ماتور-جير -حساسات) ومثبته على ارتفاع تقريبي ٣,٥ م من أرضية الساحة شكل (٢).
- تتكون من عدد ٢ خزان مياه عدد ١ معدات مركز تنقية المياه و عدد ١ محطة ضخ المياه (خزان مياه معالجة محطة ضخ عالية الضغط ومحطة معالجة بالأشعة الفوق بنفسجية (لتجنب أي بكتيريا في الأنابيب)،و حساسات وصمامات ومضخة بقدرة ٢٠٠ لتر/الساعة وضغط ١٠٠ بار بالإضافة إلى المذكور أعلاه يوجد فلتر مجهري للشوائب في أسفل كل عمود يتم التحكم بنظام الترطيب من غرفة التحكم الرئيسية في المواقف .

المسجد الحرام:

- تتكون المحطة من خزان لحفظ الماء وفلاتر لتنقية الماء قبل دخوله إلى المضخات ذات ضغط عالي والتي تستخدم لنقل الماء من المحطة إلى مراوح الرذاذ الموزعة في ساحات المسجد الحرام من خلال شبكة مواسير ممتدة في الساحات (شكل ٣).
- المروحة المستخدمة من شركة (Schaefer) ذات قطر ٣٦ بوصة وسعة (١١٠٠ CFM) وعدداها ٢٢٨ وتشمل على مخارج ماء الترطيب (رشاشات) موزعة على محيط القطر الخارجي للمروحة وتقوم المروحة بالدوران على زاوية (١٨٠ درجة).



شكل (٢) نوع المروحة المستخدمة في لترطيب ساحات المسجد النبوي.



شكل (٣) مخطط تقريبي يوضح مكونات محطة تغذي مياه مراوح الرذاذ بساحات المسجد الحرام.

أهداف البحث:

قام الفريق البحثي بإجراء الدراسة تحت رعاية معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة، جامعة أم القرى، مكة المكرمة والرئاسة العامة لشئون المسجد الحرام والمسجد النبوي، وفيما يلي الأهداف المرجوة من هذه الدراسة:-

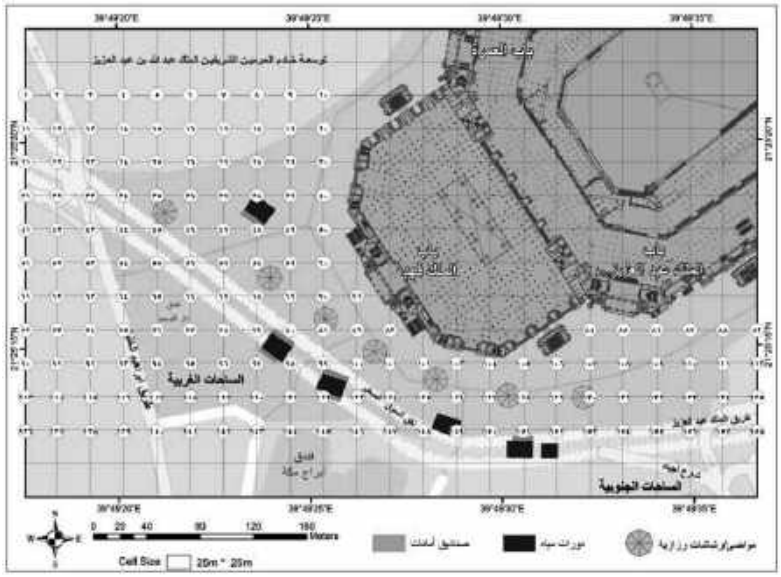
- دراسة الأداء الحراري والأثر البيئي للرشاشات الرذاذية (التبريد التبخيري) المستخدمة لتلطيف الهواء في ساحات المسجد الحرام والمسجد النبوي حيث إن الدراسات السابقة لم تتطرق إلى أهمية نظام مراوح الرذاذ في خفض درجات الحرارة ورفع مستوى الرطوبة النسبية في الهواء الخارجي.
- رصد درجات الحرارة والرطوبة النسبية في ساحات المسجد الحرام والمسجد النبوي قبل وأثناء تشغيل الرشاشات الرذاذية لمعرفة أداءها الحراري.
- حساب كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة وكذلك نسبة انخفاض انبعاث ثاني أكسيد الكربون في الهواء عند استخدام هذا النظام ومقارنتها مع نظام التبريد الانضغاطي (الفريون) لمعرفة أثرها البيئي.
- اقتراح التوصيات الممكنة للمساهمة في رفع كفاءة مراوح الرذاذ.
- وضع التوصيات اللازمة للدراسات المستقبلية.

المنهجية والطرق البحثية:

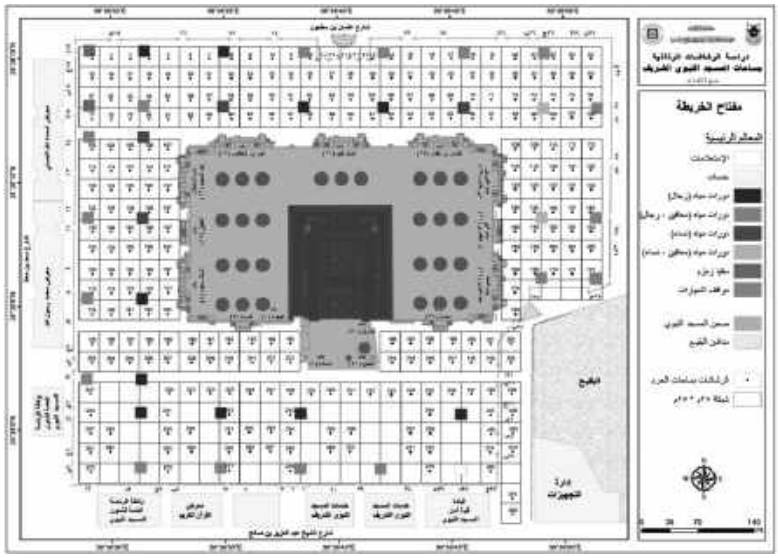
لتحقيق أهداف الدراسة المذكورة سابقاً، تم إجراء الدراسة الميدانية وتجميع البيانات الأساسية المتعلقة بالبحث قيد الدراسة للساحات بالمسجد الحرام والنبوي الشريف، وتم تحديد خطوات العمل الميداني بكل دقة كما يلي:-

- تحديد مرافق الخدمة الأساسية والبنية التحتية وتوزيع الرشاشات الرذاذية بالساحات.

