**الجمهورية العربية السورية**

**جامعة دمشق**

**كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية**

**قسم هندسة الميكانيك العام**




# تصميم وتصنيع جهاز قياس عامل انتقال الحرارة بالحمل للهواء واختباره

# Designing, Manufacturing, and Testing an apparatus measuring convictive heat transfer factor

إعداد المهندس

طارق كنينه

المشرف العلمي

الدكتور المهندس نصر ياسين

المشرف المشارك

الدكتور المهندس وجيه ناعمة

**بحث أعد لنيل درجة الماجستير في هندسة التبريد**

العام 2010

# الملخص

قامت في الآونة الأخيرة ثورة في الحسابات الهندسية تمثلت بنمذجة العمليات والإجراءات الهندسية ومحاكاتها عن طريق العديد من البرامج الخاصة بالنمذجة والمحاكاة. وبين هذه العمليات عملية انتقال الحرارة بالحمل، والتي تطرَق لها العديد من الباحثين. يتم في هذا البحث تصميم وتنفيذ وتصنيع جهاز لقياس عملية انتقال الحرارة بالحمل الحر لسطوح شاقولية وأفقية. كما يتم قياس التدرج الحراري بين السطوح والسائل المحيط بها، عن طريق مصفوفة من الحساسات باتجاه انتقال الحرارة. ثم، عن طريق دارة إلكترونية، يتم تحويل ونقل البيانات إلى حاسب آلي لتتم معالجة البيانات الصادرة عن الجهاز، وحساب أخطاء القياس، ورسم منحنيات انتقال الحرارة من السطوح، وإظهاره على شاشة الحاسب. وبمقارنة النتائج التجريبية مع النتائج الحسابية الناتجة عن المعادلات التجريبية المعتمدة من قبل الجمعية الأمريكية للقياس، ظهر تقارب القيم المقاسة مع القيم المحسوبة حتى القيمة $(0.5\ \mathrm{W/m^2\ ^oC})$ عند قياس توزع درجات حرارة بمجالات أكبر من $3.5\ ^oC$. يمكن الاعتماد على الجهاز، مع متمِّماته من العينات، لإجراء تجارب في انتقال الحرارة بالحمل الحر في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق. كما ويمكن قياس انتقال الحرارة بالحمل القسري من السطوح سابقة الذكر، بعد تعديل مصفوفة الحساسات وبرنامج معالجة النتائج بما يتلائم مع انتقال الحرارة بالحمل القسري.

# فهرس المحتويات


**الملخص** **I**

**فهرس المحتويات** **II**

**تصميم وتصنيع جهاز قياس عامل انتقال الحرارة بالحمل للهواء واختباره** **1**

**1. مقدمة** **1**
**2. أهمية البحث** **2**
**3. الهدف من البحث** **2**

**الفصل الأول** **3**

**1. الدراسة النظرية** **3**
1.1. مقدمة 3
1. 2. الأساس الحراري النظري 5
1. 3. النموذج الرياضي الحسابي التحليلي لمعامل انتقال الحرارة بالحمل 6
1. 3. 1. المبادئ الفيزيائية لانتقال الحرارة بالحمل 7
1. 3. 2. المعادلات الرياضية الناظمة لانتقال الحرارة بالحمل الحر 8
1. 3. 3. المعادلات اللابعدية (التشابه) لجريان الحمل الحر وانتقال الحرارة 10
1. 3. 4. الحمل الحر الصفائحي على سطح شاقولي: 11
1. 3. 5. الجريان المضطرب 13
1. 3. 6. العلاقات التجريبية . جريانات الحمل الحر الخارجي 14
1. 3. 6. 1. الصفيحة الشاقولية 15
1. 3. 6. 2. الصفائح المائلة والأفقية 16
1. 3. 6. 3. الاسطوانة الأفقية الطويلة 19
1. 3. 6. 4. الكرات 19
1. 3. 7. المعادلات المرجعية المستخدمة في طرق حساب معاملات انتقال الحرارة 20

**الفصل الثاني** **26**

**الطرق التجريبية في قياس انتقال الحرارة** **26**

**مقدمة** **26**
2. 1. التحسس 26
2. 2. المعايرة 27
2. 3. القراءة 28

**2. 4.أخطاء القياس** **29**
2. 4. 1. عدم الدقة 29
2. 4. 2. المتوسط والانحراف 30
2. 4. 3. توزع الخطأ 31
2. 4. 3. أخطاء الحساب 34
2. 4. 4. استيفاء المنحنيات (بالمربعات الصغرى) 35
2. 4. 5. حل جملة المعادلات الخطية وقلب المصفوفات 39
2. 4. 6. طريقة الحذف لغوص – جوردان 40
2. 5. التجهيزات المستخدمة في قياس درجة الحرارة 43
2. 6. مقاييس التدفق الحراري 43

**الفصل الثالث** **45**

**جهاز قياس عامل انتقال الحرارة بالحمل الحر** **45**

**3. 1. العناصر الأساسية للجهاز** **45**
3. 1. 1. مقاييس الحرارة الثيرمستورية (الحساس) 45
خصائص المقاومة للحرارة: 47
3. 1. 2. العناصر المؤلفة للجهاز 49
3. 1. 3. معايرة الجهاز 51
**3. 2. برنامج معالجة القيم المقاسة من الجهاز** **52**
3. 2. 1. برنامج القراءة من الجهاز وتسجيل البيانات 52
3. 2. 2. برنامج معالجة البيانات المقروءة ورسم المنحنيات: 55

**الفصل الرابع** **58**

**النتائج التجريبية والنتائج الحسابية** **58**

**4. 1. مقدمة** **58**
**4. 2. الطريقة** **59**
**4. 3. التجارب** **59**
4. 3. 1. انتقال أفقي للحرارة 59
4. 3. 1. 1. اسطوانة شاقولية 59
4. 3. 1. 2. براد منزلي 73
4. 3. 1. 3. حالة نافذة 75
4. 3. 2. انتقال حرارة شاقولي 75
**4. 4. منصة الاختبار** **77**
**4. 3. المناقشة** **78**
**4. 4. التوصيات** **78**

**الرموز والمصطلحات** **79**

**المراجع** **80**

**الملحق** **81**

# تصميم وتصنيع جهاز قياس عامل انتقال الحرارة بالحمل للهواء واختباره

## 1. مقدمة

العوامل الأساسية في الحسابات الحرارية للتكييف والتبريد والتدفئة هي إيجاد معاملات الانتقال الحراري. ومع تطور العلوم وتقنيات التصنيع من إيجاد لخلائط ومواد بناء وكودات جديدة كان من الضروري تحديد معاملات الانتقال لها. فقامت العديد من الدراسات على ذلك، وتوصلت إلى معاملات وتم الاعتماد عليها. لكن معظم هذه الدراسات قامت على اسس نمذجة للمعادلات الأساسية كما في الدراسة التي قام بها *Thijs Defraeye, Bert Blocken, Jan Carmeliet*، وكانت بعنوان *Cfd Analysis Of Convective Heat Transfer Coefficients On The Exterior Surfaces Of A Cubic Building*. والدراسة التي قام بها *Marcelo G. Emmel, Marc O. Abadie, Nathan Mendes* وكانت بعنوان *New external convective heat transfer coefficient correlations for isolated low-rise buildings*، ولم تكن عن طريق القياس، والبعض الآخر منها اعتمدت على أسس قياس بعض الحالات الخاصة مثل: *Experimental study on natural convective heat transfer from a vertical plate with discrete heat sources mounted on the back*، الذي قام بها *Chen Linhui, Tian Huaizhang, Li Yanzhong, Zhang Dongbin*. وقياس معامل انتقال الحراري الوسطي كما في الأجهزة المقدمة من شركة *Gunt* ( *Natural Convection and Radiation Apparatus* و *free and forced convection unit / PC*).

تنقسم طرق انتقال الحرارة إلى ثلاثة طرق هي التوصيل والحمل والإشعاع ولا تقل إحداها شأناً عن الأخرى. ولكل طريقة في الانتقال عامل وهي: عامل انتقال الحرارة بالحمل، وعامل انتقال الحرارة بالتوصيل وعامل انتقال الحرارة بالإشعاع. فانتقال الحرارة بالحمل والذي يتم فيه انتقال الطاقة عن طريق حركة السائل (الغاز أو المائع) [*Burmeister 1983, Kays and Crawford 1980*]. وانتقال الحرارة بالتوصيل الذي يمكن تعريفه على أنه آلية انتقال الحرارة التي فيها تنتقل الطاقة بين الجزيئات عن طريق التسلسل بانتقال الطاقة الحركية بين الجزيئات. حيث تحدث العملية في الغازات الساكنة عن طريق التصادم المرن بين الجزيئات، بينما في السوائل الساكنة والأجسام الصلبة غير الناقلة كهربائياً فيعتقد حدوثها عن طريق الحركة الترددية للهيكل الشبكي للجزيئات. وعند انتقال الحرارة بالإشعاع تقوم العناصر ببث الإشعاعات الحرارية من سطحها عندما تكون درجة حرارتها أعلى من الصفر المطلق، وتكون هذه الإشعاعات على شكل فوتونات متغيرة التردد. وهنا لا حاجة لهذه الفوتونات لأي جسم لينقلها (على عكس طرق انتقال الحرارة بالحمل والتوصيل). فتعتمد كمية الحرارة الصادرة عن العنصر على درجة حرارته

المطلقة وخصائصه. تنتقل الطاقة بين سطحين (أو جسمين) بدرجتي مختلفتين على مرأى من بعضها البعض، وتعتمد كمية الطاقة المنتقلة من أحدهما للآخر على الحجوم النسبة والأشكال والتوجيه ودرجات حرارتها ومعاملات البث والامتصاص [1].

وباعتبار عامل النقل الحراري بالتوصيل خاصة فيزيائية متعلقة بالجسم بحد ذاته فقد تم تحديد هذه المعاملات للكثير من المواد المستخدمة في الحياة العملية. كذلك تم تحديد عوامل البث والامتصاص لكثير من المواد (والتي بدورها تحدد عامل انتقال الحرارة بالإشعاع) بينما يبقى العامل الأخير وهو عامل انتقال الحرارة بالحمل. قامت مجموعة كبيرة من الدراسات لتحديد هذا العامل الذي يتعلق بمجموعة كبيرة من العوامل الأخرى. منها الفيزيائية المتعلقة بالجسم، ومنها غير المتعلقة به بل المتعلقة بالعوامل المحيطة. وتم تحديد هذه العوامل تجريبياً لبعض التطبيقات الهندسية [1–3] ، بينما ظل الكثير الباقي غير معلوم يحتاج إلى التوضيح.

## 2. أهمية البحث

تكمن أهمية البحث في تصميم جهاز اختباري لتوصيف وقياس عامل الانتقال الحراري بالحمل الحر اللازم للحسابات الحرارية والترموديناميكية في مجالات هندسة التكييف والتبريد والتدفئة والصناعات الكيميائية. حيث تفتقد هيئة المواصفات والمقاييس السورية لمثل هكذا جهاز، وما يقدمه من توفير اقتصادي وطاقي في مجال الدراسات الهندسية. بالإضافة إلى كونه مادة مخبرية لطلاب كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق، حيث سيتمكن الطالب من تفهّم عامل الانتقال الحراري $h$ (أو $\alpha$) عن قرب وقياسه، وتمييز الفرق في هذا العامل بين سطوح مختلفة. وكذلك رؤية اختلاف هذا العامل باختلاف اتجاه ونوع الجريان الحراري واختلاف درجة الحرارة. ولمس ماهية معادلة نوسلت لحساب هذا العامل عن طريق مشاهدة التوزع الحراري، ومقارنة الخطأ في قياسه.

## 3. الهدف من البحث

تصميم وتصنيع جهاز قياس عامل انتقال الحرارة بالحمل للهواء واختباره. لإيجاد عامل الانتقال الحراري المحلي بالحمل الحر لمجموعة جدران داخلية قليلة الخشونة شاقولية أو أفقية أو اسطوانية أو كروية كبيرة القطر نسبياً.

# الفصل الأول

## 1. الدراسة النظرية

### 1.1. مقدمة

إن انتقال الحرارة بالحمل هو العلاقة الحرارية بين سطح وسائل مجاور له [2]، كما هو الحال عند جريان سائل حول اسطوانة أو داخل أنبوب أو بين صفيحتين. كما وأنه يتضمن دراسة العلاقة الحرارية بين السوائل، كما هوعند نفث (قذف) سائل ضمن سائل آخر.

وحسب قانون فوريه بالتوصيل فإن التدفق الحراري في اتجاه معين يساوي إلى عامل الموصلية الحرارية في تغير درجة الحرارة بذلك الاتجاه.

$$q''_x = -k\frac{\partial T}{\partial x}, q''_y = -k\frac{\partial T}{\partial y}, q''_z = -k\frac{\partial T}{\partial z} \qquad (1-1)$$

حيث: $q_x$: التدفق الحراري بالاتجاه $x$.

$q_y$: التدفق الحراري بالاتجاه $y$.

$q_z$: التدفق الحراري بالاتجاه $z$.

$k$: عامل انتقال الحرارة بالتوصيل.

$\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}$: التدرج الحراري في الاتجاه $x, y, z$ على التوالي.

إن إشارة (−) في العلاقة (1−1) تعني أن التدفق الحراري معاكس لاتجاه تزايد الحرارة (أي تنتقل الحرارة من الأسخن باتجاه الأبرد).

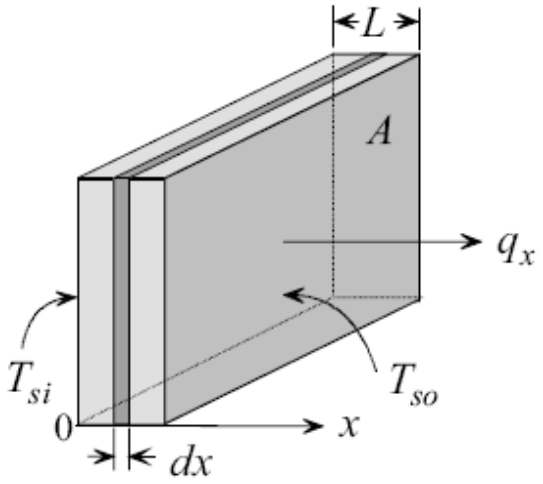
في الشكل (1−1) بفرض درجة حرارة سطح $T_{si}$ عند ($x=0$) ودرجة حرارة سطح مقابل له $T_{so}$ عند ($x=L$) حيث $L$ سماكة الجدار و $A$ مساحته. أما باقي السطوح فتعزل جيداً. وبهذا تنتقل الحرارة بالاتجاه $x$ فقط. لنفرض الحالة المستقرة ولتكن $q_x$ معدل انتقال الحرارة بالاتجاه $x$ مستقرة. دلَّت التجارب على أن $q_x$ تتناسب طرداً مع $A$ و $\Delta T$ وعكساً مع $L$ أي

$$q_x \propto \frac{A(T_{so} - T_{si})}{L}$$

وبوضع عامل التناسب $k$ خاصة المادة المسماة الموصلية الحرارية.

$$q_x = k\frac{A(T_{so} - T_{si})}{L} \qquad (2-1)$$

مع ملاحظة أن انتقال الحرارة كما هو مفترض بالشكل (1−1) يتم من السطح *Si* باتجاه السطح *So* فإن إشارة (−) تدخل إلى $\Delta T$ لتصبح $(T_{so}-T_{si})$ عوضاً عن $(T_{si}-T_{so})$.




الشكل (1−1) التدفق الحراري عبر جدار (صفيحة)

عُرف من مشاهدات اسحق نيوتن التجريبية أن التدفق الحراري السطحي بالحمل يتناسب طرداً مع فرق درجات الحرارة بين السطح والتيار المار المتاخم له أي:

$$q''_s = h(T_s - T_\infty) \qquad (3-1)$$

حيث $h$ هو عامل انتقال الحرارة بالحمل. وهو الأساس في انتقال الحرارة بالحمل.

وبمراعاة $h$ يمكن ملاحظة أنَّ:

- المعادلة السابقة هي تعريف لـ$h$.
- إن $h$ ليست خاصة فيزيائية تتعلق بالمادة. على عكس الموصلية الحرارية $k$. بل تتعلق بمواصفات السائل وحركنه وبهندسة السطح. كذلك تتعلق في بعض الأحيان بالفارق الحراري بحد ذاته.
- بالرغم من عدم ذكر التوزع الحراري في المعادلة السابقة فإن التحديد التحليلي لـ $h$ يتطلب معرفة التدرج الحراري في السائل المتحرك.

لذلك كان من الضروري التأكيد على أن العوامل الأساسية التي تلعب الدور الهام في انتقال الحرارة بالحمل هي:

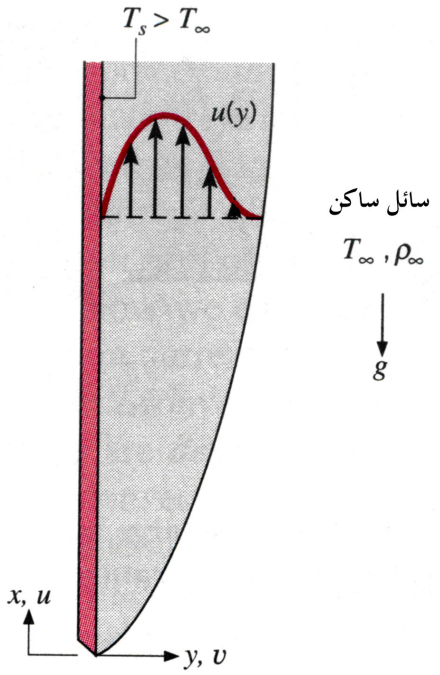
1. حركة السائل.
2. طبيعة السائل.

3. هندسة السطح (شكله وأبعاده)

وأن الأساس في تحديد انتقال الحرارة بالحمل هو تحديد توزع درجة الحرارة في السائل المتحرك أي: $T = f(x, y, z, \tau)$ وهو التابع للأبعاد الثلاث والزمن. وبمعرفة هذا التابع يصبح تحديد عامل انتقال الحرارة بالحمل عبارة عن معالجة رياضية. إن قياس التوزع الحراري والمعالجة الرياضية لهذا التوزع الحراري الذي يتم بناء عليه تحديد عامل انتقال الحرارة بالحمل، هي محور هذا البحث.

## 1. 2. الأساس الحراري النظري

يتم التركيز في هذا البحث على انتقال الحرارة بالحمل الحر. لدراسة وتصميم جهاز لقياس توزع درجات الحرارة بالقرب من سطوح شاقولية (أو أفقية). في الشكل (1-2):




الشكل (1-2)

عند تطبيق معادلة فوريه بالاتجاه $y$ للسطح نجد ما يلي:

$$q''_y = -k\frac{\partial T(y)}{\partial y} \qquad (4-1)$$

حيث $y$ الناظم على السطح و $\frac{\partial T(y)}{\partial y}$ التدرج الحراري في السائل في الاتجاه $y$ و $k$ الموصلية الحرارية للسائل.

بتعويض المعادلة (1-4) في قانون نيوتن للتبريد (1-3) نجد ما يلي:

$$h = \frac{-k\dfrac{\partial T(y)}{\partial y}}{T_s - T_\infty} = \left(\frac{-k}{T_s - T_\infty}\right)\left(\frac{\partial T(y)}{\partial y}\right) \qquad (5-1)$$

ولتطوير المعادلة لتصبح ملائمة للقياسات (حيث سيتم قياس التدرج الحراري) لا بد في البداية من التكهن بفاصلة الحساسات (أي المسافة الفاصلة بين الحساسات المتتالية $\partial y$). ويتم ذلك بتحديد أصغر مسافة يمكن اعتبارها مناسبة لتحسس الحرارة في الاتجاه $y$. بذلك تتحول العلاقة السابقة إلى:

$$h = \left(\frac{-k}{T_s - T_\infty}\right)\left(\frac{T_{i+1} - T_i}{y_{i+1} - y_i}\right) \qquad (6-1)$$

حيث: $T_i$ درجة الحرارة عند الموضع $y_i$، و$T_{i+1}$ درجة الحرارة عند الموضع $y_{i+1}$.

وباعتبار الغرض من البحث هو حساب (قياس) $h$ الموضعية عند السطح مباشرة يصبح $y_i=0$ باعتبار مبدأ القياس هو السطح و$y_{i+1}=y$ وهي المسافة ما بين الحساس الأول والثاني و$T_i=T_s$ و$T_{i+1}=T_1$ أي:

$$h = \left(\frac{-k}{y}\right)\left(\frac{T_1 - T_s}{T_s - T_\infty}\right) = \left(\frac{k}{y}\right)\left(\frac{T_s - T_1}{T_s - T_\infty}\right) \qquad (7-1)$$

باعتبار أن:

| | | |
|---|---|---|
| $K =$ | 0.025 | W/m.k |
| $\partial y =$ | 0.005 | m |
| $T_s - T_1 =$ | 2 | °C |
| $T_s - T_\infty =$ | 4 | °C |

فإن:

| | | |
|---|---|---|
| $h$ أو $\alpha =$ | *2.5* | $W/m^2.k$ |

## 1. 3. النموذج الرياضي الحسابي التحليلي لمعامل انتقال الحرارة بالحمل [3]

تدرس الحالات التي لا سرعة قسرية فيها مع وجود تيارات حملية ضمن السائل (الهواء بشكل خاص). والمسماة الحمل الحر أو الطبيعي. حيث تتولد هذه التيارات بسبب قوى داخلية في السائل ناتجة عن التدرج في الكثافة، ومحصلة التأثير لهذه القوى هي قوة الطفو. في الحالة العامة ينتج التدرج بالكثافة عن

تدرج حراري، وتنتج القوة الداخلية عن حقل الجاذبية وقوى التجاذب بين الجزيئات نفسها. وباعتبار أن الهواء يسلك سلوك الغاز المثالي فيمكن إهمال تأثير قوى التجاذب بين الجزيئات.

وبما أن سرعة الجريان في الحمل الحر هي عادة أقل بكثير منها الحمل القسري فإن معدلات انتقال الحرارة بالحمل الحر أقل من نظيراتها للقسري. وذلك يبعد اهتمامنا عن إجراءات الحمل الحر. في الحقيقة يجب الاهتمام بهذا الإجراء، ففي العديد من أنظمة الجريان المركبة (ذات التأثيرات المتعددة) ينال الحمل الحر الحصة الأكبر من مقاومة انتقال الحرارة. وبهذا يلعب الدور الهام في تصميم وأداء النظام. علاوة على ذلك، يلجأ إلى الحمل الحر عند وجود الرغبة في التقليل من معدلات انتقال الحرارة أو تصغير كلف التشغيل.

هناك بالطبع عدة تطبيقات يكون فيها الحمل الحر سيد الموقف (الأكثر فاعلية) في انتقال الحرارة من الأنابيب وخطوط النقل ووسائل إلكترونية عديدة. فالحمل الحر مهم عند نقل الحرارة من لوحات التسخين الإلكترونية أو المشعات البخارية إلى هواء الغرفة، وانتقال الحرارة من وشيعة التبريد إلى الهواء المحيط. كذلك يرتبط الحمل الحر بالعلوم البيئية، فهو المسؤول عن الحركة في المحيطات والغلاف الجوي لارتباطه بإجراءات انتقال الحرارة.

### 1. 3. 1. المبادئ الفيزيائية لانتقال الحرارة بالحمل

تنشأ حركة السائل عند الحمل الحر عن قوى الطفو بينما هي موجودة بفعل خارجي لحالة الحمل القسري. يعزى الطفو إلى الوجود المشترك للتدرج في كثافة السائل، والقوى الداخلية المتناسبة مع الكثافة. عادة ما تكون القوى الداخلية عملياً هي الجاذبية، كما يمكن أن تكون القوة الطاردة المركزية في آلات الجريان الدوارة أو قوة كيريوليس في الحركات الدورانية للمحيطات والغلاف الجوي. هناك أيضاً طرق متعددة يظهر فيها التدرج في كثافة المادة في سائل، ولكن لأكثر الحالات شيوعاً ينتج التدرج في الكثافة عن التدرج الحراري. فترتبط كثافة السوائل والغازات بدرجة الحرارة، وعموماً تكون الكثافة متناقصة (نظراً للتمدد) بزيادة درجة الحرارة ($\partial\rho/\partial T<0$).

سيتم التركيز في هذا الفصل على حالات الحمل الحر التي ينتج فيها التدرج بالكثافة عن التدرج الحراري والقوى الداخلية تنتج عن الجاذبية الأرضية، بإهمال قوى التجاذب بين الجزيئات وبفرض حالة استقرار انتقال الحرارة وجريان الحمل الحر. مع العلم أن وجود تدرج بالكثافة ضمن حقل الجاذبية لا يعني بالضرورة وجود تيارات للحمل الحر.

### 1. 3. 2. المعادلات الرياضية الناظمة لانتقال الحرارة بالحمل الحر

تتشكل المعادلات التي تصف انتقال الطاقة والمادة للحمل الحر من قانون انحفاظ الطاقة والمادة. ليكن الجريان الصفائحي للطبقة الحدية والذي تشكله قوة الطفو (الشكل 1−2) وباعتبار أن الحالة مستقرة وثنائية البعد (إهمال الجريان باتجاه $z$) وثبات الخصائص وقوى الجاذبية التي تعمل بالاتجاه السالب لـ$x$. كذلك سنفرض أن السائل غير قابل للانضغاط. حيث تتعلق هذه الفرضية بحساب تأثير الكثافة المتغيرة على قوة الطفو (المسمى تقريب بوسينيك) باعتباره التغير المسبب لحركة السائل. وأخيراً نفترض أن تقريبات الطبقة الحدية سارية المفعول.

من جراء الفرضيات السابقة، وبحسب المعادلات التفاضلية في المرجع *[3]* الذي استنتجت معادلة الكمية بالاتجاه $x$ ومعادلة الطبقة الحدية. فإذا القوة الداخلية الوحيدة هي الجاذبية، تكون القوى الداخلية لواحدة الحجم هي $X = -\rho g$ . حيث $g$ تسارع الجاذبية المحلي. ويكون الشكل المناسب لمعادلة الكمية بالاتجاه $x$:

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} - g + \nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \qquad (8-1)$$

يمكن صياغة المعادلة (1−8) بشكل ملائم أكثر، بملاحظة أنه إن لم تكن هناك قوى داخلية بالاتجاه $y$ فإن $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$ من معادلة الكمية بالاتجاه $y$. بذلك يجب أن يكون تدرج الضغط بالاتجاه $x$ عند أي نقطة في الطبقة الحدية مساوياً لتدرج الضغط في المنطقة الساكنة خارج الطبقة الحدية. مع العلم أنه في هذه المنطقة $u=0$ وتصبح المعادلة (1−8) بالشكل

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_\infty g \qquad (9-1)$$

بتعويض العلاقة (1−9) في (1−8) نحصل على الصيغة التالية:

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{g}{\rho}(\rho_\infty - \rho) + \nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \qquad (10-1)$$

والتي يجب أن تطبق على جميع النقاط في الطبقة الحدية للحمل الحر.

