محددات تصميم أبراج التبريد الطبيعى
دراسة باستخدام المعادلات الحسابية والقياسات الحقلية

د. يحيى وزيرى
أستاذ العمارة المساعد بالمعهد العالي للهندسة والتكنولوجيا بالعريش،
ومحاضر بجامعة القاهرة
Y_wazeri@yahoo.com

ملخص

إن من أهم مبادئ التصميم المعماري المستدام، هو الحد من استخدام الطاقة والتي تستخدم بصفة رئيسية في تبريد المباني المعاصرة في المناطق الحارة، ومن جهة أخرى الحفاظ على صحة مستعملي المباني باستخدام طرق التبريد الطبيعية، ومن أهمها استخدام أبراج الرياح والتبريد والتي استعملت في المباني التقليدية.

إن المشكلة الأساسية في المناطق الصحراوية الحارة الجافة تنحصر في قلة نسبة الرطوبة المتواجدة بالجو، وفي مثل هذه المناطق الجافة فان زيادة ترطيب الهواء تعمل على خفض درجة حرارته قبل دخوله إلي فراغات وغرف المبنى مما يعمل على زيادة الشعور بالراحة الحرارية للمتواجدين داخل المبنى.

والهدف من هذه الدراسة هو معرفة أهم المحددات التصميمية لأبراج التبريد الطبيعي المربعة (طراز كاننجهام وثمبسون) (Cunningham & Thompson) والدائرية الشكل (طراز جيفونى) Givoni، مع محاولة الوصول إلى أكبر كفاءة تبريد ممكنة.

والمنهج الذي تم إتباعه في هذا البحث يظهر من خلال مرحلتين أساسيتين:

١- استنباط أسس تصميم أبراج التبريد المربعة والدائرية، باستخدام بعض المعادلات الحسابية المستنتجة من دراسات وأبحاث سابقة.

٢- القيام بعمل قياسات حقلية على أحد ملاقف الهواء الاسطوانية بمبنى ورش كلية الفنون التطبيقية بجامعة حلوان بضواحي مدينة القاهرة، من أجل تطوير الأداء الحراري له باستخدام أسلوب الترطيب المباشر للهواء cooling evaporative direct، ومقارنة نتائج القياسات الحقلية مع نتائج الحسابات الخاصة بالبرج الدائري (طراز جيفونى).

- مقدمة :

إن من أهم مبادئ التصـميم المعمارى المسـتدام، هو التقليل من اسـتخدام الطاقة والتي تستخدم بصفة رئيسية في تبريد المباني المعاصـرة في المناطق الحارة، ومن جهة أخرى الحفاظ على صـحة مستعملي المباني باستخدام طرق التبريد الطبيعية، ومن أهمها استخدام أبراج الرياح والتبريد والتي استعملت في المباني التقليدية (وزيري، ٢٠٠٧).

إن المشكلة الأساسية في المناطق الصحراوية الحارة الجافة تنحصر في قلة نسبة الرطوبة المتواجدة بالجو، فإذا كانـت الرطوبة عالية على الأجزاء السـاحلية بصـفة عامة كما في بـلاد الخليج العربي على سـبيل المثال، فإنها لا تزيد على ١٠٪ في أغلب المناطق الداخلية الجافة التي تبعد عن سـاحل الخليج العربي، وفي مثل هذه المناطق الجافة فـان زيـادة ترطيب الهواء تعمل على خفض درجة حرارته قبل دخوله إلي فراغات وغرف المبنى مما يعمل على زيادة الشعور بالراحة الحرارية للمتواجدين داخل المبنى.

والهدف من هذه الدراسة هو معرفة أهم المحددات التصميمية لأبراج التبريد الطبيعى المربعة (طراز كاننجهام وثمبسـون) (Cunningham & Thompson) والدائرية الشكل (طراز جيفونى) Givoni، من أجل الوصول إلى أكبر كفاءة تبريد ممكنة.

والمنهج الذي تم إتباعه في هذا البحث يظهر من خلال مرحلتين أساسيتين:

١-اسـتنباط أسس تصميم أبراج التبريد المربعة والدائرية، باسـتخدام بعض المعادلات الحسابية المستنتجة من دراسات وأبحاث سابقة.

٢-القيام بعمل قياسـات حقلية على أحد ملاقف الهواء الاسـطوانية بمبنى ورش كليـة الفنون التطبيقية بجامعة حلوان بضواحى مدينة القاهرة، من أجل تطوير الأداء الحرارى له باستخدام أسلوب الترطيب المباشر للهواء direct coolingevaporative، ومقارنة نتائج القياسات الحقلية مع نتائج الحسابات الخاصة بالبرج الدائرى (طراز جيفونى).

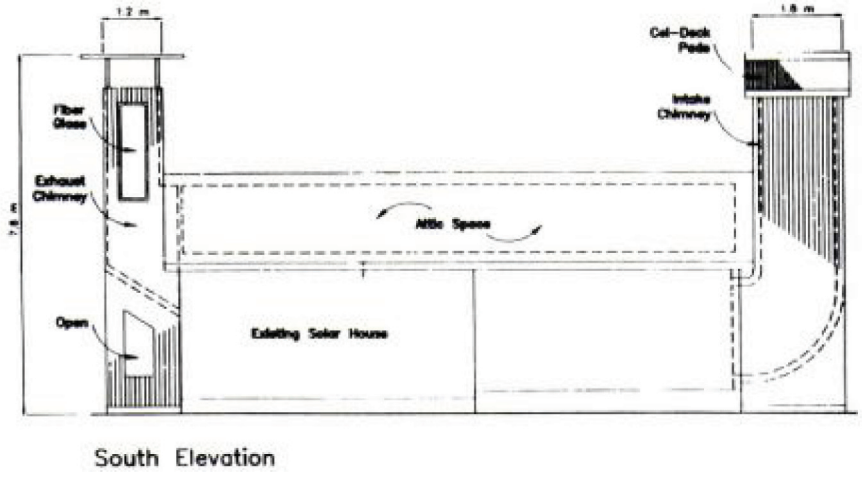
ولمعرفـة الأسـس التصـميمية وتطوير الأداء الحرارى لكل مـن أبراج التبريد المربعة والاسـطوانية في المناطق الصحراوية الجافة، فسيتم افتراض أن متوسط درجة الحرارة الجافة Dry Bulb Temp. في الصيف تبلغ حوالي ٣٩ درجة مئوية، مع متوسط رطوبة نسبية تبلغ حوالي ١٥٪، وهي ظروف مناخية تسود في العديد من المناطق الداخلية الحـارة الجافة بالبلاد العربية، وباسـتخدام المعلومات المناخية السـابقة يمكن تحديد درجـة الحرارة الرطبة Wet Bulb Temp. وذلك باستخدام المنحنى البيومناخى .Building Bio-Climatic Chart

١. تحليل العوامل المؤثرة على تصميم أبراج التبريد المربعة :

قـام الباحثـان كاننجهـام وثمبسـون Cunningham & Thompson (1986)، بتطوير واختبـار نظام تبريد طبيعـي بالتبخـير، في "تاسـون" بولاية "أريزونـا"، وهذا النظام يتكون من برج تبريد مربـع (١,٨٠ X ١,٨٠م) وبارتفـاع ٧,٦م، ملاصـق لمبنـى معزول جيدا بمسـاحة ١٠٠ مترا مربعا، ولهـذا البرج أربع فتحـات علوية يلقف من خلالها الهواء، وموضـوع خلف كل فتحة منها طبقة بسـمك ١٠سم من المواد النباتية السليلوزية التي يتم ترطيبها بالماء، ومسـاحة مقطع البرج من الداخل تسـاوى نصف مساحة المواد السـليلوزية المرطبة، ويتم حساب ارتفاع البرج من مستوى قاعدته السفلية وحتى منتصف ارتفاع الطبقة النباتية السليلوزية، شكل (١).

والنظام يحتوى أيضا على مدخنة شمسية كى تساعد على تدفق الهواء البارد خلال برج التبريد المربع والمبنى أيضا، وقد

أوضح الباحث «جيفونى» (Givoni، 1994) بأن هذه المدخنة الشمسية لم يكن لها تأثير ملموس على أداء نظام التبريد.



شكل (١): الواجهة الجنوبية للمبنى التجريبى ويظهر برج التبريد المربع من طراز «كاننجهام وسمبثون»، وواجهة المدخنة الشمسية أيضا (Givoni، 1994).

وقد تم استخدام أبراج التبريد المربعة الشكل لتبريد العديد من المباني وبخاصة في المناطق الحارة الجافة، وقد أجريت العديد من الأبحاث والقياسات لتقييم الأداء الحرارى لهذه الأبراج ومدى كفاءتها في التبريد، ومن أهم هذه الدراسات تقييم الأداء الحرارى لأبراج التبريد الملحقة بجامع الرحمانية في مدينة "سكاكا" (الحمدي وآل سعود، ١٩٩٩)، وماقام به الباحثان آل سعود والحمدى (١٩٩٩) للتعرف على فاعلية أبراج التبريد في فندق النزل في مدينة "سكاكا" بالجوف بالسعودية، وقد أظهرت النتائج فعالية أبراج التبريد في تبريد الفناء الداخلي للفندق والغرف المحيطة بالفناء (الحمدى، ٢٠٠٥).

