مجلة جامعة الملك سعود ، م١٨ ، العمارة والتخطيط (٢) ، ص ص ٣٣٣- ٣٥٧ الرياض (١٤٢٦هـ / ٢٠٠٥م)

دراسة عملية للأداء الحراري لأبراج التبريد بمنطقة الجوف

ناصر بن عبدالرحمن الحمدي

أستاذ مشارك بقسم العمارة و علوم البناء، كلية العمارة و التخطيط

جامعة الملك سعود الرياض، المملكة العربية السعودية

(قدم للنشر في ١٠ /١ /١٤٢١ هـ ؛ وقبل للنشر في ٢٣ / ١٠ /١٤٢٥ هـ)

ملخص البحث. تعرض هذه الدراسة التجريبية فاعلية أبراج التبريد الطبيعي و توضيح أدائها في تبريد الفراغات الداخلية في البيئة الصحراوية. أُجريت هذه التجربة خلال فترة الصيف ٢٦ ربيع الثاني –١ جماد الأول ١٤٢٠ هـ (الموافق ٨–١٢ أغسطس ١٩٩٩ م) ، في فندق النزل بمدينة سكاكا الصحراوية بمنطقة الجوف بالمملكة العربية السعودية. تهدفُ الدراسة إلى معرفة فاعلية أداء هذه الأبراج من حيث تحديد معدل تدفق الهواء الخارج من برج التبريد الطبيعي exit flow rate و سرعة الهواء بداخله air speed inside tower ، و معدل التبريد الناتج rate of cooling energy و معامل الأداء له the coefficient of performance و فاعلية ترطيب الهواء فيه humidifying efficiency.

أظهرت نتائج الدراسة أن أبراج التبريد ذات فاعلية جيدة و متميزة في أدائها. وقد أثبتت الدراسة إمكانية تبريد الفراغات الداخلية بواسطة أبراج التبريد كما أنها تجعل بيئة فراغ الفناء الداخلي و الغرف المحيطة بالفناء في نطاق الراحة الحرارية للإنسان. فقد وجد

بالتجربة التطبيقية أن درجة حرارة الهواء الخارج من البرج و درجة حرارة الهواء بالفناء الداخلي تقل عن درجة حرارة الهواء الخارجي بحوالي ١٧ ، ١٥مْ، على التوالي، تحت الظروف البيئية وقت التجربة. و قد تم توزيع استبانة لرصد انطباع بعض الأشخاص المستعملين للمبنى و عددهم ٤٣ شخصاً، و قد كان الانطباع العام هو أن البيئة الحرارية للفناء الداخلي كانت مريحة تماماً في الفترات المسائية خلال فصل الصيف الحار. ويختتم البحث بعرض بعض التوصيات المعمارية المناسبة لتطبيق أبراج التبريد الطبيعي في أفنية المباني في المناطق الصحراوية.

مقدمة

في الآونة الأخيرة، يُستخدم في الأوساط العلمية مصطلح أنظمة التبريد السلبي أو أنظمة التبريد غير الميكانيكية أو Passive cooling systems. يُراد بها وصف منظومات تبريد طبيعية و التي تعتمد على بعض الظواهر الطبيعية لتبريد الهواء. تتميز الأنظمة الطبيعية بمعامل أداء Coefficient of Performance "C.O.P" أعلى و عادة ما يصل إلى خمس أضعاف معامل كفاءة أداء الأنظمة الميكانيكية و الذي يحسب بقسمة كمية طاقة التبريد الناتجة من جهاز التبريد على كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة في الجهاز نفسه [١ ، ص ١].

عرف الإنسان منذ زمن بعض الظواهر الطبيعية من حوله و استفاد منها لأجل تحسين البيئة الداخلية لمسكنه و تلطيف جو مسكنه و خاصة في البيئات الحارة الجافة. و تبرز العمارة التقليدية في المناطق الصحراوية خير دليل على الاستفادة من الظواهر الطبيعية و بفاعلية عالية. فقد طور الإنسان تقنيات مبسطة ومتعددة بغرض التحكم في ظروف البيئة المناخية القاسية من شدة حرارة الصيف و لهيب الشمس و جفاف الرياح. و من بين هذه التقنيات ، استخدم ملاقف الهواء أو ما يسمى في اللغة الفارسية "البادجير" أو "الكاشتيل" أو ما يسمى "مونغ" أو "هواء- داني" في اللغة الباكستانية [٢ ، ص ١٢٧]، لتهوية وتبريد

الفراغات الداخلية للمباني في المناطق الحارة الجافة والرطبة على حد سواء والتي انتشرت في بلاد عديدة وبالأخص دول الخليج ومصر والعراق وإيران و باكستان و أفغانستان. ومن أقدم الأمثلة على توظيف أبراج التهوية ما وجد مرسوماً على ورق البردي في مصر قبل ١٥٠٠ عام من الميلاد من تصور لمسكن يعلوه برج هواء، وكذلك ما وجد من تراث الهنود الحمر في دولة البيرو في أمريكا الجنوبية قبل ٢٠٠ عام من الميلاد من تجسيم لمنزل من ثلاثة أدوار تعلوه عدة أبراج هواء [٣، ص٩].

وقد ظهرت في العمارة الإسلامية نماذج مطورة من أبراج الهواء التقليدية. ففي مصر نجد أن برج الهواء عبارة عن جزء من المبنى ذو مقطع مستطيل يرتفع رأسياً عن المبنى بفتحة واحدة موجهة إلى الشمال الغربي وذلك لاستقبال تيار الهواء البارد القادم من ذلك الاتجاه ، و يرتبط وجود برج الهواء بوجود فناء مكشوف أو قاعة مسقوفة بسقف مرتفع عن سطح المبنى لتوفير مخرج للهواء [٤ ، ص ٨]. وفي الباكستان نجد أن أبراج الهواء تكثر في مدينة حيدرأباد و تشبه في نظامها تلك المنتشرة في مصر إلا أن البرج ذو مقطع مربع يقابل الرياح المفضلة فيدخل من فتحاته ثم ينساب إلى الفراغ الداخلي و يخرج من خلال فتحات النوافذ و الأبواب خارج المبنى. و إذا صارت حركة الرياح معاكسة لفتحة البرج فإن حركة الهواء تسبب حدوث انخفاض في الضغط عند الفتحة و بذلك يؤدي إلى سحب الهواء من داخل المبنى إلى خارجه [٥ ، ص٢١١]. أما في إيران و البحرين و الإمارات العربية المتحدة و قطر فإن أبراج الهواء تتميز بمظهر جذاب وتأخذ أشكالاً متعددة فمنها رباعي المقطع ومنها السداسي كما أن بعضها يصل ارتفاعه إلى ١٥م فوق سطح الأرض [٦ ، ص ٢١]. و تستطيع هذه الأبراج استقبال الهواء من عدة اتجاهات. وفي المناطق الحارة الجافة يكون بعض هذه الأبراج مفصولاً عن المبنى بمسافة بعيدة ويمر الهواء قبل أن يصل إلى المبنى من خلال تجويف تحت سطح الأرض ، و أحياناً يمر في بعضها الهواء على مسطح مائي قبل أن

يصل إلى المبنى لأجل زيادة تبريد الهواء بواسطة التبخير evaporation.

