

دراسة التكاثر الجوفي على حدود طبقات جدران

الأبنية المدفأة مركزياً

المهندس زين العابدين جميل بستون *

الدكتور المهندس أيوب حسن **

ملخص البحث

يعالج هذا المقال التكاثر الجوفي لبخار الماء في العناصر الإنشائية، بتحديد أسباب حدوثه وإيجاد الطريق المناسبة لمنع، كما يدرس الخواص الفيزيائية والحرارية لمكونات جدار مطعم مدفأ بالهواء الساخن في مدينة صلفه، حيث تبين أن التكاثر يحدث نتيجة ارتفاع الضغط الجزئي لبخار الماء إلى قيم أعلى من ضغط الإشباع الموافق له. واستناداً للدراسات التحليلية تم تصميم نموذج حاسوبي باستخدام برنامج MATLAB. وتمكننا باستخدام النموذج من تحديد موقع حدوث التكاثر على حدود طبقات الجدران، وإيجاد طريقة لمنع حدوثه، عن طريق تغيير كل من الرطوبة النسبية ودرجة حرارة هواء الإمداد ضمن الحدود المسموح بها لكلا البارامترين وبما يضمن تحقيق الراحة الحرارية للأشخاص داخل المطعم. أدت الطريقة المقترحة إلى التخلص من التكاثر الجوفي لبخار الماء دون اللجوء إلى أساليب العزل الداخلي أو الخارجي وخصوصاً في المباني التي يتعذر إجراء العزل عليها / على سبيل المثال المباني التاريخية /.

الكلمات المفتاحية :

درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، ضغط بخار الماء الجزئي، ضغط إشباع بخار الماء، التكاثر الجوفي، هواء الإمداد.

- *مهندس في قسم هندسة القوى الميكانيكية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية –
جامعة تشرين
- ** أستاذ في قسم هندسة القوى الميكانيكية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية –
جامعة تشرين

Engineer's Preparation : *Zain AlAbedin Gamel Bastoon

Supervised By The Prof : **Ayoub Hasan

Abstract

This research carried out a computational analysis of the hollow condensation of water vapor in construction elements, to determine the causes of its occurrence and to find a way to prevent it, and to study the physical and thermal properties of the components of a hot-air-buried restaurant wall in a silver side, where condensation was found to occur as a result of a rise in the partial pressure of water vapor to values higher than the approved saturation pressure. Based on analytical studies, a computer model was designed using MATLAB. Using the model, we were able to determine where condensation occurred on the boundary of the wall's layers, and to find a way to prevent atmospheric condensation by altering the relative humidity and temperature of the supply air within the permissible limits of both parameters and ensuring the thermal comfort of the people inside the restaurant. The proposed method has resulted in the disposal of underground condensation of water vapor without resorting to internal or external insulation methods, especially in buildings where insulation is not possible/for example, historic buildings/. A computer model has also been designed to maintain the required internal requirements and provide energy consumption by comparing the internal temperature with a reference value of temperature that achieves the desired goal of the research.

Keywords: Temperature, relative humidity, partial water vapor pressure, water vapor saturation pressure, Interstitial condensation, supply air.

*Eng.- Faculty of Mech. Of Elect. Eng. –Tishreen University – Lattakia-Syria.

**Asst. Prof.- Faculty of Mech. Of Elect. Eng. –Tishreen University –Lattakia-Syria.

1 - مقدمة:

يرتبط أداء مواد العزل الحراري ارتباطاً وثيقاً بامتصاص الرطوبة وانتقال بخار الماء. واستكشف العديد من الباحثين التغيرات غير المواتية في الخصائص الحرارية أو هيكل مواد العزل الحراري بسبب امتصاص الرطوبة في البيئة الرطبة. وأظهرت النتائج أن الأداء الحراري للمواد ذات الخواص الحرارية الرطبة كان أفضل بكثير من أداء المواد العازلة التقليدية غير المقاومة للرطوبة. وعلى وجه الخصوص، وبالمقارنة مع العوامل المناخية الأخرى (مثل ارتفاع درجة الحرارة، ودورات التكاثف والتبخر، وارتفاع درجة الحرارة، والرطوبة النسبية)، فالرطوبة النسبية المرتفعة لها التأثير الأكبر على الخواص الحرارية لهياكل المباني والمواد العازلة. وفي الواقع، بعد أن تمتص مادة العزل الحراري الرطوبة، يتراكم محتوى الرطوبة داخلها. وقد تحسن الأداء المادي ذي الصلة بشكل مكثف بإجراء دراسة تجريبية وعددية عن تكنولوجيات الحرارة ونقل الرطوبة وكفاءة استخدام الطاقة. [1]