كما أجريت دراسة لمعرفة المحددات التصميمية لبرج التبريد المربع (الارتفاع، مساحة مقطع البرج، مسطح الترطيب..)، عن طريق تقييم الأداء الحراري لمبنى في الهند يستخدم برج تبريد تحت ظروف المناخ الحار الجاف والمناخ المختلط composite (Sodha & et al. 2003).

ولمعرفة بعض من أهم المحددات التصميمة للأبراج المربعة من طراز «كاننجهام وثمبسون»، فقد تم استخدام المعدلات الحسابية التالية (Givoni، 1994):

أ- لمعرفة درجة حرارة الهواء المرطب الخارج من البرج (Texit):

Texit = DBT – 0.87 * (DBT-WBT); (°C), Where:

* DBT= Dry bulb temp.; (°C).

* WBT= Wet bulb temp.; (°C).

ب- لمعرفة معدل تدفق الهواء (Flow) الخارج من البرج:

Flow = 0.033 * Aevap * $(H*(DBT-WBT)^{0.5}$; (m^3/s),Where:

* Aevap = Area of the wetted pads; (m^2).

* H = Height of the tower; (m).

ج- لمعرفة درجة الحرارة المتوقعة(Indoor air temp Tin) داخل المبنى (No-Mass Building) الذي يستخدم البرج المربع:

Tin = (UA*To + 2*0.33*Flow* Texit+Q) / (0.67*Flow+UA); (°C).

Where:

To = Outdoor air temp.; (°C).

Q = Internal and solar heat gain; (Watts) (assumed as 500 watts).

UA = Hourly heat gain coefficient of the building; W/ °C. (UA = BLC/24; where:

BLC= Building loss coefficient; Wh/ °C Watt per hour (assumed as 7000).

د- لحساب كفاءة برج التبريد المربع:

Cooling efficiency = [(DBT- Texit) / (DBT-WBT)] * 100.

وباستخدام المعادلات السابقة أمكن تحليل أهم العوامل المؤثرة على أداء أبراج التبريد المربعة، تحت الظروف المناخيــة للمناطــق الحارة الجافة، وقد أخذ في الاعتبار تغيير مســاحة مســطح الترطيب (طبقة المواد الســليلوزية) المستخدمة في البرج، وكذلك تغيير ارتفاع البرج من أجل الوصول لأفضل تصميم يعطى أكبر كفاءة تبريد ممكنة.

١,١ تأثير تغيير مساحة مسطح الترطيب:

يتضح من تحليل النتائج الواردة بجدول (١) وشكل (٢-أ)، أنه كلما زادت مساحة مسطح الترطيب المستخدم في البرج فان درجة حرارة الهواء داخل المبنى (Tin) تقل، كما أن معدل تدفق الهواء (Flow rate) داخل البرج يزداد باطراد، ويمكن تحديد مدى تأثير زيادة مسطح الترطيب على انخفاض درجة الحرارة داخل المبنى المراد تبريده كمايلي:

- بزيادة مسطح الترطيب من ١ إلي ٢م^{٢} فان درجة الحرارة تقل في المتوسط ٢ °م.
- بزيادة مسطح الترطيب من ٢ إلي ٤م^{٢} فان درجة الحرارة تقل في المتوسط ١,٢٩ °م.
- بزيادة مسطح الترطيب من ٤ إلي ٦م^{٢} فان درجة الحرارة تقل في المتوسط ٠,٤٨ °م.

من ذلك يتضح أن استعمال مسطح ترطيب يزيد عن ٤م^{٢} (في هذه الحالة تكون مساحة مقطع البرج المربع ٢م^{٢}) لن يكون له تأثير ملموس على انخفاض درجات الحرارة داخل الغرفة أو الفراغ الداخلى المراد تبريده.

٢,١ تأثير تغيير ارتفاع البرج المربع:

يتضــح من تحليل النتائج الواردة بجدول (١) وشــكل (٢-ب)، أنه كلما زاد ارتفاع البرج فان درجة حرارة الهواء داخل المبنى (Tin) تقل بصفة عامة، كما أن معدل تدفق الهواء داخل البرج يزداد باطراد ويمكن تحديد مدى تأثير زيادة ارتفاع البرج على انخفاض درجة الحرارة داخل المبنى أو الفراغ المراد تبريده كمايلي:

- بزيادة الارتفاع من ٢ إلي ٤م فان درجة الحرارة تقل في المتوسط ٠,٨٩ °م.
- بزيادة الارتفاع من ٤ إلي ٦م فان درجة الحرارة تقل في المتوسط ٠,٣٩ °م.
- بزيادة الارتفاع من ٦ إلي ٨م فان درجة الحرارة تقل في المتوسط ٠،٢٦ °م.
- بزيادة الارتفاع من ٨ إلي ١٠م فان درجة الحرارة تقل في المتوسط ٠،٢٤ °م.

مــن ذلك يتضــح أن زيادة ارتفاع الــبرج عن ٤م لن يكون له تأثير ملموس علــى انخفاض درجات الحرارة داخل

الغرفة أو الفراغ، لكن من الناحية العملية فان هذا الارتفاع لن يكون مناسبا للاستخدام في المباني حتى ذات الطابق الواحد (أي ارتفاعها ٣م فقط)، لذلك فانه يكون من المناسب عمليا أن يتم استخدام برج تبريد مربع لايزيد ارتفاعه عن ٦م بالنسبة للمباني ذات الطابق الواحد، واستخدام برج تبريد لايزيد ارتفاعه عن ٨م بالنسبة للمباني ذات الطابقين (أي ارتفاعها لايزيد عن ٦م).

ومن التحليل السابق نجد أن استخدام البرج المربع من طراز (Cunningham & Thompson) بالمواصفات السابقة، شكل (٣)، سوف يساهم في تقليل درجة الحرارة من ٣٩ إلي حوالي ٢٥ °م أي حوالي ١٤ °م في المتوسط اليومي، بكفاءة تبريد حوالي ٧٧٪ عندما تكون متوسط الرطوبة النسبية بالمنطقة ١٥٪.

مع الأخذ في الاعتبار أنه توجد خصائص هندسية أخرى تتعلق بشكل سطح المبنى ومادة بناء البرج نفسه يمكن أن تؤثر على الأداء الحرارى لبرج التبريد، كما أن بعض الدراسات أوضحت أنه يمكن زيادة سرعة الهواء عند فتحات مخارج الهواء للملاقف والأبراج بعمل زاوية ميل سقف للملقف حوالى ٣٠ درجة، وتقليل المساحة الداخلية للبرج مع مراعاة العلاقة بين مساحة وأماكن فتحات دخول وخروج الهواء (Rizq & Abd Elghaffar. 2007).

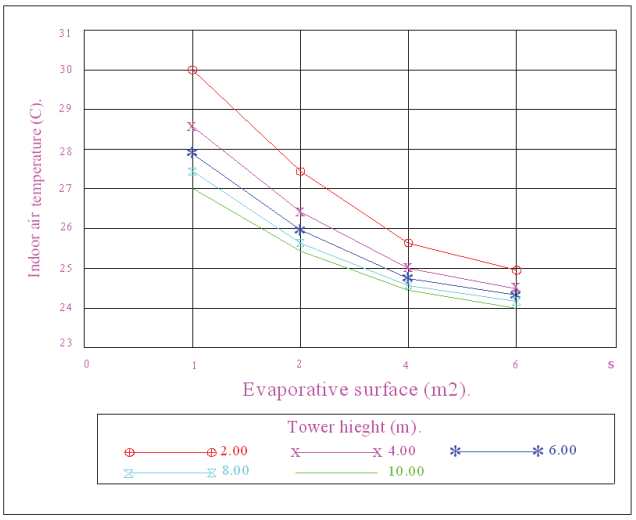
جدول رقم (١): تأثير تغيير مسطح التبريد والارتفاع بالبرج المربع على درجة الحرارة داخل المبنى.