و قد ذكر الاستشاري باتل ميكارثي أن أبراج الهواء في منطقة الخليج العربي فريدة في استخدامها في ظل ظروف المناخ ، حيث تتراوح درجات الحرارة ما بين ٣٢ - ٤٩°م صيفاً في منتصف النهار و تنحدر إلى ٢٠°م أو أقل في الليل. و بين تواجد واحد أو أكثر من برج في مبنى واحد لتبريد غرف النوم صيفاً [٧ ، ص ٢٦].

تعتمد منظومات التبريد الطبيعي على ثلاثة أوعية لحفظ الحرارة في الكون heat sink. تشتمل الأوعية الطبيعية على: السماء the sky ، و الفضاء الجوي the atmosphere ، و الأرض the earth [٨ ، ص ٤]. و تعمل هذه المنظومات على انتقال الحرارة من المبنى إلي تلك الأوعية الطبيعية. و تختلف أنواع هذه المنظومات باختلاف طريقة انتقال الحرارة بواسطة التوصيل conduction أو الحمل convection أو الإشعاع radiation.

إن الوعاء الطبيعي الثاني (الفضاء الجوي) هو المعني في هذه الدراسة ، فالهواء الحار و الجاف الذي يمر في برج التبريد يتم تخفيض درجة حرارته بواسطة تبخير الماء. و تُسهم عملية التبخير في إنقاص المحتوى الحراري المحسوس للهواء sensible heat و كذلك زيادة حرارته غير المحسوسة latent heat.

تتم عملية تبريد الهواء في البرج بأن يتخلل الهواء الحار و الجاف مسامات أو فتحات ضيقة في ألواح كرتونية مرطبة بالماء تسمى Celdek وهي مادة مصنعة من الكرتون المعالج ضد البكتيريا و الطفيليات و الطحالب. و تركب هذه الألواح المبللة بالماء في النوافذ العلوية للبرج. عندما يلامس الهواء سطح تجاويف هذه المسامات يفقد جزءاً من حرارته عن طريق تبخر الماء فتقل الحرارة المحسوسة للهواء sensible heat ، بينما ترتفع حرارة الهواء الكامنة latent heat ، و بالتالي نسبة رطوبته. وعندما تنخفض درجة حرارة الهواء بداخل برج التبريد تزداد كثافته بسبب برودته فينساب إلى أسفل البرج ليخرج من فتحة تسمح بأن يتجه

نحو المكان المراد تبريده و يستمر في حركته داخل المبنى ثم يستمر متحركاً ببطء إلى خارج المبنى عن طريق أبواب أو نوافذ مصممة خصيصاً تضمن خروج الهواء إلى خارج المبنى.

إن الحيز المبرد بواسطة أبراج التبريد الطبيعي أو المنظومات الطبيعية المستخدمة للتبريد أو التسخين ليست فقط تحقق الراحة الحرارية داخل المباني فحسب بل تسهم في ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية و تقليل زمن تشغيل المكيفات الميكانيكية وقت الذروة و بالتالي تؤدي إلى التقليل من نسبة تلوث الهواء في فراغ المبنى [٩ ، ص ٣١٨].

هدف الدراسة

تهدف الدراسة بصورة رئيسة إلى تحليل فاعلية الأداء الحراري لأبراج التبريد الطبيعي و التي تتلخص في النقاط التالية :

١- معرفة أداء برج التبريد الطبيعي من حيث تحديد معدل تدفق الهواء الخارج من البرج exit flow rate و سرعة الهواء بداخل البرج air speed inside tower ، و معدل التبريد الناتج منه cooling energy و معامل الأداء له the coefficient of performance و فاعلية تبخير الماء في الهواء لهذا البرج humidifying efficiency.

٢- معرفة أثر البرج الطبيعي على تبريد بيئة الفناء الداخلي و الغرف المحيطة بالفناء في فندق النزل بمدينة سكاكا بمنطقة الجوف و التي تمثل بيئة المناخ الصحراوي.

٣- اقتراح بعض التوصيات المناسبة لاستخدام برج التبريد كعنصر تبريد طبيعي للمباني في المناطق الحارة والجافة.

منهج البحث

نظراً لأن طبيعة الدراسة تجريبية تطبيقية ، فقد نهجت نحو إتباع الخطوات التالية :

الخطوة الأولى : مراجعة الأبحاث المنشورة عن التجارب التي أنجزت في مجال تبريد المباني طبيعياً.

الخطوة الثانية : دراسة ميدانية و اشتملت على :

١- جمع بيانات مناخية لمنطقة الجوف شاملة درجات حرارة الهواء الجافة و الرطبة و الإشعاع الشمسي و الرطوبة النسبية و سرعة الرياح و اتجاهها.

٢- إجراء تجربة تطبيقية خلال فترة الصيف ٢٦ ربيع الثاني إلى ١ جماد الأول ١٤٢٠ هـ (الموافق ٨-١٢ أغسطس ١٩٩٩ م) و ذلك لمعرفة أداء أبراج التبريد الطبيعي و فعاليتها في تبريد الفناء الداخلي و ما يحيط به من غرف سكنية في فندق النزل بمدينة سكاكا و التي تمثل بيئة المناخ الصحراوي.

٣- إجراء مقابلات شخصية مع فنيي و زوار الفندق لمعرفة انطباعاتهم عن أبراج التبريد الطبيعي من حيث تبريدها و تشغيلها و صيانتها و ذلك من خلال توزيع استبانه أثناء إجراء التجربة لمعرفة مدى انطباع عدد من الأشخاص داخل الفناء و غرف النُزلاء.

الخطوة الثالثة: تحليل البيانات وتتضمن ما يلي :

١- تحديد أداء برج التبريد الطبيعي من حيث :

أ) حساب معدل كمية انسياب الهواء من البرج exit air flow rate.

ب) حساب سرعة الهواء بداخل البرج air speed inside tower.

جـ) حساب طاقة التبريد الناتجة من البرج cooling energy.

د) حساب معامل الأداء للبرج the coefficient of performance.

هـ) حساب فاعلية تبخير الماء في الهواء للبرج humidifying efficiency.

