

## تحديد السعة الحرارية والنفوذية الحرارية للقرميد المفرغ عمودياً

الدكتور عهد محمود سليمان\*

(تاريخ الإيداع 26 / 10 / 2009. قُبِلَ للنشر في 15/12/2009)

### □ ملخص □

تكمن أهمية هذا البحث في تحديد الخواص الحرارية للقرميد المفرغ عمودياً، انطلاقاً من تحديد سعته الحرارية ونفوذيته الحرارية التي سيتم تحديدها بالطريقة العكسية انطلاقاً من القياسات المأخوذة بواسطة المزدوجات الحرارية المتوضعة ضمن هذا القرميد و على سطحه. كما سيتم تحديد السعات العقدية و الأطوار لكل من درجات الحرارة و التدفقات المقاسة على كلا وجهي القرميد البارد و الساخن، و التي ستكون ضرورية لحساب السعة الحرارية الحقيقية للقرميد باستخدام طريقة الرباعي القطبي، وفيما بعد باستخدام المعيار الأوروبي NF EN ISO 13 786 . في النهاية، تم الحصول على عدة قيم للسعة الحرارية للقرميد تبعاً لفترة التغيرات الجيبية المدروسة، كما حددنا النفوذية الحرارية المكافئة المتغيرة تبعاً للموقع ضمن القرميد و في النهاية النفوذية الحرارية الوسطية للفترات المدروسة.

**الكلمات المفتاحية:** السعة الحرارية، النفوذية الحرارية، القرميد المفرغ، القصور الحراري، جدران المباني.

\* أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Détermination des capacités et des diffusivités thermiques d'une brique à perforations verticales

Dr. Ahed Suleiman \*

(Déposé le 26 / 10 / 2009 . Accepté 15/12/2009)

### □ Résumé □

L'objectif de cet article est de caractériser les propriétés thermiques d'une brique à perforations verticales, à partir de déterminer sa capacité thermique et sa diffusivité thermique à partir de la méthode inverse à l'aide des mesures des thermocouples placés dans cette brique et sur ses surfaces. On détermine les amplitudes complexes et les phases pour des températures et des flux mesurés sur les deux faces de la brique, chaude et froide, qui seront nécessaires pour calculer la capacité thermique réelle de la brique, par l'utilisation de la méthode des quadripôles, et ensuite par la norme NF EN ISO 13 786. Enfin, plusieurs valeurs des capacités thermiques ont été obtenues suivant les périodes de variation sinusoïdale. Ainsi, on a obtenu des valeurs de la diffusivité thermique équivalente suivant la position dans la brique, et en fin la diffusivité thermique moyenne pour toutes les périodes étudiées.

**Mots-clés :** *Capacité thermique, Diffusivité thermique, Brique à perforations verticales, Inertie thermique, Parois de bâtiments.*

---

\* Maître de conférences- Département de Génie de Force Mécanique -Faculté de Génie Mécanique et Electrique- Université Tichrine -Lattaquié- Syrie.

**مقدمة:**

بعد تفاقم الأزمة البترولية في السبعينيات من القرن الماضي، بدأ التفكير فعلياً باقتصاد الطاقة، وهذا ما دفع العديد من الباحثين إلى دراسة السلوك الديناميكي للأبنية من خلال دراسة الخصائص الحرارية للمواد المركبة لجدرانها. ضمن هذه الرؤية نجد النظام الحراري الفرنسي [1]، المتعلق بمواد البناء والذي يفرض خصائص عزل حرارية عالية لعناصر الجدران، و أنظمة حصرية من شأنها تخفيض الجسور الحرارية. إن الهدف من دراسة السلوك الديناميكي للجدران هو من أجل دمجها في حسابات الاستهلاك الطاقي. من أجل ذلك سنحاول دراسة البارامترات المؤثرة على التقاط و تخزين الطاقة ضمن المبنى، والتي نجد أن أهمها هي السعة الحرارية التي تميز ظاهرة القصور الحراري التي تحافظ على درجة حرارة مستقرة ضمن المبنى مع تغيرات درجة حرارة الوسط الخارجي. إن الهدف من القصور الحراري هو تخفيض استهلاك التدفئة في الشتاء بفضل تخزين الأحمال الشمسية وكذلك الحد من استخدام التكييف في الصيف. عند التفكير باختيار مواد البناء يجب تحقيق التوافق بين مفهومي القصور و العزل الحرارين من أجل الحصول على مقاومة حرارية و على سعة تخزين أعظميين للمواد المركبة لجدران المباني، إن هذا الهدف ليس سهل المنال لأن مفهومي القصور و العزل الحرارين هما في الواقع مفهومان متناقضان، لأن دور العزل الحراري يكمن في منع الطاقة من عبور المادة، بينما تابع القصور الحراري على العكس يكمن في التقاط الطاقة و تخزينها. من بين المواد المجيبة لهذه الأهداف نجد القرميد المفرغ، هذا القرميد مؤلف من أعمدة من الغضار المشوي تحصر فيما بينها حجرات هوائية عمودية، ذات أشكال هندسية متنوعة، تبعاً لنوع القرميد المصنَّع، تلعب هذه الأعمدة دور الناقل الحراري، بينما يلعب الهواء دور العازل الحراري. من ضمن الأعمال المنجزة ضمن هذا القطاع نجد [2]، [3]، و [4]. يكمن هدفنا في هذا البحث، بتحديد السعة الحرارية، والنفوذية الحرارية للقرميد المدروس، ولتحقيق هذا الهدف تم الاستفادة من قياس درجات الحرارة و التدفقات الحرارية على وجهي القرميد، وكذلك قياس درجات الحرارة داخل هذا القرميد، ومن ثم استثمار تلك القياسات ضمن حساباتنا.

أجري هذا البحث في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة تشرين، بعد استثمار القياسات التي تم الحصول عليها بالاتصال الشخصي مع مخبر فيزياء الإنسان التطبيقي و بيئته (PHASE) بجامعة بول ساباتييه (Paul Sabatier)، تولوز - فرنسا.