- جمع المعلومات المتعلقة بكيفية عمل أنظمة التبريد التبخيري بمراوح الرذاذ وطرق الاستفادة منها وكذلك حصر عددها والاطلاع عل طرق تشغيلها في المسجد الحرام والمسجد النبوي.
- إجراء الدراسات الميدانية بالمسجد الحرام خلال الفترة من (٢٣ – ٢٨) رمضان ١٤٣٧هـ خلال مختلف أوقات اليوم وذلك للتطرق لمدى اختلاف تأثير الرشاشات الرذاذية على مدار اليوم وفترات الذروة (صلاة العشاء والتراويح والتهجد).
- تم إجراء الدراسات الميدانية بالمسجد الحرام خلال الفترة من (٤ – ١٢) ذو الحجة ١٤٣٧هـ خلال مختلف أوقات اليوم وذلك للتطرق لمدى اختلاف تأثير الرشاشات الرذاذية على مدار اليوم وفترات الذروة.
- تم إجراء نقاط القياس ميدانياً من خلال ١٥٨ نقطة قياس موزعة على محيط الرشاشات الرذاذية بالساحات الغربية والجنوبية للحرم المكي الشريف (شكل ٤)، حيث تم إجراء المسح الميداني على هيئة شبكة منتظمة الأبعاد ٢٥*٢٥ متر لرصد درجة الحرارة والرطوبة النسبية باستخدام جهاز EXTECH موديل رقم ٤٢٢٧٠.
- تم إجراء الدراسات الميدانية خلال بالمسجد النبوي الفترة من ١-٨ ذو الحجة ١٤٣٧هـ خلال مختلف أوقات اليوم وذلك للتطرق لمدى اختلاف تأثير الرشاشات الرذاذية على مدار اليوم وفترات الذروة (أوقات الصلاة).
- تم إجراء نقاط القياس ميدانيًا من خلال ٤٤٧ نقطة قياس موزعة على جميع ساحات المسجد النبوي الشريف (شكل ٥) حيث تم إجراء المسح الميداني على هيئة شبكة منتظمة الأبعاد ٢٥*٢٥ متر بمحيط الساحات الأربعة بالمسجد النبوي.



شكل (٤): نقاط القياس بساحات المسجد الحرام.



شكل (٥): نقاط القياس بساحات المسجد النبوي الشريف.

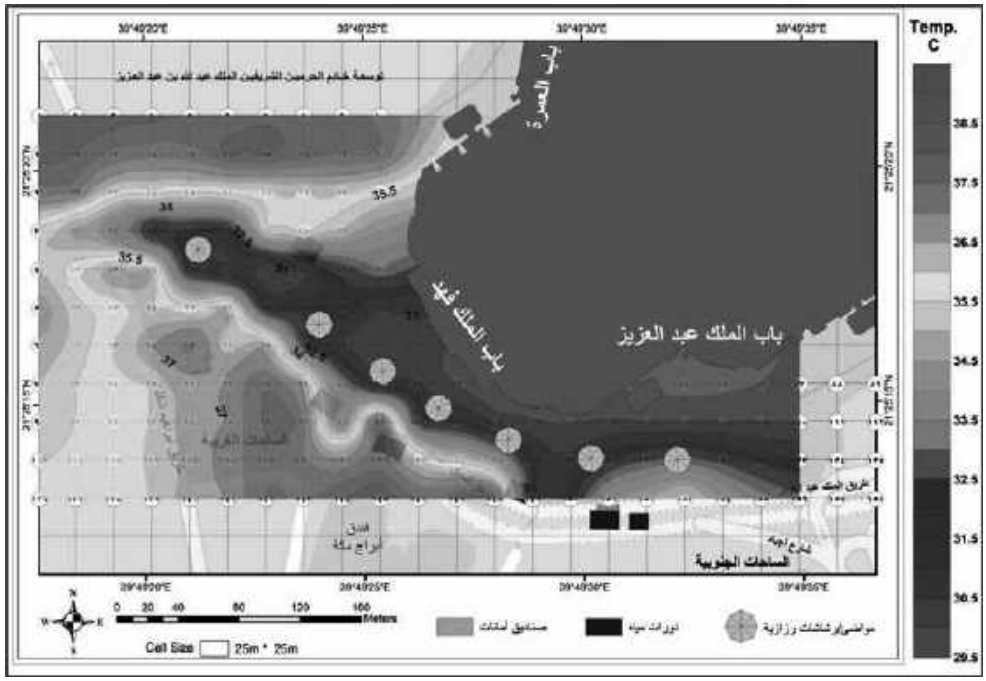
النتائج:

- **ساحات المسجد الحرام خلال شهر رمضان (٢٨-٢٣) لعام ١٤٣٧هـ**

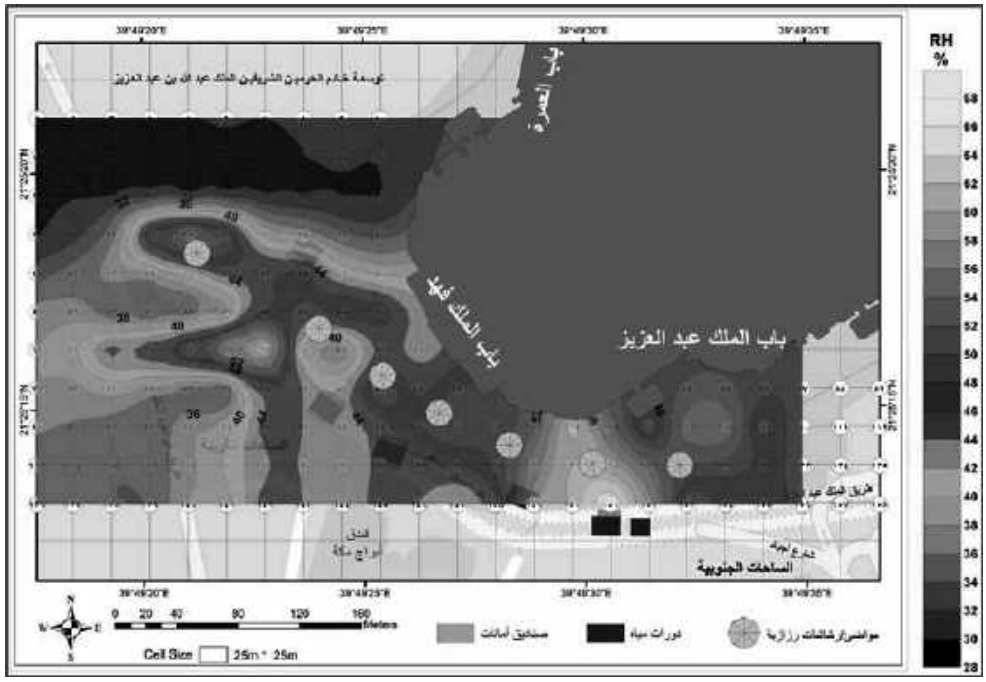
جدول (١) يوضح درجات الحرارة والرطوبة النسبية التي تم رصدها بالساحات الجنوبية والغربية للمسجد الحرام خلال (٢٨-٢٣) رمضان لعام ١٤٣٧هـ، وتم استعراضها بالخرائط الكنتورية لتوزيع درجة الحرارة والرطوبة النسبية كما هو موضح في الإشكال (٦)، (٧) و(٨)؛ ولقد لوحظ أن متوسط فرق درجات الحرارة خلال تلك الفترة بين مجموع درجات الحرارة العظمى والتي تم قراءتها في المحيط الخارجي لمواقع الرشاشات الرذاذية ومجموع متوسط درجات الحرارة الصغرى حوالي ٨,٣٥ درجة مئوية، حيث انخفضت درجة الحرارة من ٣٩ الى ٣٠,٥ درجة مئوية بينما ارتفعت الرطوبة النسبية من ٢٩-٦٦% ليوم ٢٦ رمضان نتيجة لتشغيل الرشاشات الرذاذية.

جدول (١): درجات الحرارة والرطوبة النسبية خلال شهر رمضان ١٤٣٧هـ بساحات المسجد الحرام

م	اليوم	وقت بداية القياس	درجة الحرارة °C		الرطوبة النسبية %	
			الصغرى	العظمى	الصغرى	العظمى
١	٢٣ رمضان ١٤٣٧هـ	١٧:٠٠	35.50	38.90	14.40	29.00
٢	٢٤ رمضان ١٤٣٧هـ	١٧:٠٠	29.50	42.30	16.50	37.60
٣	٢٥ رمضان ١٤٣٧هـ	٢١:٣٠	28.50	38.50	18.30	54.20
٤	٢٦ رمضان ١٤٣٧هـ	٢١:٣٠	30.50	39.00	29.00	66.00
٥	٢٧ رمضان ١٤٣٧هـ	٢١:٣٠	28.00	37.20	25.50	52.00
٦	٢٨ رمضان ١٤٣٧هـ	٢٣:٤٠	27.70	33.90	35.00	50.20



شكل (٦) التوزيع الكنتوري لدرجة الحرارة، ٢٦ رمضان ١٤٣٧هـ بساحات المسجد الحرام



شكل (٧) التوزيع الكنتوري للرطوبة النسبية، ٢٦ رمضان ١٤٣٧هـ بساحات المسجد الحرام

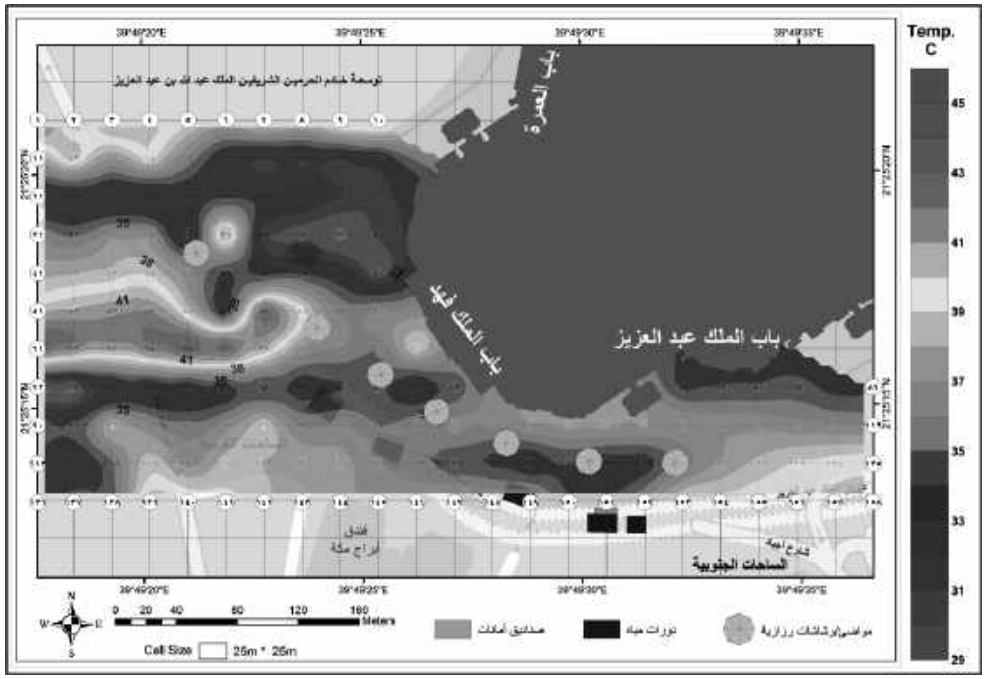
- **ساحات المسجد الحرام خلال شهرذي الحجة (١٢-٤) لعام ١٤٣٧هـ:**