وعلى الرغم من الجهود المبذولة، لا يزال السعي مستمراً في تطوير تقنيات و مواد العزل بسبب المشاكل، مثل التكاثف السطحي أو الداخلي في البناء. ويعزى ذلك إلى عدم مراعاة البيئة المحلية الرطبة. وفي حالة تكاثف بخار الماء على السطح الداخلي، كلما ارتفع أداء العزل الحراري للجدار، كلما ارتفعت درجة حرارة السطح الداخلي للجدار في الشتاء، والتي يمكن حلها بزيادة مستوى أداء العزل الحراري. ومع ذلك، في حالة التكاثف الداخلي الذي يحدث داخل الجدار، من الضروري النظر في تغير درجة الحرارة داخل الجدار بسبب التوصيل الحراري وتغير درجة حرارة نقطة الندى بسبب حركة الرطوبة نتيجة لفرق الضغط الجزئي لبخار الماء. وعلاوة على ذلك، تنتقل الرطوبة المفرطة في الغرفة عبر مظروف المبنى مما يسبب مشاكل مختلفة متصلة بالرطوبة، وقد يؤدي إلى العديد من المشاكل الصحية والهيكلية. يمكن نقل الطاقة الحرارية من خارج المبنى من خلال الرطوبة مع قدرة حرارية عالية وكذلك الطاقة الحرارية من خلال التوصيل والحمل والإشعاع. ولذلك، فإن جميع مواد البناء تتطور فيها العمليات الحرارية الرطبة بشكل كبير مع زيادة محتوى الرطوبة. [2]

يتم انتشار بخار الماء في فصل الشتاء بفعل الفرق في ضغط بخار الماء عبر العناصر الإنشائية من الجانب الداخلي (الدافئ) للمبنى إلى الجانب الخارجي (البارد) حيث يكون ضغط بخار الماء في الداخل أعلى منه في الخارج. حيث يحدث التكاثف الجوفي في المواضع التي تكون درجة حرارتها مساوية لدرجة حرارة نقطة الندى أو ادنى من ذلك اثناء انتشار بخار الماء عبر عناصر البناء، أو عندما يصبح الضغط الجزئي لبخار الماء مساوياً لضغط بخار الماء المشبع أو أعلى منه $[p_v \geq p_{vs}]$ داخل العنصر الإنشائي، ينتج عن التكاثف الجوفي عدة مشاكل أبرزها تآكل وضعف البنية الداخلية للجدران، وانخفاض مقاومتها الحرارية، اهتراء التمديدات الكهربائية والصحية داخل الجدران، تشكل العفن الذي يعد بيئة مناسبة لتكاثر الفطريات والعديد من الكائنات الحية الدقيقة الضارة.

2- أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى :

- 1-تقديم طريقة منهجية تحليلية لدراسة أداء انتقال الحرارة والرطوبة عبر جدران الأبنية المدفأة مركزياً، وذلك باستخدام معادلات انتقال الحرارة والكتلة.
- 2-دراسة تأثير تغير درجات الحرارة والرطوبة النسبية داخل الحيز المدفأ وفي الوسط المحيط على السلوك الحراري الرطب ضمن الجدران.
- 3-تمذجة المعادلات الرياضية المستخدمة في الحسابات الحرارية والكتلية باستخدام

برنامج MATLAB-SIMULINK.

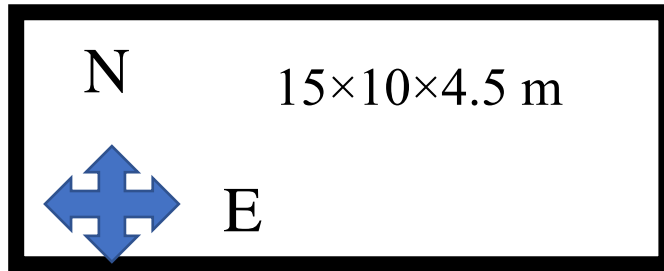
تأتي أهمية البحث من خلال المساهمة في تقديم طريقة منهجية تحليلية لتحديد إمكانية حدوث تكاثف سطحي أو جوفي لبخار الماء على العناصر الإنشائية، وإيجاد طريقة عملية لتجنب حدوث التكاثف والمشاكل الناتجة عنه باستخدام برنامج MATLAB-SIMULINK.

3- طريقة البحث ومواده:

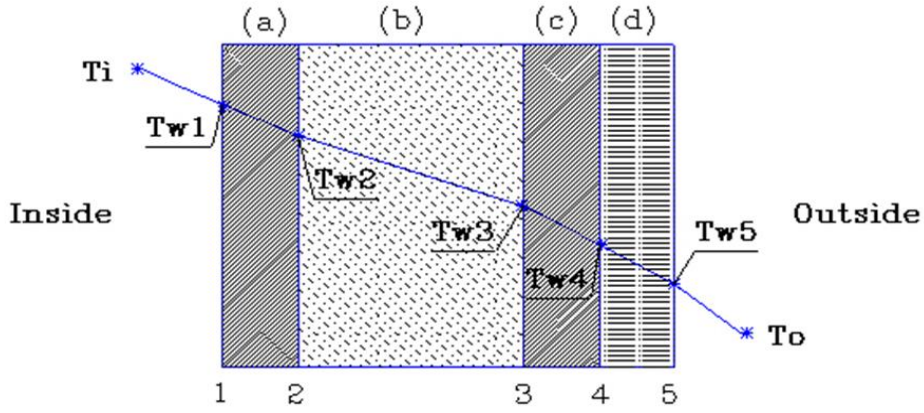
تم في هذا البحث اعتماد طريقة تحليلية علمية استندت على مراجعة كثير من الأبحاث والمنشورات في مجال دراسة انتقال الحرارة والكتلة، نفاذية مواد البناء لبخار الماء، والحالات الترموديناميكية لبخار الماء المشبع والجزئي. استناداً إلى ما سبق تم نمذجة العلاقات المحددة لحساب الضغوط الجزئية والمشبعة لبخار الماء على حدود طبقات الجدران وتحديد مدى إمكانية حدوث تكاثف البخار.