**أهمية البحث وأهدافه:**

يقدم هذا البحث الطرق المستخدمة لتحديد السعة الحرارية لمادة القرميد المفرغ، وكذلك استخدام الطريقة العكسية لتحديد النفوذية الحرارية، انطلاقاً من درجات الحرارة المقاسة ضمن هذا القرميد. من بين أهداف هذا البحث دراسة الخصائص الحرارية لهذا القرميد، و إظهار أهمية استخدامه في الأبنية قيد الإنشاء، لأنه يلعب دوراً مزدوجاً من ناحيتي العزل و القصور الحرارين، وكذلك لفت الانتباه إلى اختبار ودراسة مواد أخرى.

**دراسة مرجعية:****طرق تحديد السعة الحرارية:**

يوجد عدة طرق لتحديد السعة الحرارية:

\* الحل العددي: [5]، يحدد السعة الظاهرية للمبنى انطلاقاً من المعادلة التالية:

$$Ca = \sum_i \rho_i c_i v_i$$

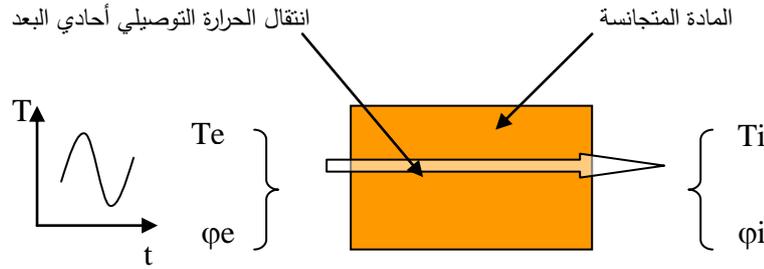
حيث يشير  $v_i$  إلى حجم العنصر (i) من غلاف المبنى،  $c_i$  السعة الحرارية الكتلية للعنصر  $i$ ،  $\rho_i$  الكتلة الحجمية. [5] يعرف بعدنذ السعة الفعالة التي تقدم السعة الحقيقية للمبنى، و التي يحددها بحل معادلة الحرارة بواسطة برنامج عددي باستخدام طريقة الفروق المنتهية. كما أنه يستخدم موديلاً لتحديد السعة الفعالة، من أجل ذلك يعطي المعادلة التي تربط الطاقة الضائعة من المبنى مع معامل النفوذ الحراري  $L$  بالعلاقة التالية:

$$C \frac{dT_i(t)}{dt} = -L(T_i(t) - T_0)$$

حيث :

$C$  (J/°C) السعة الفعالة،  $T_i$  (°C) درجة الحرارة المحيطة،  $T_0$  درجة الحرارة الخارجية و  $L$  (W/°C) معامل النفوذ الحراري للمبنى. يحصل في النهاية على معادلة ثانية لـ  $T_i(t)$  مشابهة لتلك الناتجة عن الحل العددي وبالمطابقة يستنتج السعة الفعالة.

\* الحل باستخدام طريقة الـ (quadripôles) [6]، حيث تسمح هذه الطريقة بتحديد السعات الحرارية الداخلية و الخارجية للمادة المتجانسة الخاضعة لتغيرات جيبيية على وجهيها معاً، أو على أحدهما فقط.



الشكل (1) مخطط يبين كيفية استخدام طريقة الـ quadripôles

حيث  $T_e$ ،  $\phi_e$  على التوالي درجة الحرارة والتدفق الحراري على الوجه البارد للقرميد، و  $T_i$ ،  $\phi_i$  درجة الحرارة والتدفق الحراري على الوجه الساخن للقرميد.

تستند هذه الطريقة إلى الحل التحليلي لقانون فورييه لمعادلة التوصيل الحراري أحادي البعد. إن استخدام تحويل لابلاس يسمح بالتعبير عن التغيرات الجيبية لدرجة الحرارة و للتدفقات الحرارية على شكل سعيات عقدية، مما يُبسّط المعادلات. فنحصل بذلك على نظام من معادلتين معبرتين عن السعيات العقدية لدرجات الحرارة و للتدفقات الحرارية على وجهي المادة المتجانسة ( $\hat{\theta}_e, \hat{\phi}_e, \hat{\theta}_i, \hat{\phi}_i$ ) كتابع لمصفوفة الانتقال.

$$(1) \quad \begin{bmatrix} \hat{\theta}_e \\ \hat{\phi}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ D & E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\theta}_i \\ \hat{\phi}_i \end{bmatrix}$$

حيث  $A, B, D, E$  توابع لأبعاد المادة و خصائصها الفيزيائية.

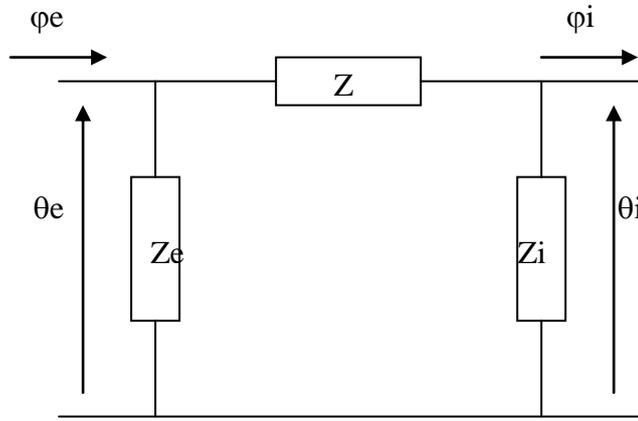
تمثل السعات العقديّة  $\hat{\theta}_e, \hat{\phi}_e$  , درجة الحرارة و التدفق الحراري على الوجه الساخن للقرميد. و  $\hat{\theta}_i, \hat{\phi}_i$  تمثل السعات العقديّة لدرجة الحرارة و التدفق على الوجه البارد، و  $\hat{\theta}_i, \hat{\phi}_i$  تمثل السعات العقديّة

$$\begin{cases} A = D = \cosh\left(\frac{d}{\delta}\right)\cos\left(\frac{d}{\delta}\right) + j\sinh\left(\frac{d}{\delta}\right)\sin\left(\frac{d}{\delta}\right) & \text{من أجل مادة متجانسة} \\ B = -\frac{\delta}{2\lambda} \left\{ \sinh\left(\frac{d}{\delta}\right)\cos\left(\frac{d}{\delta}\right) + \cosh\left(\frac{d}{\delta}\right)\sin\left(\frac{d}{\delta}\right) + j \left[ \cosh\left(\frac{d}{\delta}\right)\sin\left(\frac{d}{\delta}\right) - \sinh\left(\frac{d}{\delta}\right)\cos\left(\frac{d}{\delta}\right) \right] \right\} \\ E = -\frac{\lambda}{\delta} \left\{ \sinh\left(\frac{d}{\delta}\right)\cos\left(\frac{d}{\delta}\right) - \cosh\left(\frac{d}{\delta}\right)\sin\left(\frac{d}{\delta}\right) + j \left[ \sinh\left(\frac{d}{\delta}\right)\cos\left(\frac{d}{\delta}\right) + \cosh\left(\frac{d}{\delta}\right)\sin\left(\frac{d}{\delta}\right) \right] \right\} \end{cases}$$