لوحظ أن متوسط فرق درجات الحرارة خلال تلك الفترة بين مجموع درجات الحرارة العظمى (جدول ٢) والتي تم قراءتها في المحيط الخارجي لمواقع الرشاشات الرذاذية ومجموع درجات الحرارة الصغرى حوالي ٩ درجة مئوية، وتم استعراضها بالخرائط الكنتورية (شكل

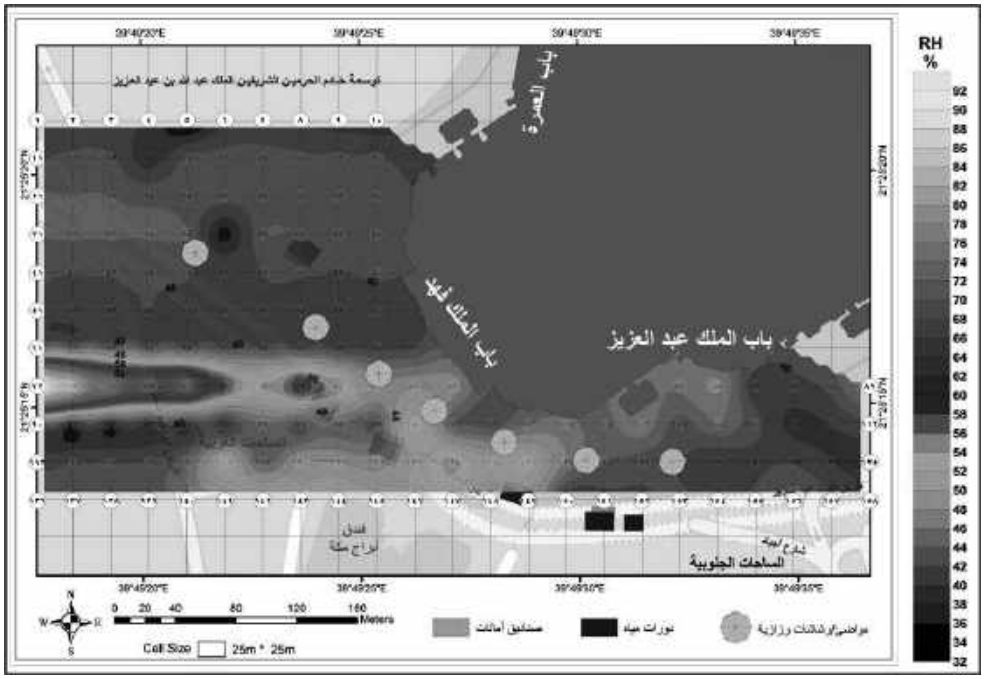
٨) حيث تم خفض دراجة الحرارة في ٤ من ذي الحجة ٤٥,٤٠ -٢٨,٦٠ درجة مئوية بينما ارتفعت الرطوبة النسبية من ٣١,٦٠ -٩٩,٩٠% (شكل ٩).

جدول (٢): درجات الحرارة والرطوبة النسبية خلال شهر ذي الحجة ١٤٣٧هـ بساحات المسجد الحرام

م	اليوم	وقت بداية القياس	درجة الحرارة °C		الرطوبة النسبية %	
			الصغرى	العظمى	الصغرى	العظمى
١	٠٤ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	١٠:٣٠	28.60	45.40	31.60	99.90
٢	٠٥ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	١٦:٠٠	31.30	35.80	36.10	54.80
٣	٠٦ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	١٨:٠٠	28.30	33.10	28.80	62.90
٤	٠٧ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	٢٠:٣٠	24.00	33.00	21.80	46.90
٥	٠٩ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	١٩:٠٠	29.50	34.50	22.20	48.10
٦	١١ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	٠٧:٠٠	20.70	31.80	36.20	50.10
٧	١٢ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	١٠:٣٠	31.00	38.00	29.00	46.80