٢- تحديد أثر برج التبريد الطبيعي على تبريد بيئة الفناء الداخلي و الغرف المحيطة بالفناء. ويتم ذلك من خلال :

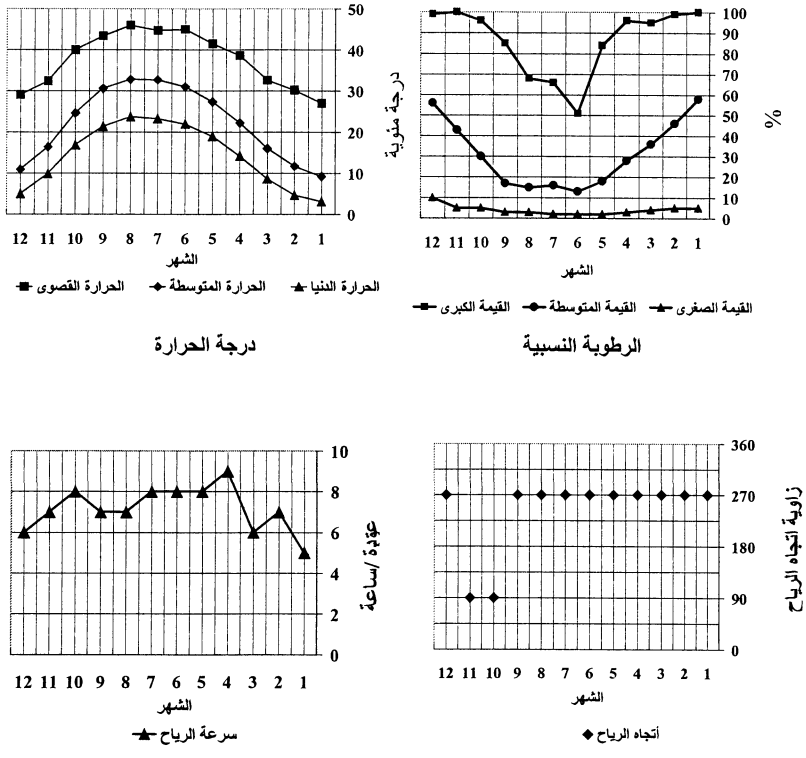
أ) قياس الخفض في درجات الحرارة داخل الفناء و وسط إحدى غرف الفندق عن درجات حرارة البيئة في خارج الفندق.

ب) قياس الرطوبة النسبية داخل فناء و وسط غرفة واحدة مع تحديد نطاق الراحة الحرارية للإنسان Human thermal comfort zone.

تحليل مناخ منطقة الجوف

تقع منطقة الجوف شمال المملكة العربية السعودية، و على خط عرض ٥ر٢٩ ° شمال خط الاستواء و بارتفاع و قدره ٧٠٠ م فوق سطح البحر. توضح المعلومات المناخية الخاصة بمنطقة الجوف [١٠، ص ١٦] بأن المناخ يتصف بارتفاع درجة الحرارة في فصل الصيف حيث يصل متوسط درجة الحرارة العظمى إلى ٤٠مْ، وقد ترتفع لتصل إلى ٤٥مْ في أشهر يونيو ويوليه وأغسطس. و متوسط درجة الحرارة الصغرى يتراوح ما بين ٢٢ – 24م في نفس أشهر الصيف. أي بمدى يومي يصل إلى أكثر من عشرين درجة مئوية. كما أن المناخ جاف جداً ، فالرطوبة النسبية في وسط النهار تنخفض لتصل ما بين ٢ إلى ٣ ٪. و في الليل تتراوح الرطوبة النسبية ما بين ٥١ و ٦٨ ٪. و الرياح السائدة خلال أشهر الصيف غربية الاتجاه وبسرعة تتراوح ما بين ٧ إلى ٨ عقده، أي ٧,٨ إلى ٨,٨ متر/ الثانية، أما الرياح المثيرة للأتربة فيمكن حدوثها خلال يومين إلى أربعة أيام في الشهر وذلك في أشهر يونية ويوليه وأغسطس. و نظراً لجفاف المناخ وارتفاع درجة الحرارة في وسط النهار فإنه يمكن استخدام طرق التبريد بواسطة التبخير.

و يوضح الشكل رقم (١) رسومات بيانية لمناخ منطقة الجوف و الخاصة بدرجات الحرارة للهواء الخارجي والرطوبة النسبية و سرعة الهواء و كمية الأمطار على التوالي [١٠، ص ١٦] .



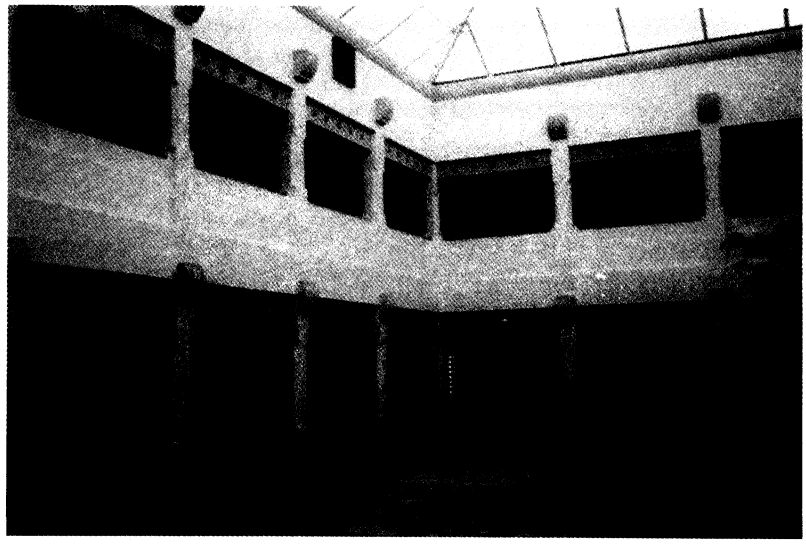
الشكل رقم (١) . رسومات بيانية لمناخ منطقة الجوف، المملكة العربية السعودية [١٠].

عينة الدراسة

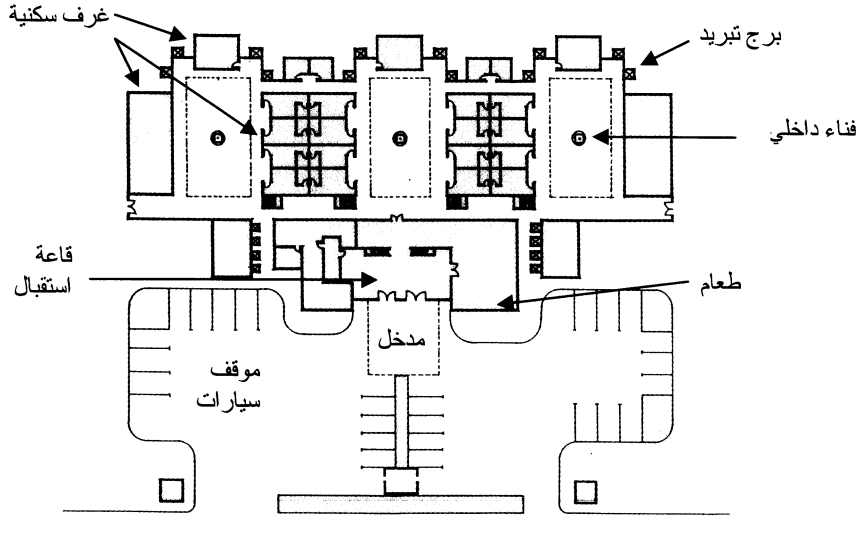
تم اختيار أبراج التبريد الطبيعي في فندق النزل بمدينة سكاكا، عينة لإجراء الدراسة، لأنه هو الوحيد من نوعه و الذي روعي في تصميمه توظيف أبراج التبريد الطبيعي لتبريد أفنية داخلية و غرف محيطة بها. توضح الأشكال أرقام (٢-٥) منظر لواجهة خارجية و منظر لداخل الفناء و مسقط أفقي للفندق و قطاع تفصيلي لبرج التبريد الطبيعي. يتكون الفندق من طابقين، يحتوي الطابق الأرضي على بهو استقبال وقاعة