4- الدراسة التحليلية:

تم تصميم نموذج حاسوبي باستخدام برنامج MATLAB-SIMULINK لتحديد الرطوبة النسبية ودرجة الحرارة اللازمتين لهواء الإمداد بشكل يضمن عدم حدوث التكاثر الجوفي ويحقق شروط الراحة الحرارية للأشخاص ضمن الأماكن المدفأة. يتم تزويد النموذج الحاسوبي بالشروط التصميمية لمطعم مطعم في منطقة صلالة التي تقع على ارتفاع (1130 m) عن سطح البحر، يقع على الأرض الطبيعية أبعاده ($15 \times 10 \times 4.5$ m) يعطوه طابق مدفأ. تنتقل الحرارة منه من ثلاثة جدران ما عدا الجدار الغربي، وتشغل النوافذ 25 % من مساحة الجدارين الشمالي والجنوبي، وله باب مصنوع من الخشب المعاكس على الجهة الشرقية أبعاده (3×3 m) ونوافذ بمساحة 10 %، كما في الشكل (1). كما يظهر الشكل (2) مقطعاً عرضياً لجدران المطعم المتجانسين والمتماثلين الخواص.



الشكل (1) رسم رمزي لصالة المطعم واتجاهاتها



الشكل (2) مقطع عرضي لجدران المطعم

الشروط الداخلية التصميمية له والخارجية للمنطقة مبينة في الجدول (1) :

الجدول (1) الشروط الداخلية والخارجية التصميمية

	درجة الحرارة [°C]	الرطوبة النسبية [%]
المطعم	20	55
الوسط المحيط	5-	70

كما يتم تزويد النموذج بتركيبة الجدران وخواصها الحرارية والفيزيائية، كما في الجدول (2) :

الجدول (2) الخواص الحرارية والفيزيائية لمكونات الجدران

المقاومية البخارية $\left[\frac{Mn*s}{m*g}\right]$	معامل الموصلية الحرارية $\left[\frac{W}{m*K}\right]$	السماكة [cm]	
3.8	13.9	2	ط1 : توريقة اسمنتية
8.64	0.696	15	ط2 : بلوك اسمنتي مفرغ
3.8	1.39	2	ط3 : توريقة اسمنتية
2.7	0.27	2	ط4 : رخام

تمت نمذجة المعادلات على برنامج MATLAB من أجل حساب درجات الحرارة والضغوط الجزئية والمشبعة على حدود الطبقات. حيث يحصل النموذج على البارامترات الخارجية عن طريق حساس كون البارامترات متغيرة بشكل يومي تقريباً لتحديد الشروط الداخلية الأنسب.

يقوم النموذج بتحديد كمية الحرارة المنتقلة عبر الجدار متعدد الطبقات بالعلاقة

التالية: [3]

$$Q = U * A * (t_i - t_o) [W] \quad (1)$$

حيث :

Q : كمية الحرارة المنتقلة وتقدر بـ [W]

U : معامل انتقال الحرارة الكلي للجدار ويقدر بـ $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$

t_i : درجة الحرارة الداخلية مقدره الـ [°C]

t_o : درجة الحرارة الخارجية مقدره بالـ [°C]

A : مساحة الجدار وتقدر بـ [m^2]

ويتم بحسب معامل انتقال الحرارة الكلي بالعلاقة :

$$U = \frac{1}{(R_{si} + \sum_{i=1}^4 \frac{D_i}{\lambda_i} + R_c + R_{se})} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] \quad (2)$$

حيث :

$$R_{si} = 0.13 \left[\frac{m^2 * K}{W} \right] \text{ : المقاومة الحرارية السطحية الداخلية}$$

$$R_c = 0 \text{ : المقاومة الحرارية للفراغات الهوائية لعدم وجود فراغ هوائي في الجدار}$$

$$R_{se} = 0.04 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] \text{ : المقاومة الحرارية السطحية الخارجية}$$

$$D_1 = 0.02 \text{ m} \text{ : سماكة طبقة التوريق الاسمنتية}$$

$$D_2 = 0.15 \text{ m} \text{ : سماكة طبقة البلوك الاسمنتي المفرغ}$$

$$D_3 = 0.02 \text{ m} \text{ : سماكة طبقة التوريق الاسمنتية}$$

$$D_4 = 0.02 \text{ m} \text{ : سماكة طبقة الرخام}$$

$$\lambda_1 = 1.39 \left[\frac{W}{m * K} \right] \text{ : معامل التوصيل الحراري للتوريق الاسمنتية}$$

$$\lambda_2 = 0.696 \left[\frac{W}{m * K} \right] \text{ : معامل التوصيل الحراري للبلوك الاسمنتي المفرغ}$$

$$\lambda_3 = \lambda_1 = 1.39 \left[\frac{W}{m * K} \right]$$

$$\lambda_4 = 0.27 \left[\frac{W}{m * K} \right] \text{ : معامل التوصيل الحراري للرخام}$$