إن الحد الأول في الطرف اليميني للمعادلة (1−10) هو قوة الطفو ويحدث الجريان بسبب تغير $\rho$. ويمكن أن يتجلّى منشأ هذا التغير بتقديم معامل التمدد الحراري الحجمي المساوي إلى:

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_p \qquad (11-1)$$

هذه الخاصة التيرموديناميكية للسائل هي مقياس كمية التغير الحاصل بالكثافة بالنسبة للتغير في درجة الحرارة تحت ضغط ثابت. فإذا تمت صياغتها بالشكل التقريبي التالي:

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho}\frac{\rho_\infty - \rho}{T_\infty - T}$$

هذا يؤدي إلى:

$$(\rho_\infty - \rho) \approx \beta\rho(T - T_\infty)$$

وبالتعويض في المعادلة (1−10) تصبح معادلة الكمية في الاتجاه $x$

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_\infty) + v\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \qquad (12-1)$$

وهنا يظهر ارتباط قوة الطفو المسببة للجريان بالفارق في درجات الحرارة.

وبما أن تأثيرات الطفو محصورة على معادلة الكمية (الحركية) فإن معادلات مصونية الطاقة والكتلة لا تتغير عن تلك للحمل القسري. ويمكن استخدام المعادلات (6.54) و(6.57) من *[3]* لإكمال صياغة النموذج الرياضي. فتصبح مجموعة المعادلات الناظمة لجريان الحمل الحر هي:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \qquad (13-1)$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_\infty) + v\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \qquad (14-1)$$

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \qquad (15-1)$$

يمكن ملاحظة إهمال التبدد اللزوجي (التخامد بسبب اللزوجة) في معادلة الطاقة (1−15) وهو افتراض معقول جداً للسرعات الصغيرة المقترنة بالحمل الحر. رياضياً، إن ظهور حد الطفو في المعادلة (1−14) يعقد الأمور. لأن المعادلات (1−13) و(1−14) مرتبطة بالمعادلة (1−15)، فإن حل المعادلة الكمية يعتمد على معرفة $T$ ومن هنا يكون حل معادلات الطاقة ((1−13) وحتى (1−15)) مرتبطاً ارتباطاً وثيقاً وتحل على التوازي (سويةً).

من الواضح تماماً اعتماد تأثيرات الحمل الحر على عامل التمدد β. وتعتمد طريقة الحصول عليه على السائل. لغاز مثالي $\rho = p/RT$ و

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_p = \frac{1}{\rho}\frac{p}{RT^2} = \frac{1}{T} \qquad (16-1)$$

حيث $T$ درجة الحرارة المطلقة. أما بالنسبة للغازات والسوائل غير المثالية فيجب الحصول على β من جداول الخصائص المناسبة.

### 1. 3. 3. المعادلات اللابعدية (التشابه) لجريان الحمل الحر وانتقال الحرارة

لنضع الآن البارامترات اللا بعدية الناظمة لجريان الحمل الحر وانتقال الحرارة. ويمكن الحصول على هذه البارامترات بتحويل المعادلات الناظمة إلى معادلات لا بعدية.

نعرف $X^* \equiv \frac{x}{L}, Y^* \equiv \frac{y}{L}, u^* \equiv \frac{u}{u_0}, v^* \equiv \frac{v}{u_0}, T^* \equiv \frac{(T-T_\infty)}{(T_s-T_\infty)}$ حيث $L$ سمة الطول و$u_0$ سرعة مرجعية اعتباطية[1]، فتتحول معادلات الكمية بالاتجاه $x$ ومعادلات الطاقة (14 و15) إلى العلاقات التالية:

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = \frac{g\beta(T_s-T_\infty)L}{u_0^2} T^* + \frac{1}{\mathrm{Re}_L} \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \qquad (17-1)$$

$$u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\mathrm{Re}_L \,\mathrm{Pr}} \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \qquad (18-1)$$

إن البارامتر اللا بعدي في الحد الأول من الطرف اليمين للمعادلة (1-17) يمثل قوة الطفو. وبسبب صياغته كتابع لمرجع غير معروف للسرعة $u_0$ فإن شكله الحالي غير ملائم. مما يدعو إلى الحاجة للتعامل مع شكل بديل، لذلك نضرب بـ $\mathrm{Re}_L^2 = (u_0 L/\nu)^2$ فتكون النتيجة عدد غراشوف $Gr_L$.

$$Gr_L \equiv \frac{g\beta(T_s-T_\infty)L}{u_0^2}\left(\frac{u_0 L}{\nu}\right)^2 = \frac{g\beta(T_s-T_\infty)L^3}{\nu^2} \qquad (19-1)$$

يلعب عدد غراشوف بالنسبة للحمل الحر نفس الدور الذي يلعبه عدد رينولز بالنسبة للحمل القسري. لنتذكر أن عدد رينولز هو قياس نسبة القوى الداخلية إلى قوى اللزوجة المؤثرة في السائل. وللتمييز فإن عدد غراشوف يشير إلى نسبة قوى الطفو إلى قوى اللزوجة المؤثرة في السائل.

مع أن المعادلات (17 وحتى 19) توجهنا لتوقُّع علاقات انتقال الحرارة من الشكل $Nu_L = f(\mathrm{Re}_L, Gr_L, \mathrm{Pr})$ فإنه من المهم ملاحظة أن هذه العلاقات تكون مترابطة فقط عند تقارب تأثيرات الحملين القسري والحر. ولمثل هذه الحالات يتراكب جريان خارجي مع الجريان المتشكل من الطفو، ولهذا الجريان سرعة حمل قسري معروفة. عموماً يؤخذ التأثير المشترك للحملين الحر والقسري بالحسبان عند $(Gr_L/\mathrm{Re}_L^2) \approx 1$ فإذا لم تتحقق المساواة وكان $(Gr_L/\mathrm{Re}_L^2) << 1$ فيمكن إهمال تأثيرات الحمل الحر و $Nu_L = f(\mathrm{Re}_L, \mathrm{Pr})$. والعكس بالعكس فعند $(Gr_L/\mathrm{Re}_L^2) >> 1$ فيمكن إهمال تأثيرات الحمل القسري و $Nu_L = f(Gr_L, \mathrm{Pr})$. وللدقة إن الحمل الحر هو الذي ينشأ فقط عن قوى الطفو، وفي هذه الحالة لا توجد سرعة حمل قسري معلومة و $(Gr_L/\mathrm{Re}_L^2) = \infty$.

[1] بما أن التيار الحر ساكن في الحمل الحر، فلا وجود لسرعة خارجية مرجعية (V أو $u_\infty$) كما هو الحال للحمل القسري.

### 1. 3. 4. الحمل الحر الصفائحي على سطح شاقولي

استُحصِل على الحلول العددية لمعادلات الطبقة الحدية الصفائحية للحمل الحر. والحالة المدروسة تضمنت الحمل الحر من سطح إيزوتيرمي شاقولي ضمن وسط ساكن وشامل (الشكل 1−3). تؤخذ الشروط الحدية للمعادلات (1−13) وحتى (1−15) لهذا العنصر الهندسي من الشكل:

$$y = 0 \quad : \quad u = v = 0 \quad T = T_s$$
$$y \to \infty : \quad u \to 0 \qquad T \to T_\infty$$

حصل *Ostrach [10]* على الحل التشابهي للمسألة السابقة. وتضمن الحل تحويل المتغيرات ببارامتر للتشابه من الشكل:

$$\eta \equiv y\left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{1/4} \tag{20−1}$$

وتحويل مركبات السرعة كتابع لمتحول التيار المعرف بـ

$$\psi(x,y) \equiv f(\eta)\left(4v\left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{1/4}\right) \tag{21−1}$$

وللتعريف السابق لمتحول التيار، يتم التعبير عن مركبة السرعة بالاتجاه $x$ بـ

$$u = \frac{\partial\psi}{\partial y} = \frac{\partial\psi}{\partial\eta}\frac{\partial\eta}{\partial y} = 4v\left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{1/4} f`(\eta)\frac{1}{x}\left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{1/4}$$
$$u = \frac{2v}{x}Gr_x^{1/4} f`(\eta) \tag{22−1}$$

حيث تضمنت الكميات الأولية إلى المشتق بالنسبة لـ $\eta$. باعتبار أن $f`(\eta) = \frac{\partial f}{\partial\eta}$.

ويمكن تقدير مركبة السرعة بالاتجاه $y$ ($v = -\frac{\partial\psi}{\partial y}$) بنفس الطريقة. وبتعريف درجة الحرارة اللابعدية

$$T^* = \frac{T - T_\infty}{T_s - T_\infty} \tag{23−1}$$

تصبح المعادلات التفاضلية الجزئية (1−13) وحتى(1− 15) من الشكل

$$f``` + 3ff`` - 2(f`)^2 + T^* = 0 \tag{24−1}$$
$$T^{*``} + 3\Pr f T^{*`} = 0 \tag{25−1}$$

حيث أن $T^*$ و $f$ تابعة فقط لـ $\eta$ والمشتق الثاني والثالث هي بالنسبة لـ $\eta$. لاحظ أن $f$ هو المتحول الأساسي المرتبط لسرعة الطبقة الحدية وأن معادلة الاستمرار (1−13) تحل من خلال تابع التيار.

إن الشروط الحدية لحل المعادلات الكمية والطاقية (24 و25) هي من الشكل:

$$\eta = 0 \quad f = f' = 0 \quad T^* = 1$$
$$\eta \to \infty \quad f' \to 0 \quad T^* \to 0$$

حصل *Ostrach [10]* على حل عددي، والنتائج اللازمة للاستخدام مبينة بالشكل (1–3). فيمكن ملاحظ أنه يمكن قراءة مركبات السرعة بالاتجاه $x$ من المخطط (1–3($a$)) من خلال استخدام المعادلة (1–24). ومن تعريف بارامتر التشابه $\eta$ يمكن استخدام الشكل (1–3) للحصول على قيم $u$ و$T$ لأي قيمة من $x$ و$y$.

كما ويمكن أيضاً استخدام المخطط (1–3($b$)) لاستخلاص الشكل المناسب لعلاقة انتقال الحرارة. باستخدام قانون نيوتن للتبريد يمكن التعبير عن عدد نوسلت المحلي (الموضعي) بالعلاقة التالية:

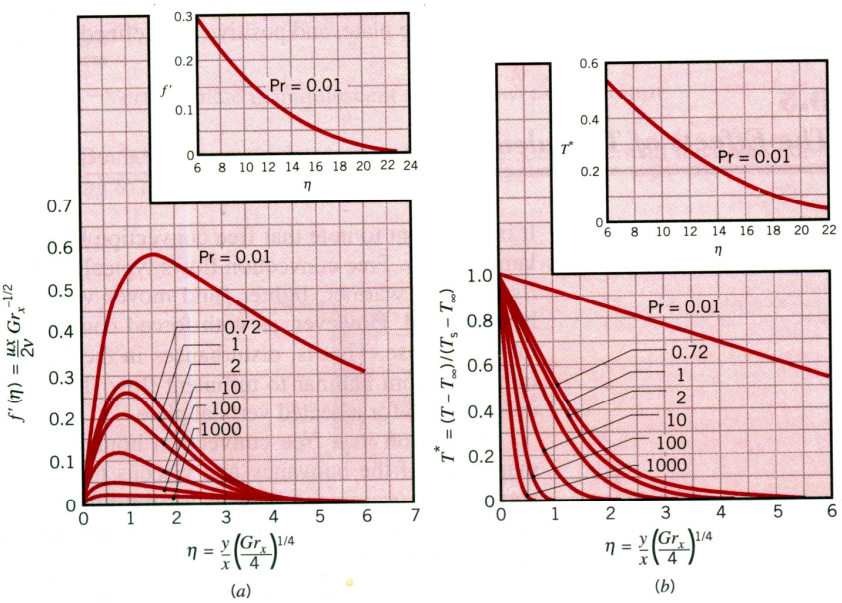
$$Nu_x = \frac{h\,x}{k} = \frac{[q_s'' /(T_s - T_\infty)]x}{k}$$

باستخدام قانون فوريه للحصول على $q_s''$ والتعبير عن تدرج الحرارة للسطح كتابع لـ $\eta$ والمعادلة (1–20) و$T^*$ يؤدي إلى:

$$q_s'' = -k\left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=0} = -\frac{k}{x}(T_s - T_\infty)\left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{1/4}\left.\frac{dT^*}{d\eta}\right|_{\eta=0}$$

وبذلك

$$Nu_x = \frac{h\,x}{k} = -\left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{1/4}\left.\frac{dT^*}{d\eta}\right|_{\eta=0} = \left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{1/4} g(\Pr) \qquad (26\text{–}1)$$




الشكل (1–3) شروط الطبقة الحدية الصفائحية على سطح شاقولي إيزوتيرمي. (a) بروفيلات السرعة (b) بروفيلات درجة الحرارة [10]

ونستدل منها أن تدرج الحرارة على السطح هو تابع لعدد براندل *g(Pr)*. ويتضح هذا الارتباط من الشكل (1−3(*b*)). وتم تحديده عددياً لمجموعة قيم من أعداد براندل*[10]*. كما وتم تقريب النتائج بدقة 0.5% *[11]* بمعادلة من الشكل:

$$g(\mathrm{Pr}) = \frac{0.75\,\mathrm{Pr}^{1/2}}{\left(0.609 + 1.221\,\mathrm{Pr}^{1/2} + 1.238\,\mathrm{Pr}\right)^{1/4}} \qquad (27-1)$$

والتي تطبق على المجال $0 \le Pr \le \infty$.

باستعمال المعادلة (1−26) لحساب عامل الحمل المحلي والتعويض في عدد غراشوف المحلي $Gr_x = \frac{g\,\beta\,(T_s - T_\infty)\,x^3}{\nu^2}$ يكون متوسط عامل انتقال الحرارة بالحمل على السطح بطول $L$ عندها محدداً بالعلاقة التالية:

$$\bar{h} = \frac{1}{L}\int_0^L h\,dx = k\left[\frac{g\,\beta\,(T_s - T_\infty)}{4\nu^2}\right]^{1/4} g(\mathrm{Pr}) \int_0^L \frac{dx}{x^{1/4}}$$

وبإجراء التكامل ينتج

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}\,L}{k} = 4\left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{1/4} g(\mathrm{Pr}) \qquad (28-1)$$

أو بالتعويض من المعادلة 26 بـ $x=L$.

$$\overline{Nu}_L = \frac{4}{3} Nu_L \qquad (29-1)$$

تطبق النتائج السابقة دون التفريق بين $T_s > T_\infty$ أو $T_s < T_\infty$. فإذا كانت $T_s < T_\infty$ تنعكس الحالات عن تلك في الشكل (1−3). بحيث يصبح المبدأ هو الحافة العليا من الصفيحة، واتجاه $x$ الموجب بنفس اتجاه قوة الجاذبية.

### 1. 3. 5. الجريان المضطرب

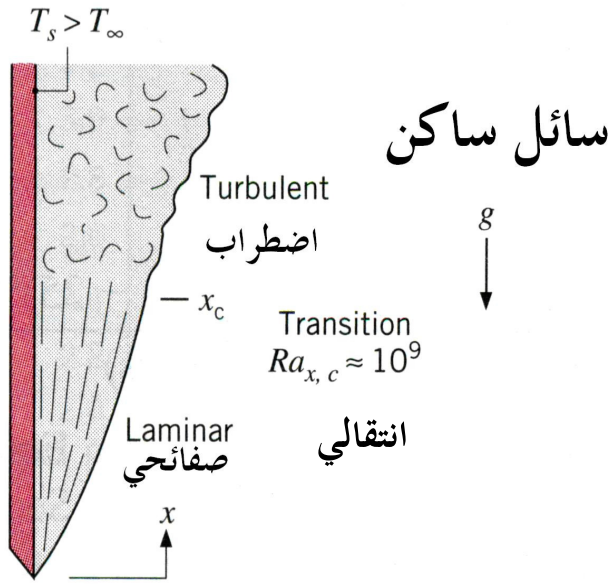
تنشأ جريانات الحمل الحر من عدم الاستقرار الحراري. أي يتحرك السائل الأخف الأسخن شاقولياً للأعلى بالنسبة للسائل الأثقل الأبرد. ويمكن أن ينشأ عدم استقرار هيدروديناميكي. فيزداد عدم انتظام الجريان ناقلاً الجريان من صفائحي إلى مضطرب. هذا الإجراء موضح تخطيطياً بالشكل (1−4) لصفيحة شاقولية مسخنة.

يعتمد الانتقال من الجريان الصفائحي إلى المضطرب في الطبقة الحدية للحمل الحر على الحجم النسبي لقوى الطفو واللزوجة في السائل. ويرتبط حدوث هذا الانتقال بعدد رايلي (ناتج جداء عدد غراشوف بعدد براندل). وعدد رايلي الحرج للصفائح الشاقولية هو

$$Ra_{x,c} = Gr_{x,c}\,\mathrm{Pr} = \frac{g\,\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu\,\alpha} \approx 10^9 \qquad (30-1)$$

قدم *[3]* مناقشة شاملة للاستقرار وتأثيرات الانتقال.

إن لانتقال الجريان من صفائحي إلى مضطرب تأثير قوي على انتقال الحرارة، لذلك تطبق النتائج السابقة فقط على المجال $Ra_L \le 10^9$ وللحصول على النتائج الملائمة للجريان المضطرب *لا بد من التأكيد على النتائج التجريبية*.




الشكل 1–4 الانتقال في الطبقة الحدية للحمل الحر على صفيحة شاقولية

**1. 3. 6. العلاقات التجريبية . جريانات الحمل الحر الخارجي**

تتلخص العلاقات التجريبية التي تم الوصول لها لحالات العناصر المغموسة العامة (جريان خارجي)، (المناسبة لمعظم التطبيقات الهندسية) بالمعادلات التالية:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}.L}{k} = C.Ra_L^n \qquad (31-1)$$

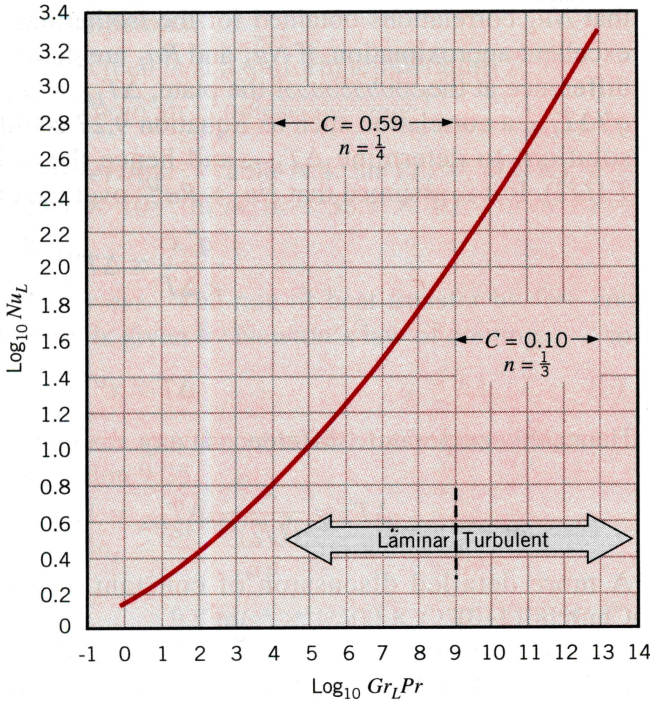
حيث عدد رايلي هو

$$Ra_L = Gr_L\,\mathrm{Pr} = \frac{g\,\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\,\alpha} \qquad (32-1)$$

والذي يعتمد على خاصة الطول للعنصر الهندسي. نموذجياً، $n=1/4,1/3$ للجريانات الصفائحية والمضطربة بالترتيب. (مع ملاحظة أن كل الخصائص تحدد عند درجة حرارة الشريط (الطبقة) $T_f = (T_s + T_\infty)/2$). للجريانات المضطربة تكون $\overline{h}_L$ مستقلة عن $L$.

### 1. 3. 6. 1. الصفيحة الشاقولية

تم الحصول على صيغ موافقة لشكل المعادلة (1−31) للصفيحة الشاقولية *[3-6]*. وهي موضحة بالشكل (1−5). حيث يعتمد العامل $C$ والأس $n$ على مجال عدد رايلي. ولعدد رايلي أقل من $10^4$ يجب الحصول على عدد نوسلت من المخطط.




الشكل (1−5) عدد نوسلت لانتقال الحرارة من صفيحة شاقولية بالحمل الحر *[5-7]*

تم تطوير علاقة يمكن تطبيقها على كامل مجال عدد رايلي والتي أوصى بها *Churchill and Chu* وغيرهم *[3-6]* وهي من الشكل التالي:

$$\overline{Nu}_L = \left[ 0.825 + \frac{0.38 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492/\text{Pr})^{9/16}\right]^{8/27}} \right]^2 \qquad (33-1)$$

إن المعادلة (1−33) مناسبة لمعظم الحسابات الهندسية ويمكن الحصول على دقة أكبر بشكل طفيف للجريان الصفائحي *[3-6]* باستخدام:

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492/\text{Pr})^{9/16}\right]^{4/9}} \qquad Ra_L \le 10^9 \qquad (34-1)$$

ومن المهم إدراك كون النتائج السابقة لصفيحة إيزوتيرمية ($T_s$ ثابتة)، أما إذا كانت حالة سطح ذو تدفق حراري منتظم ($q_s^{``}$ ثابتة) فإن الفارق الحراري $(T_s - T_\infty)$ سيتغير تبعاً لـ $x$ متزايداً من الصفر عند الحافة. بالاعتماد على النتائج *[3-6]*، يمكن اعتماد إجراء تقريبي لتحديد التغير. والتي أظهرت إمكانية استخدام

علاقات $\overline{Nu}_L$ الموجودة للسطح الإيزوتيرمي للحصول على تقريب ممتاز وذلك بحساب $\overline{Nu}_L$ و $Ra_L$ للفارق الحراري عند منتصف الصفيحة $\Delta T_{L/2} = T_s(L/2) - T_\infty$. بهذا ومع $\bar{h} = \frac{q_s^{``}}{\Delta T_{L/2}}$ يمكن استخدام معادلة كـ (1−34) (بالتقريب المتتالي) لتحديد $\Delta T_{L/2}$، ومنها درجة حرارة منتصف السطح $T_s(L/2)$.

وبفرض أن $Nu_x \propto Ra_x^{1/4}$ لكامل الصفيحة، فإن هذا يؤدي إلى $\frac{q_s^{``} x}{k\,\Delta T} \propto \Delta T^{1/4} x^{3/4}$ أو $\Delta T \propto x^{1/5}$، مما يعني أن الفارق الحراري عند أي $x$ هو

$$\Delta T_x \approx \frac{x^{1/5}}{(L/2)^{1/5}} \Delta T_{L/2} = 1.15 \left(\frac{x}{L}\right)^{1/5} \Delta T_{L/2} \qquad (35-1)$$

ولتفصيل أكثر لنتائج التدفق الحراري الثابت راجع *[3-6]*.

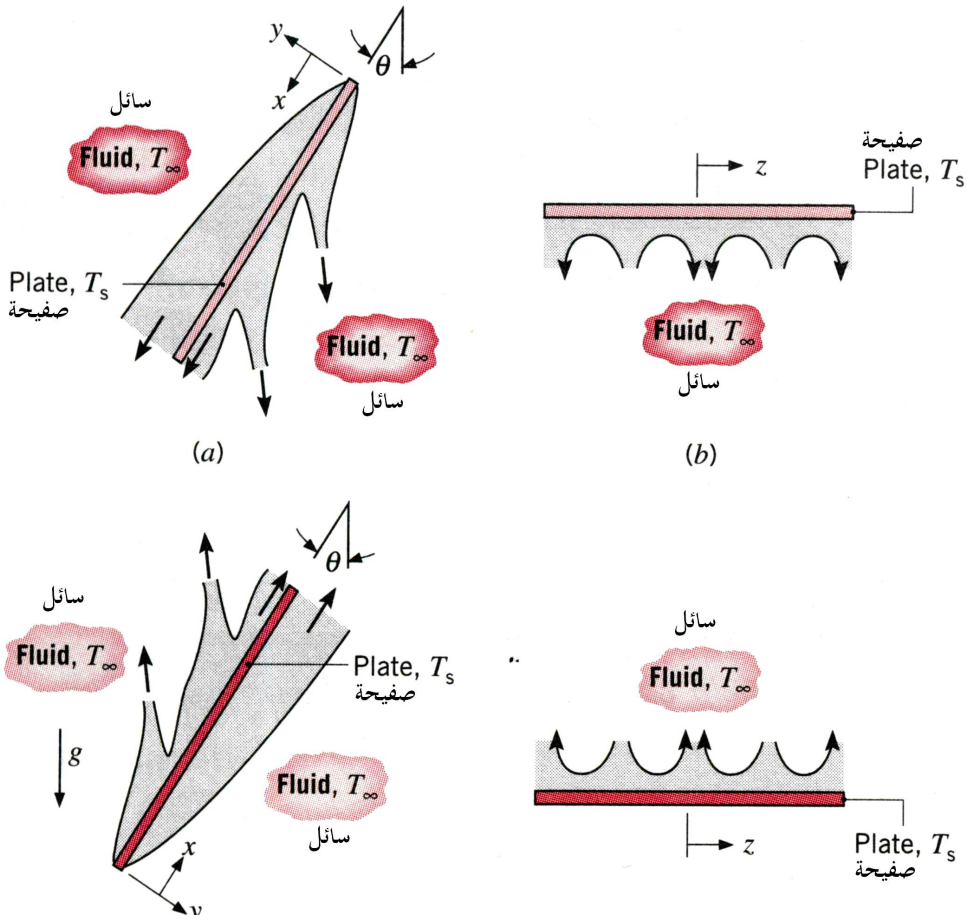
من الممكن أيضاً تطبيق النتائج السابقة على اسطوانة شاقولية بارتفاع $L$ إذا كانت سماكة الطبقة الحدية $\delta$ أقل بكثير من قطر الاسطوانة $D$. وهذه الحالة يمكن أن تطبق عند $\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}}$.

### 1. 3. 6. 2. الصفائح المائلة والأفقية

عملت قوة الطفو لحالة الصفيحة الشاقولية (الساخنة أو الباردة حسب السائل المحيط بها) على تشكيل حركة صاعدة (أو هابطة) للسائل. أما إذا كانت الصفيحة مائلة بالنسبة لقوة الجاذبية تصبح لقوة الطفو مركبتان عامودية وموازية لسطح الصفيحة. وبتناقص قوة الطفو الموازية للسطح تتناقص سرعات السائل على طول الصفيحة.

وكما هو مبين بالشكل (1−6)(*a*) إذا كانت الصفيحة باردة، تعمل مركبة قوة الطفو بالاتجاه $y$ (العامودية على الصفيحة) مع المحافظة على جريان هابط للطبقة الحدية الملامسة للسطح العلوي. وبما أن مركبة $x$ لتسارع الجاذبية الأرضية تتناقص إلى $g\,cos\theta$، وبالتالي تتناقص سرعة جريان السائل على طول الصفيحة ويظهر تناقص انتقال الحرارة بالحمل من السطح العلوي. أما بالنسبة للسطح السفلي، فتعمل المركبة $y$ لقوة الطفو على إزاحة السائل عن السطح وتتم مقاطعة الطبقة الحدية بشحنات مندفعة من السائل البارد على السطح (الشكل (1−6) (*a*)). يكون الجريان الناتج ثلاثي البعد، وكما هو مبين بالشكل (1−6) (*b*) الممثل للتغير بالاتجاه $z$، تستبدل باستمرار شحنات السائل البارد المنطلقة من السطح السفلي بالسائل الأسخن من المحيط. يعمل استبدال سائل الطبقة الحدية البارد بغيره من المحيط الساخن وتناقص سماكة الطبقة الحدية الحرارية على زيادة انتقال الحرارة بالحمل من السطح السفلي. عموماً، إن الزيادة في انتقال الحرارة الناتج عن الجريان ثلاثي البعد أكثر من النقصان الناتج عن تناقص المركبة $x$ لـ $g$.