للاحتفالات ومطعم وثلاثة أفنية داخلية مغطاة تحيط بها غرف وأجنحة النزلاء. و يتم تبريد هذه الأفنية بصورة رئيسية باستخدام أبراج التبريد الطبيعي وعددها ١٢ برجاً بمقطع مربع ١,٦٠ × ١,٦٠ مترًا مربعًا و بارتفاع تقريبي يصل الى١٠ أمتار. و يدخل الهواء الخارجي عن طريق أربع فتحات على الجوانب الأربعة العلوية للبرج. ويمر الهواء عبر مسامات ألواح الكرتون المبلل بالماء التي ركبت في الفتحات ثم يبرد الهواء بواسطة التبخير فينساب إلى أسفل البرج. ويخرج الهواء البارد عن طريق فتحة واحدة في اسفل البرج و يندفع تلقائياً إلي الفناء. و تبلغ أبعاد فتحة دخول الهواء في كل برج ١,٤٠ × ١,٥٠ مترًا و أبعاد فتحة خروج الهواء في كل برج ٢,٢٠ × ٢,٢٠ مترًا. ومن خلال هذه الأفنية الباردة يتم تبريد غرف النزلاء بسحب الهواء البارد إليها بواسطة مراوح سحب في سقف ممرات الأفنية ومن ثم طرده إلى خارج المبنى. و قد زودت غرف النزلاء بوحدات تبريد منفصلة لتدعيم التبريد الطبيعي عندما يرغب النزلاء في خفض درجة الحرارة عن درجة حرارة الهواء التي تحققها أبراج التبريد للفناء.

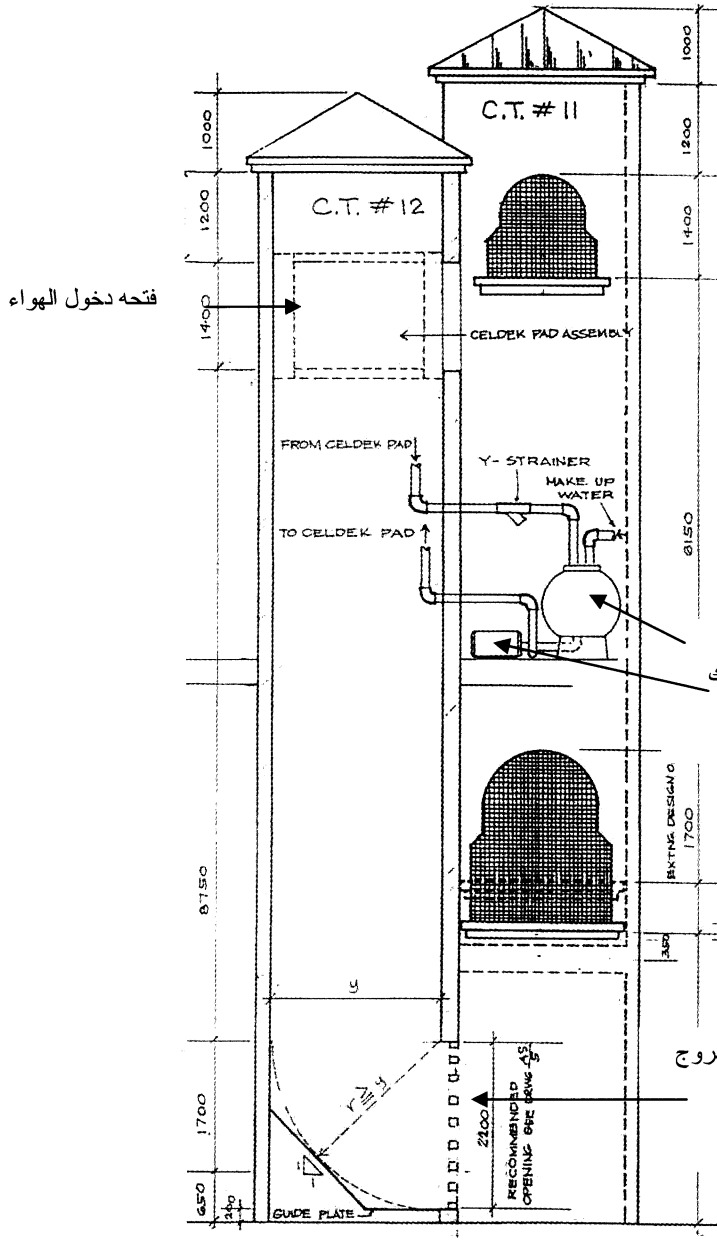
الشكل الرقم (٢). منظر للواجهة الأمامية لفندق الرّل في مدينة سكاكا.



الشكل رقم (٣). منظر للفناء الداخلي في فندق التل في مدينة سكاكا.



الشكل رقم (٤). مسقط أفقي في فندق التل، سكاكا.



الشكل رقم (٥). قطاع تفصيلي في برج التبريد في فندق النزل، سكاكا.

الأجهزة المستخدمة في التجربة

تم استخدام أجهزة قياس خاصة و عالية الجودة في إجراء الدراسة و يمكن تصنيفها إلى ثلاثة أقسام رئيسة وهي :

أولا: المجسات

تم استخدام ١٢ مجسًا إزدواجًا حراريًا Thermocouples, type T لقياس درجة حرارة الهواء في خارج و داخل أبراج التبريد الطبيعي ، و بداخل فراغ الفناء على ارتفاع متر ونصف عن سطح الأرض ، و في وسط فراغ أحد غرف الفندق. و قد تم عمل تصحيح قراءات المجسات الحرارية بواسطة الباحث حيث حصل على قراءات للمجسات و معيار حراري زئبقي عندما وضعت جميعها في ماء ساخن و ماء مثلج وماء دافئ. و تم عمل معادلة علاقة خطية بين قراءة المجس الواحد و قراءة المعيار الزئبقي بهدف الحصول على معامل تصحيح لكل مجس حراري. و استخدم في التجربة مجس لقياس سرعة الهواء الخارج من البرج A Met One anemometer, type 014A-U.

ثانيا: نظام تجميع وتخزين و تصنيف القراءات

تم استخدام نظام CR10 المصنوع بواسطة شركة كامبل العلمية الأمريكية في مدينة لوجن بولاية يوتا ، Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA و يقوم هذا الجهاز بتسجيل متوسطات للقراءات من جميع المجسات كل ١٥ دقيقة ثم كل ١ ساعة ثم كل ٢٤ ساعة.