حيث d سماكة طبقة المادة و  $\delta = \sqrt{\frac{\lambda\tau}{\pi\rho c}}$  ، عمق الاختراق الدوري للمادة،  $\lambda$  معامل التوصيل الحراري.

يسمح التناظر بين الحرارة و الكهرباء في الحيز المتغير من نمذجة المادة و شروطها الحدية بالطريقة الكهربائية

التالية:  $\Pi$



الشكل (2) التقديم الكهربائي لطريقة الـ quadripôles

إن كتابة المعادلات الكهربائية الناتجة عن هذا التقديم الكهربائي، وكذلك استخدام النظام (1) يسمحان بتحديد الممانعات العقديّة كتابع لمركبات مصفوفة الانتقال للمادة.

$$\begin{cases} Zi = \frac{B}{1-A} \\ Z = -\frac{B}{E} \\ Ze = \frac{B}{1-E} \end{cases}$$

بالإضافة لذلك، يمكننا ربط الممانعات العقديّة بالسعات الحرارية الداخلية و الخارجية للمادة بالعلاقات الكهربائية

التالية:

$$\begin{cases} Ci = -\frac{\tau}{2\pi \cdot \text{Im}(Zi)} = -\frac{\tau}{2\pi \cdot \text{Im}\left(\frac{B}{1-A}\right)} \\ Ce = -\frac{\tau}{2\pi \cdot \text{Im}(Ze)} = -\frac{\tau}{2\pi \cdot \text{Im}\left(\frac{B}{1-E}\right)} \end{cases} \quad \text{وبالتالي} \quad \begin{cases} U = Z \cdot i(t) = (R + jX) \cdot i(t) = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i(t) dt \\ i(t) = |i| \cdot e^{j\omega t} \\ U = \frac{1}{Cj\omega} i(t) = -\frac{j}{C\omega} i(t) \\ X = Xc = \frac{1}{C\omega} = -\text{Im}(Z) \\ C = -\frac{1}{\omega \cdot \text{Im}(Z)} \end{cases}$$

حيث  $(\omega = 2\pi/\tau)$  التردد الزاوي،  $\tau$  فترة التغيرات الجيبية،  $Z$  الواحدة على المحور التخيلي للعدد العقدي، و  $Im$  يمثل القسم التخيلي للمقدار المذكور.

يستند المعيار NF EN ISO 13 786 [7]، على طريقة الـ (quadripôles) لتحديد السعة الحرارية لجدار مركب من عدة طبقات متجانسة، حيث يطبق على وجهيه تغيرات جيبية لدرجة الحرارة، أو على أحد وجهيه كما في حالتنا المدروسة في هذا البحث. بما أن طريقة الـ (quadripôles) غير صالحة للتطبيق مباشرة ضمن حالتنا هذه، فإن المعيار السابق يسمح بحساب الخصائص الحرارية للمادة، انطلاقاً من خصائصها الفيزيائية، وبما أننا نريد تحديد السعة الحرارية للقرميد انطلاقاً من المعطيات التجريبية للتدفق ودرجة الحرارة، فنقوم بتحديد السعة الحرارية بتقريب عكسي:

1- نقيس درجات الحرارة و التدفق على كل وجه من القرميد كتابع للزمن.

2- نحل النظام التالي:

$$Z_G = \begin{bmatrix} A & B \\ D & E \end{bmatrix} \text{ حيث } \begin{bmatrix} \hat{\theta}_e \\ \hat{\phi}_e \end{bmatrix} = Z_G \begin{bmatrix} \hat{\theta}_i \\ \hat{\phi}_i \end{bmatrix}$$

بما أن القرميد المستخدم متناظر، بالتالي يكون لدينا  $A=E$  و  $AE-BD=1$  ، وبالتالي نحصل على نظام

خطي من 4 مجاهيل  $A, B, D, E$  :

$$(2) \quad \begin{cases} \hat{\theta}_e = A\hat{\theta}_i + B\hat{\phi}_i \\ \hat{\phi}_e = D\hat{\theta}_i + E\hat{\phi}_i \\ AE - BD = 1 \\ A = E \end{cases}$$

نحسب مركبات مصفوفة الانتقال بطريقة عددية غير خطية.

3- نحسب السعة الحرارية للقرميد كتابع لمركبات مصفوفة الانتقال.

4- نقوم بالحساب لكل فترات التغيرات الحرارية المعتبرة (3h, 6h, 12h, 18h, 24h).

إن حل نظام المعادلات السابق (2)، يستند على اختيار طريقة عددية تدعى طريقة نيوتن رافسون [8]، حيث

تسمح هذه الطريقة بحل نظام من  $(n)$  معادلة غير خطية بعدد من المجاهيل قدره  $(n)$  . ضمن حالتنا نريد حل 4

معادلات بأربعة مجاهيل، حيث  $A, B, D, E$  هم المجاهيل و  $\hat{\theta}_e, \hat{\phi}_e$  تمثل السعات العقدية لدرجة الحرارة و التدفق

على الوجه البارد، و  $\hat{\theta}_i, \hat{\phi}_i$  تمثل السعات العقدية لدرجة الحرارة و التدفق الحراري على الوجه الساخن للقرميد.