وبالمحصلة يكون التأثير المشترك هو زيادة في انتقال الحرارة إلى السطح السفلي للصفيحة. في الشكل (1–6) (*c,d*) يقترن الجريان ثلاثي البعد بالسطح العلوي الذي تندفع منه شحنات السائل الأسخن [3–6].

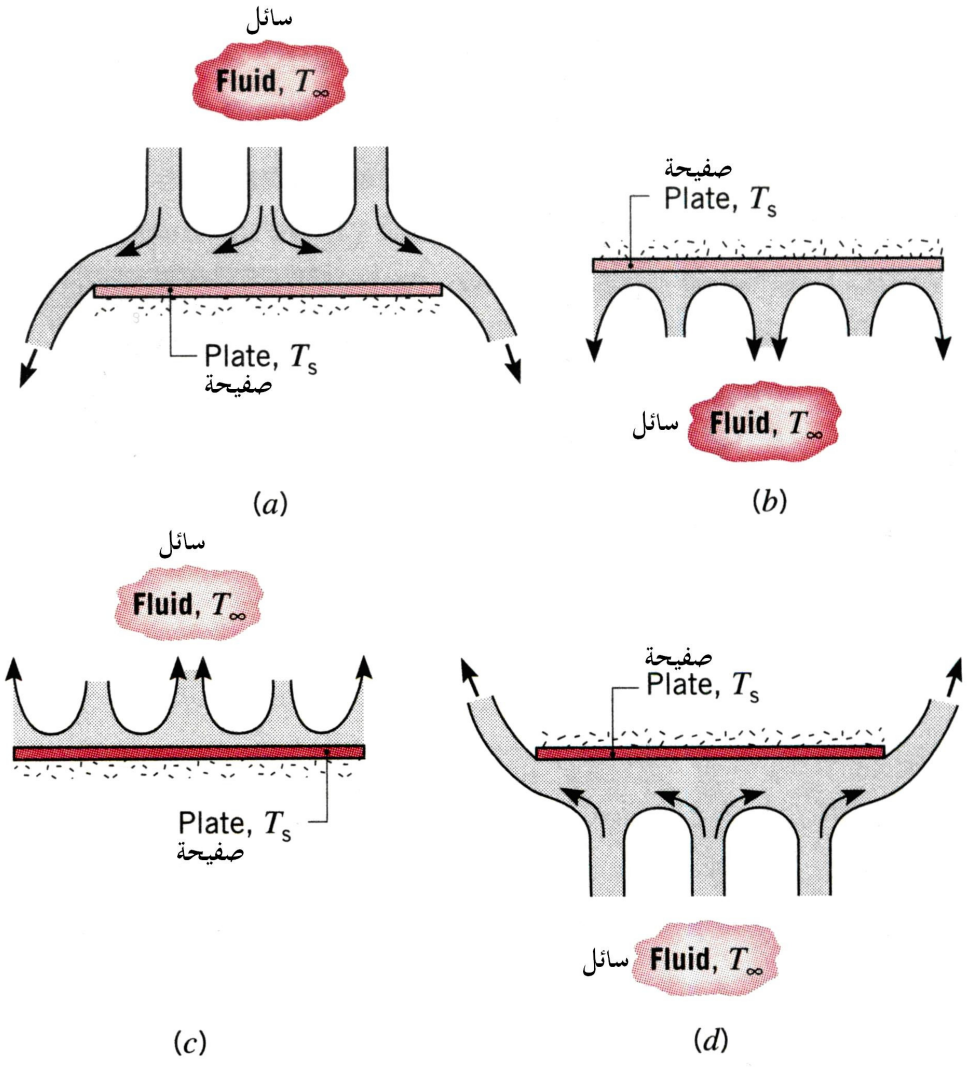



الشكل (1–6) الجريانات الناشئة بالطفو على صفيحة مائلة (*a*) مسقط جانبي للسطحين العلوي والسفلي لصفيحة باردة $T_s < T_\infty$، (*b*) مسقط الجريان عند نهاية السطح السفلي للصفيحة الباردة، (*c*) مسقط جانبي للسطحين العلوي والسفلي لصفيحة ساخنة $T_s > T_\infty$، (*d*) مسقط الجريان عند نهاية السطح السفلي للصفيحة الساخنة

اقترح *Rich [12]* في دراسة لانتقال الحرارة من الصفائح المائلة إمكان تحديد معاملات انتقال الحرارة بالحمل من علاقات الصفيحة الشاقولية باستبدال $g$ بـ $g\cos\theta$ في حساب عدد رايلي للصفيحة. هذا التقريب يصلح فقط للسطوح العلوية والسفلية للصفائح المبردة والمسخنة بالترتيب. وهو غير ملائم للحالة العكسية، وفيها يقيد الجريان ثلاثي البعد قابلية تطوير علاقات عامة، ولذلك من المستحسن استبدال $g$ بـ

$g\cos\theta$ للسطوح العلوية والسفلية للصفائح المبردة والمسخنة بالترتيب ضمن المجال $0 \le \theta \le 60$ واستخدام المعادلة (1–33) أو (1–34) لحساب عدد نوسلت الوسطي. وأما بالنسبة للسطوح المقابلة فلا توصيات لها ومن الممكن الرجوع إلى *[3-6]*.

في الصفيحة الأفقية، تكون قوة الطفو عامودية على السطح. وكما في الصفيحة المائلة تعتمد نماذج الجريان بقوة على كون السطح بارداً أم ساخناً، وكذلك على اتجاه السطح للأعلى أو للأسفل.




الشكل (1–7) الجريان المتشكل من الطفو على صفيحة أفقية باردة $T_s < T_\infty$ وساخنة $T_s > T_\infty$ (*a*) سطح علوي لصفيحة باردة (*b*) سطح سفلي لصفيحة باردة (*c*) سطح علوي لصفيحة ساخنة (*d*) سطح سفلي لصفيحة ساخنة

أما بالنسبة للسطح البارد والاتجاه للأعلى (الشكل (1-7-*a*)) ولسطح ساخن وباتجاه الأسفل (الشكل (1-7-*d*)) تعيق الصفيحة صعود السائل (أو هبوطه)، مما يجبر الجريان للانتقال أفقياً قبل أن يعاود هبوطه أو صعوده عند حواف الصفيحة. وانتقال الحرارة بالحمل غير فعال نوعاً ما. بينما لحالة سطح بارد والاتجاه للأسفل ((1-7) (*b*)) ولسطح ساخن وباتجاه الأعلى ((1-7) (*c*)) يقود الجريان حزم هابطة أو صاعدة من السائل (بالترتيب) وبفعل انحفاظ الكتلة يحل سائل صاعد أسخن من المحيط محل السائل البارد الذي يهبط عن السطح، يحل سائل هابط أبرد من المحيط محل السائل الساخن الذي يصعد عن السطح. وهنا انتقال الحرارة بالحمل فعال بشكل كبير.

مع أن العلاقات السابقة تستخدم بشكل واسع للصفائح الأفقية، فإنه بحسب *[3-6]* يمكن الحصول على دقة أكبر باستبدال خاصة الطول التي تعتمد عليها العلاقات بخاصة الطول المعرفة بالعلاقة التالية:

$$L \equiv \frac{A_s}{P} \qquad (36-1)$$

حيث $A_s$ و$P$ هما مساحة ومحيط الصفيحة بالترتيب، وعلاقات نوسلت الموصى بها هي

. لسطح علوي لصفيحة مسخنة أو سطح سفلي لصفيحة مبردة

$$\overline{Nu}_L = 0.54.Ra_L^{1/4} \quad \left(10^4 \le Ra_L \le 10^7\right) \qquad (37-1)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.15.Ra_L^{1/3} \quad \left(10^7 \le Ra_L \le 10^{11}\right) \qquad (38-1)$$

. لسطح سفلي لصفيحة مسخنة أو سطح علوي لصفيحة مبردة

$$\overline{Nu}_L = 0.27.Ra_L^{1/4} \quad \left(10^5 \le Ra_L \le 10^{10}\right) \qquad (39-1)$$

### 1. 3. 6. 3. الاسطوانة الأفقية الطويلة

أوصى *Churchill and Chu [13]* بعلاقة واحدة لمجال واسع من عدد رايلي

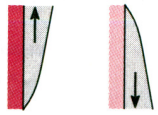
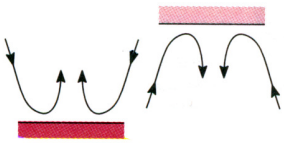
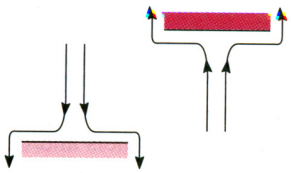
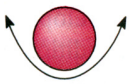
$$\overline{Nu}_D = \left\{0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{\left[1+(0.559/\Pr)^{9/16}\right]^{8/27}}\right\}^2 \quad Ra_L \le 10^{12} \qquad (40-1)$$

### 1. 3. 6. 4. الكرات

أوصى *Incropera [3]* بالعلاقة التالية للكرات في السوائل ذات $\Pr \ge 0.7$ و $Ra_D \le 10^{11}$ :

$$\overline{Nu}_D = 2 + \frac{0.589Ra_D^{1/4}}{\left[1+(0.469/\Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \qquad (41-1)$$

الجدول 1-1 ملخص العلاقات التجريبية للعناصر الهندسية المغموسة-جريانات الحمل الحر الخارجي

| | | |
|---|---|---|
| **1. الصفائح الشاقولية** [2] | | |
|  | المعادلة (1-33) | لا يوجد |
| **2. الصفائح المائلة السطح البارد للأعلى أو الساخن للأسفل** | | |
|  | المعادلة (1-33)<br>$g \rightarrow g\cos\theta$ | $0 \le \theta \le 60^o$ |
| **3. الصفائح الأفقية** | | |
| **أ. السطح الساخن للأعلى أو البارد للأسفل** | | |
|  | المعادلة (1-38)<br>المعادلة (1-38) | $10^4 \le Ra_L \le 10^7$<br>$10^7 \le Ra_L \le 10^{11}$ |
| **ب. السطح البارد للأعلى أو الساخن للأسفل** | | |
|  | المعادلة (1-39) | $10^5 \le Ra_L \le 10^{10}$ |
| **4. اسطوانة أفقية** | | |
|  | المعادلة (1-40) | $Ra_D \le 10^{12}$ |
| **5. الكرات** | | |
|  | المعادلة (1-41) | $Ra_D \le 10^{11}$ و $\Pr \ge 0.7$ |

يلخص الجدول (1-1) العلاقات المحبذ استخدامها لهذا القسم ويمكن بالعودة للمراجعة الشاملة لـ *Churcill [13]* و *Raithby and Hollands [14]* الحصول على نتائج لعناصر مغموسة أخرى، وحالات خاصة غيرها.

## 1. 3. 7. المعادلات المرجعية المستخدمة في طرق حساب معاملات انتقال الحرارة

بينت المعادلات المرجعية كيفية حساب معاملات انتقال الحرارة بالحمل الحر وغيرها. وهي كما يلي:

[2] يمكن تطبيق العلاقة للاسطوانات الشاقولية عند $(D/L) \ge \left(35/Gr_L^{1/4}\right)$

### 1. 3. 7. 1. الانتقال الحراري من السطوح

عند حساب عامل الانتقال الحراري للسطح $h$ كما هي معرفة بـ *ASTM2006-C186*، يفترض أن يكون السطح والسائل المحيط به ذو درجة حرارة منتظمة.

يتضمن انتقال الحرارة امتزاج تأثير الإشعاع والحمل والتوصيل وتعرف بالمعادلة:

$$h = hr + hc \qquad (40-1)$$

حيث $hr$ المركبة الإشعاعية و $hc$ المركبة الحملية والتوصيلية بآن معاً.

**عامل انتقال الحرارة بالإشعاع**

ويحسب من قانون *Stefan-Boltzmann* بقسمة كمية الحرارة المنتقلة على متوسط فرق درجات الحرارة بين السطح والهواء. أي:

$$h_r = \frac{\sigma\epsilon\,(T_s^4 - T_o^4)}{T_s - T_o} \quad \text{or}$$

$$h_r = \sigma\epsilon \cdot (T_s^3 + T_s^2 T_o + T_s T_o^2 + T_o^3) \quad \text{or} \qquad (41-1)$$

$$h_r = \sigma\epsilon \cdot 4T_m^3 \left[1 + \left(\frac{T_s - T_o}{T_s + T_o}\right)^2\right]$$

حيث

$\varepsilon$ [لا بعدي]: البث الحراري الحراري بين السطح الخارجي والجو المحيط به.

$\sigma$ [$W/(m^2 \cdot K^4)$]: ثابت *Stefan-Boltzman* ويساوي إلى $5.66973\ 10^{-8}\ W/(m^2 \cdot K^4)$

$Ts$ [$K$]: درجة الحرارة المطلقة للسطح.

$To$ [$K$]: درجة الحرارة المطلقة للعناصر المحيطة بالسطح.

$Tm = (Ts + To)/2$

**عامل انتقال الحرارة بالحمل:**

لحساب هذه المركبة يجب تحديد شروط معينة، وهي:

. شكل السطح (مستوي، اسطوانة، كرة)

. توجيه السطح (من الشاقولي وحتى الأفقي متضمنة تبعية الجريان)

. طبيعة الجريان الحراري ضمن السائل (الحمل حر أو قسري مع تغير اتجاه و حجم جريان السائل)

. حالة السطح (من سطح ناعم وحتى درجات خشونة متعددة وهي مهمة بشكل أساسي في الحمل القسري)

يتم تقديم العلاقات الحديثة للنقل الحراري من السطوح كتوابع لأعداد لا بعدية تعرف للسوائل ذات التماس مع السطوح الصلبة. وهذه الأعداد هي:

نوسلت

$$\overline{Nu_L} = \frac{\overline{h_c} L}{k_f} \quad \text{or} \quad \overline{Nu_D} = \frac{\overline{h_c} D}{k_f} \tag{42-1}$$

رايلي

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot \rho \cdot c_p (\Delta T) L^3}{\nu \cdot k_f} \quad \text{or} \quad Ra_D = \frac{g \cdot \beta \cdot \rho \cdot c_p (\Delta T) D^3}{\nu \cdot k_f} \tag{43-1}$$

رينولدز

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} \quad \text{or} \quad Re_D = \frac{VD}{\nu} \tag{44-1}$$

برندل

$$Pr = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{k_f} \tag{45-1}$$

حيث:

$L$: مواصفة البعد للسطوح المستوية الشاقولية والأفقية والاسطوانات الشاقولية ($m$) وبالعموم هي ارتفاع السطوح الشاقولية أو طول السطوح الأفقية.

$D$: مواصفة البعد للاسطوانات الأفقية والكرات ($m$) وبالعموم هي القطر.

$Cp$: الحرارة النوعية للسائل المحيط $J/(kg \cdot K)$

$hc$: معدل انتقال الحرارة الحملي $W/(m^2 \cdot K)$

$kf$: انتقال الحرارة للوسط المحيط $W/(m \cdot K)$

$V$: سرعة التيار الحر للوسط المحيط $m/s$

$\upsilon$: اللزوجة الحركية للوسط المحيط $m^2/s$

g: تسارع الجاذبية الأرضية $m/s^2$

$\beta$: عامل التمدد الحجمي الحراري للوسط المحيط $K^{-1}$

$\rho$: كثافة الوسط المحيط $(kg/m^3)$

$\Delta T$: فرق درجات الحرارة المطلقة بين الوسط المحيط والسطح $K$

وهنا يجب ملاحظة (عدا الحمل القسري في الكرات) أن حساب قيم خصائص السائل يتم عند درجة حرارة الطبقة الرقيقة الملاصقة للسطح $T_f$ وهي متوسط درجات الحرارة للسطح والوسط المحيط. ولذلك يتم فرض

أن الوسط المحيط هو هواء جاف معرض للضغط الجوي. ويمكن الحصول على مواصفات الهواء من مراجع عديدة.

عند تعرض السطح لجريان سائل فإن انتقال الحرارة الحملي سيكون مزيجاً من الحمل القسري والحر. وأوصى *Churchill* [15] بالمعادلات التالية، بحيث يتم حساب متوسط عدد نوسلت لكل شكل هندسي بجميع الاتجاهات لحالتي الحمل القسري والحمل الحر من العلاقة:

$$(\overline{Nu} - \delta)^j = (\overline{Nu_f} - \delta)^j + (\overline{Nu_n} - \delta)^j \qquad (46-1)$$

حيث تتبع المركبة $j$ والثابت $\delta$ لنوع وتوجيه السطح. وبعد حساب عدد نوسلت يتم حساب عامل انتقال الحرارة من العلاقة:

$$h_c = \overline{Nu}_L \cdot k_f / L$$
$$\overline{h}_c = \overline{Nu}_D \cdot k_f / D \qquad (47-1)$$

حيث $L$ و$D$ خصائص البعد للنظام. والحد $kf$ عامل انتقال الحرارة للهواء بالتوصيل ويحدد $kf$ عند درجة حرارة الطبقة الملاصقة للسطح باستخدام المعادلات بالجدول (1-2)

.

**عامل انتقال الحرارة بالحمل للسطوح المستوية:**

تعطى علاقة الحمل القسري للجريان الصفائحي على سطوح مستوية ايزتيرمية *Churchill and Ozoe* [17]:

$$\overline{Nu}_{f,L} = \frac{0.6774\, Re_L^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.0468/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \qquad Re_L < 5 \times 10^5 \qquad (48-1)$$

واقترح *Incropera and Dewitt* [3] للحمل القسري لجريان مضطرب فوق سطح مستوي إيزوتيرمي العلاقة التالية:

$$\overline{Nu}_{f,L} = (0.037\, Re_L^{4/5} - 871)\, Pr^{1/3} \qquad 5 \times 10^5 < Re_L < 10^8 \qquad (49-1)$$

يجب ملاحظة أنَّ الحد الأعلى لـ $Re_L$ قيمة تقريبية ويجب الانتباه عند استخدام هذه المعادلة .

كما وتم اقتراح العلاقات التالية للحمل الحر على سطوح شاقولية مستوية من قبل *Churchill and Chu* [19] في:

$$\overline{Nu}_{n,L} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387\, Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \qquad \text{All } Ra_L \qquad (50-1)$$

ولمزيد من الدقة للمجال الصفائحي تم اقتراح العلاقة التالية في نفس المرجع:

$$\overline{Nu}_{n,L} = 0.68 + \frac{0.670\, Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \qquad Ra_L < 10^9 \tag{51-1}$$

ويكون الارتفاع الشاقولي هو خاصة البعد لحالة السطوح الشاقولية. ومن المهم ملاحظة أنه يمكن تطبيق علاقات الحمل الحر على الاسطوانات الشاقولية في معظم الحالات.

كما ووضع *Incropera and Dewitt* [3] لحالة الحمل الحر للسطوح الأفقية المستوية العلاقات التالية:

. جريان حراري للأعلى

$$\overline{Nu}_{n,L} = 0.54\, Ra_L^{1/4} \qquad 10^4 < Ra_L < 10^7$$
$$\overline{Nu}_{n,L} = 0.15\, Ra_L^{1/3} \qquad 10^7 < Ra_L < 10^{11} \tag{52-1}$$

. جريان حراري للأسفل

$$\overline{Nu}_{n,L} = 0.27\, Ra_L^{1/4} \qquad 10^5 < Ra_L < 10^{10} \tag{53-1}$$

تكون خاصة البعد في حالة السطوح الأفقية المستوية حاصل قسمة مساحة السطح على محيطه.

**عامل انتقال الحرارة للاسطوانات الأفقية:**

وضع *Incropera and Dewitt* [3] العلاقة التالية لحالة الحمل القسري لسائل يجري عامودياً على اسطوانة دائرية:

$$\overline{Nu}_{f,D} = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2}\, Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282\,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \tag{54-1}$$
$$\text{All } Re_D \cdot Pr > 0.2$$

وتستخدم هذه العلاقة للحمل القسري من الأنابيب الشاقولية أيضاً.

وضع *Incropera and Dewitt* [3-4] معادلة لحالتي جريان الحمل الحر الصفائحي والمضطرب على اسطوانة أفقية [3-4] وهذه المعادلة هي:

$$\overline{Nu}_{n,D} = \left\{0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2 \qquad Ra_D < 10^{12} \tag{55-1}$$

**عامل انتقال الحرارة للكرات:**

وضع *Incropera and Dewitt* [3-4] معادلات الحمل القسري على الكرات كالتالي:

$$\overline{Nu}_{f,D} = 2 + (0.4\, Re_D^{1/2} + 0.06\, Re_D^{2/3})\, Pr^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{1/4}$$
$$0.71 < Pr < 380$$
$$3.5 < Re_D < 7.6 \times 10^4 \tag{56-1}$$
$$1.0 < (\mu/\mu_s) < 3.2$$

حيث $\mu$ و$\mu_s$ هي لزوجتي التيار الحر والتيار الملاصق السطح على التوالي. ومن المهم جداً ملاحظة أن تقدير جميع المواصفات يجب أن يتم بالاعتماد على درجة حرارة التيار الحر للوسط المحيط عدا $\mu_s$ والتي يجب أن تقدر عند درجة حرارة السطح.

وضع *Incropera and Dewitt* [3–4] معادلات الحمل الحر على الكرات كالتالي:

$$\overline{Nu}_{n,D} = 2 + \frac{0.589\, Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.469 / Pr)^{9/16}]^{4/9}} \qquad (57-1)$$

$$0.7 \leq Pr$$

$$Ra_D < 10^{11}$$

حيث تحسب جميع المواصفات عند درجة حرارة الطبقة الملاصقة للسطح.

الجدول (1–2) المعادلات المستخدمة لحساب خصائص الهواء [4]

| الخاصة | المعادلة | الواحدة |
|---|---|---|
| Thermal Conductivity, $k_a$ | $\frac{6.325 \times 10^{-4} \cdot \sqrt{T_k}}{[1 + (245.4 \cdot 10^{-12/T_k}) / T_k]} \cdot 241.77$ | Btu/(hr·ft·°F) |
| Dynamic Viscosity, μ | $\mu = \frac{145.8 \cdot T_k \cdot \sqrt{T_k}}{T_k + 110.4} \cdot 241.9 \times 10^{-7}$ | lb/(h·ft) |
| Prandtl Number, $Pr$ | $Pr = 0.7189 - T_f \cdot [1.6349 \times 10^{-4} - T_f \cdot (1.8106 \times 10^{-7} - 5.6617 \times 10^{-11} \cdot T_f)]$ | |
| Volumetric Expansion Coefficient, β | $\beta = \frac{1}{1.8 \cdot T_k}$ | °R$^{-1}$ |
| Density, ρ | $\rho = \frac{22.0493}{T_k}$ | lb/ft$^3$ |
| Kinematic Viscosity, $\nu$ | $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ | ft$^2$/h |
| Specific Heat, $c_p$ | $c_p = 0.24008 - T_f \cdot [1.2477 \times 10^{-6} - T_f \cdot (4.0489 \times 10^{-8} - 1.6088 \times 10^{-11} \cdot T_f)]$ | Btu/(lb·ft) |

# الفصل الثاني

# الطرق التجريبية في قياس انتقال الحرارة

**مقدمة**

إن القياس من المواضيع ذات الأهمية الكبيرة في الهندسة والعلوم. تعتمد عليها العديد من الأعمال كتحديد قيم خصائص عنصر أو تصنيف مواد جديدة أو تقدير أداء التجهيزات الجديدة أو الموجودة أو المراقبة والتحكم بأجهزة وإجراءات موجودة.

كذلك فإن القياس من أهم العناصر المكونة للتجربة. وهو غير مطلق ولا يعرف الكمية المقاسة، بل هو جهد نسبي ويتم للمقارنة والتقدير. فالمقارنة تحتاج إلى قياس ووحدات قياسية.

إن العناصر الأساسية في القياس هي: الحساسية والمعايرة والوثوقية وقابلية القراءة. وسوف نستعرض تعريفها ثم ننتقل لمناقشة العناصر الإحصائية مثل المتوسط والانحراف والتوزع الطبيعي والمتعلقة بالدقة واتجاه الخطأ والشك بالقياس ثم ننتقل لمناقشة مختصرة لأدوات قياس درجة الحرارة والتدفق الحراري.

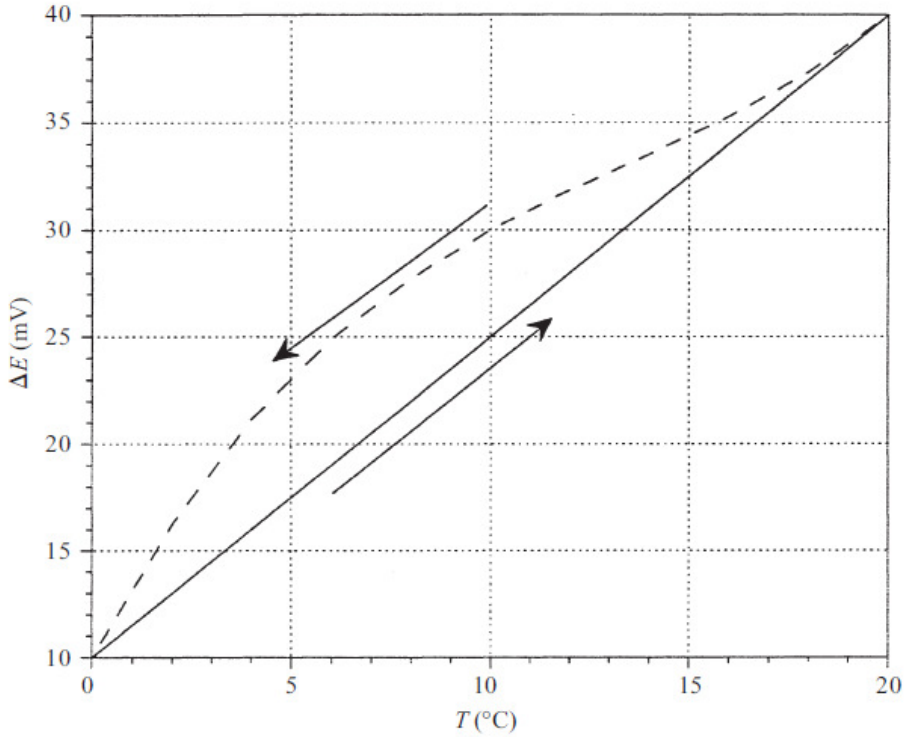
## 2. 1. التحسس

إن للحساسات الممكن استخدامها في القياس نوعان هما الحساسات التلامسية وغير التلامسية. من محاسن الحساسات التلامسية متانتها واقتصاديتها ودقتها النسبية وسهولة استخدامها. ومن مساوئها قابلية عناصرها للتفكك (مثل الوصلات في المزدوجات الحرارية) وضرورة تأمين تلامس فيزيائي مع العنصر المراد قياسه، مما يغير من خصائص العنصر المراد قياسه في بعض الأحيان، والمشكلة الأهم من ذلك أن وصلات الحساس التلامسي تعمل كجسر حراري لتوصيل الحرارة بين الحيز غير المراد قياسه والحيز المقاس. يمكن أن يغير هذا الجسر الحراري موصفات العنصر المقاس.