شكل (٨) التوزيع الكنتوري لدرجة الحرارة، ٤ ذوالحجة ١٤٣٧هـ بساحات المسجد الحرام



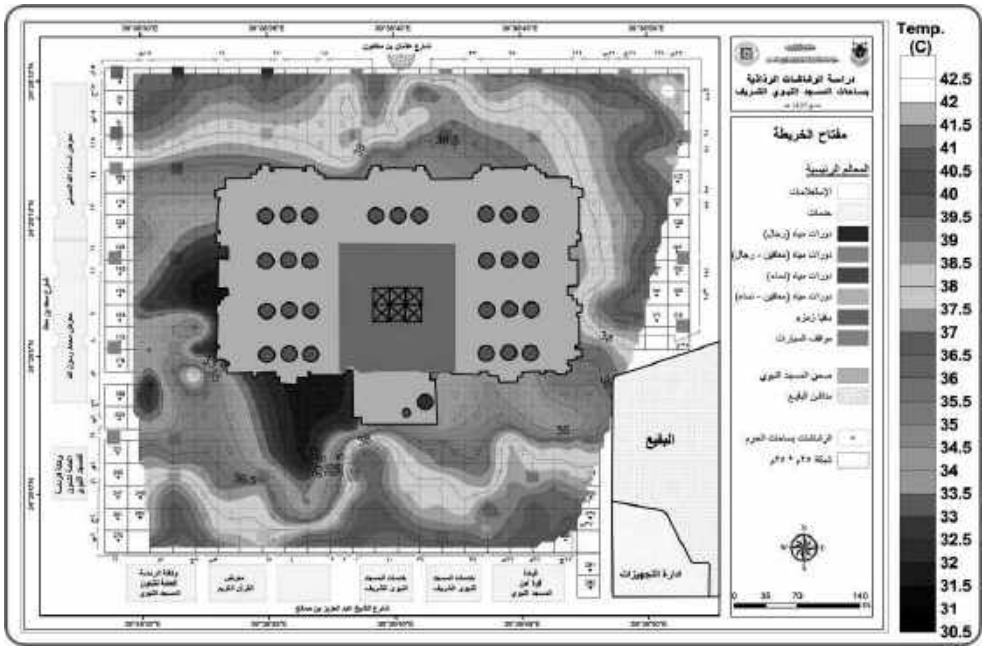
شكل (٩) التوزيع الكنتوري للرطوبة النسبية، ٤ ذوالحجة ١٤٣٧هـ بساحات المسجد الحرام

- **ساحات المسجد النبوي الشريف خلال شهر ذي الحجة (٨-١) لعام ١٤٣٧هـ:**

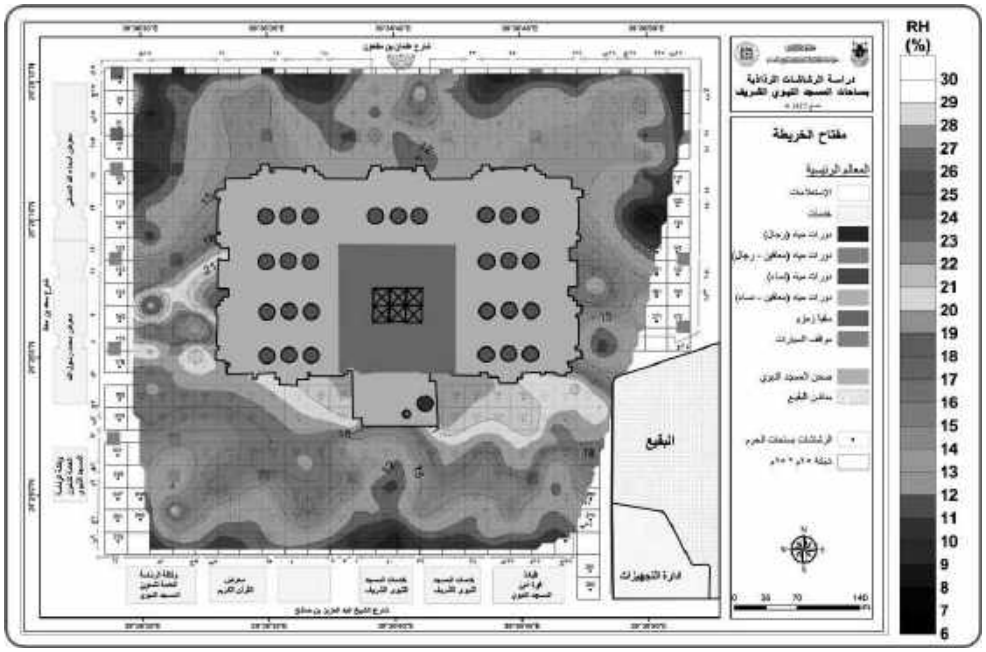
جدول (٣) يوضح درجات الحرارة والرطوبة النسبية التي تم رصدها بساحات المسجد النبوي الشريف خلال ١-٨ ذي الحجة لعام ١٤٣٧هـ، ولقد لوحظ أن متوسط فرق درجات الحرارة خلال تلك الفترة بين مجموع درجات الحرارة العظمى والتي تم قراءتها من جوار المحيط الخارجي لمواقع مراوح الرذاذ ومجموع درجات الحرارة الصغرى التي تم تسجيلها بالقرب من الرشاشات الرذاذية حوالي ٩ درجات مئوية، وتم عرض توزيع درجات الحرارة بالخرائط الكنتورية (شكل ١٠) حيث تم خفض دراجة الحرارة من ٤٢,٥٠ -٣٠,٧٠ درجة مئوية، في حين ارتفعت الرطوبة النسبية من ٦,٥-٢٩,٧٠% (شكل ١١) في الخامس من ذي الحجة.

جدول (٣): درجات الحرارة والرطوبة النسبية خلال شهر ذوالحجة ١٤٣٧هـ بساحات المسجد النبوي الشريف

م	اليوم	وقت بداية القياس	درجة الحرارة °C		الرطوبة النسبية %	
			العظمى	الصغرى	العظمى	الصغرى
١	١ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	١٣:٠٠	44.90	39.90	19.20	15.20
٢	٢ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	١٥:٠٠	40.70	31.90	28.90	8.00
٣	٣ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	١٦:٤٠	40.30	35.20	15.30	7.20
٤	٤ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	١٩:١٥	40.10	31.40	28.80	8.20
٥	٥ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	٢٠:٤٠	42.50	30.70	29.70	6.50
٦	٦ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	١٢:٠٠	46.10	32.70	18.00	5.90
٧	٧ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	٢٠:٣٠	38.40	31.20	32.10	12.10
٨	٨ ذو الحجة ١٤٣٧هـ	١٦:١٥	42.70	33.80	12.20	3.10