مسطح الترطيب (م٢)	ارتفاع البرج (م)	معدل تدفق الهواء (م٣/ث)	درجة الحرارة الداخلية (°م)
1	2	0.19	30.00
1	4	0.28	28.57
1	6	0.34	27.89
1	8	0.39	27.44
1	10	0.44	27.00
2	2	0.39	27.44
2	4	0.56	26.42
2	6	0.68	25.95
2	8	0.79	25.64
2	10	0.88	25.43
4	2	0.79	25.64
4	4	1.12	25.00
4	6	1.37	24.74
4	8	1.58	24.57
4	10	1.77	24.44
6	2	1.18	24.95
6	4	1.68	24.50
6	6	2.00	24.32
6	8	2.37	24.18
6	10	2.65	24.00

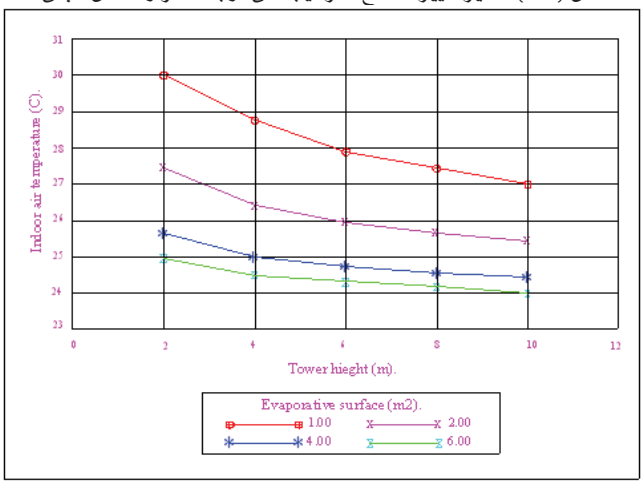
٢. تحليل العوامل المؤثرة على تصميم أبراج التبريد الاسطوانية:

قام الباحث «جيفونى» باستخدام برج تبريد اسطواني الشكل ويستخدم أدشاش مائية بداخله كمصدر لترطيب الهواء، في معرض «اكسبو ٩٢» بأسبانيا لتبريد أحد الفراغات الخارجية، كما اتضح أنه يمكن استخدام هذا النظام

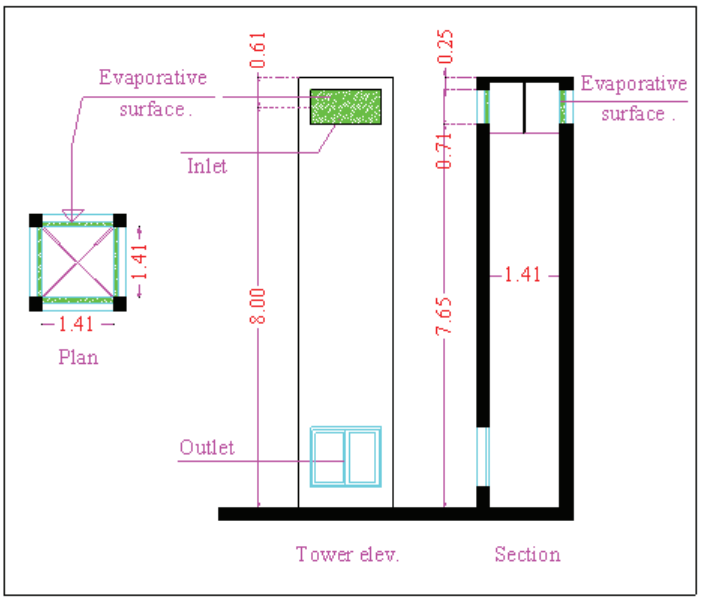
في تبريد الفراغات الداخلية أيضا.



شكل (٢-أ): تأثير تغيير مسطح الترطيب على درجة الحرارة داخل المبنى.

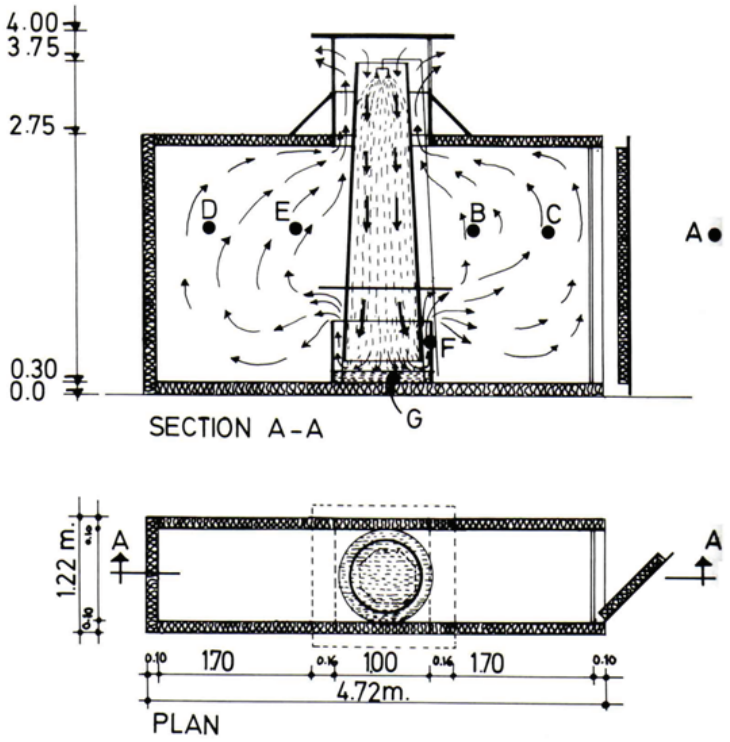


شكل (٢-ب): تأثير تغيير ارتفاع البرج على درجة الحرارة داخل المبنى.



شكل (٣): مواصفات برج التبريد المربع المقترح طبقا لظروف البيئة الحارة الجافة. (من دراسة الباحث)

وقد قام أحد الباحثين (Al-Hemmidi 1992،) بعمل قياسات على خلية اختبارية بمقاسات ٧٥X ,٢٤ ,١م وبارتفاع ٢,٥م، مبنية من خشب الأبلكاج، لمعرفة وتقييم الأداء الحرارى لهذا النظام، وقد وضع في منتصفها برج دائري المسقط مسلوب المقطع ومتوسط مساحة مقطعه حوالي ٠,٣٨ مترا مربعا، شكل (٤)، ويستخدم أدشاش مائية بداخله لترطيب الهواء، ويتم احتساب ارتفاع البرج من مستوى سطح الماء بالحوض عند أسفل قاعدة البرج وحتى رؤوس الأدشاش أعلى البرج.



شكل (٤): خلية الاختبار لبرج التبريد الدائرى من طراز جيفونى (Givoni. 1994) .

وبناء على مقارنة الأداء الحرارى لبرج التبريد الاسطوانى تحت ظروف مناخية مختلفة (الرياض، لوس أنجلوس، يوكوهاما)، فان النظام أثبت فاعلية في التبريد الطبيعى للمبانى في هذه المناطق المناخية المختلفة (Givoni, 1997).

كما قام باحثان بتطوير برنامج حاسب إلى لتحديد كفاءة تبريد برج التبريد الاسطوانى، من خلال ادخال المعلومات المناخية المتاحة للمنطقة المراد استخدام هذا النظام بها، مثل درجة الحرارة الجافة والرطوبة النسبية وسرعة الهواء (باحبيل والحمدى، ٢٠٠٥).

ولمعرفة بعض من أهم المحددات التصميمة للأبراج الاسطوانية من طراز «جيفونى»، فقد تم استخدام المعادلات الحسابية التالية (Givoni. 1994):

أ- لحساب درجة حرارة الهواء المرطب الخارج من البرج (Texit):

Texit =DBT –((DBT-WBT)*(1-exp(-0.8*H)*(1-exp(-0.15*WF)); (°C).
Where:
* H= Height of the shower; (m).
* WF= Water flow rate.; (liters/minute).

ب- لحساب معدل تدفق الهواء بالبرج:

Flow *0.0125 = WF *$H^{0.5}$ (m^3/sec.).

ج- لحساب كفاءة برج التبريد الاسطوانى:

Cooling efficiency = [(DBT- Texit) / (DBT-WBT)] * 100.

وباستخدام المعادلات السابقة أمكن تحليل أهم العوامل المؤثرة على أداء أبراج التبريد الدائرية تحت ظروف المناخ الحار الجاف، وقد أخذ في الاعتبار تغيير معدل تدفق الماء الخارج من الأدشاش الموجودة بداخل جسم البرج وكذلك تغيير ارتفاع البرج من أجل الوصول لأفضل تصميم يعطى أكبر كفاءة للتبريد.

١,٢ تأثير تغيير معدل تدفق الماء:

يتضح من تحليل النتائج الواردة بجدول (٢) وشكل (٥-أ)، أنه كلما زاد معدل تدفق الماء فان درجة حرارة الهواء المرطب الخارج من البرج (Texit) تقل، كما أن معدل تدفق الهواء (rate Flow) داخل الفراغ يزداد باطراد، ويمكن تحديد مدى تأثير زيادة معدل تدفق الماء على انخفاض درجة حرارة الهواء المرطب الخارج من البرج كما يلي:

- بزيادة معدل التدفق من ١٠ إلي ١٥ لتر/دقيقة فان درجة الحرارة تقل بمتوسط ٠,٩٥ °م.
- بزيادة معدل التدفق من ١٥ إلي ٢٠ لتر/دقيقة فان درجة الحرارة تقل بمتوسط ١،٠٠ °م.
- بزيادة معدل التدفق من ٢٠ إلي ٢٥ لتر/دقيقة فان درجة الحرارة تقل بمتوسط ٠،٣٤ °م.