بناءً على ذلك يتم حساب درجات الحرارة على حدود طبقات الجدران واعتماداً على

قانون كمية الحرارة المنتقلة عبر العنصر الإنشائي وقانون معامل التوصيل الحراري،

وباعتبار أن كمية الحرارة المنتقلة عبر طبقات العنصر ثابتة يمكن تحديد درجات

الحرارة على حدود كل طبقة وفق الآتي:

$$t_{w1} = t_i - R_{si} * q \quad (3)$$

$$t_{w2} = t_{w1} - \frac{d_1}{\lambda_1} * q \quad (4)$$

$$t_{w3} = t_{w2} - \frac{d_2}{\lambda_2} * q \quad (5)$$

$$t_{w4} = t_{w3} - \frac{d_3}{\lambda_3} * q \quad (6)$$

$$t_{w5} = t_{w4} - \frac{d_4}{\lambda_4} * q \quad (7)$$

حيث :

$$q = Q/A : \text{كمية الحرارة المنتقلة عبر واحدة السطح و تقدر بـ } [W/m^2]$$

$$t_{wi} : \text{درجة الحرارة على حدود الطبقة } i \text{ مقدر بـ } [^{\circ}C]$$

كما يقوم النموذج بحساب الضغوط المشبعة بالاعتماد على درجة الحرارة النسبية، يمكن من خلاله تحديد ضغط بخار الماء المشبع في أي مكان أو حيز وحتى على حدود طبقات العناصر الإنشائية بعد حساب درجات الحرارة عندها.

يعطى ضغط الإشباع عند درجات الحرارة الواقعة ضمن المجال ($t =$

$$[3] : (-100 \div 0^{\circ}C)$$

$$\ln P_{vs} = \left(\frac{C_1}{T} + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7 \ln T \right) * 10^{-3} = [kPa] \dots (8)$$

أما في المجال ($0 \div 200^{\circ}C$) فيعطى بالعلاقة :

$$\ln P_{vs} = \left(\frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln T \right) * 10^{-3} = [kPa] \dots (9)$$

حيث :

$C_{1 \rightarrow 13}$: ثوابت معلومة

$$T = t + 273.15 : \text{درجة الحرارة مقدر بـ } [K]$$

$C_1 = -5.6745359 * 10^3$	$C_8 = -5.8002206 * 10^3$
$C_2 = 6.3925247$	$C_9 = 1.3914993$
$C_3 = -9.677843 * 10^{-3}$	$C_{10} = -4.8640239 * 10^{-2}$
$C_4 = 6.2215701 * 10^{-7}$	$C_{11} = 4.1764768 * 10^{-5}$
$C_5 = 2.074782 * 10^{-9}$	$C_{12} = -1.4452093 * 10^{-8}$
$C_6 = -9.4840240 * 10^{-13}$	$C_{13} = 6.5459673$
$C_7 = 4.1635019$	<p>درجة الحرارة بالـ K : T درجة الحرارة بالـ °C : t : $T[K] = t[°C] + 273.15$</p>

يحسب عادة الضغط الجزئي بدلالة ضغط بخار الماء المشبع (P_v) والرطوبة النسبية (ϕ)، وفقاً للعلاقة [4]:

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} \Rightarrow P_v = \phi * P_{vs} \quad (10)$$

يمكن حساب الضغوط الجزئية للحيز المدروس (الداخلي) والوسط المحيط (الخارجي) وفق العلاقة :

$$P_{v,o} = \phi_o * P_{vso} = [kPa] \quad (11)$$

$$P_{v,i} = \phi_i * P_{vsi} = [kPa] \quad (12)$$

حيث :

$P_{v,o}$: ضغط بخار الماء الجزئي الخارجي

$P_{v,i}$: ضغط بخار الماء الجزئي الداخلي

يتم حساب الضغوط الجزئية على حدود طبقات الجدار من خلال معيار ASHRAE يعتمد بشكل رئيسي على المقاومة البخارية لانتشار بخار الماء عبر العناصر الإنشائية، ويعطى بالعلاقة: [5]

$$\frac{\Delta P_{v,layer}}{P_{v,i} - P_{v,o}} = \frac{Z_{layer}}{Z_{total}} \quad (13)$$

حيث :

$\Delta P_{v,layer}$: فرق الضغط الجزئي لبخار الماء على حدود الطبقة (i) ويقدر بـ [kPa]