ليكن لدينا  $F(x)$  بحيث:

$$F(X) = \begin{cases} f_1(X) = \hat{\theta}_e - A\hat{\theta}_i - B\hat{\phi}_i = 0 \\ f_2(X) = \hat{\phi}_e - D\hat{\theta}_i - E\hat{\phi}_i = 0 \\ f_3(X) = AE - BD - 1 = 0 \\ f_4(X) = A - E = 0 \end{cases}$$

ليكن  $X_0 = \{A_0, B_0, D_0, E_0\}$  حلاً مجاوراً لنظام المعادلات و  $U = \{\Delta A, \Delta B, \Delta D, \Delta E\}$  بحيث يكون:

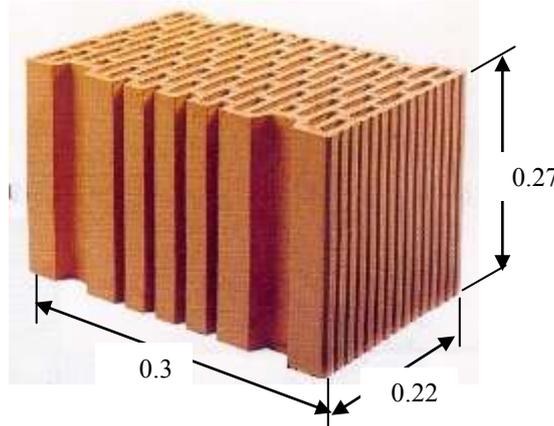
$$\begin{cases} A = A_0 + \Delta A \\ B = B_0 + \Delta B \\ D = D_0 + \Delta D \\ E = E_0 + \Delta E \end{cases}$$

ليكن  $J(X)$  مصفوفة جاكوبيان للنظام  $F$ . بالتالي يمكننا كتابة النظام الخطي التالي:  
 حيث  $U = J(X_0) \cdot U = -F(X_0)$  هو المجهول، وبالتالي يكون  $X = X_0 - J^{-1}(X_0) \cdot F(X_0)$ . تُحل هذه  
 المعادلة حلاً خطياً كلاسيكياً. يمكننا تحديد  $X$  بتكرار الحساب حتى يتقارب كل من  $X$  و  $X_0$  بشكل كاف

$$\sum_{i=1}^4 f_i^2 \rightarrow 0$$

### القرميد المفرغ المستخدم:

نبين في الشكل (3) القرميد المستخدم، أبعاد هذا القرميد  $0,22 \times 0,27 \times 0,30 \text{ m}^3$ ، أما خصائصه فهي: عامل  
 توصيل حراري صغير، خزن حراري جيد، مقاومة جيدة للضغط، امتصاص جيد للصوت، لا يُولد أية عناصر عضوية  
 سامة، مادة غير قابلة للاشتعال، يحد من التكاثر ضمن جدران المبنى. ويصنع من الغضار المشوي (terre cuite)،  
 ومؤلف من أعمدة تحصر بينها فراغات هوائية، تؤمن مقاومة حرارية عالية، كما هو موضح في الشكل التالي:



الشكل (3) القرميد المستخدم

نستعرض ضمن الجدول (1) بعض الخصائص الترموفيزيائية للغضار المشوي:

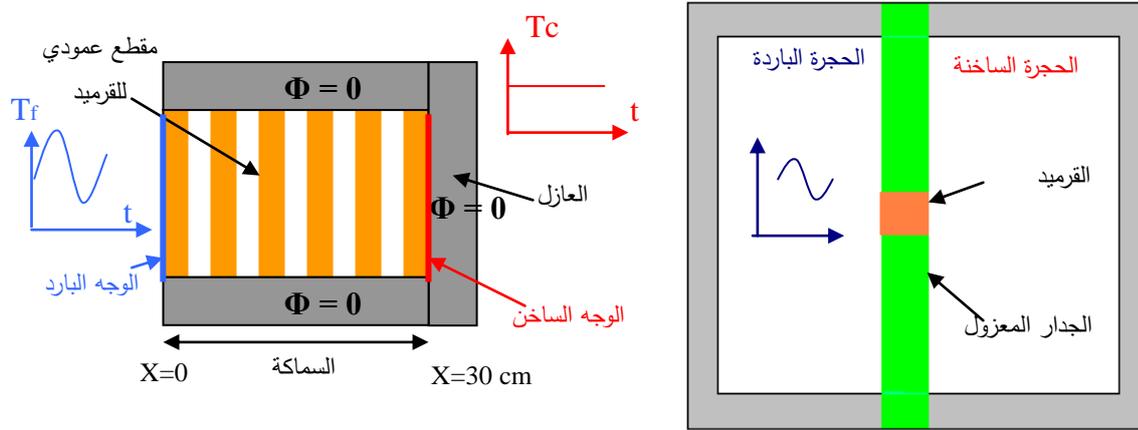
الجدول (1) الخصائص الترموفيزيائية للغضار المشوي

السعة الحرارية $(\text{J.kg}^{-1})$ ( <sup>1</sup> )	الكتلة الحجمية ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	عامل التوصيل الحراري ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
920	1700	0.5

### طرائق البحث ومواده:

تم الاعتماد في هذا البحث على قياسات درجات الحرارة على كل السماكات ضمن القرميد وعلى وجهيه الساخن  
 والبارد وكذلك على قياس التدفقات الحرارية على كلا الوجهين. لذلك تم وضع (38) مزدوجة حرارية منتشرة على كل

السماكات بتباعد قدره (0.77 cm)، كما تم وضع أربعة مزدوجات حرارية على كل وجه من أوجه القرميد (البارد و الساخن)، وذلك من أجل أخذ القيمة الوسطية لدرجات الحرارة على كلا الوجهين. بالنسبة لقياس التدفقات فقد تم بواسطة وضع جهازين مخصصين لقياسه، وذلك على كلا وجهي القرميد، يعطي هذان الجهازان قيمة الجهد بالفولت عند كل قياس، بعدها يتم تحديد التدفق بوحدة الـ (W/m<sup>2</sup>) انطلاقاً من معاملات مميزة للجهازين بوحدة (μV/W/m<sup>2</sup>). تم وضع هذا القرميد ضمن جدار من البوليستيرين بأبعاد (1m×1m)، كما في الشكل (4)، هذا الجدار يفصل الحرتين الباردة والساخنة. الحجرة الباردة مبرمجة، بحيث تسمح بالحصول على درجات حرارة ما بين -25°C و +30°C ، أما الحجرة الساخنة فهي مزودة بمقاومة مُسخنة تسمح بالحصول على درجات حرارة ما بين 5°C و 45°C.