من ذلك يتضح أن استعمال معدل تدفق يزيد عن ٢٠ لتر/دقيقة لن يكون له تأثير ملموس على انخفاض درجات الحرارة داخل المبنى أو الفراغ المراد تبريده.

٢,٢ تأثير تغيير ارتفاع الأدشاش داخل البرج الاسطوانى:

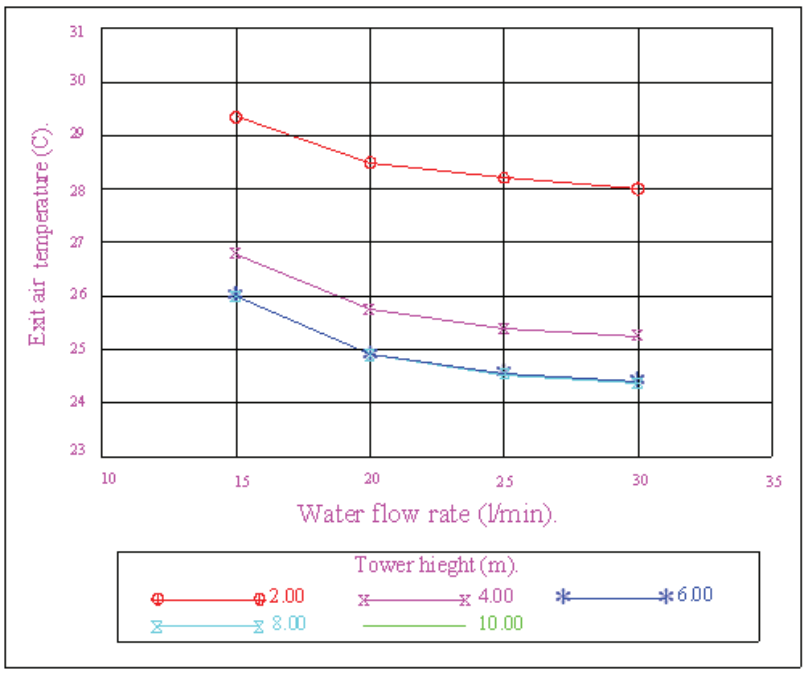
يتضح من تحليل النتائج الواردة بجدول (٢) وشكل (٤-ب)، أنه كلما زاد ارتفاع الأدشاش فان درجة حرارة الهواء المرطب الخارج من البرج (Texit) تقل بصفة عامة، ويمكن تحديد مدى تأثير زيادة ارتفاع الأدشاش على انخفاض درجة حرارة الهواء المرطب الخارج من البرج كما يلي:

- بزيادة الارتفاع من ٢ إلي ٤م فان درجة الحرارة تقل في المتوسط ٢،٦٣ °م.
- بزيادة الارتفاع من ٤ إلي ٦م فان درجة الحرارة تقل في المتوسط ٠،٦٩ °م.
- بزيادة الارتفاع من ٦ إلي ٨م فان درجة الحرارة تقل في المتوسط ٠،١٠ °م.
- بزيادة الارتفاع من ٨ إلي ١٠م فان درجة الحرارة لاتقل تقريبا.

جدول رقم (٢): تأثير تغيير معدل تدفق الماء وارتفاع الأدشاش بالبرج الأسطواني على درجة حرارة الهواء المرطب الخارج من البرج .

معدل تدفق الماء (لتر/دقيقة)	ارتفاع الأدشاش (م)	معدل تدفق الهواء ($م^3$/ث)	درجة حرارة الهواء المرطب (°م)
10	2	0.17	27.13
10	4	0.25	24.73
10	6	0.30	24.12
10	8	0.35	24.00
10	10	0.39	23.99

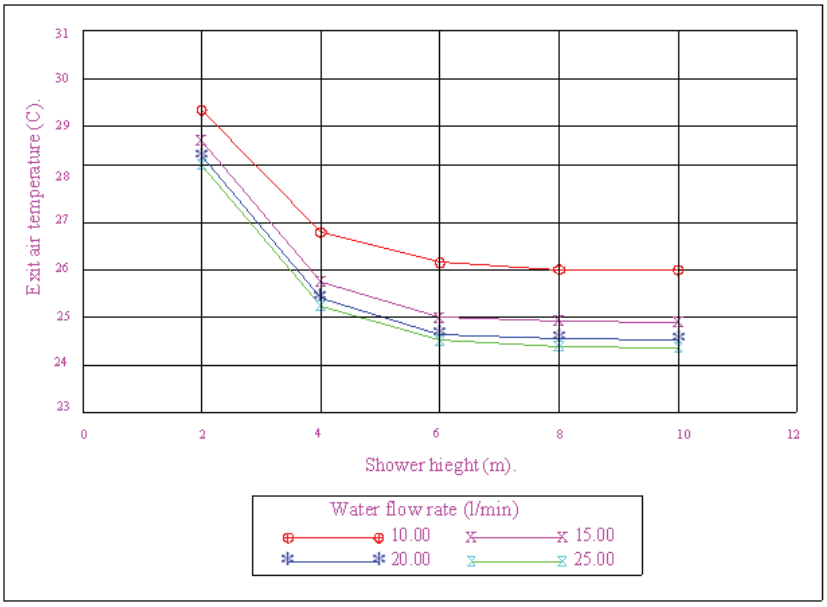
معدل تدفق الماء (لتر/دقيقة)	ارتفاع الأدشاش (م)	معدل تدفق الهواء ($م^3$/ث)	درجة حرارة الهواء المرطب (°م)
15	2	0.26	26.34
15	4	0.37	23.78
15	6	0.45	23.14
15	8	0.52	23.00
15	10	0.59	22.99
20	2	0.35	25.49
20	4	0.50	22.75
20	6	0.61	22.00
20	8	0.70	21.93
20	10	0.79	21.91
25	2	0.44	25.20
25	4	0.62	22.41
25	6	0.76	21.65
25	8	0.88	21.57
25	10	0.98	21.55



شكل (٥-أ): تأثير معدل تدفق الماء على درجة حرارة الهواء الخارج من البرج الاسطوانى.

من ذلك يتضح أن زيادة ارتفاع الأدشاش داخل البرج عن ٤م لن يكون له تأثير ملموس على انخفاض درجات الحرارة داخل الغرفة أو الفراغ، لكن من الناحية العملية فان هذا الارتفاع لن يكون مناسبا للاستخدام في المباني حتى ذات الطابق الواحد (أي التي ارتفاعها ٣م فقط)، لذلك فانه يكون من المناسب عمليا أن يتم استخدام برج تبريد اسطوانى لا يزيد ارتفاعه عن ٦م بالنسبة للمباني ذات الطابق الواحد، واستخدام برج تبريد لايزيد ارتفاعه عن ٨م بالنسبة للمباني ذات الطابقين (أي ارتفاعها لا يزيد عن ٦م).

من التحليل السابق نجد أن استخدام هذا البرج الأسطواني من طراز جيفونى بالمواصفات السابقة، سوف يساهم في تقليل درجة الحرارة من ٣٩ إلي حوالي ٢٣ درجة مئوية أي بحوالي ١٦ درجة مئوية في المتوسط اليومي بكفاءة تبريد حوالي ٨٨٪ عندما تكون متوسط الرطوبة النسبية بالمنطقة ١٥٪، وكلما زادت نسبة الرطوبة قلت كفاءة التبريد للبرج.



شكل (٥- ب): تأثير تغيير ارتفاع الأدشاش على درجة حرارة الهواء الخارج من البرج الاسطوانى.

٣. تطوير الأداء الحرارى لملقف هواء اسطوانى باستخدام رشاش مائى:

أوضحت بعض الأبحاث والدراسات السابقة أفضلية استعمال برج التبريد الاسطوانى، لوجود بعض السلبيات في الأبراج المربعة حيث أن المواد السليلوزية النباتية (أو ألواح الكرتون) تقلل من سرعة الهواء بنسبة من ١٠٪ إلى ٢٠٪، كما أنها تحتاج إلى صيانة أو تغيير دورى نظرا لانسداداها بفعل ترسيب بعض المواد العالقة بالهواء كحبيبات الرمال أو الأتربة (Givoni.1994).

لذلك فقد اهتمت العديد من الأبحاث الحديثة نسبيا بعمل تجارب وقياسات على أبراج اسطوانية بالحجم الطبيعى، لتطوير الأداء الحرارى لهذه النوعية من أنظمة التبريد السلبى التى تستخدم نظام التبريد بالتبخير، نذكر منها على سبيل المثال مايلى:

١- الدراسة التى قام بها مجموعة من الباحثين (2005.al.et&Etzion) على برج تبريد اسطوانى تجريبى بالحجم الطبيعى، في اسرائيل (Boqer-Sde)، وارتفاع البرج ٨م وبقطر ٢,٢٥ م (عند أكبر مقطع له)، وبداخله نظام لرش الماء ومروحة لسحب الهواء إلى داخل جسم البرج، والبرج مكون من مخروطين العلوى مقلوب والأسفل عدل، وله فتحة دخول رئيسية علوية للهواء وفتحة دخول فرعية عند التقاء المخروط العلوى بالسفلى.