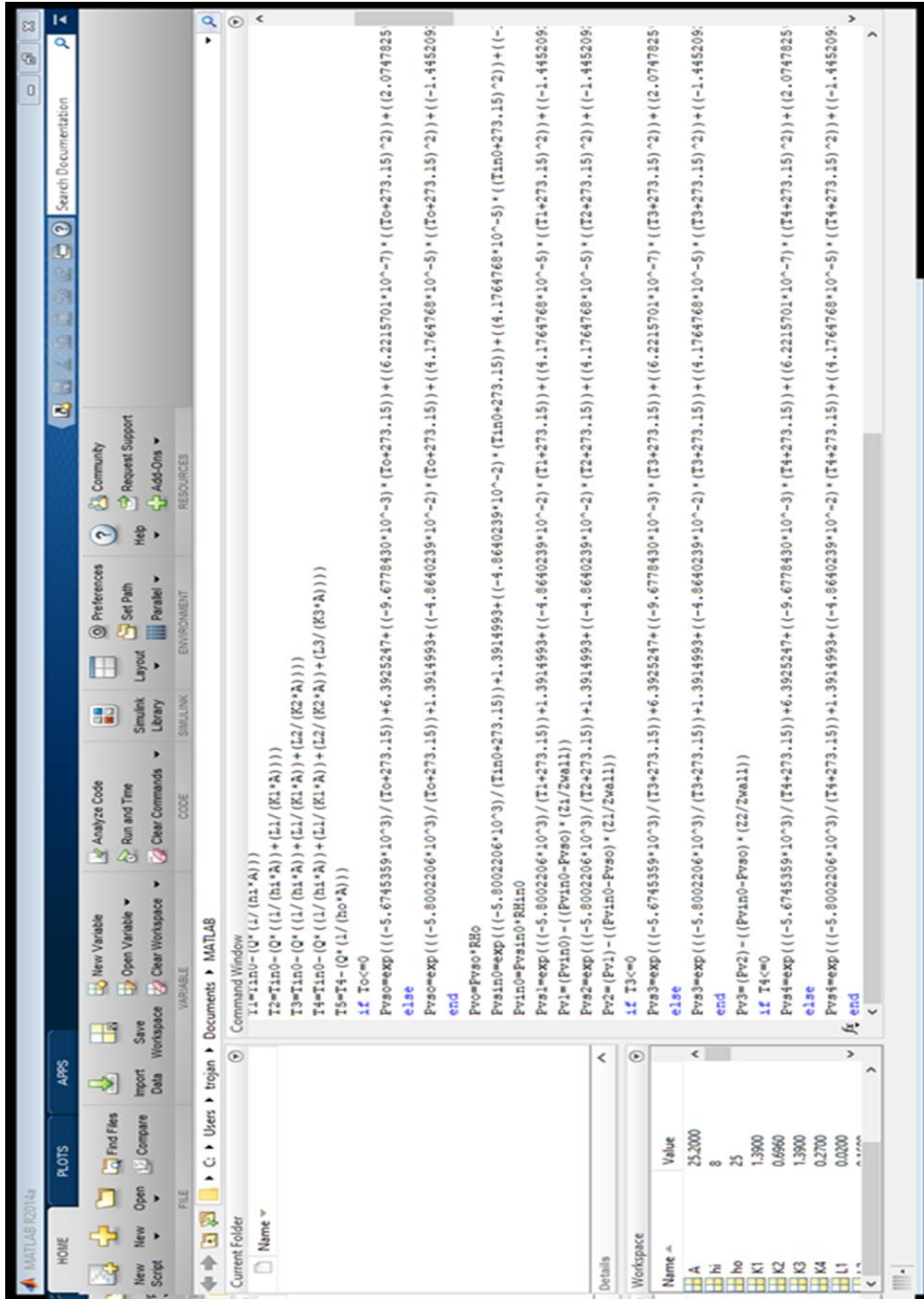
$P_{v,i}$: الضغط الجزئي الداخلي لبخار الماء ويقدر بـ [kPa]

$P_{v,o}$: الضغط الجزئي الخارجي لبخار الماء ويقدر بـ [kPa]

Z_{layer} : المقاومة البخارية للطبقة (i) وتقدر بـ $\left[\frac{MN*s}{g} \right]$

المقاومة البخارية الكلية (الداخلية والخارجة وللجدار المدروس) وتقدر بـ $\left[\frac{MN*s}{g} \right]$: $Z_{total} = Z_i + \sum_{i=1}^{i=4} Z_{wall} + Z_o$

ويبين الشكل (3) نوافذ برنامج MATLAB، والمعادلات المستخدمة في حساب درجات الحرارة والضغوط الجزئية والمشبعة لبخار الماء.



الشكل (3) نوافذ برنامج MATLAB

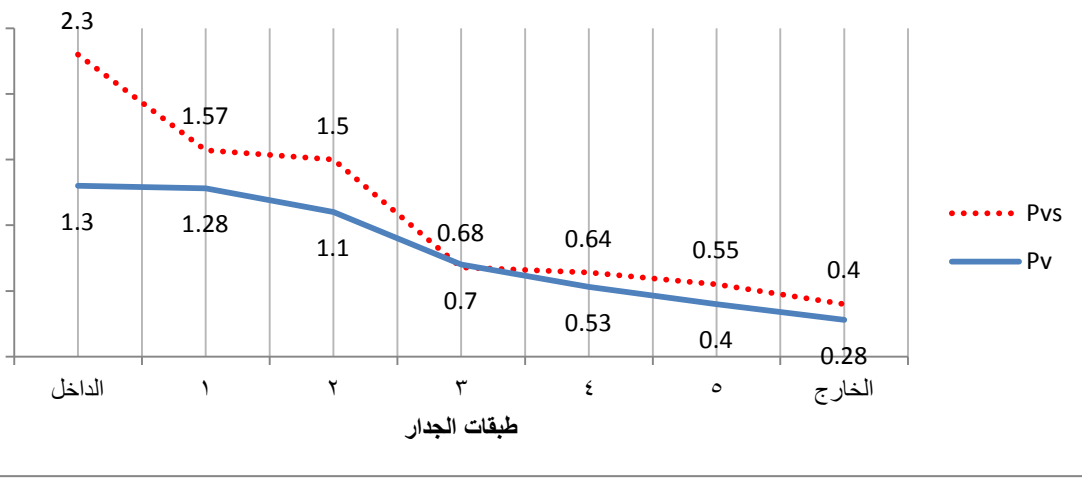
5- النتائج والمناقشة:

تم حساب درجات الحرارة والضغوط الجزئية والمشبعة على حدود طبقات الجدارين الشمالي والشرقي فقط كون الجدار الجنوبي مماثل للجدار الشمالي بالمساحة والمواصفات بينما الجدار الغربي لا يتم من خلاله فقدان للحرارة لوجود حيز مدفاً بجواره، عند الشروط التصميمية الداخلية $t_i = 20^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 55\%$ والشروط الخارجية الوسطية لمنطقة صলيفة في فصل الشتاء ($t_o = -5^{\circ}\text{C}$, $\varphi_o = 70\%$) عند الضغط الجوي $[P = 88.4663 \text{ kPa}]$ الموافق لارتفاع المنطقة عن سطح البحر $[H = 1130 \text{ m}]$ ، وكذلك حساب نموذج PMV عند هذه الشروط. وأظهر البرنامج البيانات التالية الموضحة في الجدول (3):

الجدول (3) درجات الحرارة والضغوط على حدود طبقات الجدران الخارجية عند الشروط التصميمية

المكان	درجة الحرارة [°C]	ضغط بخار الماء الجزئي [kpa]	ضغط إشباع بخار الماء [kpa]
الداخل	20	1.3	2.3
w1	13.7	1.28	1.57
w2	12.99	1.1	1.5
w3	1.45	0.7	0.68
w4	0.73	0.53	0.64
w5	1.28-	0.4	0.55
الخارج	5-	0.28	0.4

يظهر الشكل (4) تدرج الضغوط الجزئية والمشبعة على حدود طبقات الجدران الخارجية عند الشروط التصميمية.



الشكل (4) تدرج الضغوط الجزئية والمشبعة على حدود طبقات الجدران الخارجية عند الشروط التصميمية

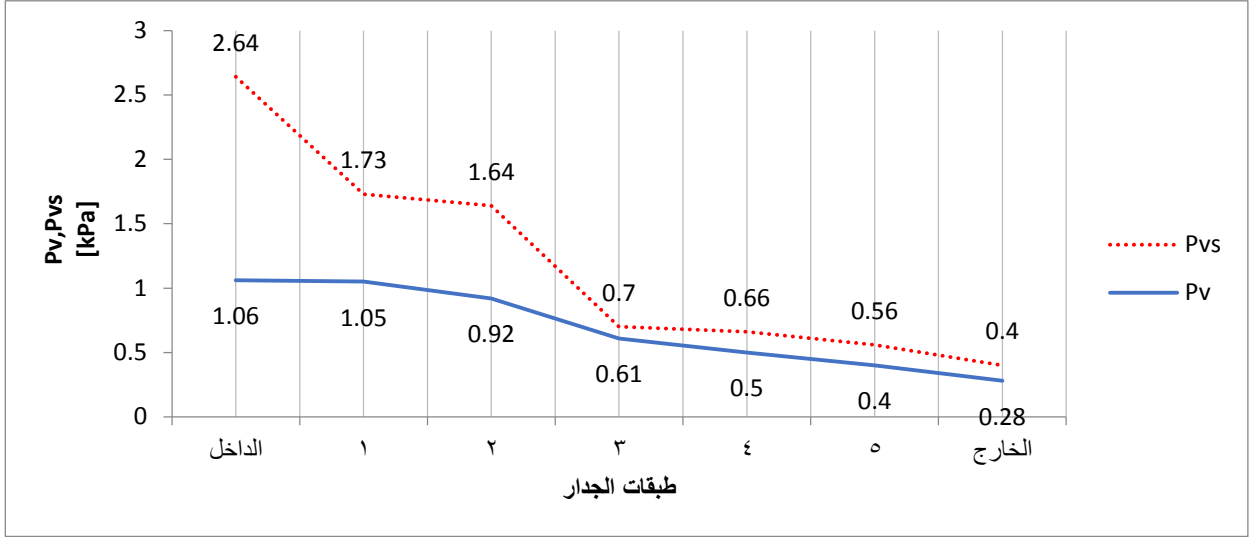
نلاحظ من الشكل (4) أن الضغط الجزئي لبخار الماء على حد الطبقة الثالثة أكبر من ضغط الإشباع له $P_{vs3} = 0.7 [kPa]$ عند كلا الجدارين الشمالي والشرقي، مما يعني حدوث التكاثف الجوفي لبخار الماء في هذه المنطقة حيث أن $\varphi_{w3} = 103\% > 100\%$.

تتلخص مهمة البرنامج المقترح في تحديد أخفض رطوبة نسبية داخلية ضمن الحدود المسموح بها ($\varphi_i = 30 \div 70\%$) من أجل تقليل كمية بخار الماء المنتشرة عبر الجدار وأدنى درجة حرارة ضمن الحدود المسموح بها $t_i = 20 \div 27^\circ C$) بما يضمن عدم حدوث التكاثف الجوفي ويحقق الراحة الحرارية للأشخاص. قام البرنامج بمعالجة كافة البارامترات الخارجية والداخلية مع الأخذ بعين الاعتبار الخواص الحرارية والفيزيائية لمكونات الجدران الخارجية. تم التوصل إلى الشروط الداخلية التالية [$t_i = 22^\circ C, \varphi_i = 40\%$]. يبين الجدول (4) درجات الحرارة والضغوط عند الشروط الجديدة على حدود طبقات الجدران الخارجية :

الجدول (4) درجات الحرارة والضغط الجزئية والمشبعة عند الشروط الداخلية الجديدة للجدران الخارجية

المكان	درجة الحرارة [°C]	ضغط بخار الماء الجزئي [kpa]	ضغط إشباع بخار الماء [kpa]
الداخل	22	1.06	2.64
w1	15.22	1.05	1.73
w2	14.44	0.92	1.64
w3	1.97	0.61	0.7
w4	1.19	0.5	0.66
w5	-0.98	0.4	0.56
الخارج	-5	0.28	0.4

يظهر الشكل (2) تدرج الضغوط الجزئية والمشبعة عليها عند الشروط الداخلية الجديدة للجدران الخارجية.