الشكل (4) الغرفة الحاوية للحرتين وكذلك للجدار الحاوي على القرميد مع الحالات المدروسة

تم عزل الأوجه الجانبية للقرميد، ثم تم تطبيق إشارة (تغيرات) جيبية لدرجة الحرارة على الوجه البارد للقرميد، هذه الإشارة تعبر عن تغيرات درجة الحرارة الخارجية، فيما بعد تم تغيير فترة تطبيق هذه الإشارة (3 ساعات، 6 ساعات، 12 ساعة، 18 ساعة، 24 ساعة). المعادلة المعيرة عن هذه الإشارة الجيبية لتغيرات درجة

$$T_f(t) = 10 + 10 \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t\right)$$

حيث:  $\tau$  فترة الإشارة الجيبية،  $t$  الزمن.

تم دراسة حالتين مختلفتين، كما في الشكل (4):

a. عزل الوجه الساخن للقرميد.

b. تطبيق شرط Dirichlet (درجة حرارة ثابتة على الوجه الساخن للقرميد)،  $T_c(t) \approx 10^\circ C$ .

سنهتم في هذا البحث بالاستفادة من القياسات التجريبية من أجل حساب السعات الحرارية، وكذلك النفوذية الحرارية للقرميد المقرغ، ولذلك سوف لن نقوم بعرض درجات الحرارة و التدفقات المقاسة تجريبياً، بل سنقوم باستثمار تلك القياسات من أجل الحساب.

## النتائج والمناقشة:

## 1. حساب الساعات الحرارية باستخدام طريقة الـ (quadripôles)

نقوم بحل النظام (2) السابق، حيث إن  $\hat{\theta} = |\theta| \cdot \exp(\lambda \psi_1)$  ،  $\hat{\phi} = |\phi| \cdot \exp(\lambda \psi_2)$  . نصف سعة درجة الحرارة، و  $|\phi|$  نصف سعة التدفق، و  $\psi_1$  طور درجة الحرارة، و  $\psi_2$  طور التدفق. نُذكر أن  $A, B, D, E$  هم المجاهيل و  $\hat{\theta}_i, \hat{\phi}_i, \hat{\theta}_e, \hat{\phi}_e$  تمثل الساعات العقدية لدرجة الحرارة و التدفق الحراري على وجهي القرميد والتي سنحددها انطلاقاً من القياسات التجريبية. من أجل ذلك نقوم بتصفية الإشارات بتحويل فورييه، ومن ثم نقوم بعزل إشارة جيبية واحدة كل مرة، ومن بعدها نستنتج الساعات العقدية و الأطوار لكل من درجات الحرارة و التدفقات المقاسة على كلا وجهي القرميد، ولكل الفترات المدروسة، وذلك من أجل الشروط الحدية من النوع الأول (عزل الوجه الساخن للقرميد)، فنحصل في النهاية على الجدول (2).

يقدم الجدول (2)، الساعات العقدية مقدرة بالدرجة °C و الطور مقدر بالراديان.

الجدول (2) الساعات العقدية والأطوار لدرجات الحرارة و للتدفقات الحرارية على وجهي القرميد

24		18		12		6		3		الفترة (ساعة)
الطور	السعة °C									
3,19	1,02	2,73	0,69	3,05	0,23	2,51	0,12	3,98	0,07	$\hat{\theta}_i$
4,95	1,68	4,51	1,15	4,62	0,99	-0,16	0,23	1,36	0,1	$\hat{\phi}_i$ (W/m <sup>2</sup> )
1,11	9,02	0	9,02	0	8,85	1,1	8,63	2,3	7,41	$\hat{\theta}_e$
0	26	-0,87	33,64	-1	37,99	0	56,46	0	79,75	$\hat{\phi}_e$ (W/m <sup>2</sup> )

بمعرفة الساعات العقدية لدرجات الحرارة و التدفقات الحرارية على وجهي القرميد، يمكننا حساب السعة الحرارية عددياً باستخدام الـ Matlab . يُحل النظام (2) بطريقة نيوتن رافسون [8]، وبالتالي نحصل على الساعات الحرارية، كتابع للفترة المعتمدة كما في الجدول (3).

الجدول (3) الساعات الحرارية كتابع للفترة، محسوبة بطريقة الـ (quadripôles)

24	18	12	6	3	الفترة (ساعة)
3.190	2.729	2.153	1.508	1.516	السعة الحرارية (kJ/K)

## 2. حساب الساعات الحرارية باستخدام المعيار NF EN ISO 13 786

إن الحساب باستخدام المعيار NF EN ISO 13 786 [7]، يعتبر أن السعة الحرارية متعلقة بالتبادلات الحرارية الكلية بين القرميد و الوسط المحيط، من الجهتين الداخلية والخارجية، وبالتالي يجب الأخذ بالحسبان معاملات التبادل السطحية.

في هذه الحالة نستفيد من المركبات المحددة سابقاً  $A, B, D, E$  بطريقة الـ (quadripôles) لمصفوفة الانتقال للقرميد من أجل كل فترة معتبرة. يمكننا الآن تطبيق هذا الإجراء بشكل مباشر على المعيار الذي يعتبر أن الجدران متعددة الطبقات. لدينا إذن ثلاث طبقات : تبادلات داخلية، و تبادلات ضمن القرميد، وتبادلات خارجية، وبالتالي مصفوفة الانتقال الجديدة تأخذ الشكل التالي:

$$\begin{bmatrix} A' & B' \\ D' & E' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{h_e} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ D & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{h_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

تُستنتج السعات الحرارية من المصفوفة الجديدة باستخدام المعادلات التالية:

$$\begin{cases} C_i = -\frac{\tau}{2\pi \cdot \text{Im}(Z_i)} = -\frac{\tau}{2\pi \cdot \text{Im}\left(\frac{B'}{1-A'}\right)} \\ C_e = -\frac{\tau}{2\pi \cdot \text{Im}(Z_e)} = -\frac{\tau}{2\pi \cdot \text{Im}\left(\frac{B'}{1-E'}\right)} \end{cases}$$

حيث  $h_i=8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  و  $h_e=25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

نلاحظ هنا أن القرميد متناظر، ويعبر عن السعة الحرارية للقرميد بقيمة واحدة، غير أن وجود التبادلات السطحية يسبب عدم تناظر للسعات الداخلية والخارجية، وبالتالي لهما قيم مختلفة. نقدم في الجدول (4) السعات الداخلية والخارجية لجدار القرميد بوحدة الـ (kJ/K). بمقارنة هذه القيم مع قيم سعات القرميد بمفرده نجد أنها متقاربة. إن الاختلاف بينهما يأتي من اختلاف معاملات التبادل. كذلك عيّنا ضمن هذا الجدول عن قيم تلك السعات بوحدة (kJ/m<sup>2</sup>.K)، هذه الأرقام الأخيرة يجب أن تأخذ بدقة لأنها لاتعبر عن السعة الحقيقية للجدار الذي من المتوجب عليه أن يأخذ بالحسبان مجموع عناصر الجدار (السعة متغيرة تبعاً لمساحة سطح القرميد).