٢- الدراسة التى قام بها باحثان (2006.Joubert &Carew) على برج اسطوانى تجريبى بالحجم الطبيعى، موضوع في مبنى يستخدم كصالة عرض في جنوب أفريقيا، ويستخدم بداخله عدة مخارج للماء (Nozzeles)، بحيث يمكن التحكم في كمية الماء المستخدمة لترطيب الهواء الداخل للبرج.

ج- الدراسة التى قام بها باحثان على ملقف هواء اسطوانى مبنى بالطوب بالبرتغال، من أجل تطوير الأداء الحرارى

له باستخدام نظام الأدشاش، وباستخدام برنامج محاكاة بالحاسب الإلى(Guedes & Melo De, 2006).

كما قام باحثان (Hemiddi-Al & Saud-Al, 2003) باجراء دراسة على أحد المساكن بضاحية "العوينة" بالرياض، لمعرفة تأثير استخدام أبراج التبريد بنظام التبخير لتقليل درجة حرارة الفناء الداخلى للمنزل وبالتإلى الحجرات المحيطة به.

١,٣ وصف المبنى والملقف الاسطوانى:

قام مقدم البحث باستخدام رشاش مائى (من النوع الذي يستخدم في رش الحدائق والمسطحات الخضراء)، لاختبار مدى فاعليته في تطوير الأداء الحرارى لأحد ملاقف الهواء الأسطوانية الموجودة بمبنى ورش كلية الفنون التطبيقية بجامعة حلوان بمصر، مع مقارنة نتائج القياسات الحقلية مع النتائج المحسوبة من المعادلات المستنتجة بواسطة "جيفونى".

يحتوى مبنى ورش كلية الفنون التطبيقية على أربعة ملاقف اسطوانية مبنية بالطوب الأسمنتى المصمت، شكل (٧)، وسقف هذه الورش مغطى بتربة زراعية وتفتح على فناء مكشوف يقع تحت مستوى سطح الأرض، وكل ملقف يستخدم لتهوية ورشتين متجاورتين عن طريق نافذتين قرب قاعدة البرج، وكل نافذة تفتح على ورشة من هاتين الورشتين، والملقف غير مغطى من فتحته العلوية بل مكشوف تماما مع وجود ميل بزاوية ٤٥ درجة، وقد تم اختيار الملقف الذي تواجه فتحته العلوية جهة الشمال تماما، ويخترق جسم الملقف من الداخل كمرة خرسانية ظهرها العلوى على ارتفاع ٢,٥٠م، أما ارتفاع الملقف من قاعدته السفلية حتى أعلى نقطة لفتحته العلوية فهى ٦م.

٢,٣ وصف التجربة:

تم وضع رشاش مائى ذو ثلاثة أفرع على السطح العلوى للكمرة الخرسانية التى تخترج فراغ الملقف من الداخل، شكل (٨) بحيث يتحرك الرشاش حركة دائرية كاملة (٣٦٠ درجة) عند خروج الماء منه، فيعمل على ترطيب الهواء المار بجسم الملقف فيتم تقليل درجة حرارته، وكان معدل كمية الماء الخارج من الرشاش هو ٧ لتر/ دقيقة.

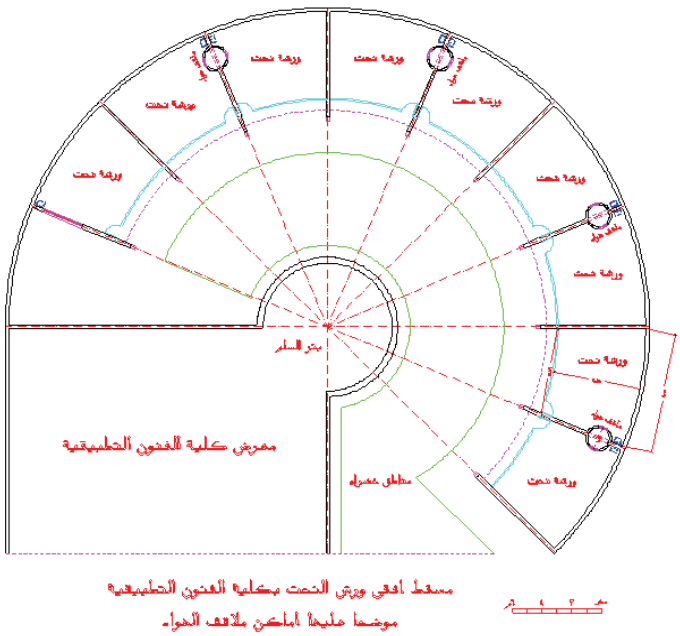
وتم تسجيل القياسات باستخدام الجهازين الرقميين الآتيين: جهاز القياس الأول هو (EM 4000-M) ويستخدم في قياس درجة الحرارة والرطوبة النسبية وسرعة الرياح، وجهاز القياس الثانى فهو(Thermometer combined/ Art Hygrometer. 22011/22015) ويستخدم في قياس درجة الحرارة والرطوبة النسبية.

٣,٣ نتائج القياسات:

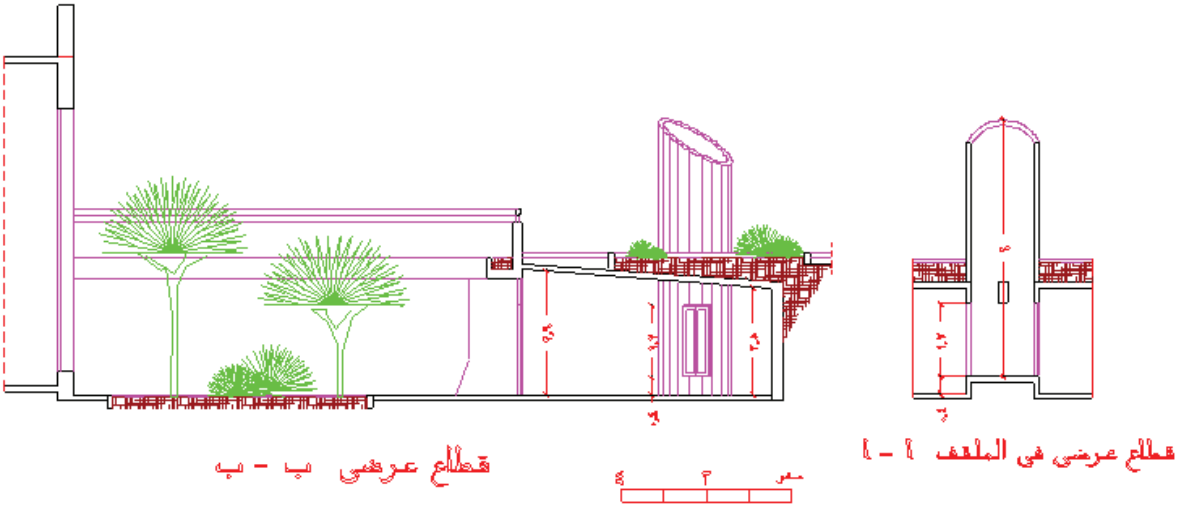
يتضح من جدول (٣)، وشكل (٩) نتائج القياسات التى تم تسجيلها خلال أربعة أيام من شهر أغسطس، ويلاحظ أنه في اليوم الثالث من التجربة وفي الساعة الثانية ظهرا وصل الفرق بين درجة حرارة الهواء الخارجى والهواء المرطب الداخل إلى فراغ الحجرة من النافذة أسفل الملقف كان ٨,٦ درجة مئوية، كما أنه في اليوم الرابع من التجربة بلغ الفرق ٧,٧ درجة مئوية في الساعة الثانية ظهرا، كما بلغ الفرق ٧,٩ الساعة الثالثة ظهرا.

ان النتائج السابقة توضح أن استخدام مثل هذا الرشاش المائى البسيط (ورخيص الثمن أيضا)، كأداة للترطيب المباشر للهواء بنظام التبخير، قد أسهم بالفعل في تقليل درجة حرارة الهواء الداخل لفراغ الغرفة، ويتوقع أن تعطى هذه التجربة نتائج أفضل في حالة اجرائها في مناطق أكثر جفافا من منطقة التجربة المشار اليها، وفي حالة عدم وجود أية عوائق انشائية (الكمرة الخرسانية التى تخترق جسم برج التبريد من الداخل)، مع وضع

الرشاش المائى في مستوى أعلى عند مدخل البرج.