الشكل (5) تدرج الضغوط الجزئية والمشبعة على حدود طبقات الجدران الخارجية عند الشروط الداخلية الجديدة

كما هو موضح في الشكل (5) تبقى الضغوط الجزئية على حدود الطبقات أخفض من الضغوط المشبعة الموافقة لها مما يضمن عدم حدوث التكاثر.

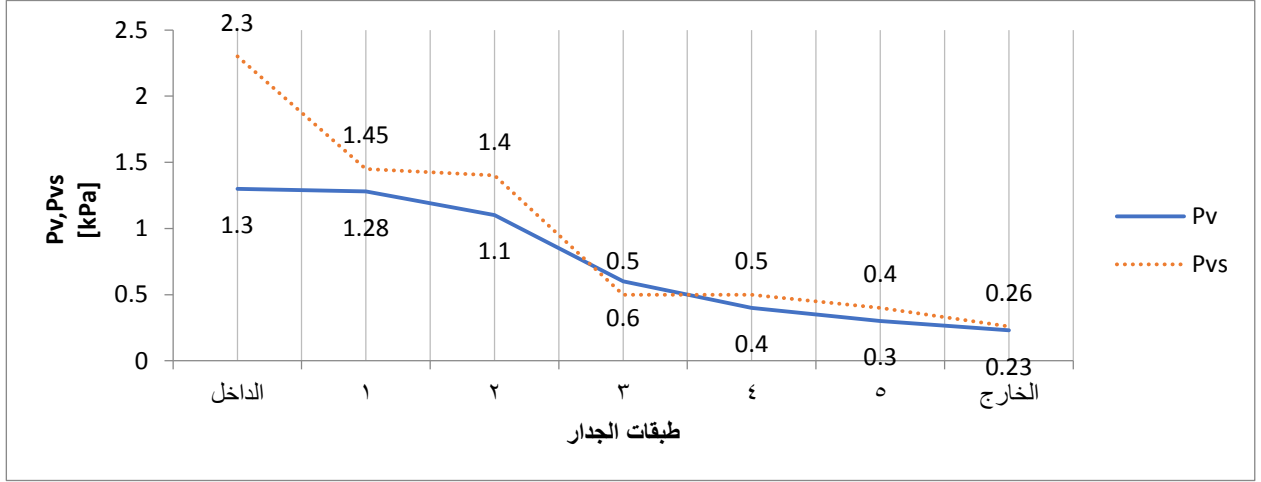
- تم دراسة احتمال حدوث التكاثر السطحي والجوي على حدود طبقات الجدران ومدى ملائمة الشروط التصميمية الداخلية للارتياح الحراري عند شروط خارجية مختلفة، وتحديد الشروط الداخلية الجديدة التي تضمن عدم حدوث التكاثر والارتياح الحراري عند الضرورة.

قمنا بإجراء الدراسة عند بارامترات خارجية عظمى ($t_o = -10^{\circ}\text{C}, \varphi_o = 90\%$) والشروط التصميمية الداخلية للمطعم ($t_i = 20^{\circ}\text{C}, \varphi_i = 55\%$)، حيث أظهر البرنامج البيانات التالية الموضحة في الجدول (5) :

الجدول (5) درجات الحرارة والضغوط على حدود الطبقات عند الشروط الداخلية التصميمية وشروط خارجية أظمية

المكان	درجة الحرارة [°C]	ضغط بخار الماء الجزئي [kpa]	ضغط إشباع بخار الماء [kpa]
الداخل	20	1.3	2.3
w1	12.5	1.28	1.45
w2	11.6	1.1	1.4
w3	-2.3	0.6	0.5
w4	-3.1	0.4	0.46
w5	-5.5	0.3	0.4
الخارج	-10	0.23	0.3