ثالثا: وحدة حاسب الآلي

تم استخدام جهازين من الحاسب الآلي ، يعملان على برنامج PC208 ، لتشغيل لنظام CR10 و معالجة القراءات و تخزينها يوميا و مشاهدة رسومات بيانية وقت تسجيل القراءات لجميع أجهزة القياس لأحوال الطقس و المجسات الحرارية. كما استخدم محلل بيانات Microsoft Excel Program لعمل رسومات بيانية و تحليل المعلومات المسجلة.

تحليل المعلومات

تحديد أداء برج التبريد الطبيعي

تركز هذه الدراسة على أحد أبراج التبريد الأربعة التي تقوم بتبريد الفناء الداخلي الأوسط في فندق النزل، علما بأن المبنى يتوافر به ١٢ برجاً للتبريد موزعة على الأفنية الثلاثة. تم اختيار أحد أبراج التبريد الطبيعي رقم واحد الذي يفتح فتحته السفلية على الطابق الأول و يقع في الركن الشمالي الشرقي من الفناء الداخلي لأن هذا البرج أداءه في التشغيل جيد و تم صيانته مؤخرا عند البدء في التجربة.

حساب معدل كمية انسياب الهواء الخارج من البرج

يوضح الشكل رقم (٦) قياس سرعة الهواء الخارج من البرج و سرعة الرياح السائدة في خارج المبنى. و يلاحظ أن سرعة الهواء الخارج من البرج تتراوح ما بين ٢,٨ متر/ثانية إلى ٣,٥ متر/ثانية، بينما تكون سرعة الهواء الخارجي متفاوتة وقد تصل إلى ٧,٢ متر/ثانية و تنخفض إلى ٠,٢ متر/ثانية. ويلاحظ استقرار تدفق الهواء الخارج من البرج بالرغم من زيادة أو انخفاض سرعة الهواء الخارجي. و يرجع السبب في ذلك إلى أن درجة حرارة و الضغط في داخل البرج تنخفض عن درجة الهواء خارجه. ويلاحظ أن سرعة الهواء الخارج من البرج يمكن تنشيطها وقت انخفاض سرعة الرياح أو الرغبة في زيادة برودة فناء الفندق و الغرف في حال تكاثر أعداد الزوار في الفناء و الغرف كإقامة حفلات اجتماعية مثل الزواج. توجد مراوح سحب علوية في أفنية الفندق يتم تشغيلها ما بين الساعة ١٢ ظهراً و حتى الساعة ١٠ مساءً. و بقياس سرعة الهواء الخارج من البرج exit air speed في وسط فتحة خروج الهواء من البرج، يمكن حساب معدل كمية انسياب الهواء الخارج من البرج exit air flow rate بالمعادلة التالية:

$$ك_{س} = م \times ع_{س} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (١)$$

حيث إن :

ك س = معدل كمية انسياب الهواء الخارج من البرج في الساعة (م٣/س)

م = مساحة فتحة خروج الهواء من البرج بالمتر المربع (م٢) و هي ٢,٢× ٢,٢ م٢

ع س = سرعة الهواء الخارج من البرج في الساعة (م/س)

و قد تم حساب معدل كمية انسياب الهواء الخارج من البرج exit air flow rate خلال فترة القياس و تبلغ ٦٣٨,٨٨ م٣/ساعة ، عندما قيست سرعة الهواء الخارج من البرج من ٢,٨ متر/ثانية و كانت سرعة الرياح في نفس الوقت ٠,٢ متر/ثانية. و يصل المعدل لكمية الهواء الخارج من البرج حوالي ١٠١٦,٤ م٣/ساعة عندما تكون سرعة الهواء الخارج من البرج ٣,٥ متر/ثانية و سرعة الرياح حولي ٧,٤ متر/ثانية. يلاحظ بأن تغير معدل حجم الهواء الخارج من البرج في الساعة يتأثر بسرعة الهواء الخارج من البرج و سرعة الرياح المحيطة بالبرج ، كما هو موضح في الشكل رقم (٦). و هذه النتيجة تدل على أن حجم و سرعة الهواء الخارج من برج التبريد يعتمد على سرعة الرياح خارج البرج.

حساب سرعة الهواء بداخل البرج

بعد الحصول على قياس معدل كمية انسياب الهواء الخارج من البرج exit air flow rate فأنه يمكن حساب سرعة الهواء داخل البرج التبريد الطبيعي باستخدام المعادلة التالية :

ر س = ك س ÷ ط ..... (٢)

حيث إن :

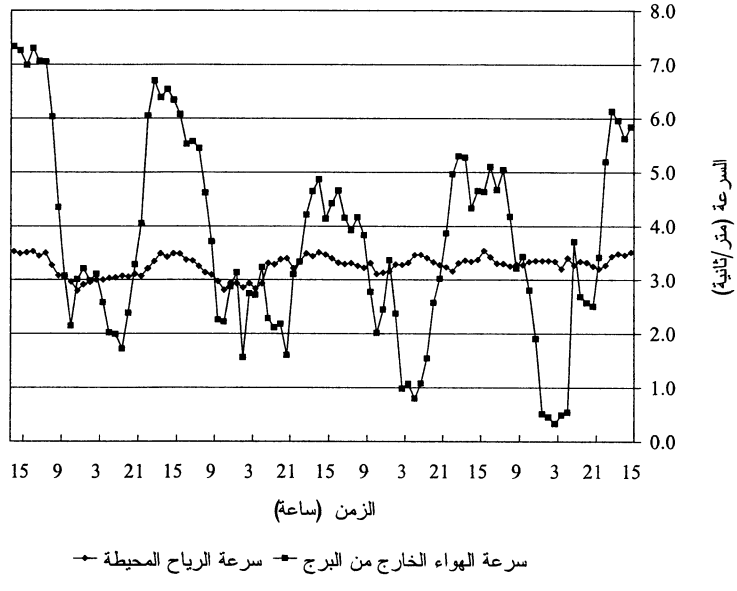
ر س = سرعة الهواء داخل برج التبريد الطبيعي (متر/ساعة)

ك س = معدل كمية انسياب الهواء الخارج من البرج في الساعة (متر مكعب/ساعة)

ط = مساحة مقطع البرج بالمتر المربع (م٢) وهي ١,٦× ١,٦ م٢

من اليسير حساب سرعة الهواء داخل برج التبريد air speed inside tower خلال فترة

القياس باستخدام المعادلة رقم (٢). و يمكن الحصول على سرعة الهواء بداخل البرج بقيمة ٤,١٥٩٤ م/ثانية عندما يكون معدل حجم الهواء الخارج من البرج ٦٣٨,٨٨ م٣/س و سرعة الهواء الخارجي ٠,٢ م/ث و سرعة الهواء الخارج من البرج ٢,٨ م/ث. و يلاحظ أن سرعة الهواء بداخل البرج يفوق سرعة الهواء الخارج من فتحة البرج في هذه الحالة لأن كثافة الهواء البارد في أعلى البرج أعلى من الهواء في أسفل البرج لذا ينساب الهواء بداخل البرج متجه إلى فتحة الخروج و لكن سرعته عند الفتحة أقل من سرعته بداخل البرج بالرغم من أن مساحة مقطع فتحة البرج أكبر من مساحة مقطعه داخل البرج. و عندما يرتفع كل من معدل حجم الهواء الخارج من البرج ليصل ١٠١٦,٤م/ساعة و سرعة الهواء الخارجي ٧,٤ م/ث و سرعة الهواء الخارج من البرج ٣,٥ م/ث ، يكون سرعة انسياب الهواء بداخل البرج هي ٦,٦١٨ م/ثانية. يستنتج من ذلك أن تغير سرعة الهواء بداخل البرج تتأثر بمعدل حجم الهواء الخارج من البرج.