شكل (١٠) التوزيع الكنتوري لدرجة الحرارة، ٥ ذوالحجة ١٤٣٧هـ بساحات المسجد النبوي الشريف



شكل (١١) التوزيع الكنتوري للرطوبة النسبية، ٥ ذوالحجة ١٤٣٧هـ بساحات المسجد النبوي الشريف

وللتعرف على الخصائص الفنية لشبكة الرشاشات الرذاذية بساحات المسجد الحرام والمسجد النبوي الشريف، يتطلب حساب كل من الحمل التبريدي (Qc) وكفاءة مراوح الترطيب ومعامل الأداء واستهلاك الطاقة الكهربائية (Ec) وتكلفة الكهرباء المستهلكة وانبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون:

جدول (٤): المعادلات الرياضية المستخدمة لحساب العوامل المرتبطة بكفاءة النظام التبريدي

سعة الحمل التبريدي التبخيري المباشر Q_c:	كفاءة مراوح الترطيب (ηH):	معامل الأداء (COP) :
$Qc = CpPV(Ti - To)$	$\eta H = \frac{(Ti - To)}{Ti - To(RH = 100\%)} * 100$	$COP = \frac{Qc}{P}$
Q_c : حمل التبريد (kW) C_p : الحرارة النوعية عند ثبوت الضغط $(KJ/KG\,K)$ p : كثافة الهواء (kg/m^3) V : معدل تدفق الهواء الخارج (m^3/s) T_i : درجة حرارة الهواء عند الدخول (^oc) T_o : درجة حرارة الهواء عند الخروج (^oc)	η_H : كفاءة الترطيب (%) $T_{o\,(RH=100\%)}$: درجة حرارة الهواء عند الخروج ($^\circ$c) في حالة التشبع عند RH = ١٠٠ %	P : مجموع الحمل الكهربي لمحرك مروحة الترطيب والحمل الكهربي لمضخة المياه (kW)
استهلاك الطاقة الكهربائية (E_c):	تكلفة الكهرباء المستهلكة C_C :	انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون (C_{CO2} $_{emission}$)
$Ec = P * t$	$Cc = E * Etariff$	$Cco_2emission = Ec * f_{co2}$
E_c : (kWh) t : عدد ساعات التشغيل (h)	E_{traiff} تكلفة الوحدة من الكهرباء (SAR/kWh)	f_{CO2} (kg/kWh) معامل انبعاث ثاني أكسيد الكربون الناتج من الكهرباء

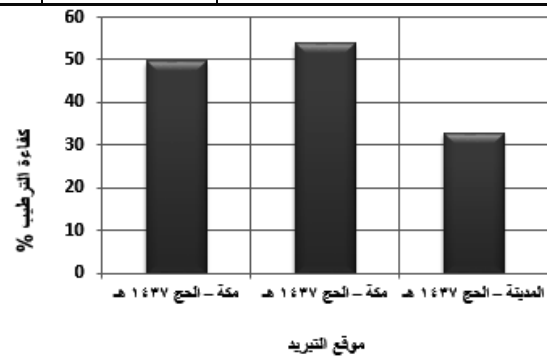
مناقشة النتائج:

تم حساب الحمل التبريدي لمراوح الرشاشات الرذاذية (جدول ٥) حيث تجاوز ٥٠ كيلو وات لمروحة الرذاذ الواحدة المستخدمة في ساحات المسجد الحرام مع معدل تدفق للمروحة الواحدة ٥,١٩ م٣/ث وعلى الرغم من أن فرق درجات الحرارة المسجل في ساحات المسجد النبوي أكبر من فرق درجات الحرارة التي تم رصدها في ساحات المسجد الحرام، نجد أن حمل التبريد لم يتجاوز ٣٩ كيلو وات لمروحه الرذاذ الواحدة المستخدمة في ساحات المسجد النبوي، ويعود ذلك بسبب انخفاض معدل تدفق الهواء للمروحة الواحدة حيث بلغ ٣,٧٧ م٣/ث (شكل ١٢).

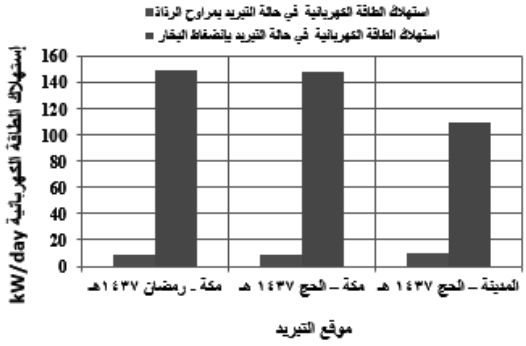
وبإيجاد كفاءة الترطيب لمراوح الرشاشات الرذاذية بساحات المسجد الحرام والمسجد النبوي (شكل ١٣) حيث إن كفاءة التبريد لمراوح الرذاذ في ساحات المسجد الحرام تجاوزت ٥٠% بينما في المسجد النبوي كانت حوالي ٣٣% ويرجع انخفاضها في ساحات المسجد النبوي بسبب انخفاض الرطوبة النسبية في الجو الخارجي حيث إنه لم تتجاوز ٧% وأن مراوح الرذاذ أصغر حجمًا وأقل تدفق للهواء والماء من المراوح المستخدمة في ساحات المسجد الحرام.