إن معظم أجهزة القياس لا تقيس الكمية المراد قياسها مباشرة. فمثلاً في المزدوجات الحرارية يتم قياس الجهد على طرفي دارة مفتوحة. هذا الجهد ينبع من التأثير الكهربائي لدرجة الحرارة على الجهد الكهربائي على طول سلكين مختلفي المادة متصلين ببعضهما. بعد قراءة الجهد تتم ترجمة فرق الكمون على طرفي السلكين إلى درجة حرارة. كذلك الحال في مقاييس درجة الحرارة الزئبقية. فالقياس لتمدد الزئبق الناتج عن درجة الحرارة.

إن حساسية جهاز القياس من العناصر الهامة في القياس. والحساسية هي العلاقة بين السبب والنتيجة. فللمزدوجات الحرارية مثلاً حساسية مقدرة بـ $mV/°C$ ناتجة عن كون أن قياس الازدياد في درجة الحرارة بحد ذاته هو تغير في الجهد على طرفي المزدوجة.

ويمكن ألاّ تكون الحساسية منتظمة على كامل مجال القياس، ولمثل هذه الحالات فإن ترجمة القيمة المقاسة إلى القيمة المراد قياسها لا تكون خطية. علاوة على ذلك، يمكن أن تتعلق حساسية الأداة على اتجاه تغير الكمية المقاسة.




الشكل (2–1) يبين تغير الجهد على طرفي مزدوجة حرارية عند القياس بالاتجاه المتزايد (الخط المستمر) وبالاتجاه المتناقص (المنقط).

## 2. 2. المعايرة

يجب معايرة جميع أجهزة القياس لتحديد دقتها. فهذه الدقة تحدد قدرة الجهاز على قياس قيمة مرجعية معلومة. تحدد القيم المرجعية وحدات القياس وهي ضرورية لبناء تدريجات القياس. إن القيم المرجعية لقياس درجة الحرارة والتدفق الحراري موجودة في المعهد الوطني للتقانة والقيم المرجعية *(NIST)*.

إن المقياس العالمي لدرجات الحرارة *(ITS-90)* معرف بعدة نقاط ذات درجات حرارة ثابتة مبينة بالجدول (2–1). هذه التدريجات (المقياس) كانت من عمل اللورد كلفن. والذي اعتمد درجة الحرارة المطلقة لقياس

درجات الحرارة بمقياس كلفن في العام 1884. إن مقياس كلفن لدرجات الحرارة هو مطلق والسبب أن المقياس يغطي كامل مجال درجات الحرارة المحتملة المثبتة بقانون التيرموديناميك الثاني.

وعند معايرة مقياس للحرارة، تقارن درجات الحرارة المقاسة مع قيم درجات الحرارة للحالة المحددة في *ITS-90* والموافقة لها تباعاً. وعند ثبات الدقة على طول مجال القياس تعاير الأداة بكل بساطة بإزاحة نقطة الصفر للمقياس بحيث تتطابق القيم المقاسة الجديدة مع القيم المرجعية.

الجدول (2–1) المقياس العالمي لدرجات الحرارة *(ITS-90)*

| الحالة | $T$ (K) |
|---|---|
| **equilibrium state of hydrogen** | 13.8033 |
| **Triple equilibrium state of neon** | 24.5561 |
| **Triple equilibrium state of oxygen** | 54.3584 |
| **Triple equilibrium state of argon** | 83.8058 |
| **Triple equilibrium state of water** | 273.16 |
| **Solid–liquid equilibrium of galium at 1 atm** | 302.9146 |
| **Solid–liquid equilibrium of tin at 1 atm** | 505.078 |
| **Solid–liquid equilibrium of zinc at 1 atm** | 692.677 |
| **Solid–liquid equilibrium of silver at 1 atm** | 1234.93 |
| **Solid–liquid equilibrium of gold at 1 atm** | 1337.33 |
| **Solid–liquid equilibrium of copper at 1 atm** | 1357.77 |

**المصدر.Holman (2001)**

غالباً ما تكون القيم المرجعية ذات معنى فيزيائي للقيم المقاسة بهذا المقياس. كذلك الأمر بالنسبة لمقياس كلفن. طبعاً هناك مقاييس أخرى شائعة وهي السلزيوس والفهرنهايت. وهذه المقاييس تعطي قيماً سالبة مقاسة. مع ملاحظة أن تدريجات المقياس سيلزيوس تساوي تدريجات المقياس كلفن، بمعنى حساسية المقياس المعاير على تدريجات سيلزيوس تساوي حساسية المقياس المعاير على تدريجات كلفن. أي أن تغير الفولت الناتج عن تغير درجة مئوية واحدة لسيلزيوس يساوي نفس التغير بالفولت الناتج عن تغير درجة كلفن واحدة. هناك أيضاً مقياس رانكين المطلق والذي يظهر نفس حساسية تدريجات فهرنهايت.

## 2. 3. القراءة

تستند تدريجات المقياس إلى قيم قياسية تم اختيارها لتمثل القياس في دول معينة. فمن الممكن تقسيم المسافة بين القيم القياسية بمسافات متساوية على طول قراءات الجهاز للحصول على تقدير أفضل لقياسات حالة تختلف عن الحالة القياسية. إن قراءة الأداة هي عدد التقسيمات الممكن قراءتها على الأداة. مثلاً: إذا بني مقياس للحرارة يتوافق مع مقياس كلفن مع 50 مسافة متساوية بين النقطة الثلاثية لتوازن الأكسجين (54.3584 كلفن) والنقطة الثلاثية لتوازن الماء (273.16 كلفن) تكون كل مسافة (تدريجة) من هذا المقياس مساوية إلى $Lc = (273.16\ K - 54.3584\ K)/50 = 4.3726\ K$ وهي ما يدعى القيمة

الصغرى. إذا قسمت المسافة إلى 150 جزءاً بدلاً من الـ50 فتكون القيمة الصغرى عندها مساوية لـ $Lc = 1.4587\ K$.

تحدد قراءة الجهاز (القيمة الصغرى) مدى قرب القيمة المقروءة بالجهاز من القيمة الفعلية. فعلى سبيل المثال، في محاولة لقراءة درجة حرارة النقطة الثلاثية لتوازن الأرغون $(83.8058\ K)$ باستخدام جهاز معاير على النقطة الثلاثية لتوازن الأكسجين $(54.3584\ K)$ وقيمة صغرى مقدارها $4.3726\ K$ سيشير المقياس إلى القيمة المرادة بين التدريجتين السادسة $(80.594\ K)$ والسابعة $(84.967\ K)$ على المقياس.

ولهذه الحالة، تكون القيمة المقاسة بالاعتماد على متوسط القيمتين المجاورتين ونصف القيمة الصغرى هو $T = \{[(80.594\ K + 84.976\ K)/2] \pm (4.3726\ K/2)\}$. وتغطي القيمة الناتجة، وهي $T = 82.785 \pm 2.186\ K$، كامل المجال بين $80.594\ K$ و $84.976\ K$. بينما عند استخدام نفس مقياس الحرارة السابق ولكن مع قيمة صغرى تساوي إلى $1.4587\ K$، تكون نفس قيمة القياس السابقة بين التدريجتين العشرين $(83.532\ K)$ والحادية والعشرين $(84.991\ K)$، وتكون القيمة المحددة ضمن المجال $1.4587\ K$ ولهذه الحالة هي $T = 84.261 \pm 0.73\ K$. وبالنتيجة هذه القيمة أقرب إلى القيمة $83.8058\ K$ من قيمة مقياس الحرارة الذي يعتمد قيمة صغرى $4.3726\ K$.

يمكن دائماً فحص الخطأ في قراءة الجهاز بقياس قيمة مرجعية معينة ومقارنتها بالقيمة القياسية. وفي كل الحالات فإن القيم المرجعية وضعت عند بعض الحالات المتباعدة. فإذا كانت القيمة المرجو قياسها لا توافق اياً من تلك الحالات المرجعية، فلا يمكن للقائم على التجربة التأكد من دقة القياس حتى ولو كان الجهاز معايراً.

## 2. 4. أخطاء القياس

### 2. 4. 1. عدم الدقة (الانحياز وأخطاء الدقة)

للمثال السابق، لم يكن من الممكن تحديد الخطأ بين القيمة الحقيقية والقيمة المقاسة، بسبب عدم كون القيمة المقاسة قيمة مرجعية (قياسية). لكن الخطأ لا يتجاوز حد نصف القيمة الصغرى للجهاز. ويمكن ملاحظة أن هذا الخطأ مستقل عن عدد مرات القياس أو بشكل مكافئ، مستقل عن حجم العينة. يسمى هذا الخطأ (والمرتبط بالقيمة الصغرى) بخطأ النظام المؤدي إلى خطأ الانحياز $B$ للجهاز. ويبقى هذا الخطأ ثابتاً عند بقاء الجهاز في ظل نفس الظروف البيئية (مثلا لا نغير القيمة الصغرى للجهاز). ولا يتضمن خطأ الانحياز جميع الأخطاء الموجودة والتي لم تحذف (مثل الدقة والخطية والتباطؤ).

إن خطأ الانحياز أحد مركبات الخطأ الكلي في القياس والمدعو عدم الدقة في القياس $U$. وتتأثر عدم الدقة للجهاز بالإضافة إلى الانحياز بخطأ الدقة $\sigma_p$ للأداة. عموماً يمكن الحصول على عدم دقة جهاز من خطأ الانحياز وخطأ الدقة *[9]* كالتالي:

$$U = \left(B^2 + \sigma_P^2\right)^{1/2} \qquad (1-2)$$

حيث $\sigma_P$ لجهاز هو مقدار تكرار القياس.

تتأثر معظم الأجهزة وبخاصة الحقلية بعوامل لا يمكن السيطرة عليها كدرجة حرارة ورطوبة وضغط الجو المحيط. وحتى عند محاولة معايرة الجهاز لقياس قيمة قياسية محددة فإن استجابة الجهاز لن تكون نفسها إذا كرر القياس عدة مرات. وهذا التناقض في القيمة يعطي مقدار خطأ الدقة للجهاز.

يمكن حساب الخطأ بالدقة لجهاز بإجراء قياسات متعددة لنفس الحالة (وليس من الضروري أن تكون حالة قياسية من المذكورة سابقاً في الجدول (1-2)). وبذلك لا يمكن الحصول على خطأ الدقة بقراءة واحدة. ولنتذكر دائماً أن خطأ الدقة والدقة هما عنصران مختلفان تماماً، فالدقة هي خطأ قابل للتحديد ويمكن حذفه بمعايرة الجهاز فهو يؤثر بخطأ الانحياز. بينما خطأ الدقة للجهاز هو عنصر متعلق بالجهاز بحد ذاته وغالباً ما يتأثر بالبيئة. ولا يمكن حذف هذا الخطأ إلا بإعادة بناء الجهاز [يمكن ملاحظة أنه حتى عند استخدام الجهاز ضمن نفس البيئة المحكومة (من حيث درجة الحرارة والرطوبة والضغط....) فإن اهتلاك الجهاز مع الزمن سيؤثر على خطأ الدقة]. وخطأ الدقة خطأ عشوائي بالنسبة لعدم دقة قياس. ومع أن التنبؤ بخطأ دقة جهاز صعب، فإنه يمكن تقديره بثقة إحصائياً.

أخيراً، لا بد من الإشارة إلى أن خطأ القراءة المؤثر بالانحياز (بسبب القيمة الصغرى) يؤثر أيضاً بخطأ الدقة للجهاز (بسبب إمكانية تغيير القيمة الصغرى). فمثلاً عند تغير الظروف البيئية تتغير القيمة الصغرى للجهاز بسبب التمدد أو التقلص، وهذا ما يؤدي خطأ عشوائي لا يمكن تحديده، لهذا يضاف خطأ القراءة هذا إلى خطأ دقة الجهاز.

## 2. 4. 2. المتوسط والانحراف

عند القيام بقياس $Ti$ بعدد من المرات مقداره $n$ تكون القيمة المقابلة للمتوسط الحسابي لـ$T$ لهذه القيم هي:

$$\overline{T} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_i \qquad (2-2)$$

ويعرف الانحراف $di$ عن القيمة المتوسطة $Ti$ بـ:

$$d_i = T_i - \overline{T} \qquad (3-2)$$

ويمكن استخدام الانحراف العام $\sigma$ لمعرفة انتشار القيم المقاسة حوالي القيمة الوسطية

$$\sigma = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T_i - \bar{T})^2\right]^{1/2} \qquad (4-2)$$

هذا الانحراف العام هو ما يمثل خطأ دقة الجهاز $\sigma p$ عندما يكون عدد القياسات أكبر أو مساوٍ لـ 20، وإلاّ فيجب أن يضرب بالمقدار $[n/(n-1)]^{1/2}$.

ويمكن تحديد الانحراف العام عن القيمة المتوسطة من

$$\sigma_{\bar{T}} = \frac{\sigma}{n^{1/2}} \qquad (5-2)$$

عندما تكون عدد مرات القياس أكثر من 10.

والانحراف العام لمجموعة من القياسات مؤشر مهم لتمثيل احتمال وقوع قياس معين ضمن مجال معين. ومع أن هذا الخطأ شبيه بخطأ القراءة سابق الذكر، فهو مختلف عنه. فلا ننسى أن لكل قياس خطأ معين للقراءة مرتبط به، وهذا الخطأ فهو متناسب مع القيمة الصغرى لجهاز القياس. إن خطأ دقة الجهاز أو القياس هو عدم تأكيد (دقة) إضافي بسبب ارتباطه بسلسلة من القياسات المأخوذة لنفس الحالة أو الكمية.

## 2. 4. 3. توزع الخطأ

عند القيام بقياسات عديدة لكمية $T$ تتأثر جميعها بخطأ عشوائي صغير موجب أو سالب. واحتمال ($\Gamma_G(T)$) وقوع أحد تلك القياسات ضمن المجال $T$ و$T+dT$ يعطى بالتوزع العشوائي أو توزع غاوس للخطأ.

$$\Gamma_G(T) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} e^{-(T-\bar{T})^2/2\sigma^2} \qquad (6-2)$$

يمثل الشكل (2-2) نتائج التوزع الغاوسي (الطبيعي) لبعض قياسات درجة الحرارة المنمذجة

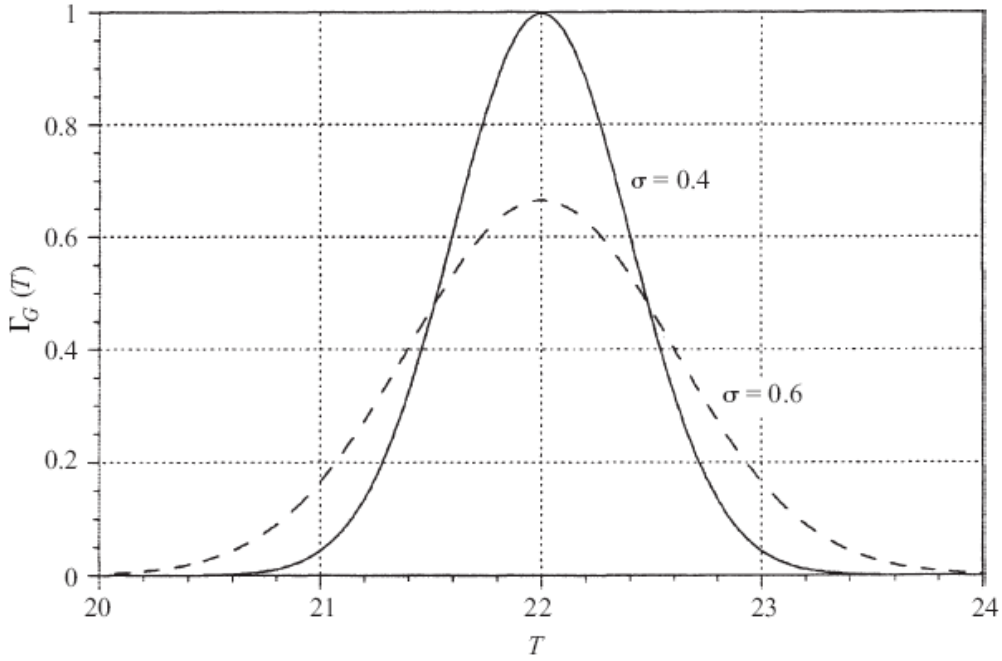
$\int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_G(T)dT = 1$

وكما هو متوقع فإن القياس الأكثر احتمالاً هو الاحتمال المطابق للقيمة الوسطية $T$. كذلك بزيادة الانحراف العام فإن انتشار القيم المقاسة يزداد معه. وبذلك فإن احتمال وقوع أحد القياسات بعيداً عن $T$ يزداد بزيادة $\sigma$ كما هو متوقع من $\Gamma_G(T)$.

يمكن ملاحظة أن احتمال وقوع القيمة المقاسة بالقرب من القيمة المتوسطة يساوي إلى $1/[\sigma(2\pi)^{1/2}]$.

وللحالة الممثلة بالشكل (2-2) فإن الاحتمال $\Gamma_G(T)=0.997$ عند $\sigma=0.4$ و $\Gamma_G(T)=0.665$ عند $\sigma=0.6$

وكما هو مثبت فإن $\Gamma_G(T)$ ستكون أكبر من الواحد عند نقصان $\sigma$ عن $(2\pi)^{-1/2}$ والذي يكافئ $\sigma<0.399$. كذلك إن القيمة $\Gamma_G(T)$ هي مقياس لقيمة خطأ دقة الجهاز.




الشكل (2–2) نتائج التوزع الغاوسي (الطبيعي) لبعض قياسات درجة الحرارة المنمذجة $\int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_G(T)\,dT = 1$ *[9].*

إن القيمة العملية والمفيدة جداً هي احتمال وقوع قياس محدد ضمن مجال (انحراف) محدد $\Delta T$ من القيمة الوسطية $\overline{T}$. واحتمال الانحراف هذا هو

$$\Gamma_d(\Delta\xi) = \left[\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2}\right]\int_0^{\Delta\xi} e^{-\xi^2/2}\,d\xi \qquad (7-2)$$

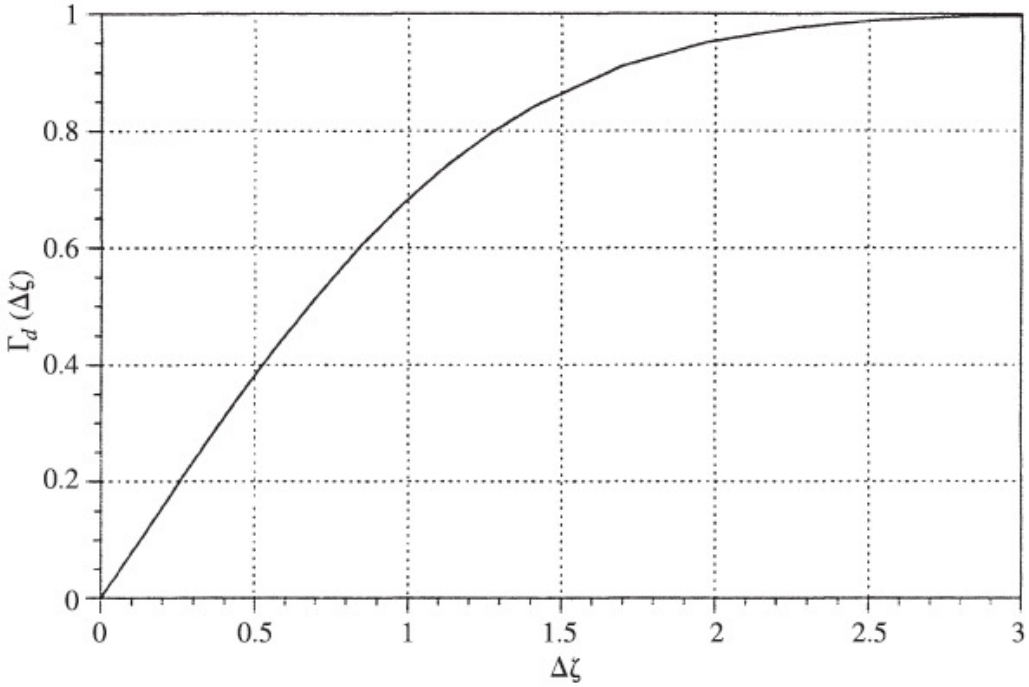
حيث $\xi = (T-\overline{T})/\sigma$ و $\Delta\xi = \Delta T/\sigma$. وكما هو واضح يمكن كتابة معادلة $\Gamma_d(\Delta\xi)$ بصيغة تابع الخطأ

$$\Gamma_d(\Delta\xi) = erf\left(\frac{\Delta\xi}{2^{1/2}}\right) \qquad (8-2)$$

حيث

$$erf(x) = \frac{2}{\pi^{1/2}}\int_0^x e^{-m}\,dm \quad \text{و} \quad m = \xi^2/2$$

وتمثل النتائج من المعادلة (2−8) بالشكل (2−3). عملياً ليس من الضروري عند محاولة إيجاد احتمال وقوع قياس ضمن مجال $\Delta T$ من القيمة الوسطى إلاّ حساب $\Delta\xi = \Delta T/\sigma$ وإيجاد قيمة $\Gamma_d(\Delta\xi)$ المقابلة لها من الشكل (2−3)




الشكل (2−3) تمثيل المعادلة (2−8) بيانياً تغير $\Gamma_d(\Delta\xi)$ كتابع لـ $\Delta\xi$

لنفرض مثلاً أنه نتج عن سلسلة من قياسات درجة الحرارة انحراف معياري مقداره 0.4. تكون عندها احتمال وقوع القياس ضمن المجال $\Delta T=0.4$ (وحدة قياس) من القيمة الوسطى هو 0.68. وهذه هي قيمة $\Gamma_d(\Delta\xi)$ المقروءة من الشكل (2−3)عند $\Delta\xi = \Delta T/\sigma = 1$. من الجدير بالملاحظة أن احتمال وقوع قياس ضمن $3\sigma$ وحدة (أو أكثر) من القيمة الوسطى هو بالتحديد $\Gamma_d(3) = 0.997$ أو بالتقريب يساوي الواحد. مع العلم أن هذه القيم صحيحة لتوزع غاوسي للقياسات المأخوذة، والتي عادة ما تكون صحيحة عند أخذ العديد من القياسات لنفس الكمية.

شيء آخر مهم يرتبط بـ $\Gamma_d(\Delta\xi)$ ، فإذا كان بالإمكان استنتاج أن احتمال وقوع قياس ضمن مجال $\Delta T$ معرف بـ $\Gamma_d(\Delta\xi/\sigma)$ من القيمة الوسطى لسلسلة قياسات، يمكن القول أن نفس هذا الاحتمال يمكن أن يكون لوقوع القيمة الوسطى ضمن نفس المجال. يدعى الاحتمال $\Gamma_d(\Delta\xi)$ عند ارتباطه القيمة الوسطى بمستوى الوثوقية ويدعى كذلك $(\Delta\xi)$ بمجال الوثوقية.

وفقاً للتقييم السابق فإن لتمثيل القيمة الوسطى (باستخدام مجال وثوقية واحدي) مستوى وثوقية مقداره 68% عند توزع غاوسي لاحتمال القياسات. ويمكن حساب عدد القياسات اللازمة لتحقيق مستوى وثوقية معين من العلاقة

$$n = \left( \frac{\sigma_P \, \Delta\xi}{\sigma} \right)^2 \qquad (9-2)$$

للمثال: لنفرض قياس درجات حرارة لجهاز بدقة $\sigma_P = \pm 0.4\ ^oC$. فإذا كان من المهم تحقيق مجال وثوقية $\Delta\xi = \Delta T / \sigma = 2$ (والمقابل لمستوى وثوقية مقداره 95.4% من الشكل (2−3)) لانحراف معياري مقداره $\pm 0.2\ ^oC$. يلزمنا 16 قراءة على الأقل.

## 2. 4. 3. أخطاء الحساب

بمجرد تحديد عدم دقة كمية مقاسة، تصبح المشكلة بحساب كمية معينة من هذا القياس. ويكون السؤال ما مدى تأثير عدم دقة الكمية المقاسة على عدم دقة الكمية المحسوبة. تصبح الإجابة على هذا السؤال صعبة عند اشتراك عدد من الكميات المقاسة في الحساب. إن الإجراء العام المتبع في تقدير عدم دقة الكمية المحسوبة في هذه الحالة يعتمد على طريقة *Kline- McClintock (1953)* المبينة في *[9]*.

عند حساب كمية معينة $Q$ من عدد $n$ من الكميات $T$ المقاسة ولكل قيمة مقاسة عدم دقة مقداره $\pm U$، يمكن تقدير عدم دقة الكمية المحسوبة $U_Q$ المقابلة من العلاقة:

$$U_Q = \left[ \left( U_1 \frac{\partial Q}{\partial T_1} \right)^2 + \left( U_2 \frac{\partial Q}{\partial T_2} \right)^2 + \ldots + \left( U_n \frac{\partial Q}{\partial T_n} \right)^2 \right]^{1/2} \qquad (10-2)$$

وأصل (منشأ) هذه العلاقة موجود في *Coleman and Steel (1989)*. تقدم المعادلة (2−10) تقديراً جيداً عندما تكون كل أزواج الكميات المقاسة $Ti$ وعدم دقتها $Ui$ متساوية، كذلك وعندما تكون الكميات $T1, T2, \ldots, Tn$ مستقلة عن بعضها (أي لا يتعلق الخطأ من إحداها بالخطأ من الآخر) وعند وجود علاقة للأخطاء ببعضها فيجب تعديل العلاقة كما هو مقترح في *Coleman and Steel (1989)* المبينة في *[9]*.

إذا كان عدم دقة كمية مقاسة $Ti$ باحتمال أكبر من عدم دقة كمية مقاسة أخرى ولتكن $Ti+1$ فيجب تصحيح المعادلة (2−10). وللعموم:

$$U_Q = \frac{1}{\Omega} \left[ \left( \omega_1 U_1 \frac{\partial Q}{\partial T_1} \right)^2 + \left( \omega_2 U_2 \frac{\partial Q}{\partial T_2} \right)^2 + \cdots + \left( \omega_n U_n \frac{\partial Q}{\partial T_n} \right)^2 \right]^{1/2} \qquad (11-2)$$

حيث $\omega_i$ تمثل أزواج القيم $Ti$ ذات عدم الدقة $Ui$. و $\Omega$ تمثل معدل هذه الأزواج وتساوي:

$$\Omega = \frac{\left(\omega_1^2 + \omega_2^2 + .. + \omega_n^2\right)^{1/2}}{n^{1/2}} \qquad (12-2)$$

يمكن الحصول على معلومات ذات صلة بتحليل عدم الدقة في *Moffat (1982, 1985)*

## 2. 4. 4. استيفاء المنحنيات (بالمربعات الصغرى) [8]

يسمى الاستيفاء بالمربعات الصغرى الملائمة بأفضل منحنى *Curve Fitting* ويقصد به إمرار أفضل منحني بعدد من النقاط المعطاة. بشكل عام تكون النقاط قيماً تجريبية أو قيماً مقاسة فهي بذلك تحمل أخطاءً وبتمثيلها على المحاور الإحداثية تكون مبعثرة بشكل عشوائي بالنسبة للنقاط النظرية الصحيحة.