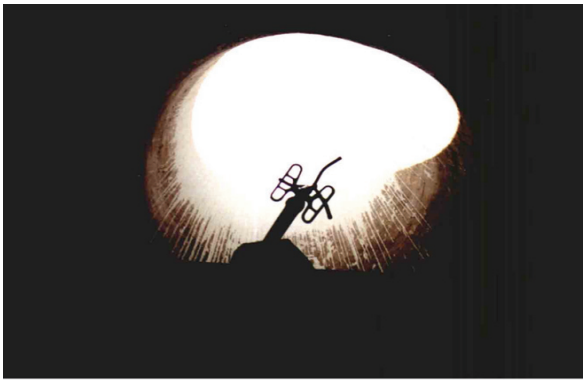






شكل (٧): المبنى ومواصفات وشكل ملقف الهواء الاسطوانى الذي تمت عليه التجربة والقياسات.





شكل (٨): استعمال رشاش مائى كمصدر لترطيب الهواء داخل الملقف الأسطواني أثناء التجربة.

جدول (٣): نتائج قياسات الملقف الاسطوانى بعد استخدام الرشاش المائى. (جميع القياسات خلال شهر أغسطس)

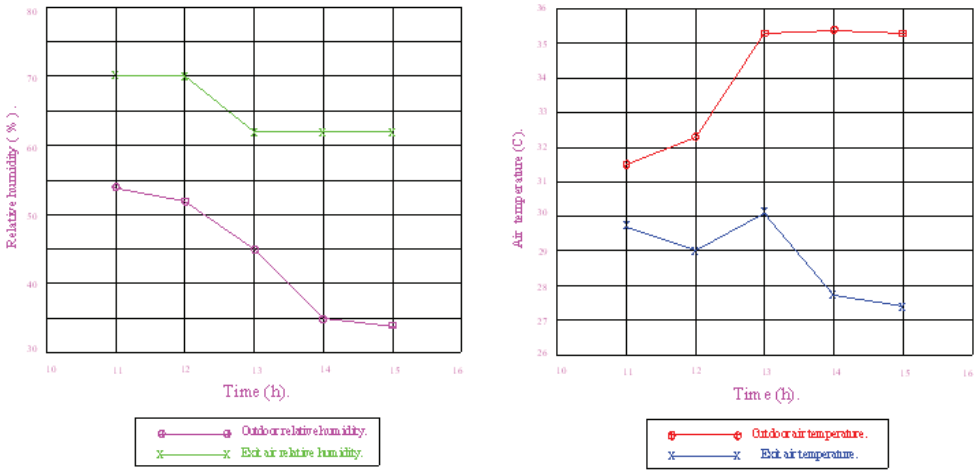
القياسات	درجة حرارة الهواء	(درجة مئوية)	الرطوبة	النسبية	الفرق بعد	التجربة
التوقيت	الخارجية	للهواء المرطب	الخارجية	للهواء المرطب	انخفاض درجة الحرارة	زيادة الرطوبة النسبية
اليوم الأول (الساعة ١٤)	٣٦,٢	٣١,٣	٤٨٪	٦٣٪	٤,٩	١٥٪
اليوم الثانى (الساعة ١٣)	٣٢,٧	٢٨,٦	٥٥٪	٧٣٪	٤,١	١٨٪
اليوم الثانى (الساعة ١٤)	٣٥,٦	٢٨,٢	٤٥٪	٧٥٪	٧,٤	٣٠٪
اليوم الثانى (الساعة ١٥)	٣٦,٢	٢٩,٧	٤٧٪	٧٠٪	٦,٥	٢٣٪
اليوم الثالث(الساعة ١٤)	٣٧,٣	٢٨,٧	٢٧٪	٥٧٪	٨,٦	٣٠٪
اليوم الثالث (الساعة ١٦)	٣٦,٣	٢٩,٨	٣٣٪	٥٥٪	٦,٥	٢٢٪
اليوم الرابع (الساعة ١١)	٣١,٥	٢٩,٧	٥٤٪	٧٠٪	١,٨	١٦٪
اليوم الرابع (الساعة١٢)	٣٥,٢	٣٠,١	٤٥٪	٦٢٪	٥,١	١٧٪
اليوم الرابع (الساعة ١٤)	٣٥,٤	٢٧,٧	٣٥٪	٦٢٪	٧,٧	١٨٪
اليوم الرابع (الساعة ١٥)	٣٥,٣	٢٧,٤	٣٤٪	٦٢٪	٧,٩	١٧٪

٤,٣ التحكم في مستوى رطوبة الهواء الخارج من برج التبريد أثناء التجربة:

كما هو معروف فانه اذا زادت نسبة رطوبة الهواء عن حوالى ٧٠٪ (حتى مع الانخفاض في درجة الحرارة)، فان ذلك يؤدى إلى عدم الشعور بالراحة الحرارية خاصة في الفراغات الداخلية والتي تقل فيها أو تنعدم سرعات الهواء.

لذلك فقد لوحظ أثناء التجربة أن الانخفاض في درجة حرارة الهواء نتيجة ترطيبه، تحتاج لحوالى ١٥ دقيقة حتى تصل إلى المستويات الموضحة في جدول (٣) السابق، ثم تبدأ الرطوبة في الارتفاع التدريجى مع عدم تسجيل انخفاض ملحوظ في درجة حرارة الهواء المرطب الخارج من الملقف.

وبناء على الملاحظة السابقة فقد تم ترطيب الهواء الداخل إلى جسم الملقف لمدة ١٥ دقيقة ليصل إلى أقصى انخفاض في درجة حرارته، وبعد ذلك تم اغلاق الماء الواصل للرشاش (أداة الترطيب المستخدمة)، وتم تسجيل الارتفاع في درجة حرارة الهواء وكذلك الانخفاض في مستوى الرطوبة خلال فترات زمنية محسوبة.



شكل (٩): منحنيات توضح الفرق في درجات الحرارة والرطوبة النسبية، خلال أربعة أيام من شهر أغسطس.

ويلاحظ من شكل (١٠) أنه بعد غلق الرشاش لفترة ٤٥ دقيقة فان درجة حرارة الهواء ترتفع بحوالي ٤ درجة مئوية بينما تنخفض الرطوبة بمقدار ١٨٪، أما بعد حوالى ساعة ونصف فان درجة الحرارة ترتفع بمقدار ٥,١ درجة مئوية بينما تنخفض الرطوبة النسبية بمقدار ٢٠٪، وقد وجد في المتوسط أنه بعد غلق الرشاش بمدة ٣٠ دقيقة فان درجة الحرارة ترتفع ١ درجة مئوية بينما تنخفض الرطوبة النسبية للهواء بمقدار ٧,٥٪ (متوسط قراءات يوم ٨/٢٦).

مما سبق يتضح أنه يمكن استعمال الرشاش لمدة ١٥ دقيقة لترطيب الهواء الداخل للملقف، وهى المدة التى لوحظ أن درجة حرارة الهواء تنخفض فيها لمستوى مقبول من الناحية الحرارية، كما أن الرطوبة النسبية تصل فيها لحوالى نسبة ٧٠٪، وبعد ذلك يتم غلق الرشاش لمدة نصف ساعة فترتفع درجة الحرارة قليلا بينما تقل الرطوبة النسبية، وهكذا.

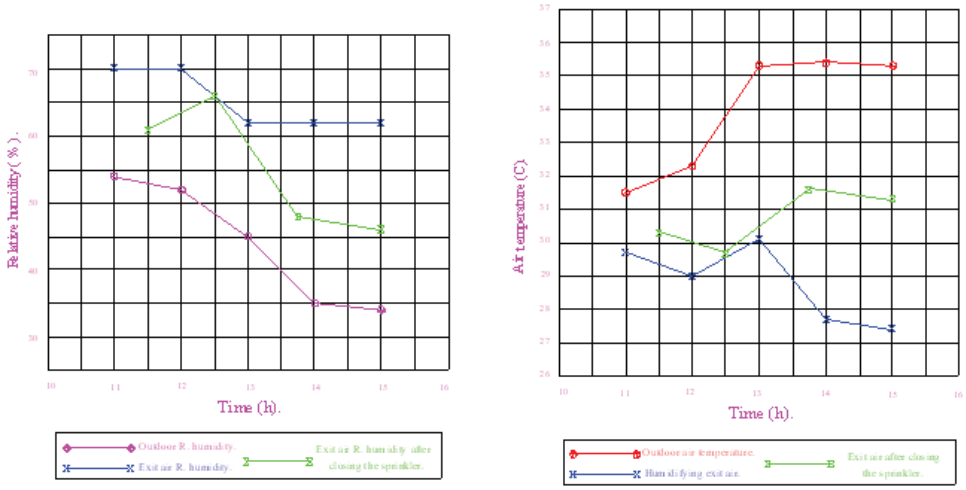
وهذا يعنى أنه يمكن عن طريق التحكم في مدة تشغيل أداة الترطيب داخل الملقف، فانه يمكن التحكم في مستوى الرطوبة النسبية للهواء، مع الحفاظ على درجة حرارة مقبولة داخل نطاق الراحة الحرارية، إلى جانب استخدام نصف كمية الماء في عملية الترطيب مقارنة بحالة استخدام أداة الترطيب طوال فترات التشغيل بالتجربة.