الجدول (4) السعات الحرارية التجريبية

24	18	12	6	3	الفترة (ساعة)	
3.19	2.729	2.153	1.508	1.516	C <sub>القرميد</sub>	القيم عبر عنصر الجدار الأحادي (kJ/K)
3.203	2.759	2.140	1.519	1.531	C <sub>الداخلية</sub>	
3.149	2.691	2.163	1.503	1.507	C <sub>الخارجية</sub>	
52.727	45.107	35.587	24.926	25.058	C <sub>القرميد</sub>	القيم السطحية للجدار الأحادي (kJ/m <sup>2</sup> .K)
52.942	45.603	35.372	25.107	25.306	C <sub>الداخلية</sub>	
52.05	44.479	35.752	24.843	24.909	C <sub>الخارجية</sub>	

### 3. الحساب التقريبي لسعات الجدار

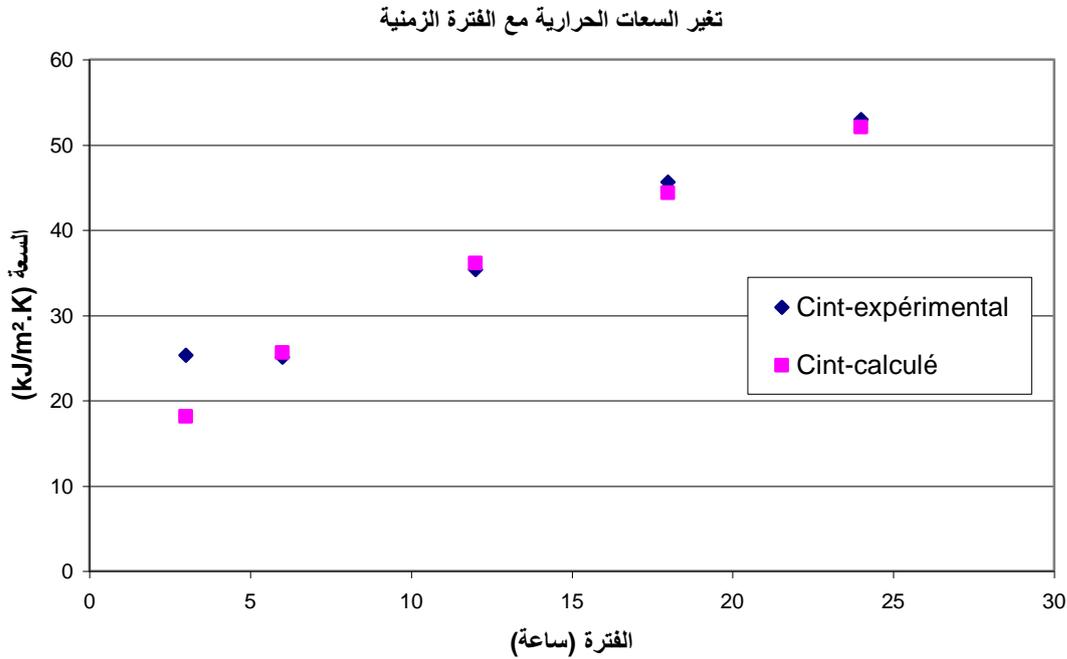
من أجل التأكد من قيم السعات المحددة تجريبياً، تم حساب السعة الحرارية باستخدام المعيار السابق، وذلك لجدار مركب من مادة متجانسة ويسماكة مساوية لتلك المتعلقة بالقرميد الذي له ( $\rho = 863 \text{ kg/m}^3$ )، والسعة الظاهرية (C=920 J/kg.K)، أما عامل التوصيل الحراري فاستنتج من المقاومة الحرارية الكلية للقرميد المفرغ

وبالتالي تكون النفوذية الحرارية ( $a=1,5.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ). نقدم ضمن الجدول (5) قيم السعات الداخلية والخارجية التقريبية.

الجدول (5) السعات التقريبية

الفترة (ساعة)	3	6	12	18	24	الجدار المتجانس (kJ/ m <sup>2</sup> .K)
C <sub>الداخلية</sub>	18.110	25.615	36.112	44.358	52.026	
C <sub>الخارجية</sub>	18.110	25.616	36.080	44.536	52.579	

يقارن الشكل (5) تطور قيم السعات الحرارية الداخلية المستنتجة من التجربة مع تلك المحسوبة، وذلك من أجل كل الفترات المعتبرة. نلاحظ من هذا الشكل أن السعة الحرارية تزداد مع ازدياد الفترة.



الشكل (5) تغير السعات الحرارية مع الفترة

بالنتيجة، إن القيم الناتجة للسعات الداخلية والخارجية للقرميد منخفضة، وهذا ما يميز المواد العازلة التي لها سعة حرارية حجمية منخفضة.