تتلخص هذه الطريقة بتعيين منحني شكله العام مستوحى من وضعية النقاط المعطاة والممثلة على جملة الإحداثيات، لكن هذا المنحني لا يمر من تلك النقاط بل يأخذ بعين الاعتبار التبعثر الناتج عن الأخطاء.

يلعب موضوع الاستيفاء بالمربعات الصغرى دوراً هاماً في تحليل النتائج وتفسير المعطيات التجريبية وتمثيلها بنماذج رياضية وخاصة في المواضيع الهندسية والإحصائية.

يتضمن الاستيفاء بالمربعات الصغرى تعيين تابع مستمر $y=f(x)$ يعطي النموذج الرياضي الأفضل لبيان الارتباط الرياضي للقيم التجريبية أو المقاسة والتي هي قيم الاستيفاء: $(x_1,y_1), (x_2,y_2),\ldots\ldots, (x_n,y_n)$

وقد يكون شكل المنحني معلوماً مسبقاً من اعتبارات فيزيائية أو نظرية للمتحولات المقاسة. أو قد توحي لنا المعطيات بشكل المنحني. يجب عند الاستيفاء بالمربعات الصغرى أن تعطى $n$ نقطة بإحداثيات معلومة: $P1(x1,y1), P2(x2,y2),\ldots\ldots, Pn(xn,yn)$. ونقترح إلباس المنحني $y=f(x,c1,c2,..,cm)$ بهذه النقاط. ويكون المطلوب تعيينه هو الثوابت $c$ لكي يمر المنحني $y$ أفضل ما يمكن بالنقاط $P$.

سنفترض أن التابع $y$ هو متحول خطي بالنسبة للثوابت $c$ أي أن الثوابت تظهر كأمثال وليست ضمن التوابع.

الشكل الخطي العام وإدخال المصفوفات:

لنعمل على مبدأ المربعات الصغرى ولنعط الحل باستخدام المصفوفات. إن الشكل الخطي العام بالنسبة للأمثال $c_1, c_2, \ldots\ldots, c_m$ هو

$$y = f(x) = c_1 f_1(x) + c_2 f_2(x) + \ldots\ldots + c_m f_m(x) \qquad (13-2)$$

وسنعين الأمثال $c_1, c_2, \ldots\ldots, c_m$ بشكل يتم إلباس هذا المنحني أفضل ما يمكن بالنقاط $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2), \ldots\ldots, p_n(x_n, y_n)$ ذات الإحداثيات المقاسة.

إن كل نقطة $p_i(x_i, y_i)$ تسمح لنا بكتابة معادلة بواسطة $m$ مجهول وذلك اعتباراً من (2-13) (بإبدال $y$ بـ $y_1$ و $x$ بـ $x_1$ فنحصل على $n$ معادلة بـ $m$ مجهول علماً أن $n > m$ :

$$y_i = c_1 f_1(x_i) + c_2 f_2(x_i) + ..... + c_m f_m(x_i),\ \ \mathrm{i} = 1,2,\ldots,\mathrm{n} \qquad (14-2)$$

ويمكن كتابتها بالشكل:

$$y_i = \sum_{k=1}^{m} c_k f_k(x_i),\ \ \mathrm{i} = 1,2,\ldots,\mathrm{n} \qquad (15-2)$$

إن $(x_i, y_i)$ تحمل أخطاء فباعتبار $n > m$ لا يمكننا إيجاد قيم للثوابت $c_1, c_2, ....., c_m$ تتحقق فيها جميع المعادلات.

إن أي حل لـ $c_1, c_2, ....., c_m$ من شأنه أن يعطي عندما نبدل قيمها بالمعادلات السابقة رواسب نرمز لها بـ $v_1, v_2, ....., v_n$ وعلى هذا الأساس نكتب من (2-15):

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{m} c_k f_k(x_1) - y_1 &= v_1 \\ \sum_{k=1}^{m} c_k f_k(x_2) - y_2 &= v_2 \\ \cdots \quad \cdots \quad \cdots & \\ \sum_{k=1}^{m} c_k f_k(x_n) - y_n &= v_n \end{aligned} \qquad (16-2)$$

وعلينا تعيين الثوابت $c_1, c_2, ....., c_m$ بتطبيق مبدأ المربعات الصغيرة أي بشكل تصبح فيه قيمة التابع:

$$\Omega = \sum_{i=1}^{n} v_1 = \min \quad \text{أصغرية}$$

لنعرف الأشعة:

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ : \\ v_n \end{bmatrix},\ \vec{C} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ : \\ c_n \end{bmatrix},\ \vec{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ : \\ y_n \end{bmatrix} \qquad (17-2)$$

يمكننا عندئذ كتابته على الشكل:

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{m} c_k f_k(x_1) \\ \sum_{k=1}^{m} c_k f_k(x_2) \\ ..... \\ \sum_{k=1}^{m} c_k f_k(x_n) \end{bmatrix} - Y = V \qquad (18-2)$$

أو:

$$\begin{bmatrix} c_1 f_1(x_1) & + & c_2 f_2(x_1) & + & .... & + & c_m f_m(x_1) \\ c_1 f_1(x_2) & + & c_2 f_2(x_2) & + & .... & + & c_m f_m(x_2) \\ .... & & ..... & .... & & & ..... \\ c_1 f_1(x_n) & + & c_2 f_2(x_n) & + & ..... & + & c_m f_m(x_n) \end{bmatrix} - Y = V \qquad (19-2)$$

أو:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1) & f_2(x_1) & .... & f_m(x_1) \\ f_1(x_2) & f_2(x_2) & .... & f_m(x_2) \\ & ..... & ..... & \\ f_1(x_n) & f_2(x_n) & .... & f_m(x_n) \end{bmatrix} C - Y = V \qquad (20-2)$$

وبوضع:

$$F = \begin{bmatrix} f_1(x_1) & f_2(x_1) & .... & f_m(x_1) \\ f_1(x_2) & f_2(x_2) & .... & f_m(x_2) \\ & ..... & ..... & \\ f_1(x_n) & f_2(x_n) & .... & f_m(x_n) \end{bmatrix} \qquad (21-2)$$

وأصبحت تكتب على الشكل:

$$FC - Y = V \qquad (22-2)$$

نلاحظ أن السطر الأول من المصفوفة $F$ يعطي أمثال المعادلة باعتبار $x = x_1$ (فاصلة النقطة الأولى).

وأن السطر الثاني يعطي أمثال المعادلة باعتبار النقطة الثانية.....وهكذا.

فالمصفوفة $F_{(n,m)}$ هي عددية .باعتبار الشعاع $\vec{V}$، يمكننا أن نكتب مبدأ المربعات الصغرى على الشكل:

$$\Omega = V^T V = \min \qquad (23-2)$$

حيث سنرمز لمنقول مصفوفة $A$ مثلاً بالرمز $A^T$ .

لقد بينا أنه لكي يصبح التابع $\Omega$أصغرياً علينا أن نعدم مشتقاته الجزئية بالنسبة للمتحولات المستقلة، وبما أن $v_1, v_2, ....., v_n$ هي توابع للمجاهيل $c_1, c_2, ....., c_m$ فلجعل $\Omega$أصغرياً يجب أن نحقق:

$$\sum_{i=1}^{n} v_i \frac{\partial v_i}{\partial c_k} = 0 \ , \mathrm{i} = 1,2,\ldots$$

إن الشكل يمثل $m$ معادلة ويمكننا كتابتها بالشكل:

$$[v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad ....v_n]\begin{bmatrix} \frac{\partial v_1}{\partial c_1} & \frac{\partial v_1}{\partial c_2} & \frac{\partial v_1}{\partial c_3} & \dots & \frac{\partial v_1}{\partial c_m} \\ \frac{\partial v_2}{\partial c_1} & \frac{\partial v_2}{\partial c_2} & \frac{\partial v_2}{\partial c_3} & \dots & \frac{\partial v_2}{\partial c_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial v_n}{\partial c_1} & \frac{\partial v_n}{\partial c_2} & \frac{\partial v_n}{\partial c_3} & \dots & \frac{\partial v_n}{\partial c_m} \end{bmatrix} = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \qquad (24-2)$$

ولكن من(2−16) نجد:

$$[v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad ....v_n]\begin{bmatrix} f_1(x_1) & f_2(x_1) & f_3(x_1) & \dots & f_m(x_1) \\ f_1(x_2) & f_2(x_2) & f_3(x_2) & \dots & f_m(x_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_1(x_n) & f_2(x_n) & f_3(x_n) & \dots & f_m(x_n) \end{bmatrix} = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \qquad (25-2)$$

وبإدخال الرموز المصفوفات تكتب هذه المعادلة الأخيرة على الشكل:

$$V^T F = O^T \qquad (26-2)$$

حيث $O$ هو شعاع الصفر (شعاع عمود).

وبأخذ منقول الطرفين في (2−26) نجد : $F^T V = O$

بإدخال الطرف الأول من (2−22) عوضاً عن $V$ نجد:

$$F^T (FC - Y) = O \qquad (27-2)$$

أو:

$$(F^T F) = F^T Y \qquad (28-2)$$

وكما ذكرنا فإن درجة $F$ هي $(n,m)$ وتكون درجة $F^T$ هي $(m,n)$ وتكون بذلك المصفوفة المتناظرة $F^T F$ ذات درجة $m$ ،أما $C$ فهو شعاع عمود في الفراغ $m$ وكذلك الأمر بالنسبة للشعاع $F^T Y$ فالمعادلة المصفوفية تمثل $m$ معادلة ب $m$ مجهول وهي معادلات مستقلة إذ أن رتبة المصفوفة $F^T F$ هي $m$ على اعتبار أن $F$ هي ذات رتبة أعظمية أي ذات رتبة $m$ $(n>m)$ (النقاط $p_1, p_2, ....., p_n$ نقاط متميزة بعضها عن الآخر). يمكننا إذن حل مجموعة المعادلات وإيجاد قيم المجاهيل $c_1, c_2, ....., c_m$ فتعطينا عندئذ مجموعة المعادلات، بإدخال قيم الثوابت هذه الفروقات أو الرواسب $v_1, v_2, ....., v_n$ فإن كانت صغيرة ومقبولة أي مفسرة بأخطاء الناتج على النقاط $p_1, p_2, ....., p_n$ اعتمدنا المنحني ذا المعادلة الذي يتلبس بالنقاط أفضل ما يمكن، وإلا فيجب اعتماد منحن آخر لتمثيل التجربة التي أعطت النقاط $p_1, p_2, ....., p_n$ .

### 2. 4. 5. حل جملة المعادلات الخطية وقلب المصفوفات

. اعتبارات عامة:

نتوصل في عدد كبير من المسائل إلى مجموعة معادلات خطية . ومن الضروري حل هذه المعادلات وإيجاد قيم المجاهيل .

نعلم أن هناك عدة طرق لحل مجموعة المعادلات الخطية، إلا أنها ليست كلها اقتصادية حين اللجوء إلى الحل بالحاسب الالكتروني. وخاصة عندما يزداد عدد المعادلات ، لنذكر على سبيل المثال أن طريقة كرامر لحل $n$ معادلة بـ $n$ مجهول تتطلب عدداً من العمليات الحسابية أكبر بكثير من طريقة الحذف، ومن البديهي أنه يجب اللجوء إلى الطرق التي نتوصل فيها إلى قيم المجاهيل بأقل عدد من العمليات.

سنستعرض في هذا الفصل طريقة الحذف لحل جملة معادلات خطية. لنذكر قبل ذلك عدداً من الملاحظات.

لنعتبر $n$ معادلة خطية بـ $n$ مجهول :

$$\begin{array}{ccccccccc} a_{11}x_1 & + & a_{12}x_2 & + & ..... & + & a_{1n}x_n & = & l_1 \\ a_{21}x_1 & + & a_{22}x_2 & + & ..... & + & a_{2n}x_n & = & l_2 \\ ... & & ... & & ... & & ... & & ... \\ a_{n1}x_1 & + & a_{n2}x_2 & + & ..... & + & a_{nn}x_n & = & l_n \end{array} \qquad (29-2)$$

نقول عن هذه المعادلات أنها غير متجانسة عندما لاتكون كل حدود الطرف الثاني من هذه المجموعة معدومة . وبالعكس نقول عنها أنها متجانسة إذا كان لدينا $l_1 = l_2 = ..... = l_n = 0$ ،في هذه الحالة يكون لمجموعة المعادلات حل لا يساوي الصفر عندما لا تكون المعادلات مستقلة خطياً .

سنرمز في الفقرات القادمة للطرف الثاني أي $l_1, l_2, .....l_n$ بـ:

$$l_1 = a_{1n+1}$$
$$l_2 = a_{2n+1}$$
$$.....$$
$$l_n = a_{nn+1}$$

ونكتب المعادلات (2-13) على الشكل:

$$\begin{array}{ccccccccc} a_{11}x_1 & + & a_{12}x_2 & + & ..... & + & a_{1n}x_n & = & a_{1n+1} \\ a_{21}x_1 & + & a_{22}x_2 & + & ..... & + & a_{2n}x_n & = & a_{2n+1} \\ ... & & ... & & ... & & ... & & ... \\ a_{n1}x_1 & + & a_{n2}x_2 & + & ..... & + & a_{nn}x_n & = & a_{nn+1} \end{array} \qquad (30-2)$$

نسمي المصفوفة:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ .. & .. & .. & .. \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

مصفوفة الأمثال. كما نسمي:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & a_{1n+1} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & a_{2n+1} \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} & a_{nn+1} \end{bmatrix}$$

المصفوفة الموسعة.

سوف لا نناقش هنا استحالة الحل أو وجود حل وحيد أو عدة حلول بل سنعتبر أنه لدينا حل وحيد أو عدة حلول بل سنعتبر أنه لدينا حل وحيد ، وسنستعرض الطرق التي يمكننا بها إيجاد قيم المجاهيل، ولكننا سنختبر في المخططات النهجية والبرامج إن كانت مصفوفة الأمثال نظامية فإن كانت نظامية فعندها سنجد الحل الوحيد للمجموعة أي قيم المجاهيل . أما إذا كانت شاذة فسيتم فقط إعلان ذلك.

لنذكر أخيراً بالتحويلات الأولية في مجموعة معادلات خطية :

. تبديل معادلتين.

. ضرب طرفي معادلة بعدد لا يساوي الصفر.

. إضافة معادلة مضروبة بعدد إلى معادلة ثانية .

إن تطبيق التحويلات الأولية على مجموعة المعادلات من شأنه أن يعطينا مجموعة ثانية تكافئ المجموعة الأصلية أي لها نفس الحلول .

### 2. 4. 6. طريقة الحذف لغوص – جوردان

تتلخص هذه الطريقة بتطبيق تحويلات أولية على مجموعة المعادلات (2−30) لكي نحولها إلى مجموعة معادلات قطرية لاتحوي كل معادلة منها إلا متحولاً واحداً ، فهنا سنحذف $x_1$ من المعادلات الثانية والثالثة ..... ثم نحذف $x_2$ من المعادلات الثالثة والرابعة..... والأولى.... وهكذا. وبذلك نحصل على قيم فورية للمتحولات بمجرد أن ننتهي من عملية الحذف.

لشرح هذه الطريقة سنعتبر أولاً مجموعة مؤلفة من ثلاثة معادلات:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 &= a_{41} \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 &= a_{24} \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 &= a_{34} \end{aligned} \qquad (31-2)$$

لنقسم المعادلة الأولى على $a_{11}$ باعتبار $a_{11} \neq 0$ ،أي نعتبره محوراً في المعادلة الأولى . ثم لنضرب المعادلة بـ $a_{21}$ ثم لنضربها بـ $a_{31}$ فنحصل على المعادلات التالية :

$$\begin{aligned} & x_1 + \frac{a_{12}}{a_{11}} x_2 + \frac{a_{13}}{a_{11}} x_3 = \frac{a_{14}}{a_{11}} \\ & a_{21} x_1 + a_{21} \frac{a_{12}}{a_{11}} x_2 + a_{21} \frac{a_{13}}{a_{11}} x_3 = a_{21} \frac{a_{14}}{a_{11}} \\ & a_{31} x_1 + a_{31} \frac{a_{12}}{a_{11}} x_2 + a_{31} \frac{a_{13}}{a_{11}} x_3 = a_{31} \frac{a_{14}}{a_{11}} \end{aligned} \qquad (32-2)$$

لنطرح المعادلة الثانية من هذه المجموعة من المعادلة الثانية من المجموعة (2−32) ، كما لنطرح الثالثة من هذه المجموعة من المعادلة الثالثة من المجموعة (2−33) ولنكتب المعادلة الأولى من المجموعة (2−33) فنحصل على :

$$\begin{aligned} & x_1 + a_{12}^{(1)} x_2 + a_{13}^{(1)} x_3 = a_{14}^{(1)} \\ & a_{22}^{(1)} x_2 + a_{23}^{(1)} x_3 = a_{24}^{(1)} \\ & a_{32}^{(1)} x_2 + a_{33}^{(1)} x_3 = a_{34}^{(1)} \end{aligned} \qquad (33-2)$$

حيث

$$\begin{aligned} & j = 2,3,4 \quad ,i = 1 \qquad a_{ij}^{(1)} = \frac{a_{ij}}{a_{11}} \\ & (i \neq 1) \quad j = 2,3,4 \quad ,i = 2,3 \qquad a_{ij}^{(1)} = a_{ij} - a_{ij} \frac{a_{1i}}{a_{11}} \end{aligned} \qquad (34-2)$$

لنقسم الآن المعادلة الثانية على محور المعادلة $a_{22}^{(1)}$ بفرض $a_{22}^{(1)} \neq 0$ ثم لنضربها بـ $a_{32}^{(1)}$ ثم لنضربها بـ $a_{12}^{(1)}$ فنجد:

$$\begin{aligned} & x_2 + \frac{a_{23}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} x_3 = \frac{a_{24}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} \\ & a_{32}^{(1)} x_2 + a_{32}^{(1)} \frac{a_{23}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} x_3 = a_{32}^{(1)} \frac{a_{24}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} \\ & a_{12}^{(1)} x_2 + a_{12}^{(1)} \frac{a_{23}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} x_3 = a_{12}^{(1)} \frac{a_{24}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} \end{aligned} \qquad (35-2)$$

لنطرح الآن المعادلة الثانية من هذه المجموعة من المعادة الثالثة من المجموعة (2−33) ولنطرح المعادلة الثالثة من المجموعة (2−35) من المعادلة الأولى من المجموعة (2−33) ولنكتب المعادلة الأولى من (2−35):

| | |
|---|---|
| $$x_1 + a_{13}^{(2)} x_3 = a_{14}^{(2)}$$ $$x_2 + a_{23}^{(2)} x_3 = a_{24}^{(2)}$$ $$a_{33}^{(2)} x_3 = a_{34}^{(2)}$$ | (36−2) |

حيث :

| | |
|---|---|
| $$j = 3,4, \quad i = 2 \qquad a_{ij}^{(2)} = \frac{a_{ij}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}}$$ $$(i \neq 2) \quad j = 3,4, \quad i = 1,3 \qquad a_{ij}^{(2)} = a_{ij}^{(1)} - a_{i2}^{(1)} \frac{a_{2j}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}}$$ | (37−2) |

لنقسم أخيراً المعادلة الثالثة من المجموعة (37−2) على $(a_{33}^{(2)} \neq 0)\, a_{33}^{(2)}$ المعتبر كمحور، ثم لنضرب المعادلة بـ $a_{13}^{(2)}$ ثم بـ $a_{23}^{(2)}$ فنجد:

| | |
|---|---|
| $$x_3 = \frac{a_{34}^{(2)}}{a_{33}^{(2)}}$$ $$a_{13}^{(2)} x_3 = a_{13}^{(2)} \frac{a_{34}^{(2)}}{a_{33}^{(2)}}$$ $$a_{23}^{(2)} x_3 = a_{23}^{(2)} \frac{a_{34}^{(2)}}{a_{33}^{(2)}}$$ | (38−2) |

لنطرح المعادلة الثانية من المجموعة (38−2) من المعادلة الأولى من المجموعة (36−2) ثم لنطرح المعادلة الثالثة من المجموعة (38−2) من المعادلة الثانية من المجموعة (36−2) ولنكتب المعادلة الأولى من المجموعة (38−2) :

| | |
|---|---|
| $$x_1 = a_{14}^{(3)} \quad , \quad x_2 = a_{24}^{(3)} \quad , \quad x_3 = a_{34}^{(3)}$$ | (39−2) |

حيث:

| | |
|---|---|
| $$j = 4, i = 3 \qquad a_{ij}^{(3)} = \frac{a_{ij}^{(2)}}{a_{33}^{(2)}}$$ $$(i \neq 3) \quad j = 4, i = 1,2 \qquad a_{ij}^{(3)} = a_{ij}^{(2)} - a_{i3}^{(2)} \frac{a_{3j}^{(2)}}{a_{33}^{(2)}}$$ | (40−2) |

يمكننا أن نعمم القوانين السابقة بالنسبة لـ $n$ معادلة بـ $n$ مجهول :

باعتبار $k=1,2,3,.....,n$ :

بالنسبة للسطر $k$ فقط ومن أجل $j=k+1\ ,\ k+2\ ,.....,n,\ n+1$ :

| | |
|---|---|
| $$(a_{kj}^{0} = a_{kj}) \qquad a_{kj}^{(k)} = \frac{a_{kj}^{(k-1)}}{a_{kk}^{(k-1)}}$$ | (41−2) |

بالنسبة لبقية الأسطر ماعدا السطر $k$ أي من أجل : $i=1,2,3,.....,n\ (I\neq k)$

ومن أجل $j = k+1, k+2,.....n , n+1$

$$a_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k-1)} - a_{ik}^{(k-1)} * a_{kj}^{(k)} \qquad (42-2)$$

يتبين لنا أننا نستطيع تخزين العناصر في كل مرحلة في نفس الأمكنة من الذاكرة، فيمكننا أن نكتب (2-41) و(2-42) بمنطق البرمجة:

$a_{kj} \leftarrow \frac{a_{kj}}{a_{kk}}$ بالنسبة للسطر $k$ : $\quad j=k+1 , k+2 , ..... , n , n+1$

$a_{ij} \leftarrow a_{ij} - a_{ik}a_{kj}$ من أجل : $\quad i=1,2,3,.....,n \quad (I\neq k)$

$j=k+1 , k+2 , ..... , n , n+1$

ويجب تطبيق هذه المعادلات من أجل $k=1.2.3.....n$

ومن أجل $k=n$ نحصل في العمود $(n+1)$ على قيم المجاهيل.

## 2. 5. التجهيزات المستخدمة في قياس درجة الحرارة

1. مقاييس الحرارة السائلة
2. المزدوجات الحرارية
3. كواشف المقاومة بدرجة الحرارة *RTD*
4. البلورات المائعة
5. الثيرمستور

## 2. 6. مقاييس التدفق الحراري

تدعى الأجهزة الخاصة بقياس التدفق الحراري المكاني التي تعتمد بالأساس على نمو درجة الحرارة الموضعية خلال الزمن، مقاييس التدفقات الفقاعية أو البطيئة (*bead calorimeter* أو *slug calorimeter*) ويفضل تسميتها هنا المكثفات المحسوسة والاسم الذي يصف خصائص الجهاز الرئيسة فهي 1. تختزن الطاقة كأنها مكثف و2. تختزن الطاقة على شكل حرارة محسوسة

عند قياس درجة الحرارة، يجب أن يتصف حساس القياس بسعة حرارية صغيرة ليحقق التوازن الحراري بأسرع ما يمكن للنقطة المقاس عندها درجة الحرارة. وللتمييز، إن قياس التدفق الحراري بالمكثفات المحسوسة يحتاج إلى سعة حرارية كبيرة مما يعني أن زمن التوازن الحراري أطول وقابلاً للقياس.

يمكن تعيير السعة الحرارية بتغيير الكتلة $m$ أو السعة الحرارية $c$ للمادة في المكثف (الخزان). يمكن حساب التدفق الحراري باستخدام القانون الأول في التيرموديناميك للأنظمة الصلبة على طول مجال إمكانية قياس تغير درجة الحرارة خلال الزمن $dT/dt$

$$\dot{q} = m.c.\frac{dT}{dt}$$

نوع آخر من مقاييس التدفق الحراري والمسماة مقاييس الانتشار. تعمل بالأساس وفق قانون فورييه بالتوصيل الحراري للحالة المستقرة

$$\dot{q} = k.A.\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

حيث $k$ الموصلة الحرارية للمادة المقاسة، $A$ مساحة مقطع المادة المار عبرها التدفق، $\Delta T$ التغير الحراري المقاس لمسافة $\Delta x$ خلال الجهاز. إن قياسات هذا الجهاز (أبعاده) مهمة جداً لملائمة الانتشار الحراري المقابل. كذلك فمن المهم أن يكون التدفق الحراري متساوي الأبعاد ضمن الجهاز لكي تصبح معادلة فورييه السابقة صحيحة.

# الفصل الثالث

# جهاز قياس عامل انتقال الحرارة بالحمل الحر

## 3. 1. العناصر الأساسية للجهاز

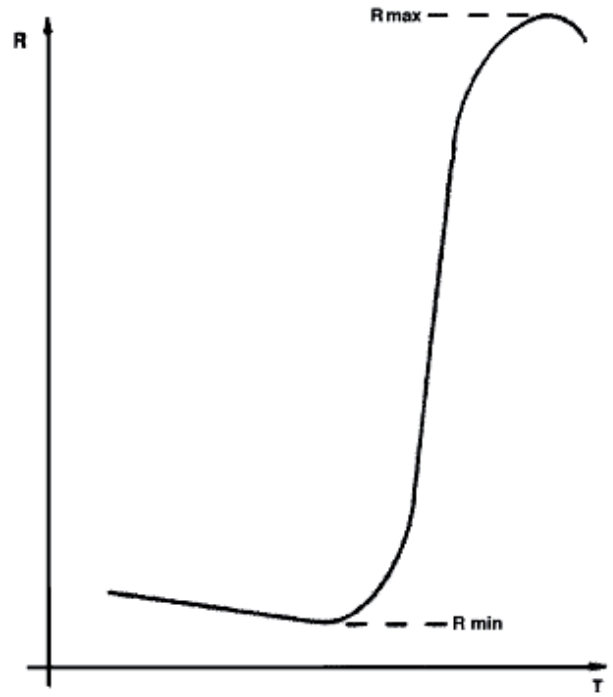
### 3. 1. 1. مقاييس الحرارة الثيرمستورية (الحساس)

الثرمستور هو المقاومة الحساسة للحرارة والتي تتمثل مهمتها الأساسية إظهار أي تغير في المقاومة الكهربائية مع وجود تغير في درجة حرارة الجسم. خلافا لكواشف المقاومة لدرجات الحرارة (*RTD*) والسلك المشطور أو مقاومة الرقاقة المعدنية، فإن الثرمستور هو من أنصاف النواقل السيراميكية. يعرض (*RTD*) معامل حرارة صغير للمقاومة بحدود *0.4 to 0.5% ℃$^{-1}$*. اعتمادا على نوع نظام المواد المستخدمة، يمكن أن يكون للثيرمستور إما معامل درجة حرارة موجب للمقاومة (*PTC*) أو معامل درجة حرارة موجب للمقاومة (*NTC*).