الشكل رقم (٦). سرعة الهواء الخارج من البرج و سرعة الرياح المحيطة.

حساب طاقة التبريد الناتجة من البرج

عندما تم الحصول على قياس معدل كمية انسياب الهواء الخارج من البرج exit air flow rate و قياس درجات حرارة الهواء الجافة في خارج البرج ، و كذلك درجة حرارة الهواء الجافة في فتحة خروج الهواء في البرج ، فإنه يمكن حساب طاقة التبريد المحسوسة الناتجة من البرج cooling energy باستخدام المعادلة التالية :

$$\text{ط.ت} = \text{ك}_{\text{س}} \times (\text{ح}_{\text{د}} - \text{ح}_{\text{خ}}) \times ٠,٠٣٣ \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (٣)$$

حيث إن :

ط ت = طاقة التبريد الناتجة من البرج (وات)

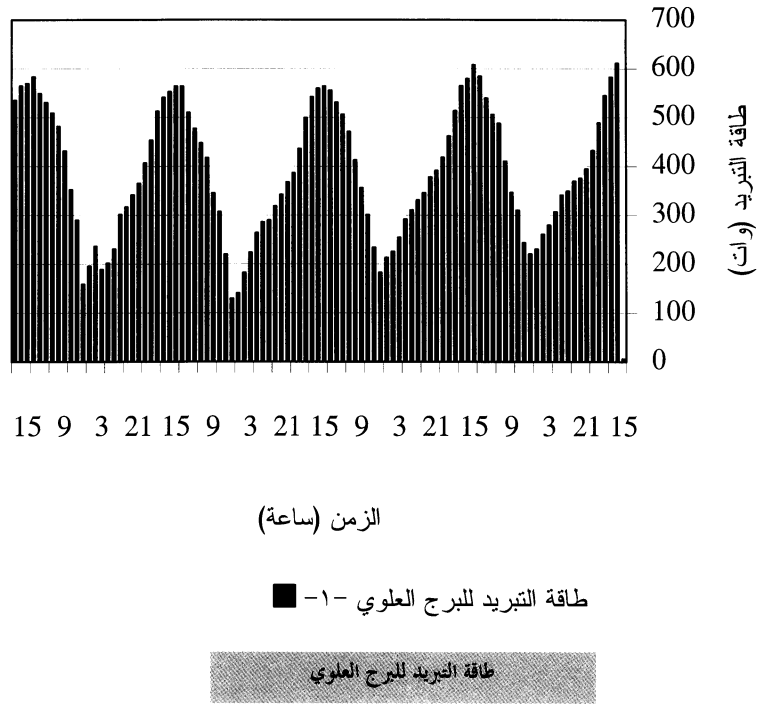
ك س = معدل كمية انسياب الهواء الخارج من البرج في الساعة (متر مكعب/ساعة)

ح د = درجة حرارة الهواء الجافة الداخل إلى البرج (درجة مئوية)

ح خ = درجة حرارة الهواء الجافة الخارج من البرج (درجة مئوية)

٠,٠٣٣ = السعة الحرارية للهواء (وات.ساعة/متر مكعب/درجة مئوية) [١]

يوضح الشكل رقم (٧) نتيجة حساب طاقة التبريد الناتجة من البرج (وات) cooling energy خلال فترة القياس ما بين ٨ يوليو إلى ١٢ يوليو ١٩٩٩ م. و يلاحظ أن طاقة التبريد تتراوح ما بين ١٣٠٠ (وات) إلى ٦١٠٠ (وات).



الشكل رقم (٧). طاقة تبريد ناتجة من البرج.

حساب معامل الأداء للبرج

بعد الحصول على حساب معدل طاقة التبريد الناتجة من البرج و معرفة طاقة مضخة الماء المستخدمة لرفع الماء من الخزان إلى الألواح الكرتونية في البرج، و عادة تكتب في سطح المضخة، فإنه يمكن حساب معامل كفاءة الأداء (ع) Coefficient of Performance "C.O.P" و يقصد بمعامل كفاءة أداء برج التبريد هو وحدة التبريد الناتجة من برج التبريد في المبنى إلى كمية الطاقة المستخدمة لتشغيل البرج [١ ، ص ١]. و يمكن حسابه باستخدام المعادلة التالية :

ع = ط ÷ ض.....(٤)

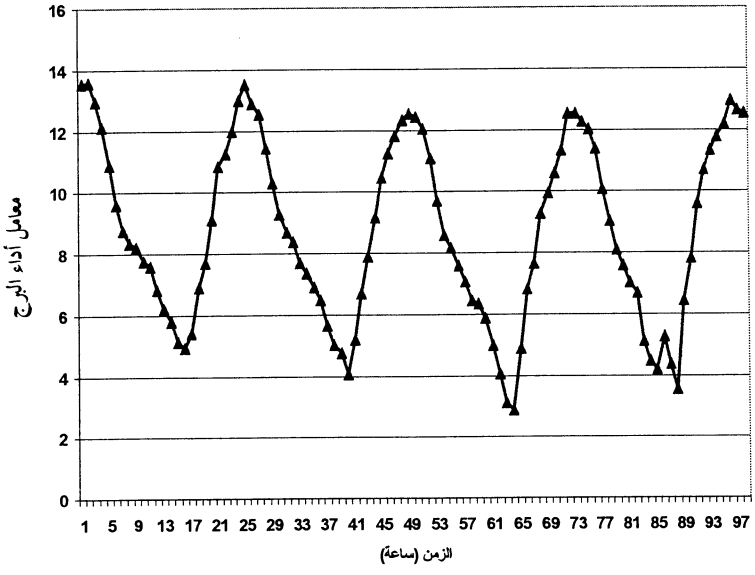
حيث إن :

ع = معامل كفاءة أداء البرج

ط = معدل طاقة التبريد الناتجة من البرج (وات)

ض = معدل الطاقة اللازمة لتشغيل مضخة الماء في البرج (وات)

يبين الشكل رقم (٨) نتيجة حساب معامل أداء البرج، خلال فترة القياس حيث يتراوح ما بين ٣ إلى١٣,٥.



الشكل رقم (٨). معامل أداء البرج.