#### 4. التحديد التجريبي للنفوذية الحرارية

بأخذ الحالة الثانية للشروط الحدية المطبقة على القرميد (شرط Dirichlet : درجة حرارة ثابتة على الوجه الساخن للقرميد). نقارن درجات الحرارة المقاسة في كل نقطة من القرميد مع تلك المحسوبة لمادة متجانسة خاضعة

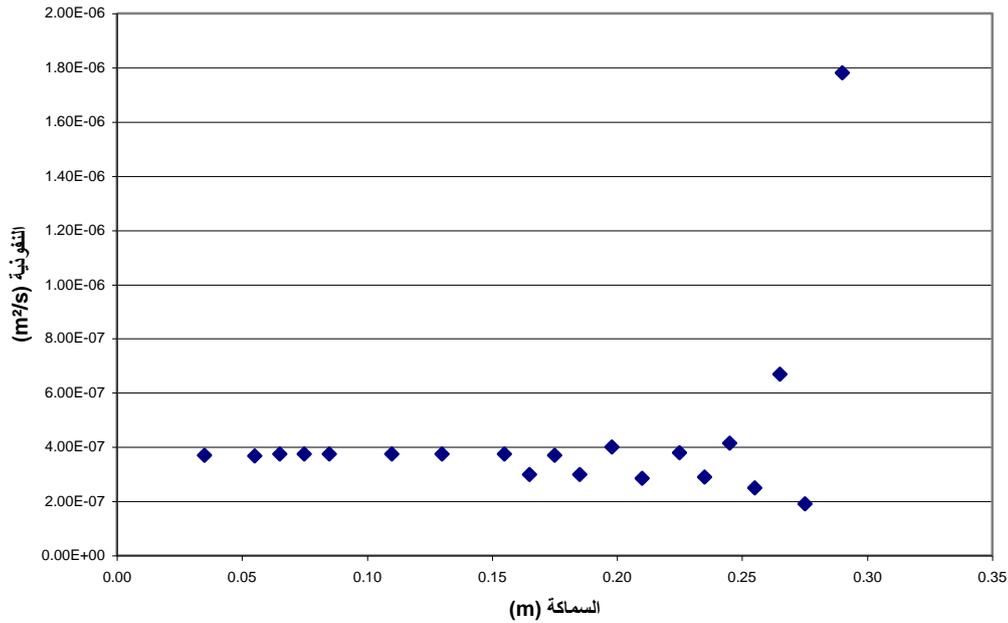
لنفس الشروط الحدية. النفوذية الحرارية لمادة متجانسة محددة بحيث تكون درجات الحرارة المقاسة والمحسوبة متطابقة قدر الإمكان، وهذا ما ندعوه بالطريقة العكسية [9] حيث:

• يوجد سماكة أصغرية، حيث يصبح بعدها الحساب مستحيلاً. كما أن النفوذية الحرارية متغيرة من نقطة لأخرى.

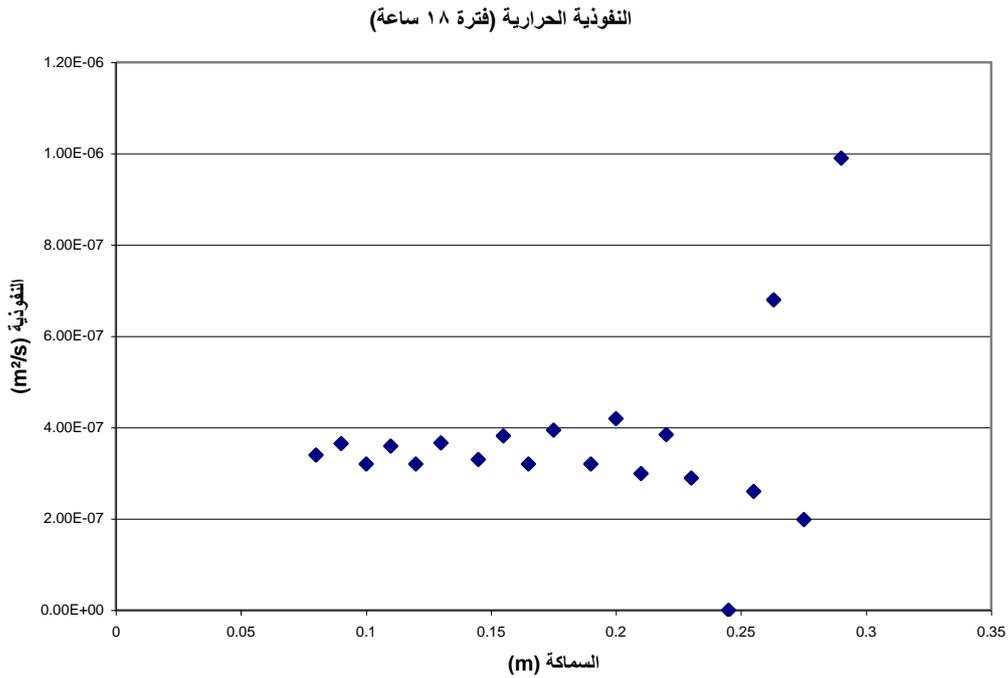
- تُحدد النفوذية الحرارية بشكل أفضل عندما يكون عدد المزدوجات الحرارية المستخدمة أكبر.
- النفوذية المحددة بوجود مزدوجة حرارية ضمن المنطقة المعتبرة تعطي حساباً دقيقاً.

تم حساب النفوذية الحرارية باستخدام الطريقة العكسية الموصوفة في [9]، والتي تعتمد على مبدأ انعدام المجموع التريبيعي الأصغرياً بين درجات الحرارة المقاسة، ودرجات الحرارة المحسوبة عديداً. تقدم الأشكال القادمة النفوذية الحرارية المكافئة المحددة، في كل نقطة وذلك لعدة فترات معتبرة. نلاحظ من هذه الأشكال أنه يوجد توافق مع ما ذكر سابقاً، بما يتعلق بالطريقة العكسية.