جدول (٥): عدد المراوح و معدل تدفق الهواء لها، حمل التبريد و الحمل الكهربائي

الموقع	عدد المراوح	معدل تدفق الهواء للمروحة الواحدة	حمل التبريد Q_c	الحمل الكهربي P
	العدد	(m^3/s)	(kW)	(kW)
مكة –رمضان١٤٣٧ هـ	٢٢٨	٥,١٩	٥٢,١٢	٠,٩٣
مكة – الحج ١٤٣٧ هـ	٢٢٨	٥,١٩	٥١,٩٣	٠,٩٣
المدينة – الحج ١٤٣٧ هـ	٤٣٦	٣,٧٧	٣٨,٧٢	١



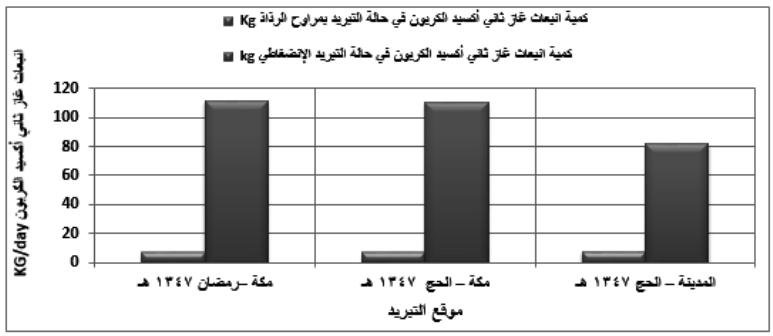
شكل (١٢): كفاءة الترطيب في مواقع بالمسجد الحرام والمسجد النبوي



شكل (١٣): مقارنة بين استهلاك الطاقة الكهربائية في حالة التبريد بنظام الرشاشات الرذاذية والانضغاط (الفريون)

الشكل (١٣) يقارن بين استهلاك الطاقة الكهربائية في حالة التبريد بنظام مراوح الرذاذ و الانضغاط (الفريون) لنفس الحمل التبريدي، حيث تم حساب معدل استهلاك الطاقة الكهربائية في حالة استخدام نظام التبريد بالانضغاط بمعرفة قيمة معامل الأداء للمبردات الانضغاطية (الفريون) للمناطق الحارة في السعودية والذي قدر بحوالي ٣,٥ في دراسات سابقة (Abdulrahman Alharbi et al ٢٠١٤). وبتطبيق معادلة معامل الأداء (جدول ٥) وجد أن معدل استهلاك الطاقة الكهربائية في حالة التبريد بالإنضغاط أعلى من التبريد بواسطة مراوح الرذاذ وبذلك تكون مراوح الرذاذ أقل استهلاكًا للطاقة الكهربائية وعلى سبيل التوضيح في حالة موقع (مكة – رمضان ١٤٣٧ هـ) نلاحظ أن قيمة الاستهلاك كانت ٩,٣ كيلو وات/اليوم الواحد لمراوح الرذاذ بينما في حالة استخدام نظام التبريد بالإنضغاط فمعدل الاستهلاك للطاقة الكهربائية يصل إلى ١٤٩ كيلو وات / اليوم خلال ١٠ ساعات تشغيل في اليوم الواحد.

يوضح الشكل (١٤) أن استخدام نظام الرشاشات الرذاذية يقلل من نسبة انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون وكذلك يحسن من الاحتباس الحراري، وإذا أخذنا في الاعتبار أن معامل انبعاث الكهرباء المولدة في المملكة العربية السعودية f CO٢ (kg/kWh) = ٠,٧٥ ونلاحظ أن نسبة انخفاض انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون وصلت إلى ٩٤ %، مقارنته مع نظام التبريد بالانضغاط لنفس حمل التبريد.



شكل (١٤): مقارنة في انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون بين نظام التبريد بمراوح الرذاذ ونظام التبريد الانضغاط خلال اليوم الواحد

الخلاصة والتوصيات:

الخلاصة:

يمكن إيجاز أهم الاستنتاجات التي تم الحصول عليها ما يلي:

- تراوح متوسط انخفاض درجة حرارة الهواء في ساحات المسجد الحرام أثناء تشغيل الرشاشات الرذاذية حوالي ٨,٤ درجة مئوية خلال شهر رمضان و٩ درجة مئوية في موسم الحج، بينما تم رصد أعلى مقدار للخفض درجة الحرارة بساحات المسجد النبوي لموسم الحج حيث بلغت ١٢ درجة مئوية.
- ارتفاع الرطوبة النسبية أثناء تشغيل الرشاشات الرذاذية بساحات المسجد الحرام حيث تجاوزت ٦٦% في بعض الأوقات خلال موسم رمضان ١٤٣٧هـ ووصلت إلى ٩٩% في ٤ ذي الحجة ١٤٣٧هـ مما يوثر سلبًا على مرتادي المكان بسبب عدم الشعور بالراحة الحرارية، بينما لم تتجاوز الرطوبة النسبية ٣٢% أثناء تشغيل الرشاشات الرذاذية بساحات المسجد النبوي لموسم الحج وذلك بسبب انخفاض الرطوبة النسبية (٧%).
- حمل التبريد لمراوح الرذاذ وصل إلى ٥٢ كيلو وات للمروحة الواحدة في ساحات المسجد الحرام مع كفاءة تبريدية تجاوزت ٥٠%، بينما حمل التبريد وكفاءة الترطيب لمراوح الرذاذ في المسجد النبوي أقل من ذلك، حيث وصل حمل التبريد إلى ٣٩ كيلو وات للمروحة الواحدة وكفاءة الترطيب لم تتجاوز ٣٣%. ويعود سبب ذلك إلى أن كمية تدفق الهواء ورذاذ الماء أقل من كمية تدفق الهواء ورذاذ الماء لمراوح الرذاذ المستخدمة في ساحات المسجد الحرام.
- في أنظمة التبريد التبخيري (نظام الترطيب بالرشاشات الرذاذية) يقتصر استهلاك الكهرباء على تشغيل المراوح ومضخات المياه لذلك نجد أن كميه الطاقة المستهلكة اقل بكثير مقارنة مع نظام التبريد الانضغاطي (فريون) حيث بلغت نسبة توفير الطاقة باستخدام مراوح الرذاذ حوالي ٩٣%.
- انخفاض استهلاك الطاقة الكهربائية عند استخدام الرشاشات الرذاذية ساعد كثيرًا في انخفاض التكلفة التشغيلية وكذالك انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون، حيث إن نسبة انبعاث ثاني أكسيد الكربون من الرشاشات الرذاذية لم تتجاوز ٧ كجم/اليوم بينما يصل إلى ١٣٠ كجم/اليوم لنظام التبريد الانضغاطي (الفريون) لنفس حمل التبريد.