يتوفر نوعين من ثيرمستورات (*PTC*). ثيرمستور (*PTC*) السيليكونية التي تعتمد على خصائص التضخيم لمعجونة السليكون ويبدي خصائص مقاومة لدرجات الحرارة خطية تقريباً. ومعاملات المقاومة لدرجة الحرارة من نحو *0.7 to 0.8% ℃$^{-1}$*. إن التطبيقات الأكثر شيوعا لثيرمستورات السيليكون (*PTC*) هو تعويض دارات وأجهزة أنصاف النواقل السيليكونية [19].

إن المواد المستخدمة في تركيب ثيرمستورات (*PTC*) هي مركبات الباريوم، والرصاص، وتيتانات السترونتيوم. ويبين الشكل (3−1) خصائص المقاومة بالنسبة للحرارة للمبدلة (*PTC*) النموذجية [20]. في درجات الحرارة المنخفضة ، من الدرجة صفر مئوية وحتى *Rmin* ، تكون قيمة المقاومة منخفضة، وتبدي *RT* بالنسبة لـ *T* معامل مقاومة سلبي صغير بالنسبة لدرجة حرارة بحدود *−1% $^{o}C^{-1}$*. وبارتفاع درجة الحرارة، يصبح معامل المقاومة لدرجة الحرارة موجباً وتبدأ المقاومة في الارتفاع. عند العتبة أو درجة حرارة التبديل ، يصبح معدل الارتفاع سريعاً جدا وتصبح صفة الـ *PTC* حادة جدا. ضمن نطاق التبديل، يمكن أن يصل معامل المقاومة للحرارة إلى *100% $^{o}C^{-1}$* ويبدي الجهاز مقاومة عالية القيمة. في درجة حرارة تزيد عن نطاق التبديل، تصل المقاومة إلى قيمة الحد الأقصى الذي ويصبح سلبيا مرة اخرى. تتراوح درجة حرارة التحول بين 80 درجة مئوية و 240 درجة مئوية متغيرة بتغيير التركيب الكيميائي للسيراميكة. أهم التطبيقات العملية للثيرمستور المتحول (*PTC*) في مجالات الحماية من ارتفاع درجة

الحرارة، وتحديد التيار، والتنظيم الذاتي للتدفئة. معامل المقاومة للحرارة لوحدة مستخدمة كعنصر تدفئة عادة حوالي $25\%\ ^oC^{-1}$ عند درجة حرارة تبديل 240 درجة مئوية [19 ، 20].




الشكل (3–1) المقاومة الكهربائية كتابع لدرجة الحرارة للثيرمستور نوع *PTC*

تتألف ثيرمستورات *NTC* من أكاسيد معدنية مثل أكاسيد الكروم والكوبالت والنحاس والحديد والمنغنيز والنيكل والتيتانيوم. تبدي هذه الوحدات انخفاض ملحوظ في المقاومة الكهربائية بارتفاع درجة الحرارة. إن خصائص المقاومة بالنسبة للحرارة غير خطية لثيرمستورات *NTC* وتقترب من الخصائص التي تبديها أنصاف النواقل الفعلية حيث تعود تبعية المقاومة للحرارة لتحفيز النواقل عبر فجوة طاقية أحادية. وفيها يكون لوغاريتم المقاومة لثيرمستور *NTC* بالتقريب تابعاً خطياً لمقلوب درجة الحرارة المطلقة. تحت درجة الحرارة العادية، يتناقص ميل التابع ويتصرف الثيرمستور بشكل مشابه لأنصاف نواقل اكسترينسيك إن آلية التوصيل الفعلية تقابل تماماً آلية الوثب الموجودة في الفريت أو أكاسيد المنغنيز ذات التركيب البلوري المحوري. يحدث التوصيل عندما تثب حامل للشحنة من موضع أيوني في النظام المحوري إلى موضع مجاور له. تحدث هذه الوثبات عند وجود أيونات نفس العنصر – بتكافؤ يختلف عن الواحد – في مواضع متكافئة ضمن نظام شبكي. يتغير معامل المقاومة للحرارة لثيرمستور *NTC* بتغير درجة الحرارة بسبب الخصائص غير الخطية لتابع المقاومة بالنسبة للحرارة. إن معامل المقاومة للحرارة عند الدرجة $25^oC$ ضمن المجال $-3\%$ وحتى $-5\%\ ^oC^{-1}$ وذلك حسب النظام المعدني المستخدم. وعند الدرجة

$-60^oC$ هي ضمن المجال $-6.4$ وحتى $-11.3\%\ ^oC^{-1}$ ، بينما تتغير عند الدرجة $100℃$ بين $-2.1$ و $-3.7\%\ ^oC^{-1}$. إن نسبة المقاومة المقابلة للدرجة $25^oC$ - $RT/R25$ هي من $41$ وحتى $228$ عند $-60^oC$ و $0.13$ حتى $0.03$ عند $100℃$. إن خاصة الميل لـ $log\ R$ بالنسبة لـ $1/T$ ($\beta$) هي ثابتة نسبياً. وتتراوح قيم ($\beta$) للأنظمة المعدنية ضمن البيانات السابقة من $2930$ وحتى $5135K$ على المجال $25$ وحتى $125^oC$ [19].

ومع أن خصائص المقاومة للحرارة غير خطية لثيرمستور $NTC$ فإنه من الممكن تحقيق خطية جيدة لخصائص التوصيل للحرارة والمقاومة للحرارة باستخدام شبكة من الثيرمستورات والمقاومات. ينتج استخدام مقاومة مع ثيرمستور على التسلسل قي شبكات التوصيل الخطية مثل مقسم الجهد. إن التيار المار المقابل للجهد المطبق على دارة خطي بالنسبة لدرجة الحرارة، وهكذا فإن خرج مقسم الجهد (الجهد عبر مقاومة) خطي بالنسبة لدرجة الحرارة. إن الدارة في التوصيل التفرعي للمقاومة بالثيرمستور ذات موصفات مقاومة خطية *[3, 4]*.

خصائص المقاومة للحرارة:

يمكن تطبيق الحد ذو القوة الصفرية للمقاومة على الثيرمستورات العاملة عند التسخين الذاتي المهمل. وتصف هذه الخاصة العلاقة بين المقاومة ذات القوة الصفرية للثيرمستور بدرجة الحرارة المحيطة به. وتعطى العلاقة الخطية التقريبية بين لوغاريتم المقاومة ومقلوب درجة الحرارة المطلقة على مجالات صغيرة لدرجة الحرارة بالعلاقة:

$$\ln R_T \cong A + \frac{\beta}{T} \qquad (1-3)$$

حيث $T$ درجة الحرارة الطلقة بالـ ($k$)

$\beta$ الثابت المعدني للثيرمستور.

بوضع $RT = RT0$ عند درجة الحرارة المرجعية $T = T0$ نحصل على الحل $RT$:

$$R_T \equiv R_{T_0} \exp\left[\frac{\beta(T_0 - T)}{TT_0}\right]$$

حيث يعرف معامل المقاومة للحرارة $\alpha$ بـ

$$\alpha \equiv \frac{1}{R_T}\frac{dR_T}{dT}$$

بحل المعادلة السابقة بالنسبة لـ $\alpha$ ينتج:

$$\alpha = -\frac{\beta}{T^2}$$

يؤدي الانحراف عن الخطية في المعادلة (3−1) إلى أخطاء في درجة الحرارة بالقيم $0.01^oC$ و$0.1^oC$ و$0.3^oC$ لمجالات درجة الحرارة $10^oC$ و$30^oC$ و$50^oC$ على التوالي ضمن المجال من $0^oC$ وحتى $50^oC$. وباستخدام كثير الحدود الممثل لعلاقة $ln\ RT$ بالنسبة لـ $1/T$ تنخفض الأخطاء إلى حد كبير، وتعتمد درجة كثير الحدود المطلوبة على مجال قيم درجات الحرارة ونظام المواد المستخدم. إن استخدام كثير حدود من الدرجة الثالثة ملائم لمعظم التطبيقات. بذلك العبارات (الصيغ) الأكثر دقة لوصف العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة هي من الشكل:

| | |
|---|---|
| $\ln R_T \cong A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3}$ | (2−3) |
| $\frac{1}{T} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln R_T + \alpha_2 (\ln R_T)^2 + \alpha_3 (\ln R_T)^3$ | (3−3) |

اعتمد *Steinhart and Hart* على استخدام المعادلة (3−3) لمجال درجات الحرارة من $-2^oC$ وحتى $30^oC$ [21]. ودل تحليلهم على عدم وجود خسارة ملحوظة بالدقة عند حذف الحد التربيعي $a_2(ln\ RT)^2$، وبناءً عليه طرحوا استخدام المعادلة:

$$\frac{1}{T} = b_0 + b_1 \ln R_T + b_3 (\ln R_T)^3$$

كما وأقر *Mangum* أن استخدام المعادلة السابقة يؤدي إلى أخطاء في الاستيفاء بحدود $0.001\ ℃$ على المجال $0\ ℃$ وحتى $70\ ℃$ [22].

قيمت الهيئة التقنية للقياسات الحرارية *Inc.* المعادلة (2−3) على المجال الحراري $-80^oC$ وحتى $260^oC$ باستخدام 17 ثيرمستور مختلف. والنتائج موجودة في *Sixth International Symposium on Temperature* وأظهرت أن أخطاء الاستيفاء لم تتجاوز القيم المقبولة. وكانت أخطاء القياس (الاستيفاء) بحدود $0.001\ ℃$ وحتى $0.003\ ℃$ [22].

### 3. 1. 2. العناصر المؤلفة للجهاز

يتألف الجهاز من العناصر التالية:




الشكل (3-2) واجهة الجهاز (وحدة الإظهار ولوحة المفاتيح)

1- وحدة إظهار LCD.

2- لوحة مفاتيح.

3- ثمان حساسات حرارية (NTC) ، كل منها موصول في تشكيلة جسرية.

4- المعالج الصغري Atmega16، الذي يقوم بما يلي:

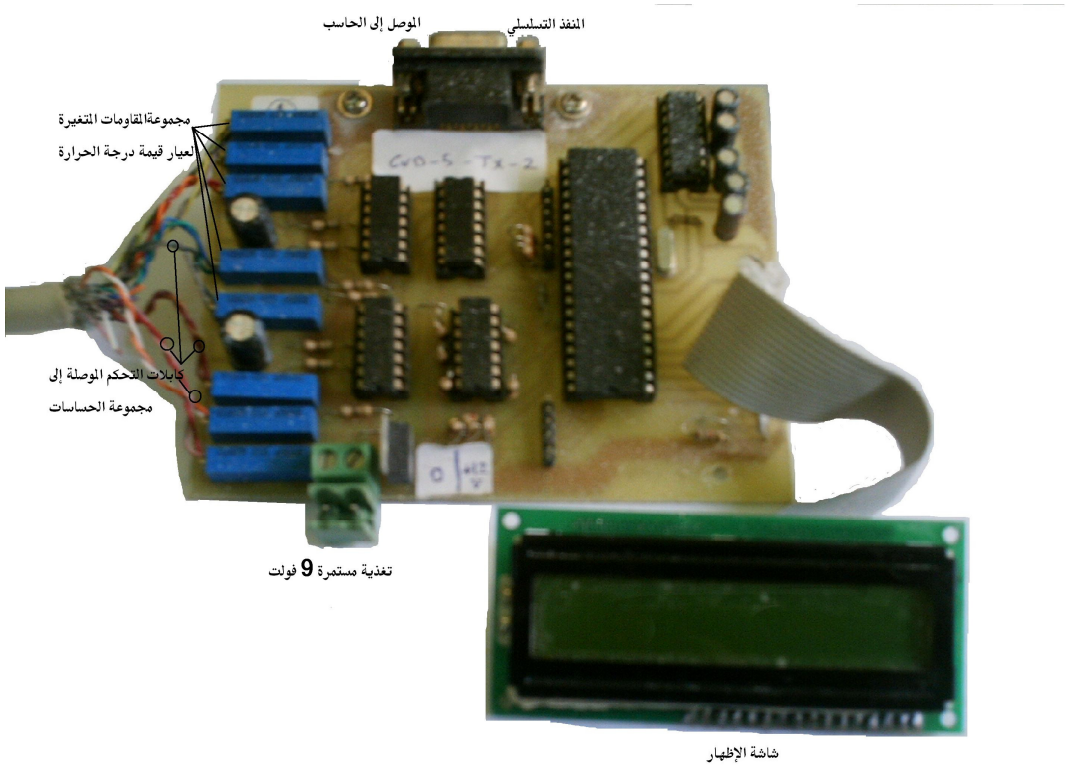
a. قراءة قيم المبدل التماثلي الرقمي وحساب قيمة الثابت H.

b. التخاطب مع الحاسب وفق المعيار RS232.

c. مسح لوحة المفاتيح.

d. قيادة وحدة إظهار LCD.

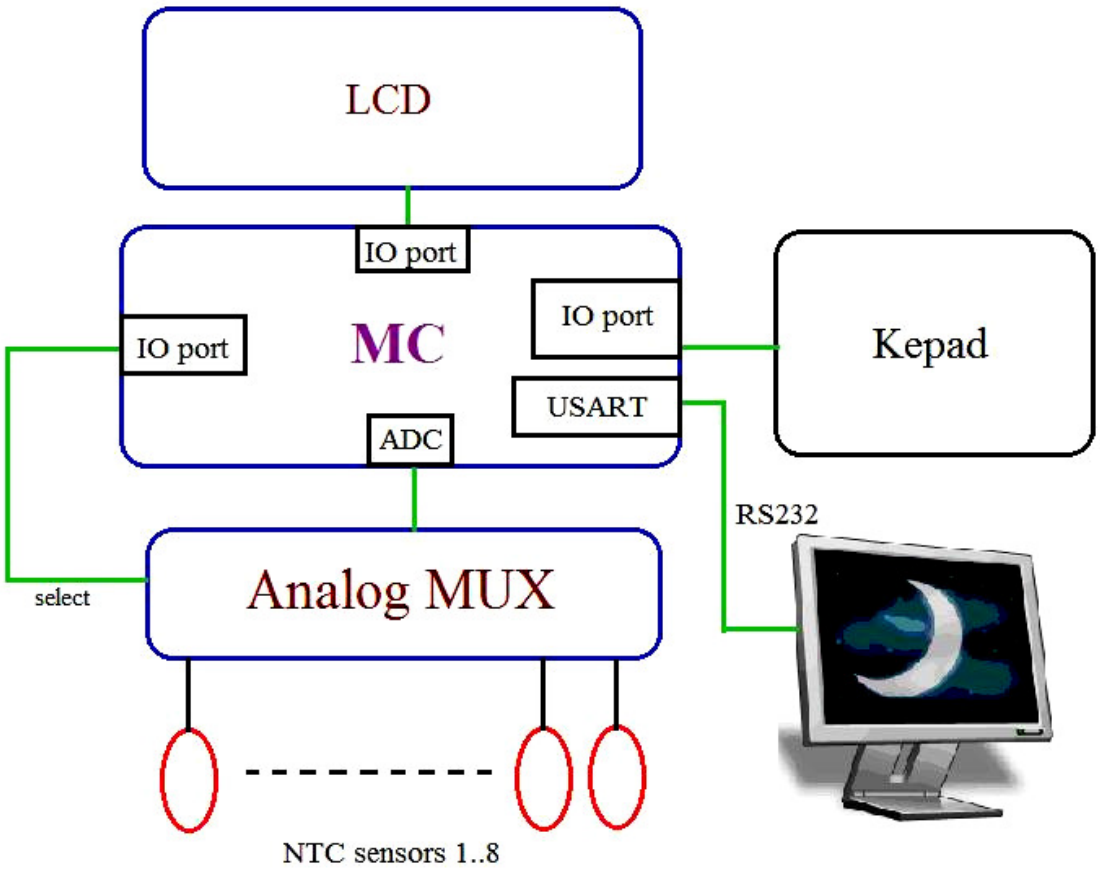
e. قيادة الناخب التماثلي وذلك لمسح الحساسات الثمانية.




الشكل (3-3) الدارة الإلكترونية للجهاز



الشكل (3-4) صورة حقيقية للحساسات المستخدمة

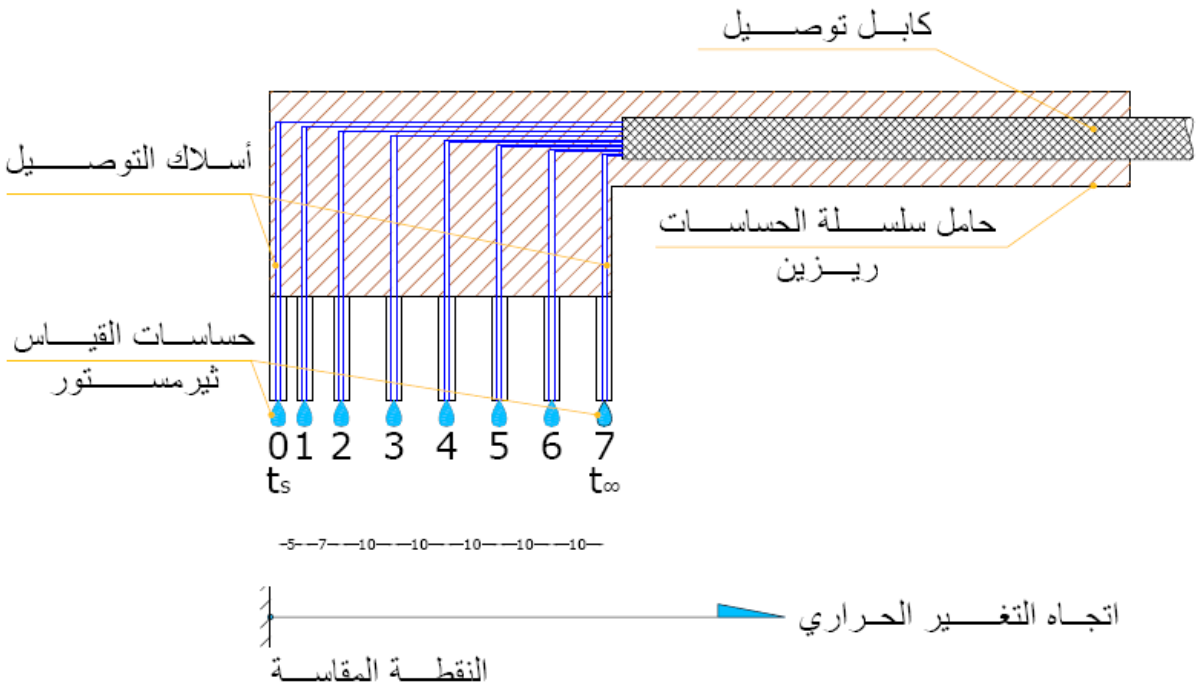



الشكل (3-5) المخطط الصندوقي للجهاز

### 3. 1. 3. معايرة الجهاز

جرت معايرة حساسات الحرارة (عند درجة حرارة تجمد المياه) واستخلاص المعادلة التي تربط بين درجة الحرارة وقراءة المبدل التماثلي الرقمي، وهي معادلة من الدرجة الثالثة:

$$T = 3.5 \times 10^{-7} X^3 - 5.3 \times 10^{-4} X^2 + 0.38 X - 47.9$$



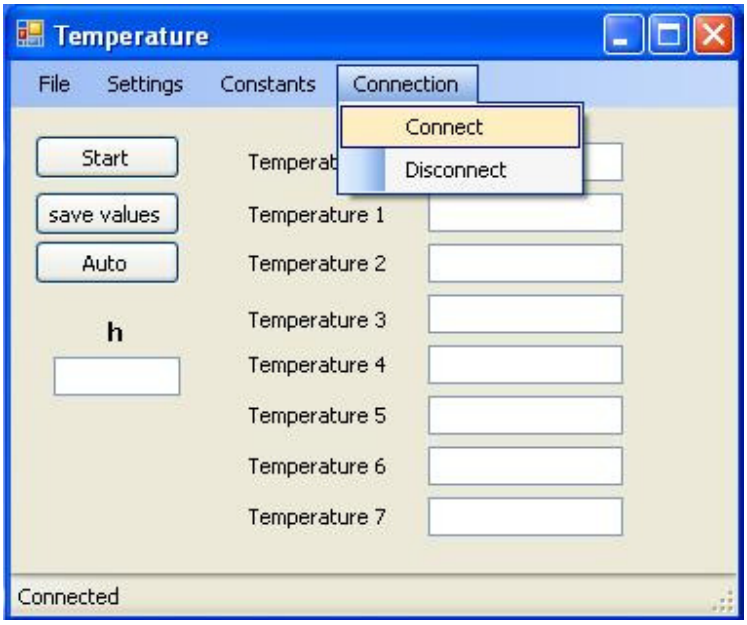

الشكل (3–6 ) مصفوفة الحساسات (طريقة قياس التدرج الحراري)

## 3. 2. برنامج معالجة القيم المقاسة من الجهاز

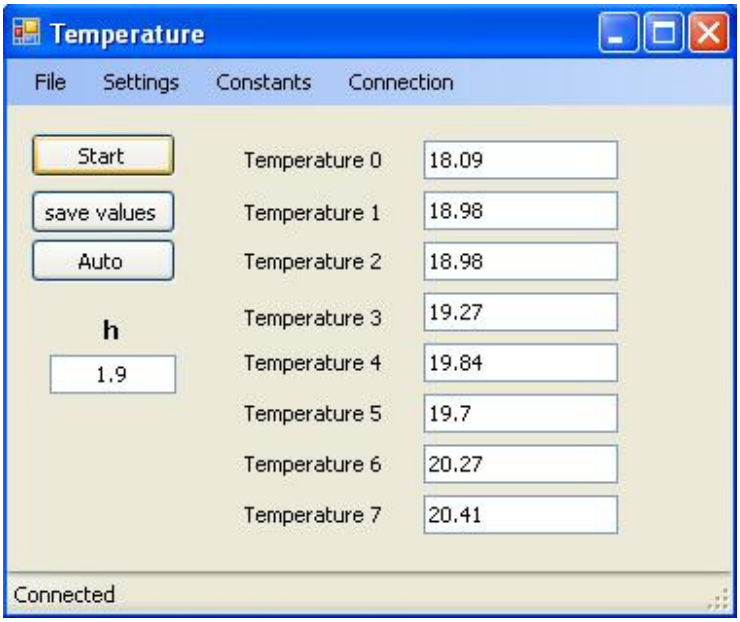
يقسم هذا البرنامج إلى قسمين رئيسين

### 3. 2. 1. برنامج القراءة من الجهاز وتسجيل البيانات

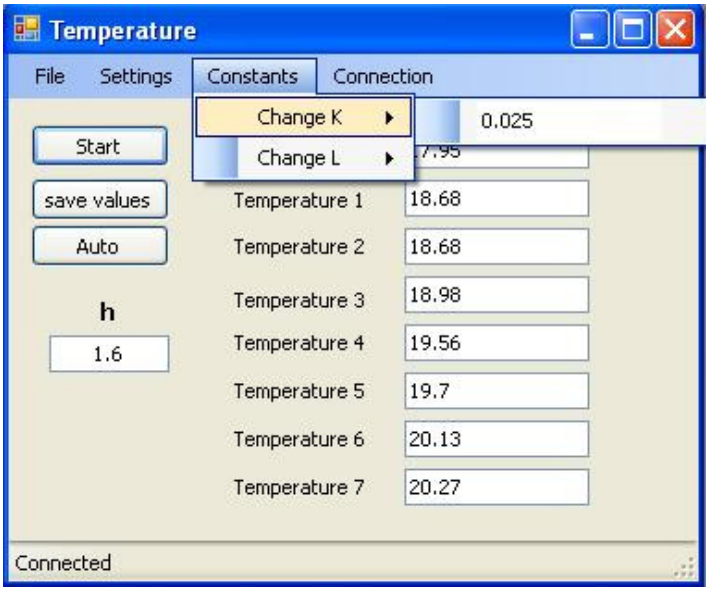
يعمل هذا البرنامج على قراءة قيم درجات الحرارة للحساسات الثماني وتسجيلها ضمن خاناتها بالترتيب. كذلك يعمل على حساب عامل انتقال الحرارة وفق العلاقة (3–1) كما هو الحال ضمن الجهاز بحد ذاته. ثم يقوم هذا البرنامج وعند الضغط على (*save*) بحفظ البيانات المقروءة وكذلك قيمة $h$ المحسوبة من هذه القيم. ويمكن فيه تعديل المسافة بين الحساسات المعنية بالقياس وكذلك عامل الانتقال الحراري بالتوصيل للسائل الذي يتم قياس عامل انتقال الحرارة بالحمل له.




الشكل (3–7) إنشاء اتصال مع الجهاز

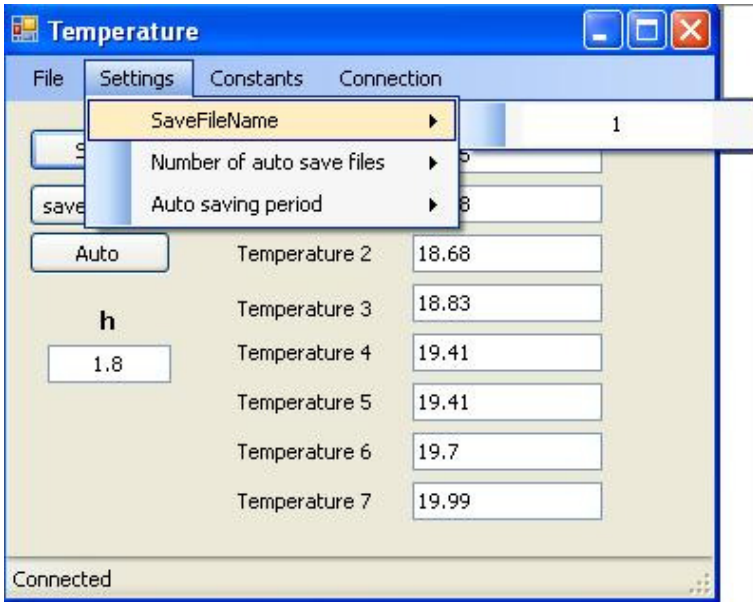



الشكل (3–8) الضغط على زر (*start*) ليقرأ البرنامج القيم من الجهاز

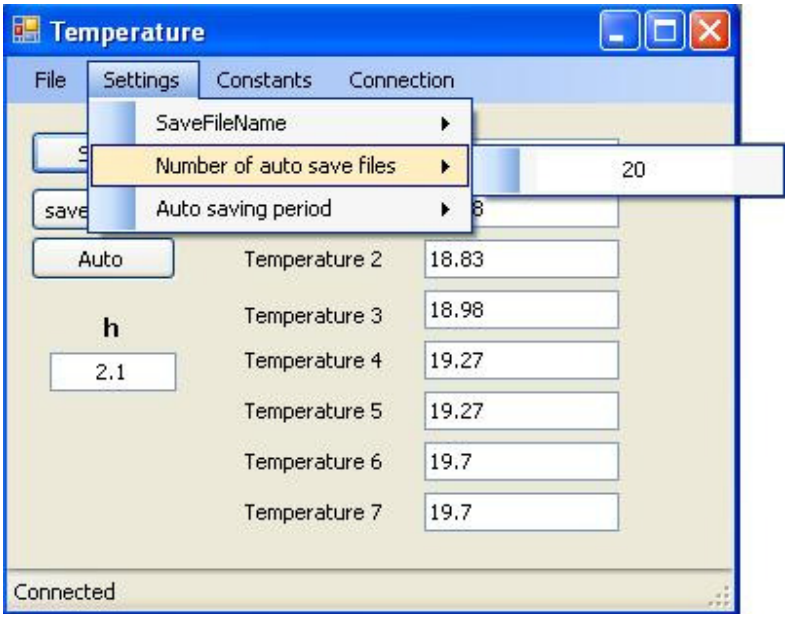



الشكل (3–9) تحديد قيم $k$ عامل التوصيل للهواء وكذلك المسافة بين الحساسات المعنية

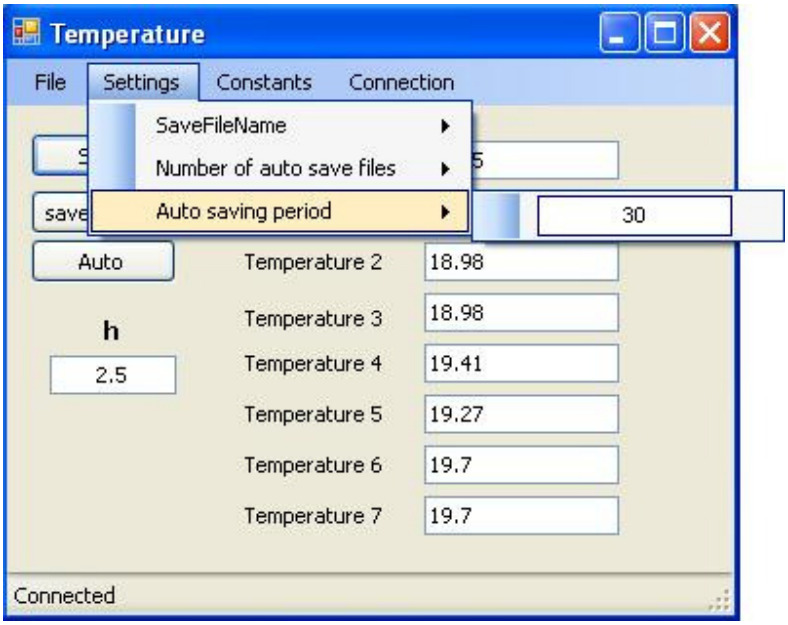
يمكن أيضا بالضغط على زر (*Auto*) حفظ مجموعة من القياسات المتتالية لنقطة قياس معينة بفارق زمني يمكن تحديده .