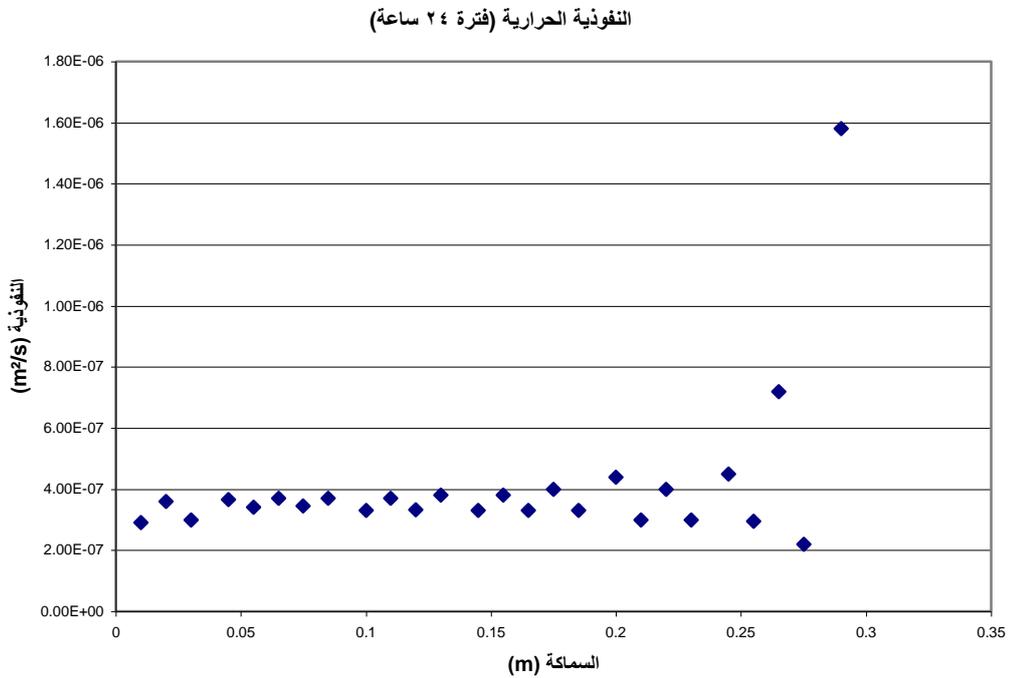
النفوذية الحرارية (فترة 6 ساعات)



الشكل (6) تغير النفوذية الحرارية كتابع للسماكة (الفترة 6 ساعات)



الشكل (7) تغير النفوذية الحرارية كتابع للسماعة (الفترة 18 ساعة)



الشكل (8) تغير النفوذية الحرارية كتابع للسماعة (الفترة 24 ساعة)

نقدم في الجدول (6) القيم الوسطية للنفوذية الحرارية من أجل الفترات المدروسة.

الجدول (6) النفوذية الحرارية كتابع للفترة

24	18	6	الفترة (ساعة)
3.49	3.45	3.39	النفوذية الحرارية ( $10^{-7} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

يمكننا القول، إن النفوذية المكافئة لا تتغير مع فترة تغيرات درجة الحرارة المفروضة على الوجه البارد للقرميد. يوجد سماكة أصغرية ضرورية لا يمكن تجاوزها، بحيث تسمح قياسات درجات الحرارة من تحديد نفوذية وحيدة، ويتجاوز هذه السماكة، فإن بارامتر النفوذية ليس له حقيقة فيزيائية بالنسبة للقرميد المفرغ، وهذا يعني أنه لا يمكن أن يُعتبر أو يُنمذج كمادة متجانسة.

### الاستنتاجات والتوصيات:

قمنا بتحديد السعة الحرارية للقرميد المفرغ بعدة طرق، هذه السعة تعبر عن القصور الحراري لهذا القرميد، و بالتالي عن كمية الطاقة التي يمكن أن يخزنها. لتحقيق ذلك قمنا بدراسة السلوك الديناميكي للقرميد انطلاقاً من النتائج التجريبية لدرجات الحرارة و التدفقات على وجهي القرميد و في داخله، ثم قمنا باستثمار هذه القياسات من أجل تحديد السعة الحرارية للقرميد و نفوذيته الحرارية.

أظهرنا أنه يمكننا تحديد النفوذية الحرارية للقرميد المفرغ، انطلاقاً من مسافة معينة من الجدار المُحرّض بإشارات جيئية لدرجة الحرارة، مما يعني أنه يوجد منطقة لا يكون فيها قانون التوصيل الحراري قابلاً للتطبيق، وبالتالي لا يمكن معرفة توزيع درجات الحرارة ضمن القرميد بواسطة موديل توصيلي بسيط. وبالعكس إذا أخذنا قياس التدفقات و درجات حرارة السطح، فإن الموديل التوصيلي مع النفوذية الحرارية التي قمنا بتحديدنا، يعطي نتائج مقبولة.

الأبحاث القادمة المتعلقة بتحسين هذا النوع من القرميد، يمكن أن تكون حول شكله الهندسي، وخصائص السطح. يمكن أن يكون هذا القرميد معدلاً بشكله الهندسي، على سبيل المثال، بزيادة مقاسات الحجرات الهوائية العمودية المحصورة بين أعمدته. في هذه الحالة فإن الموديل التوصيلي سوف لن يكون صالحاً، بل يجب دراسة الحمل الحراري المتولد ضمن هذه الحجرات.

يمكن أن تهتم الدراسات اللاحقة باختبار مواد بناء أخرى تلعب دوراً مزدوجاً من ناحيتي العزل و القصور

الحراريين.

المراجع:

- [1] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), *Réglementation thermique* 2000, 83.
- [2] LACARRIERE,B.; TROMBE,A.; MONCHOUX,F. *Experimental unsteady characterization of heat transfer in a multi-layer wall including air layers – Application to vertically perforated bricks*. Energy and Buildings, Vol. 38, Issue 3, March 2006, 232-237.
- [3] LACARRIERE,B. *Etude numérique et expérimentale des échanges thermiques en cavités partitionnées : application aux transferts instationnaires dans les briques à perforations verticales*, Thèse de doctorat, université Paul Sabatier – Toulouse, 2003, 142.
- [4] LACARRIERE,B. ; LARTIQUE,B.; MONCHOUX,F. *Numerical study of heat transfer in a wall of vertically perforated bricks : influence of assembly methode*. Energy and Buildings, Vol. 35, Issue 3, March 2003, 229-237.
- [5] ANTONOPOULOS, K.A. *Apparent and effective thermal capacitance of buildings*. Energy Vol. 23, No. 3, 1998, 183-192
- [6] MAILLET, D.; ANDRE, S. *Thermal quadrupoles*. Wiley, 2000, 384.
- [7] NF EN ISO 13786, *Performance thermique des composants de bâtiment. Caractéristiques thermiques dynamiques. Méthodes de calcul*. Janvier 2000, 50-738.
- [8] NOUGIER, J.P. *Méthodes de calcul numérique – Fonctions équations aux dérivées*. Volume 2, Hermes Sciences, 2001, 410.
- [9] BECK, J. V.; ARNOLD, K. J. *Parameter estimation in engineering and science*. John Wiley & Sons. New-York. Chichester . Brisbane. Toronto. 1977, 501.