حساب فاعلية تبخير الماء في الهواء للبرج Humidifying efficiency

إن أقل درجة حرارة يمكن أن تتحقق للهواء الخارج من البرج لن تقل بأية حال من الأحوال عن درجة الحرارة الرطبة للهواء الخارجي وذلك استنادا إلى أن عملية التبريد

بالتبخير تصل إلى حدها الأقصى عندما يتشبع الهواء بالرطوبة وتصل رطوبته النسبية إلى ١٠٠٪. وفاعلية تبخير الماء في الهواء باستخدام ألواح "السلدك" في البرج ترتبط بالتالي بفاعليته في تبخير الماء وخفض درجة حرارة الهواء إلى درجة الحرارة الرطبة للهواء الداخل للبرج و عليه فأنه يمكن حساب فاعلية تبخير الماء في الهواء للبرج باستخدام المعادلة التالية [١١، ص ١٩٧]:

$$ف.ت = (ح_{د} - ح_{خ}) \div (ح_{د} - ح_{ر}) \times ١٠٠ \quad .....(٥)$$

حيث إن:

ف.ت = فاعلية تبخير الماء في الهواء للبرج (٪)

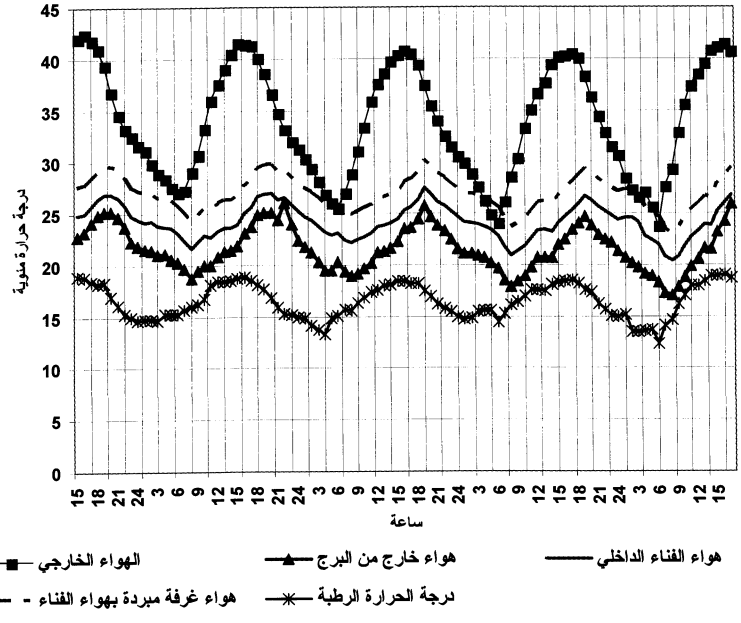
$ح_{د}$ = درجة حرارة الهواء الجافة الداخل إلى البرج من البيئة الخارجية (مْ)

$ح_{خ}$ = درجة حرارة الهواء الجافة الخارج من البرج (مْ)

$ح_{ر}$ = درجة حرارة الهواء الرطبة الداخل إلى البرج من البيئة الخارجية (مْ)

يوضح الشكل رقم (٩) قياسات درجات حرارة الهواء لكل من الحرارة الجافة و الرطبة في البيئة المحيطة و درجة حرارة الهواء الخارج من برج التبريد و درجة حرارة الهواء في الفناء و درجة حرارة احدى الغرف في الفندق و ذلك خلال فترة القياس من ٨ يوليو إلى ١٢ يوليو ١٩٩٩م. عند الساعة ٣ ظهرا في يوم ٩ يونية ١٩٩٨ م وصلت درجتي الحرارة الخارجية الجافة و الرطبة ٤١,٥٧ و ١٨,٦٨مْ على التولي، كانت درجة حرارة الهواء الخارج من البرج ٢١,٨٥مْ و بذلك يكون حساب كفاءة التبريد ٨٦,٦٢ ٪. و عند الساعة ٦ صباحا من اليوم التالي وصلت درجتي الحرارة الخارجية الجافة و الرطبة ٢٥,٥٤ درجة و ١٥,٠٢مْ على التولي، كانت درجة حرارة الهواء الخارج من البرج ٢٠,٢٨مْ و بذلك يكون حساب كفاءة التبريد ٥٠ ٪. و يستنتج من ذلك أن كفاءة برج التبريد كون مرتفعة خلال

النهار و منخفضة خلال الليل و هذا التباين يعود إلى الفارق ما بين درجتي حرارة الهواء الجافة و الرطبة كلما ازداد شدة الحرارة و الجفاف كلما ارتفعت كفاءة البرج.



الشكل رقم (٩). قياسات درجتي حرارة الهواء الخارجي الجافة و الرطبة و درجة حرارة الهواء الخارج من برج تبريد و درجة حرارة الهواء في غرفة من غرف فندق النزل في سكاكا بمنطقة الجوف.

تحديد أثر أبراج التبريد الطبيعي على تبريد بيئة الفناء الداخلي

تم تصميم الفندق بطريقة تبريد كل غرفة أو جناح بنظام التكييف المنفصل الميكانيكي split air conditioning system و في نفس الوقت تبريدها بنظام سحب الهواء البارد من الفناء إلى فراغ الغرفة ثم دفعه إلى خارج المبنى بواسطة مراوح شفط. يوضح الشكل رقم (٩) التباين الواضح في درجات حرارة الهواء الخارجي و درجة حرارة الهواء داخل الفناء و

درجة حرارة الهواء الخارج من برج التبريد. عند الساعة ٣ ظهرا في يوم ٩ يونية ١٩٩٨ م حيث وصلت درجتي الحرارة الخارجية الجافة و الرطبة ٤١,٦ و ١٨,٧مْ.

على التولي، كانت درجة حرارة الهواء الخارج من البرج و الفناء و الغرفة المبردة بالهواء المسحوب من فراغ الفناء حولي ٢١,٩و ٢٤ و ٢٦مْ ، على التوالي. و عند الساعة السادسة صباحا من اليوم التالي وصلت درجتي الحرارة الخارجية الجافة و الرطبة ٢٥,٥ و ١٥,٠٢مْ على التولي، كانت درجة حرارة الهواء الخارج من البرج و الفناء و الغرفة المبردة بالهواء المسحوب من فراغ الفناء حولي ٢٠,٣و ٢٣,٢ و ٢٥,٩مْ ، على التوالي. و يستنتج من ذلك أن أثر تبريد البرج على الفناء و الغرفة خلال النهار فعال في خفض درجة حرارة الفناء و الغرفة بحوالي ١٧,٨و ١٥,٨مْ ، على التوالي. أما أثر البرج في تبريد الفناء و الغرفة خلال فترة الليل يكون منخفض بسبب الفارق ما بين درجتي حرارة الهواء الجافة و الرطبة.