كما يجب أن يؤخذ في الاعتبار أيضا أن وجود تهوية جيدة ومستمرة للفراغات الداخلية سوف يؤدى إلى خفض مستوى الرطوبة النسبية إلى حد معقول، إلى جانب أهمية اتباع نهج استراتيجى من خلال تطوير المتغيرات التصميمية المتعلقة بالبرج للوصول إلى وضع حرارى داخلى مثالى.

٤. مقارنة نتائج قياسات التجربة بنتائج المعادلات الحسابية:

تم عمل مقارنة بين درجة حرارة الهواء المرطب الخارج من ملقف الهواء الاسطوانى نتيجة القياسات الحقلية خلال أربعة أيام من شهر أغسطس، ونتائج المعادلات الحسابية لبرج «جيفونى» الاسطوانى، جدول (٤) وشكل (١١).

وقد لوحظ أنه يوجد تطابق بين القياسات الحقلية ونتائج المعادلات في ثلاث حالات، ووجود فروقات تتراوح مابين ٠,٥٢ إلى ١,٦٢ درجة مئوية في ست حالات، وفرق درجتان مئويتان في حالتين، وهذا يعنى أنه يوجد فرق حوالي ٠,٨٨ درجة مئوية في المتوسط بالنسبة لمجموع الحالات (إجمالي عددها ١١ حالة).



شكل (١٠): أثر غلق الرشاش على الارتفاع في درجة حرارة الهواء المرطب، وانخفاض نسبة رطوبته، خلال فترات زمنية محسوبة.

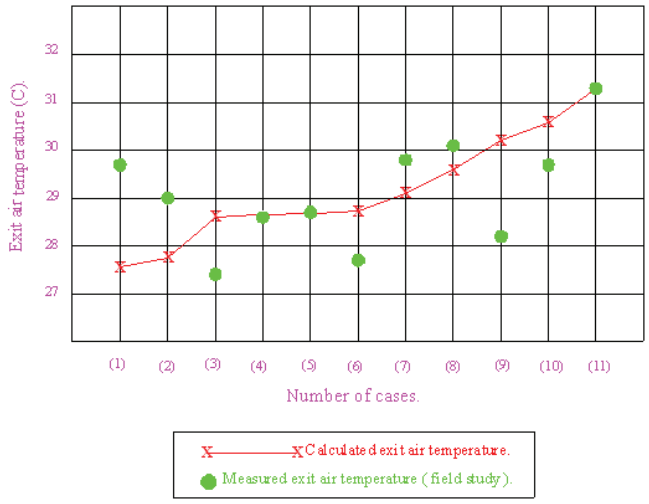
إن النتائج السابقة توضح أنه يوجد تقريبا تطابق كبير بين نتائج القياسات الحقلية والمعادلات الحسابية، بالرغم من اختلاف أداة الترطيب في الحالتين وكذلك اختلاف مقاس قطر كلا البرجين، مما يعنى أن اختلاف أداة

الترطيب سـواء أكانت أدشـاش showers أو رشاشـات مائية sprinklers لايكون له تأثيرعلى الأداء الحرارى لبرج التبريد الاسطوانى، كما أن اختلاف مقاس مقطع البرج لم يكن له تأثير ملحوظ أيضا.

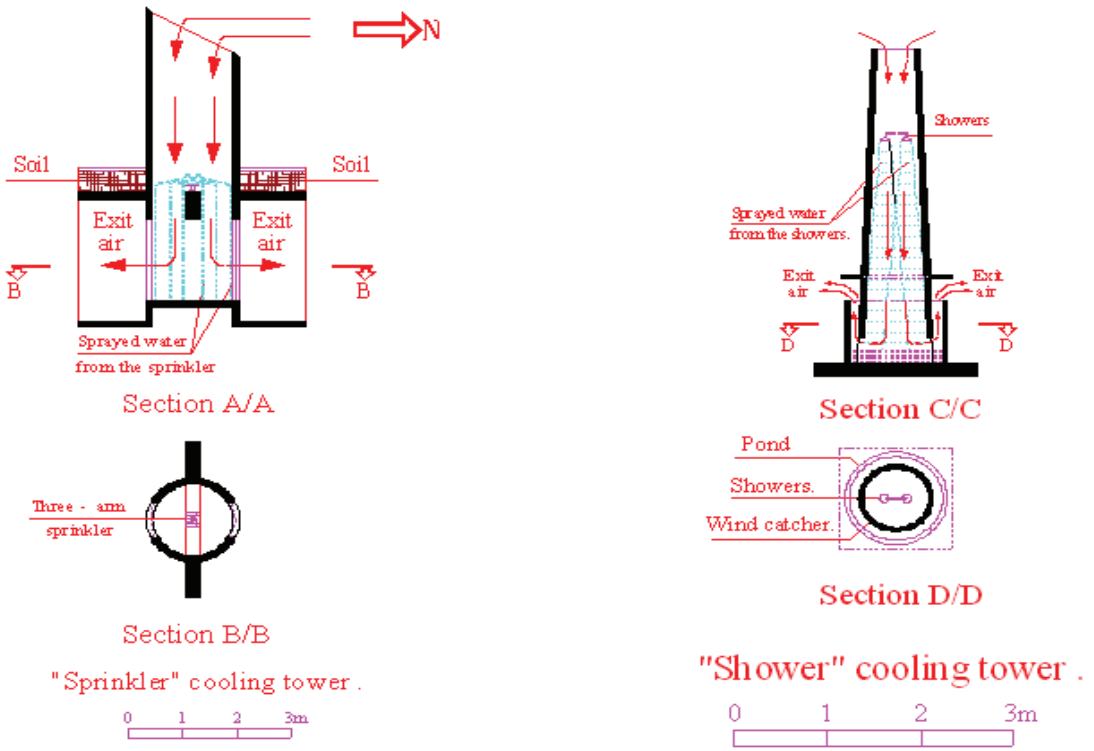
جدول (٤): مقارنة بين نتائج قياسات الحقلية لملقف الهواء الاسطوانى وحسابات معادلة «جيفونى»
(ارتفاع أداة الترطيب ٢,٥م، ومعدل تدفق الماء ٧ لتر/ دقيقة)

عنصر المقارنة / التوقيت	ملقف الهواء الاسطوانى بقطر ثابت ١,٤٦م (درجة حرارة الهواء المقاسة)	برج تبريد "جيفونى" مسلوب البدن (درجة الحرارة المحسوبة)	الفرق بين درجة الحرارة المقاسة والمحسوبة	رقم حالات المقارنة
اليوم الأول (الساعة ١٤)	٣١,٣٠	٣١,٣٠	لايوجد	(١١)
اليوم الثانى (الساعة ١٣)	٢٨,٦٠	٢٨,٦٥	لايوجد	(٤)
اليوم الثانى (الساعة ١٤)	٢٨,٢٠	٣٠,٢٠	٢,٠٠	(٩)
اليوم الثانى (الساعة ١٥)	٢٩,٧٠	٣٠,٥٨	٠,٨٨	(١٠)
اليوم الثالث (الساعة ١٤)	٢٨,٧٠	٢٨,٦٧	لايوجد	(٥)
اليوم الثالث (الساعة ١٦)	٢٩,٨٠	٢٩,١٠	٠,٧٠	(٧)
اليوم الرابع (الساعة ١١)	٢٩,٧٠	٢٧,٥٦	٢,١٤	(١)
اليوم الرابع (الساعة ١٢)	٢٩,٠٠	٢٧,٧٤	١,٢٦	(٢)
اليوم الرابع (الساعة ١٣)	٣٠,١٠	٢٩,٥٨	٠,٥٢	(٨)
اليوم الرابع (الساعة ١٤)	٢٧,٧٠	٢٨,٧١	١,٠٠	(٦)
اليوم الرابع (الساعة ١٥)	٢٧,٤٠	٢٨,٦١	١,٢١	(٣)

لقـد أثبتت القياسـات التي أجراهـا مقدم البحث على ملقف هواء اسـطوانى بقطر داخلى ثابـت قيمته ١,٤٦ متر بمبنى ورش كلية الفنون التطبيقية بجامعة حلوان بالقاهرة أنه يمكن اسـتعمال رشاش مائي Splinker كمصدر لترطيب الهواء بدلا من الأدشـاش داخل البرج، ويعطى تقريبا نفس النتائج التي يمكن الحصـول عليها باسـتخدام أدشـاش داخل برج اسـطوانى مسـلوب البدن (طـراز جيفونى)، شـكل (١٢)، وهو ما يعنى أن مقاسـ مقطع البرج الاسـطوانى ليس له تأثير كبير على درجة حرارة الهواء المرطب، ولكن يرجح أن اتسـاع البرج عند قاعدته ربما يكون له تأثير على معدل تدفق أو سرعة الهواء المار خلال جسم البرج.