الشكل (3–10) تحديد اسم مجموعة الملفات المراد قراءتها (اسم النقطة المقاسة)




الشكل (3-11) تحديد عدد القراءات للنقطة المقاسة

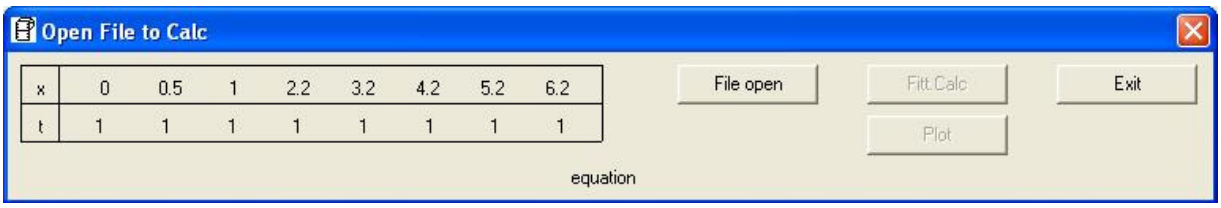



الشكل (3-12) تحديد الزمن بين القراءات (بالثانية)

### 3. 2. 2. برنامج معالجة البيانات المقروءة ورسم المنحنيات:

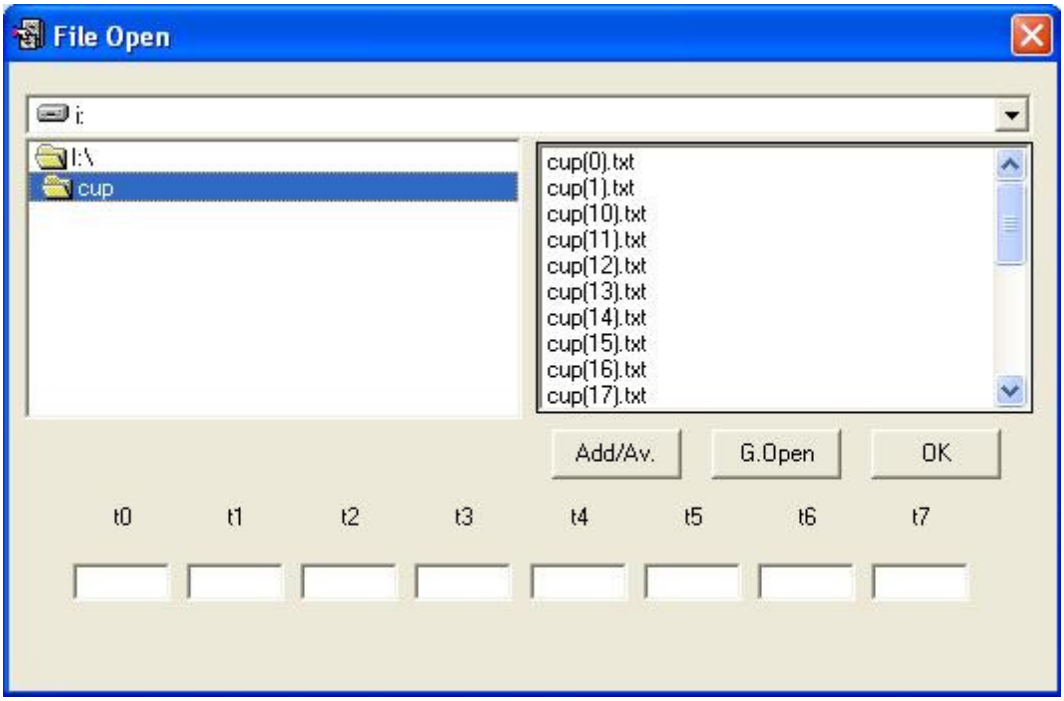
وفيه يمكن فتح أي ملف من الملفات المحفوظة سابقاً ومعالجتها وإيجاد استيفاء المربعات الصغرى فيها لمنحنى من الدرجة الخامسة. كذلك استيفاء هذه القيم المقاسة بمنحني من الشكل ($t = a - e^{bx}$). كذلك عند الحاجة لأخذ معدل مجموع قراءات وحساب الأخطاء لهذه القراءات وفق العلاقات المبينة سابقاً.

نقلع البرنامج فتظهر النافذة في الشكل (3-13)



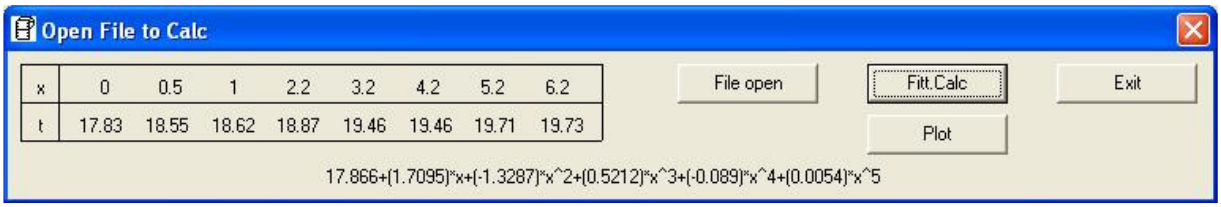

الشكل (3-13) فتح الملف المطلوب حسابه بالضغط على *File Open*

نختار الأمر *FileOpen* فتفتح نافذة الاستعراض. وفيها نختار موقع الملف المراد تحليله، أو نختار متوسط مجموعة من القراءات فنختار *Add/Av.* لكل ملف نختاره، ثم نضغط على *OK* ونحفظ اسم ملف معدل النتائج وأخطاء القياس وعدم الدقة في القراءات لهذه النقطة. كما ويمكن اختيار مجموعة تكرار قياس لنقطة مقاسة عن طريق الضغط على *G.Open*.



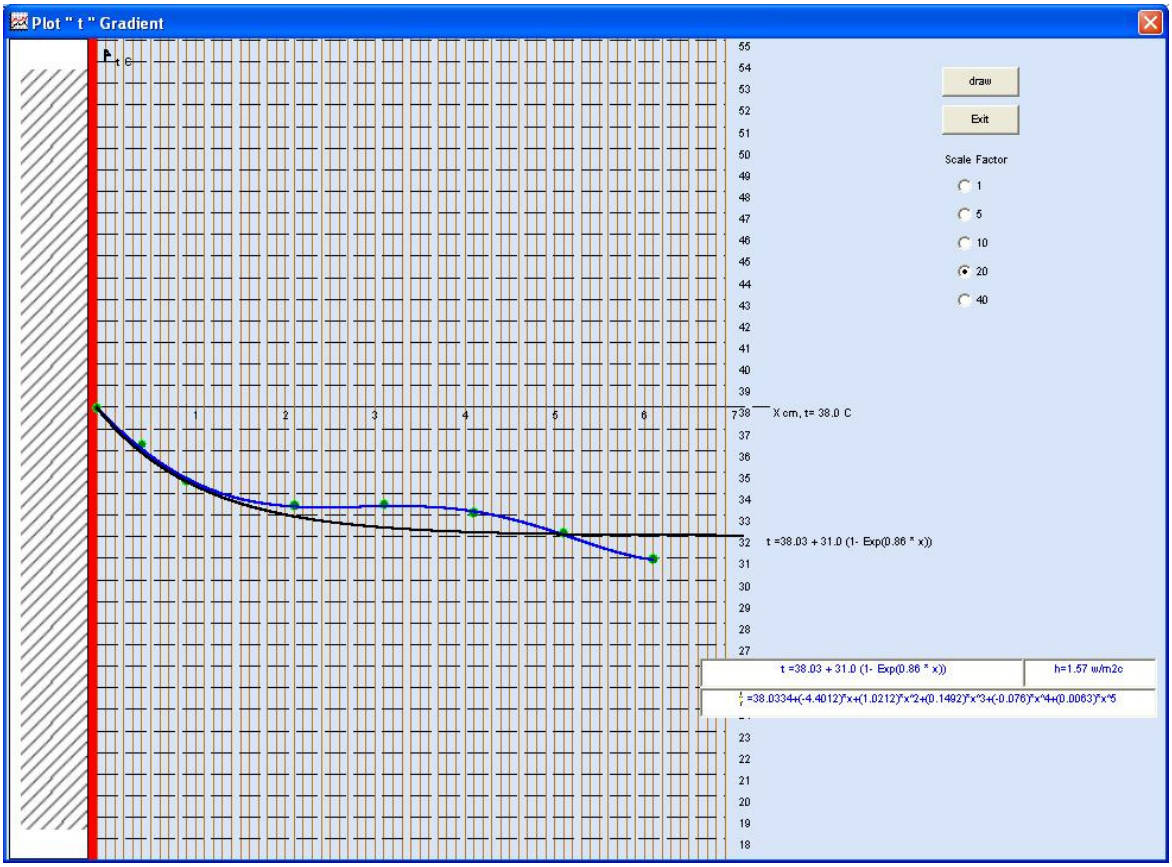

الشكل (3-14) نافذة الاستعراض لقراءة ملفات النقاط المقاسة

نعود بعدها للنافذة الأولى للبرنامج ونختار *Fit.calc* لحساب استيفاء الدرجة الخامسة لمنحنى نقاط القياس الثماني. وتظهر معادلة الاستيفاء في المكان *equation*.



الشكل (3–15) ظهور معادلة الاستيفاء من الدرجة الخامسة

لرسم هذا التدرج الحراري واستيفاءه نضغط الزر *plot* فتفتح النافذة الخاصة بالطباعة. نحدد فيها مقياس الطباعة المراد ونضغط الزر (*draw*) فنرسم التوزع الحراري لنقطة القياس تلك مع استيفاءاتها من الدرجة الخامسة وكذلك استيفاءها بقانون نيوتن للتبريد. كما وتظهر قيمة عامل انتقال الحرارة بالحمل لتلك النقطة.




الشكل (3–16) التوزع الحراري ومعادلات الاستيفاء لنقطة قياس معينة

# الفصل الرابع

# النتائج التجريبية والنتائج الحسابية

## 4. 1. مقدمة

إن الغاية الأساسية من الجهاز هي القياس الموضعي لعامل انتقال الحرارة بالحمل الحر وفق الشروط الطبيعية لهواء الغرفة. ولتقدير المجال المراد قياسه للجدران والأسقف والنوافذ كان لا بد من تقدير درجة حرارة السطح الداخلي للغرفة. بالاستعانة بالجداول المقدمة من *ASHRAE 2009* [1] (حساب معاملات انتقال الحرارة)، وبفرض الشروط التصميمية الخارجية والداخلية الموصى بها لمدينة دمشق وهي: صيفاً *40*[°C] خارجي و *25* [°C] داخلي وشتاءً *-2* [°C] خارجي و *20* [°C] داخلي، وتركيبة جدران اعتيادية غير معزولة بمعاملات انتقال الحرارة كما في (م-3) كانت النتيجة كما هو مبين بالجدول (4-1).

الجدول (4-1) تقدير حرارة السطوح المقاسة عند شروط حرارية مختلفة

| | | | |
|---|---|---|---|
| $T_{out}$ | = | -2 | [°C] |
| $T_{in}$ | = | 20 | [°C] |

| العنصر | q [w/m$^2$] | $Ts_{in}$ [°C] | $\Delta T=Ts_{in}-T_{in}$ |
|---|---|---|---|
| سقف | -26.84 | 15.706 | -4.2944 |
| جدار | -38.5 | 15.38 | -4.62 |
| نافذة | -122.32 | 7.768 | -12.232 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| $T_{out}$ | = | 40 | [°C] |
| $T_{in}$ | = | 25 | [°C] |

| العنصر | q [w/m$^2$] | $Ts_{in}$ [°C] | $\Delta T=Ts_{in}-T_{in}$ |
|---|---|---|---|
| سقف | 18.3 | 27.928 | 2.928 |
| جدار | 26.25 | 28.15 | 3.15 |
| نافذة | 83.4 | 33.34 | 8.34 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| $T_{out}$ | = | 10 | [°C] |
| $T_{in}$ | = | 20 | [°C] |

| العنصر | q [w/m$^2$] | $Ts_{in}$ [°C] | $\Delta T=Ts_{in}-T_{in}$ |
|---|---|---|---|
| سقف | -12.2 | 18.048 | -1.952 |
| جدار | -17.5 | 17.9 | -2.1 |
| نافذة | -55.6 | 14.44 | -5.56 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| $T_{out}$ | = | 35 | [°C] |
| $T_{in}$ | = | 25 | [°C] |

| العنصر | q [w/m$^2$] | $Ts_{in}$ [°C] | $\Delta T=Ts_{in}-T_{in}$ |
|---|---|---|---|
| سقف | 12.2 | 26.952 | 1.952 |
| جدار | 17.5 | 27.1 | 2.1 |
| نافذة | 55.6 | 30.56 | 5.56 |

حيث:

$T_{out}$: درجة حرارة الهواء الخارجي.

$T_{in}$: درجة حرارة الهواء الداخلي.

$Ts_{in}$: درجة حرارة سطح الجدار الداخلي.

$\Delta T$: مجال درجات الحرارة المراد قياسه ويساوي إلى $Ts_{in}$-$T_{in}$

يتبين من الجدول أن أقصى مجال لدرجات الحرارة المراد قياسه لحالة العمل الصيفي هي بالتقريب: للجدران [°C] *3.2* وللأسقف [°C] *2.93* وللنوافذ [°C] *8.3*، والقصوى لحالة التشغيل الشتوي هي بالتقريب: للجدران [°C]*4.3* وللأسقف [°C] *4.63* وللنوافذ [°C] *12.2* (هذه القيم لمدينة دمشق). مما يعني عدم فعالية الجهاز بشكل عام لقياس هذه الأنواع وفق الشروط الطبيعية العادية. مما وجه العمل باتجاه قياس نماذج ذات مجالات أكبر لدرجة الحرارة.

## 4. 2. الطريقة

تم القيام بعدد من التجارب على عدد من السطوح (شاقولية وأفقية). ولمقارنة النتائج تم الحساب التحليلي من علاقات نوسلت المبينة بالجدول (1–1). مع فرض أن:

- الهواء ساكن
- عدم وجود أي تأثير خارجي (منابع حرارية)
- استقرار درجات الحرارة واستقرار المجال الحراري
- تقريبات بوسنيك

وأقيمت التجربة في وسط غرفة مغلقة الأبواب والنوافذ بعيدة عن الجدران والمصادر الحرارية (الحاسوب والقائم على التجربة مثلاً).

## 4. 3. التجارب

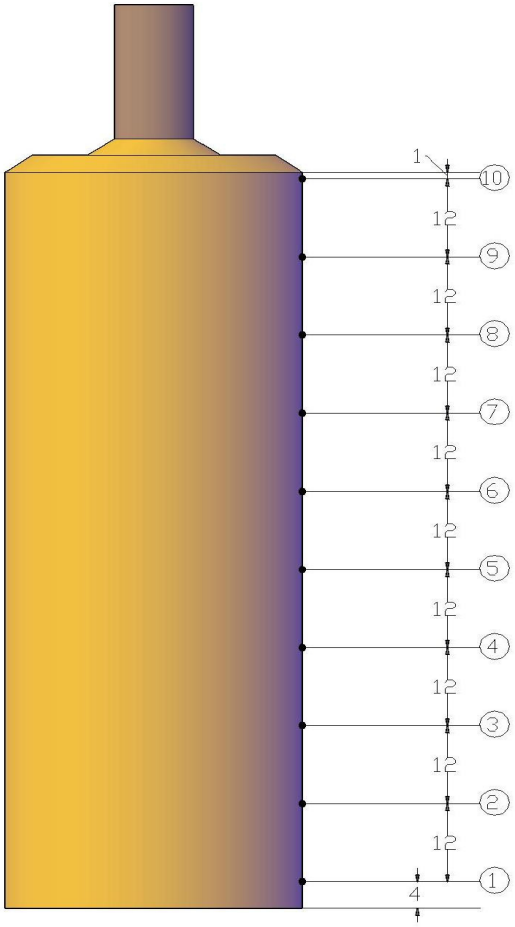
### 4. 3. 1. انتقال أفقي للحرارة

. لتقدير عامل انتقال الحرارة بالحمل الحر تم العمل على حساب عدد رايلي الموضعي ثم عدد نوسلت الموضعي ومنه عامل انتقال الحرارة بالحمل الحر وذلك بالاستعانة بجداول مواصفات الهواء (م–1). وبمساعدة برنامج *CURVE EXPERT* تمت معالجة البيانات وإيجاد الشكل العام لمعادلة معامل انتقال الحرارة للحمل الحر وحساب التكامل.

#### 4. 3. 1. 1. اسطوانة شاقولية

تمت التجربة على اسطوانة شاقولية ذات القطر *38.5cm* والارتفاع *112 cm*. تمت المحافظة على درجة حرارة ثابتة للاسطوانة عن طريق تيرموستات يتحكم بسخان كهربائي لتسخين الماء داخل الاسطوانة. تم عيار درجة حرارة الماء ضمن الاسطوانة على *40 °C*. بتطبيق الفرضيات السابقة وباعتبار 10 نقاط لقياس عامل انتقال الحرارة موزعة كما بالشكل (4–1). تستخدم لكل نقطة قياس مصفوفة الحساسات

الثماني باتجاه $x$ عامودي على السطح (لقياس التدرج الحراري). تم تكرار القياس لكل نقطة من النقاط *20* مرة بفارق زمني بين القراءات *15 Sec*.




الشكل (4–1) توزع نقاط القياس على الاسطوانة الشاقولية.

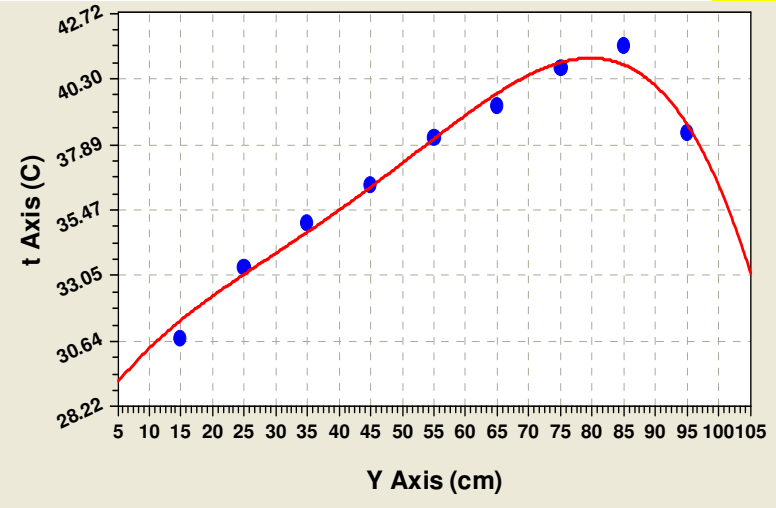
وكانت القيم الناتجة عن البرنامج بعد أخذ الـ 20 قراءة بالحسبان كما هي مبينة بالجدول (4–2):

الجدول (4–2) القيم الناتجة عن برنامج معالجة البيانات المقاسة للاسطوانة الشاقولية

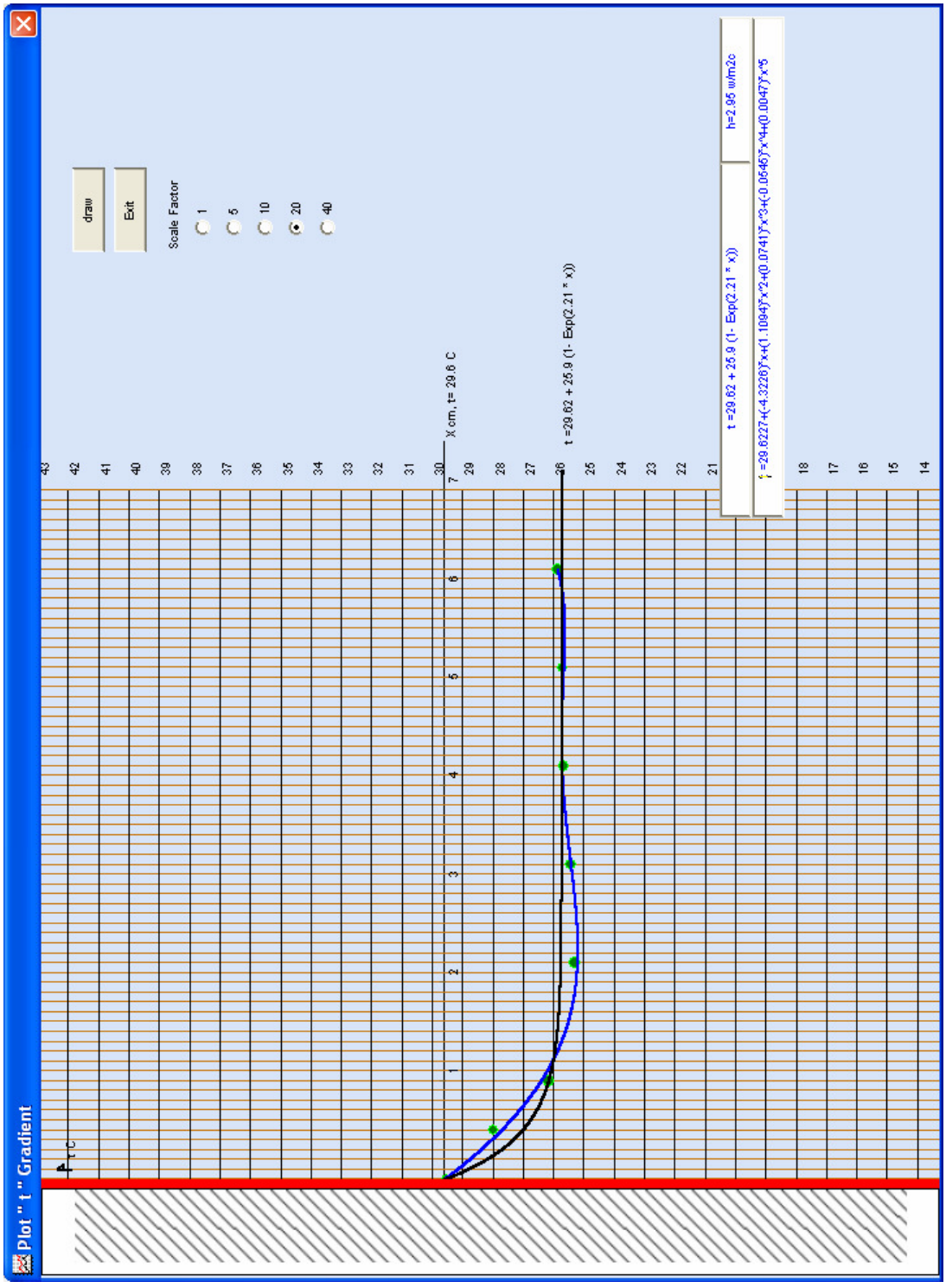
| النقطة | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| حساس1 | t0 [°C] | 29.55 | 30.75 | 33.38 | 35.02 | 36.71 | 38.14 | 39.29 | 40.7 | 41.51 | 38.31 |
| حساس2 | t1 [°C] | 28 | 28.85 | 29.03 | 29.06 | 29.83 | 29.64 | 29.32 | 32.78 | 32.6 | 30.62 |
| حساس3 | t2 [°C] | 26.18 | 26.77 | 26.91 | 26.94 | 27.59 | 27.39 | 27.34 | 29.45 | 29.65 | 28.63 |
| حساس4 | t3 [°C] | 25.33 | 25.89 | 25.86 | 26 | 26.47 | 22.67 | 25.56 | 27.48 | 27.77 | 27.43 |
| حساس5 | t4 [°C] | 25.46 | 25.82 | 25.7 | 25.84 | 26.33 | 26.15 | 26.36 | 26.96 | 27.24 | 27.15 |
| حساس6 | t5 [°C] | 25.68 | 25.96 | 25.72 | 25.9 | 26.24 | 26.29 | 26.43 | 26.69 | 27.07 | 27.05 |
| حساس7 | t6 [°C] | 25.72 | 25.95 | 25.59 | 25.72 | 26.19 | 26.31 | 26.28 | 26.4 | 26.89 | 26.91 |
| حساس8 | t7 [°C] | 25.89 | 26.02 | 25.7 | 25.85 | 26.29 | 26.43 | 26.33 | 26.42 | 26.84 | 26.9 |
| انحراف 1 | σ(0) | 0.103 | 0.117 | 0.318 | 0.722 | 0.474 | 0.287 | 0.334 | 0.284 | 0.282 | 0.44 |
| انحراف 2 | σ(1) | 0.231 | 0.159 | 0.36 | 0.224 | 0.211 | 0.412 | 0.74 | 1)= 1 | 0.49 | 0.495 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| انحراف 3 | σ(2) | 0.099 | 0.088 | 0.145 | 0.082 | 0.081 | 0.216 | 0.377 | 0.251 | 0.388 | 0.24 |
| انحراف 4 | σ(3) | 0.064 | 0.079 | 0.193 | 0.118 | 0.148 | 7.559 | 0.082 | 0.152 | 0.235 | 0.126 |
| انحراف 5 | σ(4) | 0.064 | 0.103 | 0.13 | 0.116 | 0.116 | 0.164 | 0.159 | 0.15 | 0.105 | 0.087 |
| انحراف 6 | σ(5) | 0.064 | 0.059 | 0.083 | 0.087 | 0.094 | 0.166 | 0.176 | 0.137 | 0.065 | 0.06 |
| انحراف 7 | σ(6) | 0.161 | 0.083 | 0.113 | 0.083 | 0.117 | 0.098 | 0.19 | 0.152 | 0.124 | 0.093 |
| انحراف 8 | σ(7) | 0.126 | 0.068 | 0.103 | 0.081 | 0.109 | 0.158 | 0.253 | 0.134 | 0.064 | 0.104 |
| انحراف عام 1 | σ(0)t | 0.033 | 0.037 | 0.101 | 0.228 | 0.15 | 0.091 | 0.105 | 0.09 | 0.089 | 0.139 |
| انحراف عام 2 | σ(1)t | 0.073 | 0.05 | 0.114 | 0.071 | 0.067 | 0.13 | 0.234 | 0.316 | 0.155 | 0.157 |
| انحراف عام 3 | σ(2)t | 0.031 | 0.028 | 0.046 | 0.026 | 0.026 | 0.068 | 0.119 | 0.079 | 0.123 | 0.076 |
| انحراف عام 4 | σ(3)t | 0.02 | 0.025 | 0.061 | 0.037 | 0.047 | 2.39 | 0.026 | 0.048 | 0.074 | 0.04 |
| انحراف عام 5 | σ(4)t | 0.02 | 0.033 | 0.041 | 0.037 | 0.037 | 0.052 | 0.05 | 0.047 | 0.033 | 0.028 |
| انحراف عام 6 | σ(5)t | 0.02 | 0.019 | 0.026 | 0.028 | 0.03 | 0.053 | 0.056 | 0.043 | 0.021 | 0.019 |
| انحراف عام 7 | σ(6)t | 0.051 | 0.026 | 0.036 | 0.026 | 0.037 | 0.031 | 0.06 | 0.048 | 0.039 | 0.029 |
| انحراف عام 8 | σ(7)t | 0.04 | 0.022 | 0.033 | 0.026 | 0.035 | 0.05 | 0.08 | 0.042 | 0.02 | 0.033 |
| عدم دقة 1 | U(0) | 0.124 | 0.126 | 0.157 | 0.258 | 0.192 | 0.15 | 0.16 | 0.15 | 0.149 | 0.184 |
| عدم دقة 2 | U(1) | 0.14 | 0.13 | 0.165 | 0.139 | 0.137 | 0.177 | 0.263 | 0.338 | 0.196 | 0.197 |
| عدم دقة 3 | U(2) | 0.124 | 0.123 | 0.129 | 0.123 | 0.123 | 0.138 | 0.169 | 0.144 | 0.172 | 0.142 |
| عدم دقة 4 | U(3) | 0.122 | 0.123 | 0.135 | 0.126 | 0.129 | 2.393 | 0.123 | 0.129 | 0.141 | 0.126 |
| عدم دقة 5 | U(4) | 0.122 | 0.124 | 0.127 | 0.125 | 0.125 | 0.131 | 0.13 | 0.129 | 0.124 | 0.123 |
| عدم دقة 6 | U(5) | 0.122 | 0.121 | 0.123 | 0.123 | 0.124 | 0.131 | 0.132 | 0.128 | 0.122 | 0.121 |
| عدم دقة 7 | U(6) | 0.13 | 0.123 | 0.125 | 0.123 | 0.126 | 0.124 | 0.134 | 0.129 | 0.126 | 0.124 |
| عدم دقة 8 | U(7) | 0.126 | 0.122 | 0.124 | 0.123 | 0.125 | 0.13 | 0.144 | 0.127 | 0.122 | 0.124 |
| القيمة المحسوبة | H[w/m$^2$ °C] | 2.95 | 2.89 | 3.78 | 4.3 | 4.36 | 3.76 | 4.78 | 3.67 | 3.97 | 4.38 |
| عدم الدقة | Uh[w/m$^2$ °C] | 0.99 | 0.65 | 0.66 | 0.51 | 0.44 | 0.46 | 0.35 | 0.32 | 0.46 | 0.33 |