الشكل (6) تدرج الضغوط الجزئية والمشبعة على حدود طبقات الجدران عند الشروط



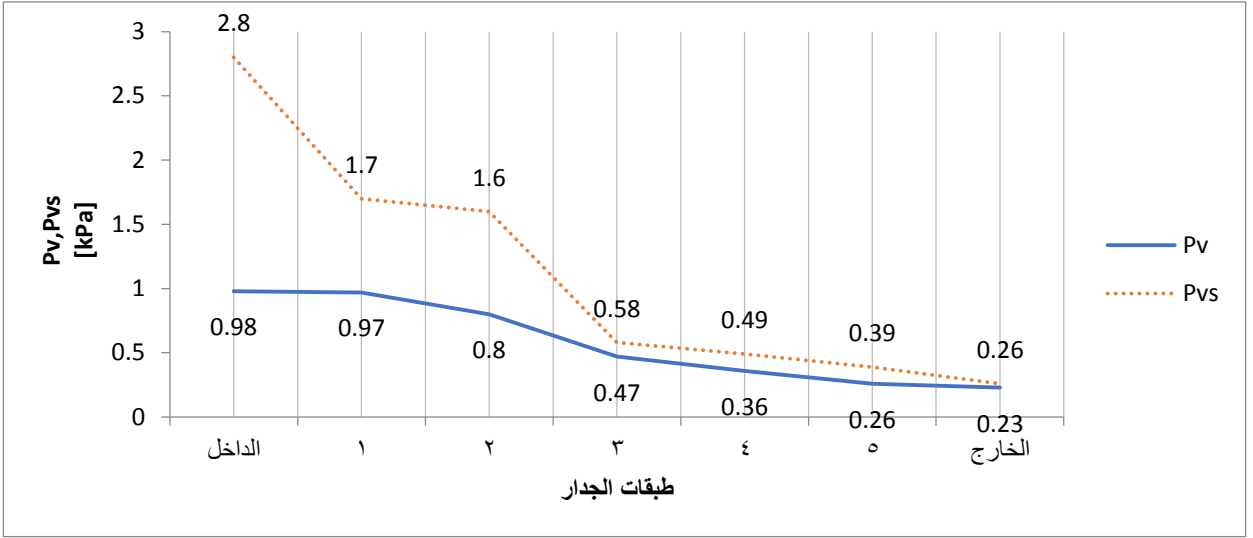
الداخلية التصميمية وشروط خارجية أعظمية

نلاحظ من الشكل (6) أن الضغط الجزئي لبخار الماء على حد الطبقة الثالثة $P_{vs3} = 0.6 [kPa]$ أكبر من ضغط الإشباع له $P_{vs3} = 0.5 [kPa]$ ، مما يعني حدوث التكاثف الجوفي لبخار الماء في هذه المنطقة.

يتم في البرنامج معالجة كافة البيانات، والخلوص إلى البارامترات الداخلية اللازمة لمنع التكاثف والارتياح الحراري. حيث تكون الشروط الداخلية الجديدة للمطعم $(t_i = 23^\circ C, \varphi_i = 35\%)$ ، حيث أظهر البرنامج البيانات التالية الموضحة في الجدول (6) :

الجدول (6) درجات الحرارة والضغط على حدود الطبقات عند الشروط الداخلية الجديدة والشروط الخارجية الأعظمية

المكان	درجة الحرارة [°C]	ضغط بخار الماء الجزئي [kpa]	ضغط إشباع بخار الماء [kpa]
الداخل	23	0.98	2.8
w1	14.7	0.97	1.7
w2	13.8	0.8	1.6
w3	-1.5	0.47	0.58
w4	-2.4	0.36	0.49
w5	-5	0.26	0.39
الخارج	-10	0.23	0.3



الشكل (7) تدرج الضغوط الجزئية والمشبعة على حدود طبقات الجدران الخارجية عند الشروط الداخلية الجديدة والشروط الخارجية الأعظمية

كما هو موضح في الشكل (7) تبقى الضغوط الجزئية على حدود الطبقات أخفض من الضغوط المشبعة الموافقة لها مما يضمن عدم حدوث التكاثر.

6- النتائج والتوصيات:

6-1 النتائج:

- 1- إن السبب الرئيسي لحدوث التكاثر الجوفي في العناصر الإنشائية يعود لزيادة الضغط الجزئي لبخار الماء على حدود الطبقات عند درجة حرارة محددة إلى قيمة أكبر من ضغط الإشباع الموافق.
- 2- إن تقليل كمية بخار الماء المنتشرة عبر العناصر الإنشائية يقلل من خطر حدوث التكاثر الجوفي، حيث يمكن تحقيق ذلك بتخفيض الرطوبة النسبية ضمن الحدود المسموح بها لهواء الإمداد.
- 3- إن رفع درجة الحرارة ضمن الحدود المسموح بها لهواء الإمداد يزيد من قيمة ضغط إشباع بخار الماء على حدود الطبقات وبالتالي يمنع حدوث التكاثر الجوفي، كما يساعد على تحقيق الراحة الحرارية للأشخاص ضمن الحيز المدفأ.

6-2 التوصيات:

ينصح بتطبيق النموذج في الأبنية والمنشآت التي تستخدم نظام التدفئة بالهواء، وتطوير النموذج ليصبح قادراً على منع حدوث التكاثر الجوفي صيفاً في المناطق الحارة والرطبة.

المراجع:References:

- [1] Boardman.C, et al. **Improving the Accuracy of a Hygrothermal Model for Wood-Frame Walls: A Cold-Climate Study.** *MDBI*.2020
- [2] Bourguiba.A, et al. **Recycled duvets for building thermal insulation.** *Building Engineering*. 2020
- [3] ASHRAE. 2013. **PSYCHROMETRICS.** *ANSI/ASHRAE Standard 2013.*
- [4] د.حسن، أيوب. **الترموديناميك2.** سوريا : منشورات جامعة تشرين. 2012
- [5] ASHRA. 2013. **HEAT, AIR, AND MOISTURE CONTROL IN BUILDING ASSEMBLIES—EXAMPLES.** *ANSI/ASHRAE Standard 2013.*
- [6] Morejón.M. et al. **Experimental Study and Analysis of Thermal Comfort in a University Campus Building in Tropical Climate.** *MDPI*. 2020