رصد انطباعات المستخدمين

تم رصد آراء المستخدمين بتوزيع استبانة عليهم و كان عددهم خمسين فردا وذلك لاستطلاع وجهات نظرهم عن كفاءة تبريد فناء الفندق باستخدام أبراج التبريد الطبيعي. و كانت انطباعات ثلاثة و أربعين شخصا تدل على الرضى التام عن درجة حرارة الهواء و نسبة رطوبته في الفناء. و أفاد بعضهم بأنه لأول مرة يشاهدون أبراج التبريد الطبيعية التي تعمل بدون وسائل ميكانيكية. كما يشعرون بالانتعاش في جو الفناء بسبب توافر الأوكسجين في الهواء المتجدد مقارنة بأداء المكيفات في الغرف المغلقة. كما أجرى الباحث مقابلة مع فني و مسئول عن تشغيل الأبراج و صيانتها، و أفاد بأن أهم المشاكل التي تواجه أبراج التبريد حدوث تسرب المياه داخل البرج، و هذا ناتج عن زيادة منسوب الماء أو بسبب نشاط حركة الرياح التي تدفع الماء من ألواح الكرتون إلى داخل البرج. كما أشار بأن

الألواح الكرتونية تقل فاعليتها تبعاً لزيادة الأملاح المتراكمة على سطحها. ولوحظ بأن الماء المستخدم في أبراج الفندق تؤخذ من آبار متوسطة الملوحة (٢٠٠٠ جزء في المليون) و لهذا السبب يتم استبدال هذه الألواح بصورة دورية كل أربع سنوات تقريباً.

الاستنتاجات

في هذه الدراسة يتضح الآتي:

١- فاعلية برج التبريد الطبيعي لتبريد الفناء الداخلي في المباني الواقعة في المناطق الصحراوية. و يزداد فاعليته عندما ترتفع درجة حرارة الهواء الجافة في البيئة المحيطة خارج المبنى و تقل ليلاً. كما وجد بالتجربة أن درجة حرارة الهواء الخارج من البرج و داخل الفناء و الغرفة المبردة بواسطة البرج تقل عن درجة حرارة الهواء الخارجي و تصل الفروقات إلى حوالي ١٩,٧ و ١٧,٦ و ١٥,٦مْ ، على التوالي خلال النهار عند الساعة الثالثة ظهراً في فصل الصيف.

٢- لا يؤثر انخفاض سرعة الرياح على سرعة الهواء الخارج من البرج، حيث تبين بالتجربة أن متوسط سرعة الهواء الخارج من البرج تصل إلى حوالي ٤,١٦متر/ثانية ، بالرغم انخفاض سرعة الرياح إلى حوالي ٠,٢ متر/ثانية. كما أن زيارة سرعة الرياح تساعد على تسريع حركة الهواء الخارج من البرج حيث وصلت سرعة الهواء الخارج من البرج ٣,٥ متر/ثانية عندما كانت سرعة الرياح حولي ٧,٢ متر/ثانية. و يمكن تركيب مراوح شفط تساعد على تحريك الهواء من البرج إلى فراغ الفناء الداخلي و بالتالي تحريك الهواء البارد من الفناء إلى الفراغات الأخرى كالغرف و غيرها.

٣- أثبتت التجارب و نتيجة الاستبانة فاعلية أبراج التبريد الطبيعي في تلطيف المناخ الداخلي في المناطق الصحراوية و ارتياح المستخدمين في الأماكن المبردة بالأبراج.

٤- يوصى بتطبيق استخدام أبراج التبريد الطبيعي في المباني ذات الدور الواحد أو الدورين، و في الأفنية الداخلية، و استغلال برودة الهواء في تبريد فراغات المباني المحيطة.

٥- يوصى بعمل المزيد من الدراسات التطبيقية باستخدام أبراج التبريد الطبيعي في المباني السكنية و لا تقتصر تلك الدراسات على النواحي الحرارية فقط بل يفضل مناقشة أمور الصيانة و التشغيل و النواحي الاقتصادية و النفسية لدى المستخدمين في داخل و خارج المباني.

الخاتمة

أثبتت هذه الدراسة أن أبراج التبريد تسهم في خفض درجة حرارة الأفنية الداخلية و الفراغات المحيطة في المباني الواقعة في المناطق الصحراوية. و إن فاعلية أداء هذه الأبراج كانت ناجحة و نالت رضاء مستخدميها من العاملين بالفندق و النزل. و يقودنا ذلك إلى أهمية تطويرها والاستفادة منها في ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية و إزاحة أحمال التبريد الميكانيكي في المباني.

المراجع

[١] Givoni, B. *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. Van Nostrand Reinhold, 1994.

[٢] Lari, Y., *Traditional Architecture of Thatta*. Karachi: Heritage Foundation, Lari Research Center, 1998.

[٣] Rudsofsky, B., *Architecture Without Architects*. Garden New York: Doubleday Company, Inc., 1964.

[٤] Fathy, H., *Natural Energy and Vernacular Architecture*. Chicago: The University of Chicago Press, 1986.

[٥] عوف ، سعيد عبدالرحيم سعيد، *العناصر المناخية و التصميم المعماري* ، النشر العلمي والمطابع ، جامعة الملك سعود ، الرياض ، المملكة العربية السعودية ، ١٤١٨ هـ / ١٩٩٨ م.

[٦] Kay S.and, Zandi, D., *Architectural Heritage of The Gulf*. Motivate Publishing, Philip Morris, 1991.

[٧] McCarthy, Battle Consulting Engineers, *Wind Towers*. John Wiley & Sons Ltd, 1999.

[٨] Cook, J., *Passive Cooling*. Cambridge. Massachusetts: MIT press; 1989.

[٩] الغزاوي ، أ. ح.، *الطاقة و المباني* ، عمان ، الأردن، دار مجدولاي للنشر و التوزيع : ١٩٩٥م.

[١٠] مصلحة الأرصاد و حماية البيئة. *معلومات عن أحوال الطقس و بيئة مدينة الرياض*. جدة: مركز المعلومات و الوثائق العلمية، وزارة الدفاع والطيران، المملكة العربية السعودية، ١٤١٥ هـ.

[١١] Clifford, G. E., *Heating, Ventilating and Air Conditioning*. Reston, Virginia, USA: Reston Publishing Company, Inc., 1984.

An Experimental Study of the Thermal Performance of Cooling Towers in Al-Jouf Region

Nasser A. M. Al-Hemiddi
Associate Professor, College of Architecture and Planning,
King Saud University, P.O. Box 57448, Riyadh 11574, Saudi Arabia.
(Received 10/1/1421H.; accepted for publication 15/6/1425H.)

Abstract. This experimental research presents the effect of natural cooling towers and shows their effective performance to cool internal spaces in the desert environment. The experiment was conducted during summer period of 1999 at the Al-Nuzl Hotel, Skaka, Al-Jouf desert region, Saudi Arabia. The objective of the study is to investigate the effective performance of those towers by determining the exit flow rate, exit air speed inside of the tower, the rate of cooling, the coefficient of performance "COP", and humidifying efficiency.

The study results conclude that the cooling towers are very effective and ideal in their performance. They can provide thermal comfort for human beings in internal courtyards and surrounding rooms. It was found that the courtyard and indoor dry bulb temperatures were lower than the outdoor temperature by 17 °C and 15 °C, respectively. The study also showed that forty-three persons out of fifty were satisfied in the courtyard environment during hot summer evening time.

The study concludes with some appropriate architectural recommendations for applying natural cooling towers that can be integrated to courtyard buildings in desert regions.