شكل (١١): منحنى يوضح المقارنة بين درجات الحرارة المقاسة والمحسوبة.



شكل (١٢): أبراج التبريد التى تستخدم رشاش مائى تعطى نفس نتائج الأبراج التى تستعمل الأدشاش، بشرط وضع أداة الترطيب عند نفس الارتفاع مع ثبات معدل تدفق الماء في الحالتين.

٥. نتائج البحث:

توصل البحث للنتائج التالية:

أ- أوضحت الدراسة التحليلية باستخدام المعادلات الحسابية، أنه بالنسبة لبرج التبريد المربع (طراز كاننجهام وثمبثون) فانه يجب ألا يزيد ارتفاع البرج عن ٦م في حالة استخدامه لتبريد مبنى بارتفاع طابق واحد، ولايزيد ارتفاعه عن ٨م في حالة استخدامه لتبريد مبنى بارتفاع طابقين، وفي الحالتين لا يوصى بأن يزيد مسطح الترطيب عن ٤ متر مربع، وفي هذه الحالة تكون مساحة مقطع البرج تساوى نصف مسطح الترطيب المستخدم (أى أن طول ضلع البرج الداخلى هو ١,٤١م تقريبا).

ب- أوضحت الدراسة التحليلية باستخدام المعادلات الحسابية، أنه بالنسبة لبرج التبريد الاسطوانى (طراز جيفونى) فانه يجب ألا يزيد ارتفاع الأدشاش داخل جسم البرج عن ٦م في حالة استخدامه لتبريد مبنى بارتفاع طابق واحد، ولايزيد ارتفاعه عن ٨م في حالة استخدامه لتبريد مبنى بارتفاع طابقين، وفي الحالتين لا يوصى بأن يزيد معدل تدفق الماء الخارج من الأدشاش عن ٢٠ لتر/ الدقيقة، أما القياسات الحقلية فقد أوضحت أن استخدام معدل تدفق ماء في حدود ٧لتر/ الدقيقة يكون مناسبا لتجنب زيادة ارتفاع الرطوبة النسبية (في المناطق الأكثر جفافا يتوقع ان يصل معدل تدفق الماء إلى حوالي ١٠ لتر/ الدقيقة أو أكثر حسب جفاف المنطقة).

ج- أوضحت القياسات الحقلية على ملقف هواء اسطواني بقطر داخلي حوالي ١,٤٦م وبارتفاع ٦م، بأن وضع رشاش مائى على ارتفاع ٢,٥م داخل جسم البرج، فان درجة حرارة الهواء المرطب قد انخفضت بحوالي ٨,٦ درجة مئوية، عندما كانت درجة حرارة الهواء الخارجية ٣٧,٧ درجة مئوية والرطوبة النسبية ٢٧٪، ويمكن أن

تتحقق نتائج أفضل في الأماكن الأكثر جفافا مقارنة بمنطقة التجربة.

د- أوضحت القياسات الحقلية أنه يمكن التحكم في مستوى رطوبة الهواء المرطب الخارج من البرج، عن طريق تشغيل أداة الترطيب لمدة ١٥ دقيقة ثم اغلاقها لمدة النصف ساعة التالية وهكذا، مما يؤمن الوصول لانخفاض مقبول في درجة حرارة الهواء مع الحفاظ على مستوى رطوبته في نطاق الراحة الحرارية، مع توفير نصف كمية الماء المستعمل.

و- أوضحت المقارنة بين نتائج القياسات الحقلية ونتائج معادلة جيفونى تطابقا كبيرا في النتائج، مما يوضح أن اختلاف أداة الترطيب (أدشاش) أو (رشاشات) ليس له تأثير ملموس على انخفاض درجة حرارة الهواء، كما أن قطر البرج وشكله لم يكن له تأثير ملحوظ أيضا، وذلك بافتراض ثبات ارتفاع أداة الترطيب في الحالتين (٢,٥م) وكذلك معدل تدفق الماء (٧ لتر/ دقيقة).

المراجع العربية:

(١) الحمدى، ناصر وآل سعود، خالد (١٩٩٩). أبراج التبريد الطبيعى وأثرها على الأداء الحرارى للمساجد: حالة دراسية لجامع الرحمانية بالجوف. سجل بحوث ندوة عمارة المساجد (المجلد السادس). كلية العمارة والتخطيط- جامعة الملك سعود، الرياض، المملكة العربية السعودية.

(٢) الحمدى، ناصر (٢٠٠٥). دراسة عملية للأداء الحرارى لأبراج التبريد بمنطقة الجوف. مجلة جامعة الملك سعود، م١٨، العمارة والتخطيط (٢)، ص ص٣٣٣- ٣٥٧ الرياض، اللملكة العربية السعودية.

(٣) آل سعود، خالد والحمدى، ناصر (١٩٩٩). أبراج التبريد الطبيعى وأثرها على الأداء الحرارى لمبنى فندق النزل بمنطقة الجوف. بحث مقبول للنشر في المؤتمر الهندسى السعودى الخامس، جامعة أم القرى، مكة المكرمة، المملكة العربية السعودية.

(٤) باحبيل، محمد والحمدى، ناصر (٢٠٠٥). برنامج محاكاة رقمى للأداء الحرارى لبرج تبريد طبيعى. سجل المؤتمر المعمارى السادس- الثورة الرقمية وتأثيرها على العمارة والعمران. كلية الهندسة- جامعة أسيوط، جمهورية مصر العربية.

(٥) وزيرى، يحيى (٢٠٠٧). التصميم المعمارى الصديق للبيئة...نحو عمارة خضراء (ط٢). الهيئة المصرية العامة للكتاب (سلسلة مكتبة الأسرة)، القاهرة، جمهورية مصر العربية.

المراجع الأجنبية:

(6) Al-Hemmidi, Nasser. (1992). "A Cooling Tower for a Passive Evaporative System in Hot Dry Climate". ISES Congress, Coca Beach, Florida, U.S.A

(7) Al-Saud, Khaled & Al-Hemmidi, Nasser. (2003). The effectiveness of natural evaporative cooling in improving internal thermal environment in hot-dry regions. International journal of ambient energy, Vol.24, No.2, pp. 8392-, UK.

(8) Carew, Paul & Joubert, Gerry (2006). "Shower Tower, Miele Showroom, Johannesburg South Africa". The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland.

(9) Cunningham,W. & Thompson, T. (1986). "Passive Cooling with Natural Draft Cooling Towers in Combination with Solar Chimneys". Proceedings, Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Pecs, Hungary.

(10) De Melo, Ana & Guedes, Manuel (2006). "Passive Downdraft Evaporative Cooling Applied on Existing Fabrics: Using Traditional Chimney as Case Study in Portugal". The

23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland.

(11) Etzion, Erell &et.al (2005). "A novel multi-stage down-draft evaporative cool tower for space cooling". International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment, Santorini, Greece.

(12) Givoni. Baruch (1994). "Passive and low energy cooling of building". Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A

(13) Givoni. Baruch (1997). "Performance of the "Shower" Cooling Tower in different climates". Renewable Energy 10, 173.

(14) Rizk, Ahmed & Abd Elghaffar, Mohamed (2007). The Effect of wind-catchers on the internal natural ventilation in hot climates with special reference to Egypt: A study on small phyaical models. Assuit Univ. Bull. Environ. Vol.10, No.1, Egypt.

(15) Sodha, M & et. al. (1991). Thermal performance of a building coupled to an evaporative cooling tower. International journal of energy research, Vol.15, No.9, pp. 747-762, UK.

Principles of Designing Natural Cooling Towers
A Study Using Equations and Field Measurements

Dr. Yehia Wazeri

Assistant Professor and Lecturer of
Architecture in Cairo University
Y_wazeri@yahoo.com

Abstract

The most important principle of sustainable architectural design is to minimize the use of energy that is essential for cooling contemporary buildings in hot areas. And protect the residents> health by adopting natural cooling methods such as; cooling towers that have been used in traditional buildings.

Low humidity represents the main problem in the hot and dry desert areas. In such areas when air moisture is increased temperature is reduced before getting into spaces and rooms of the building. Thus, the residents feel comfortable. The study aims to identifying the most important principles of designing square cooling towers (Cunningham & Thompson Model) as well as the circular (Givoni Model). In addition to achieving the most efficient cooling methods. The research's methodology consists of two major phases:

1- Reaching the principles of designing square and circular cooling towers through some equations used in previous studies and researches.

2- Taking field measurements to one of the cylindrical cooling towers in the faculty of Applied Arts workshops building, Helwan University in Cairo so as to develop its thermal performance through direct evaporative cooling. In addition to compare these field measurements' results to the calculation results of the circular wind catcher (Givoney Model).