اهم نتائج البحث:

١. قدرة نظام التبريد ألتبخيري (الرشاشات الرذاذية) على توفير الطاقة الكهرباء، لذلك يحتاج نظام الرشاشات الرذاذية لمزيد من الدراسات الأخرى لتحسين ورفع كفاءة التبريد والترطيب.

٢. تركيب حساسات بمحيط الرشاشات الرذاذية المستخدمة في ساحات المسجد الحرام لوقف تشغيلها عند وصول الرطوبة النسبية إلى ٤٠% لأن زيادة الرطوبة النسبية عن ٤٠% يزيد الشعور بالإجهاد الحراري.

٣. زيادة الرشاشات الرذاذية بساحات المسجد الحرام لأن أبعاد تأثيرها لا يزيد عن ٢٠*٢٠ متر.

٤. تصميم نظام للتخلص من الأملاح للمياه المغذية لنظام الرشاشات الرذاذية بالمسجد الحرام كما هو متبع بالرشاشات في ساحات المسجد النبوي بالمدينة المنورة (وجود الأملاح في الماء الداخل يؤدى إلى تأكل شبكة توصيل الرشاشات مما يؤدى إلى نقص العمر الافتراضي لها).

٥. استخدام مراوح رذاذ ذات تدفق هواء ورذاذ ماء أعلى في ساحات المسجد النبوي وذلك لرفع كفاءة الترطيب.

التوصيات:

- قدرة نظام التبريد التبخيري (الرشاشات الرذاذية) على توفير الطاقة الكهرباء، لذلك يحتاج نظام الرشاشات الرذاذية لمزيد من الدراسات الأخرى لتحسين ورفع كفاءة التبريد والترطيب.

- تركيب حساسات بمحيط الرشاشات الرذاذية المستخدمة في ساحات المسجد الحرام لوقف تشغيلها عند وصول الرطوبة النسبية إلى ٤٠% لأن زيادة الرطوبة النسبية عن ٤٠% يزيد الشعور بالإجهاد الحراري.
- زيادة الرشاشات الرذاذية بساحات المسجد الحرام لأن أبعاد تأثيرها لا يزيد عن ٢٠*٢٠ متر.
- تصميم نظام للتخلص من الأملاح للمياه المغذية لنظام الرشاشات الرذاذية بالمسجد الحرام كما هو متبع بالرشاشات في ساحات المسجد النبوي بالمدينة المنورة (وجود الأملاح في الماء الداخل يؤدى إلى تأكل شبكة توصيل الرشاشات مما يؤدى إلى نقص العمر الافتراضي لها).
- استخدام مراوح رذاذ ذات تدفق هواء ورذاذ ماء أعلى في ساحات المسجد النبوي وذلك لرفع كفاءة الترطيب.

المراجع :

١. هيئة تنظيم الكهرباء والإنتاج المزدوج، نشاطات الهيئة وانجازاتها خلال السنة المالية ٢٠١٣م

٢. عبدالوهاب مشاط، احمد مكي وتركي حبيب الله تقييم كفاءة المكيفات الصحراوية بتطبيق معادلة الكفاءة التبريدية ومعادلة انتقال الطاقة الحرارية،٢٠٠٥ كلية علوم الأرصاد والبيئة وزراعة المناطق الجافة، جامعة الملك عبدالعزيز

٣. العامري، رحيم كاظم وعلي عبد الكريم محمد علي و تركي محمد حبيب الله (٢٠٠٢) تقييم وتطوير أداء المكيفات الصحراوية (التبخيرية) في المشاعر المقدسة (بمنطقة منى) .تقرير - معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج، جامعة أم القرى، مكة المكرمة، المملكة العربية السعودية.

٤. تركي حبيب الله، استخدام مواد بديلة لرقاق الخشب (القش) تزيد من كفاءة المكيف الصحراوي ٢٠٠٤. معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة.

٥. تركي حبيب الله، عاطف محمد وعصام مرسي، تأثير الرشاشات الرذاذية على جودة الهواء بساحات الحرم المكي الشريف خلال شهر رمضان ١٤٣٣هـ معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة.

٦. وكالة المسجد النبوي بالمدينة المنورة إدارة التشغيل والصيانة ١٤٣٧هـ

٧. Fules, E.R.F. energy from fossilized organic materials.2013, available from: http://home.clara.net/darvill/altenerg/fossil.htm#intro

٨. Rabah Boukhanouf, Abdulrahamn Alharbi, Hatem Ibrahim and Meryem Kanzari. Investigation of Sub-Wet Bulb Temperature evaporative cooler for Buildings. Sustainable Building Conference 2013, Coventry University.

٩. ASHRAE (1984) ASHRAE Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Condition. Atlanta, GA.

١٠. A. Alharbi, R. boukhanouf, T. Habeebullah, H. Ibrahim, Thermal performance and environmental Assessment of evaporative Cooling Systems: Case of Mina Valley, Saudi Arabia. International Journal of Civil, Architectural and Construction Engineering Vol:8 No.5,2014

١١. A. Balabel, M. S. Youssef, M. Faizan and T. K. Kassem, On the Performance of the Spray Fans used in HARAM for Improving Climate Conditions, International Journal of Scientific & Engineering Research, volume 4, Issue 11, November-2013.