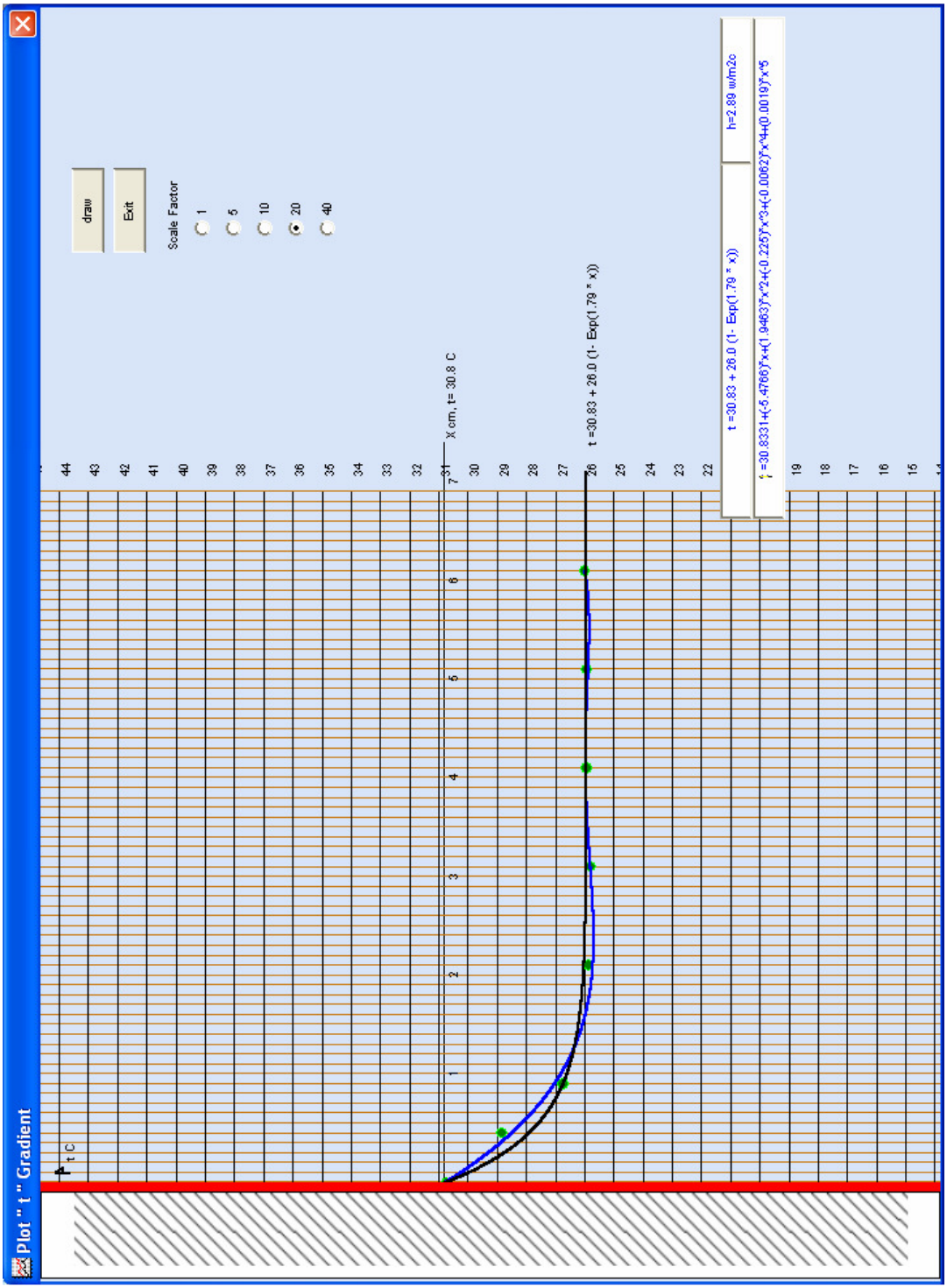
وبما أن الحساس ذو الرقم 1 يقيس درجة حرارة سطح الاسطوانة، نلاحظ أن سطح الاسطوانة لم يكن إيزوتيرمياً خلال التجربة. ومنحني توزع درجة الحرارة من الشكل:



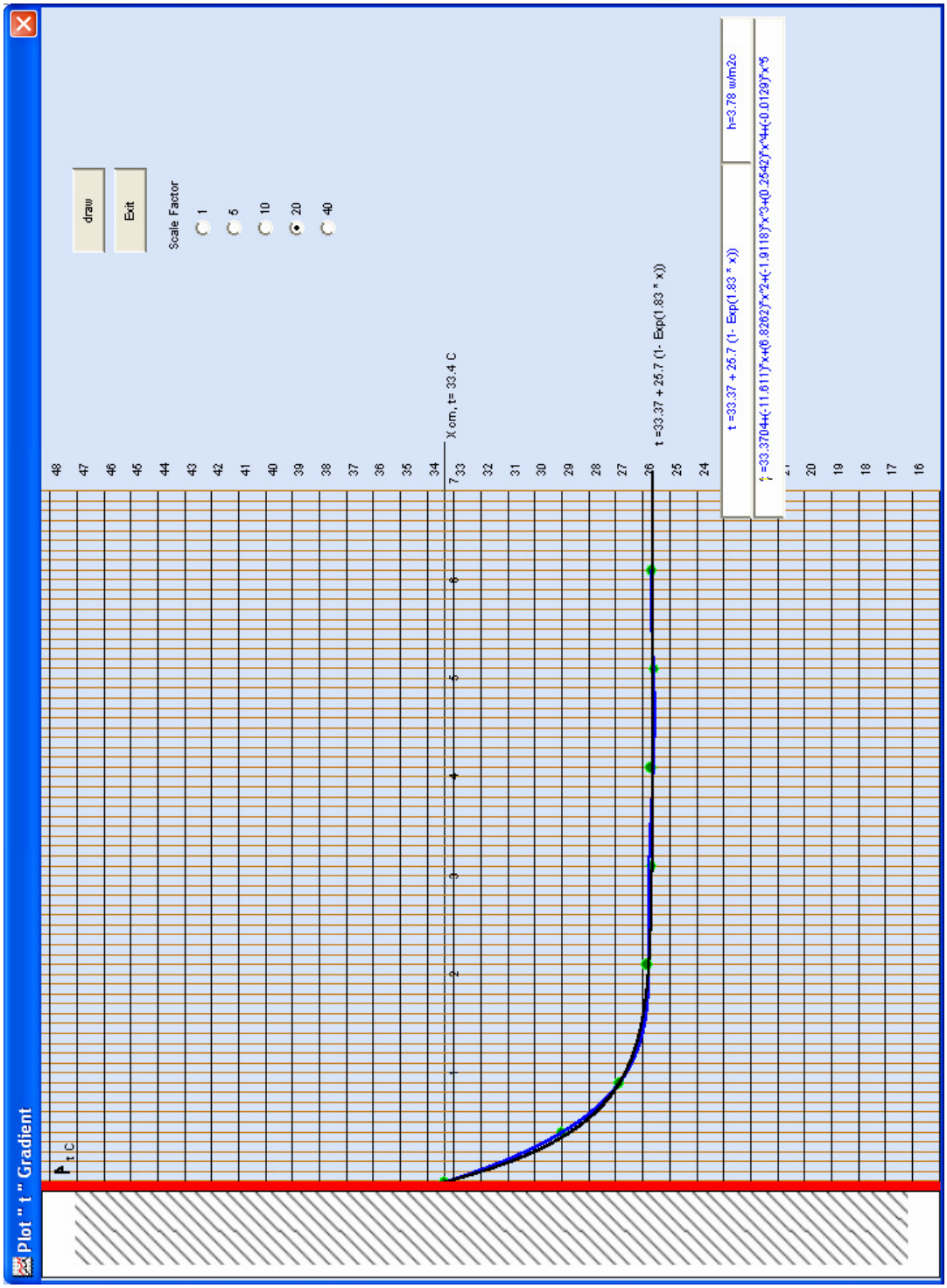

الشكل (4–2) تغير درجة حرارة سطح الاسطوانة كتابع للارتفاع



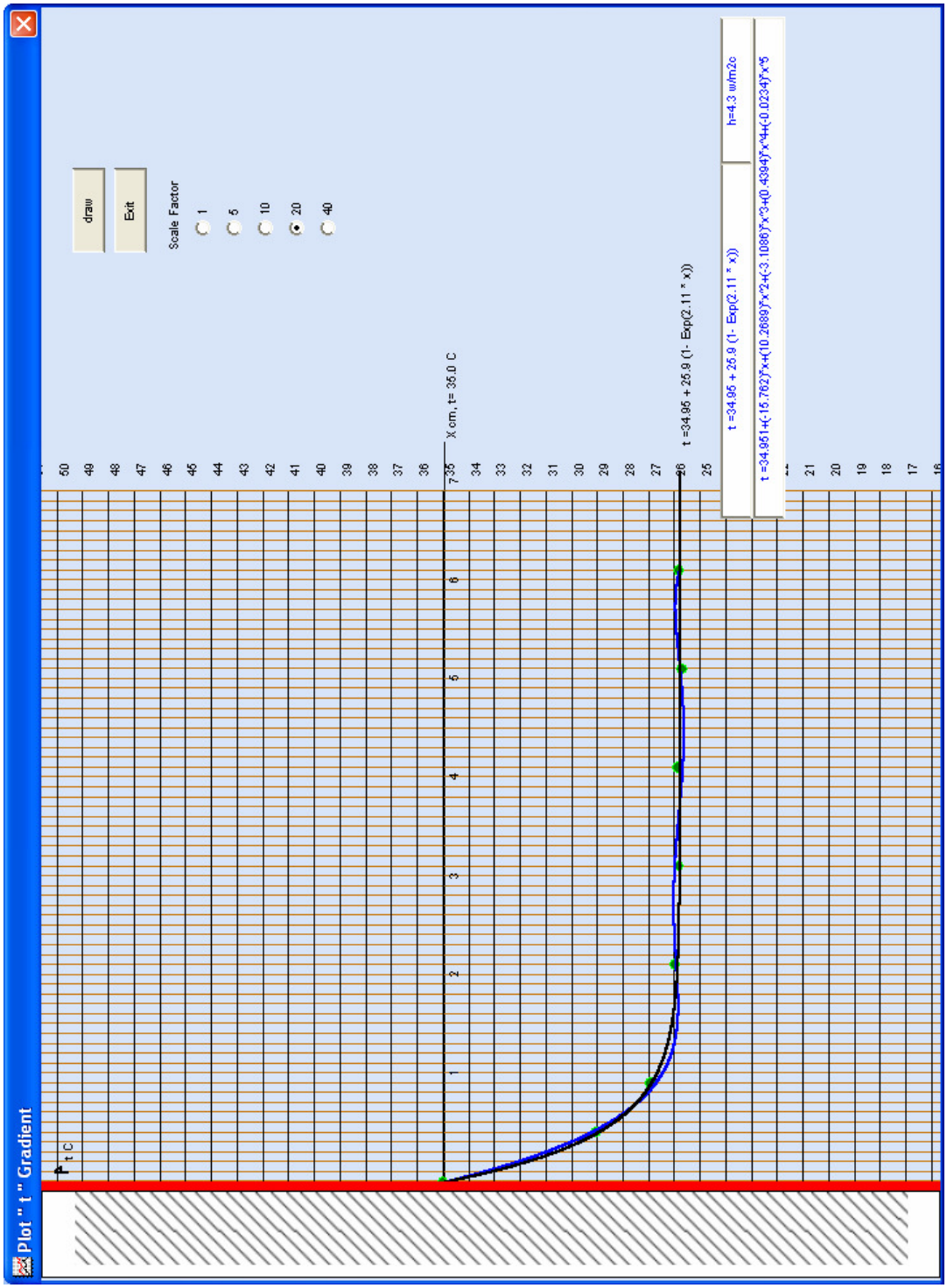

الشكل (4–3) التدرج الحراري في النقطة 1



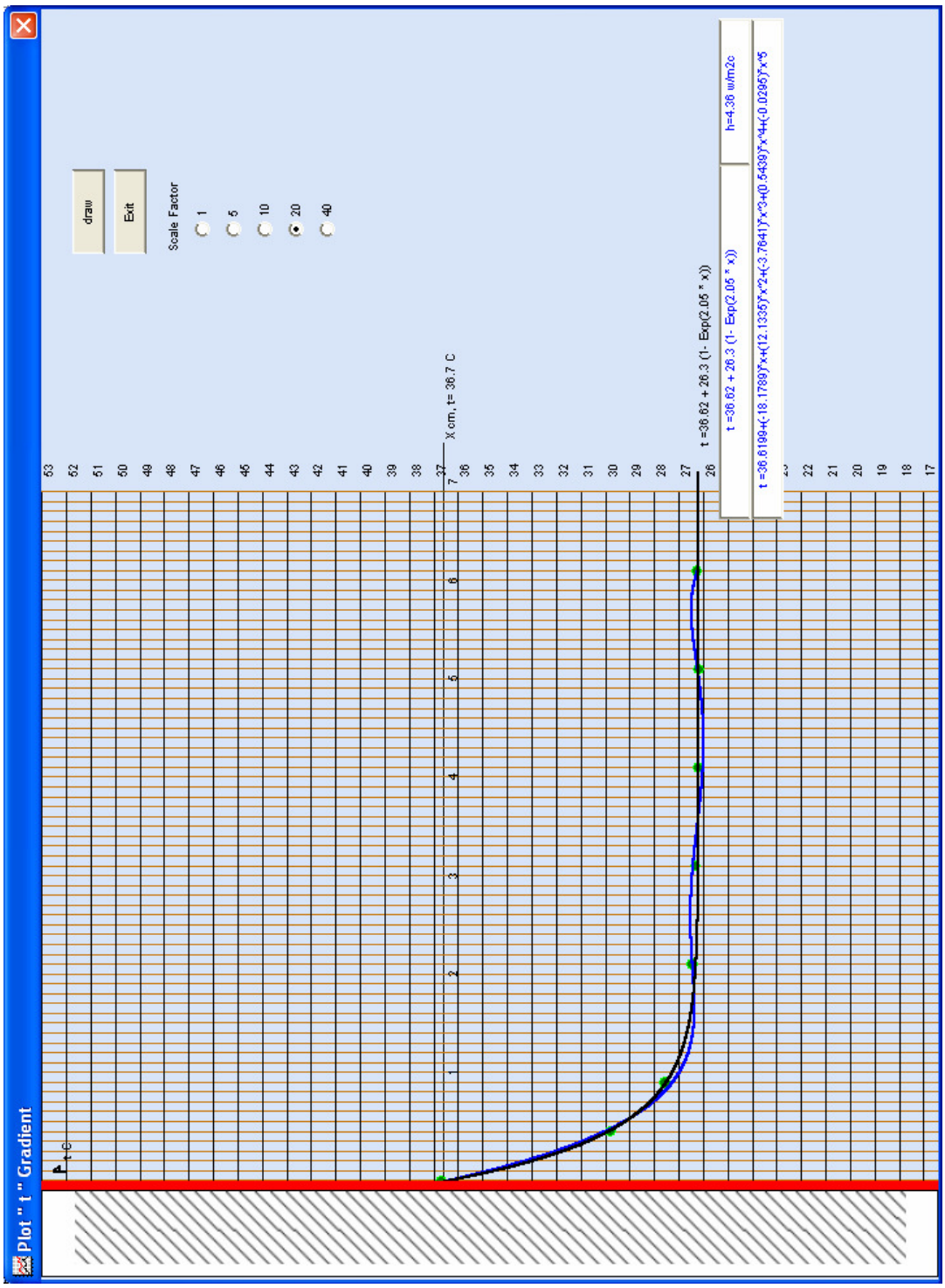

الشكل (4-4) التدرج الحراري في النقطة 2



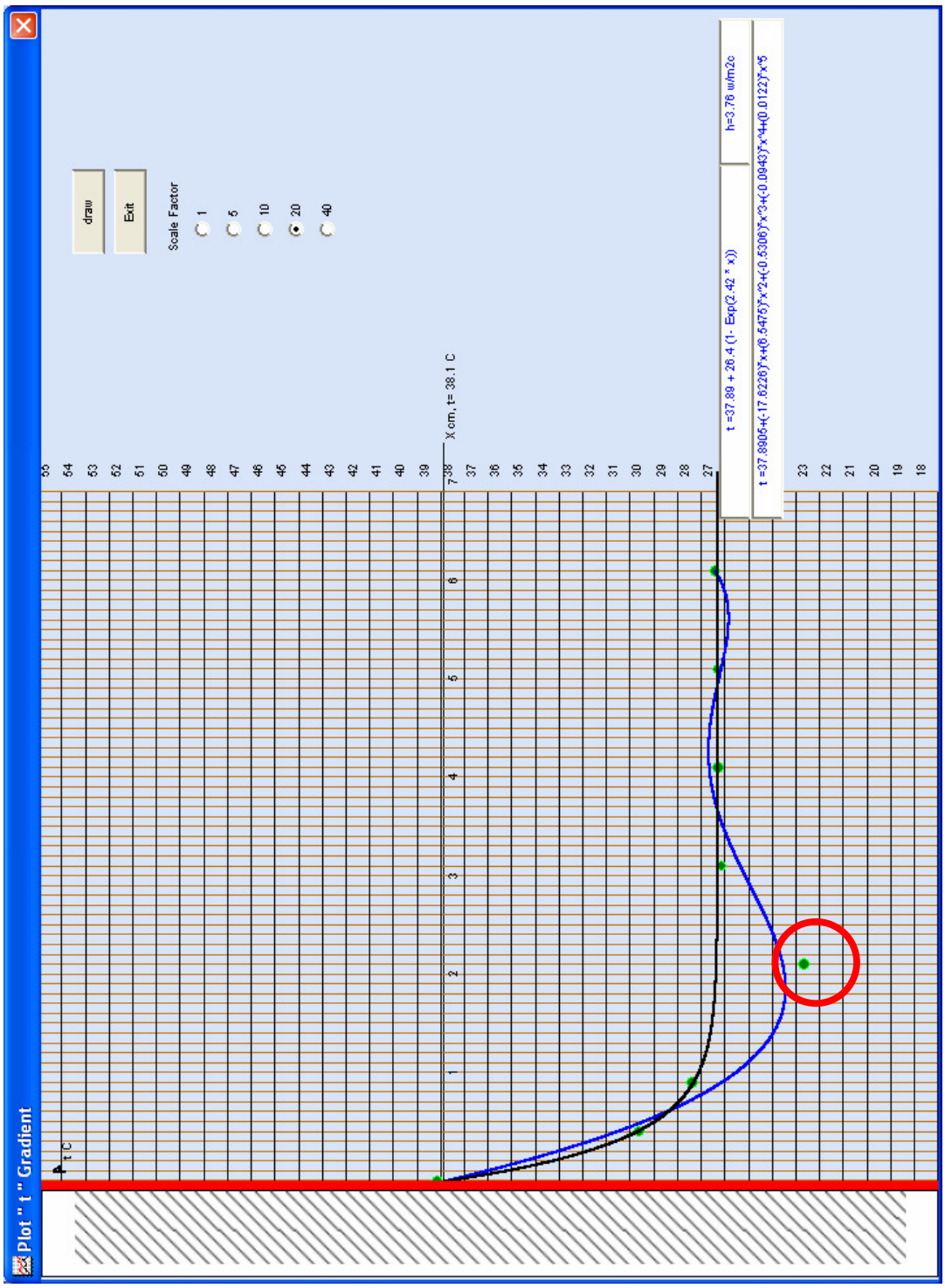

الشكل (4–5) التدرج الحراري في النقطة 3



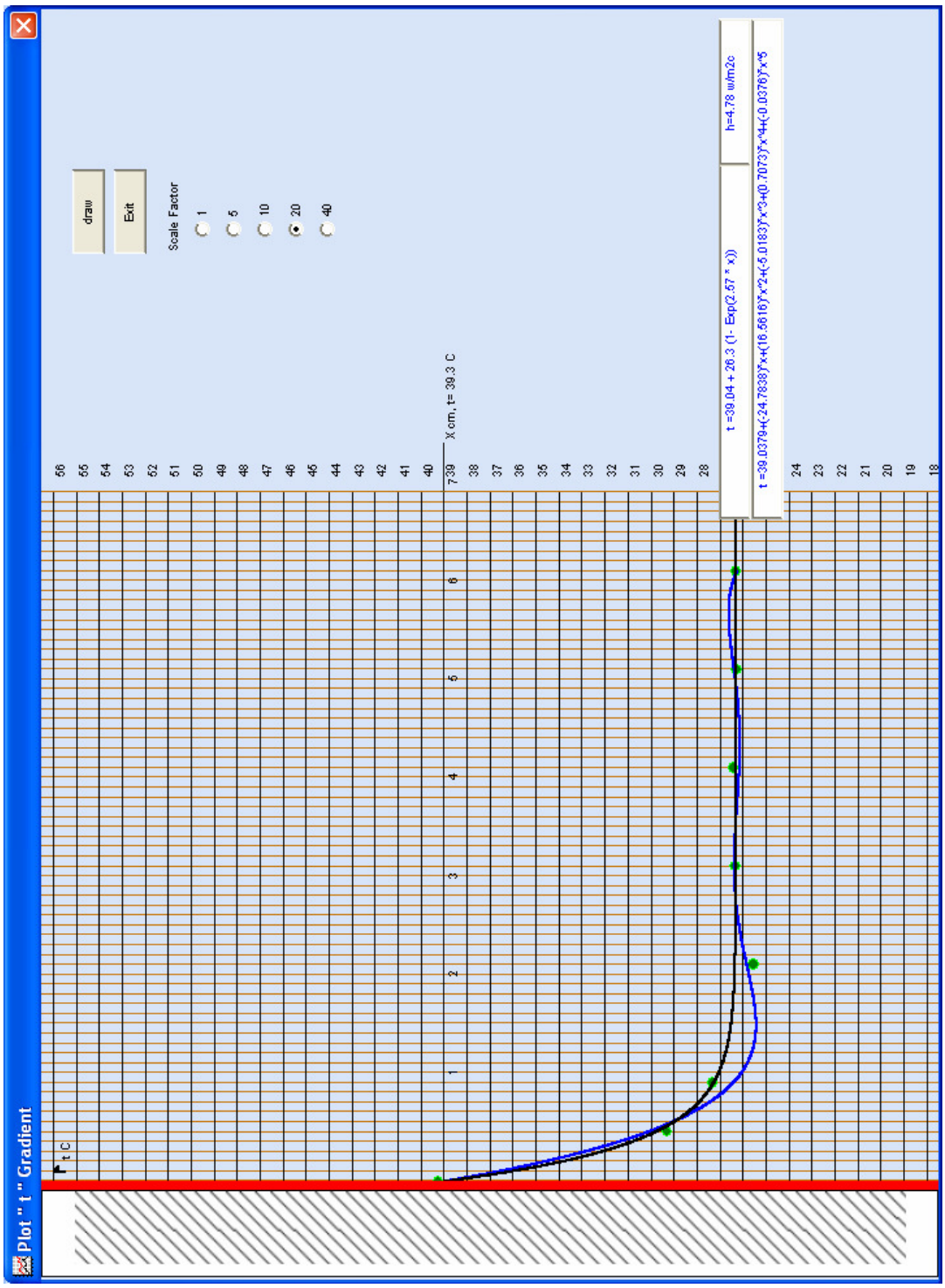

الشكل (4-6) التدرج الحراري في النقطة 4



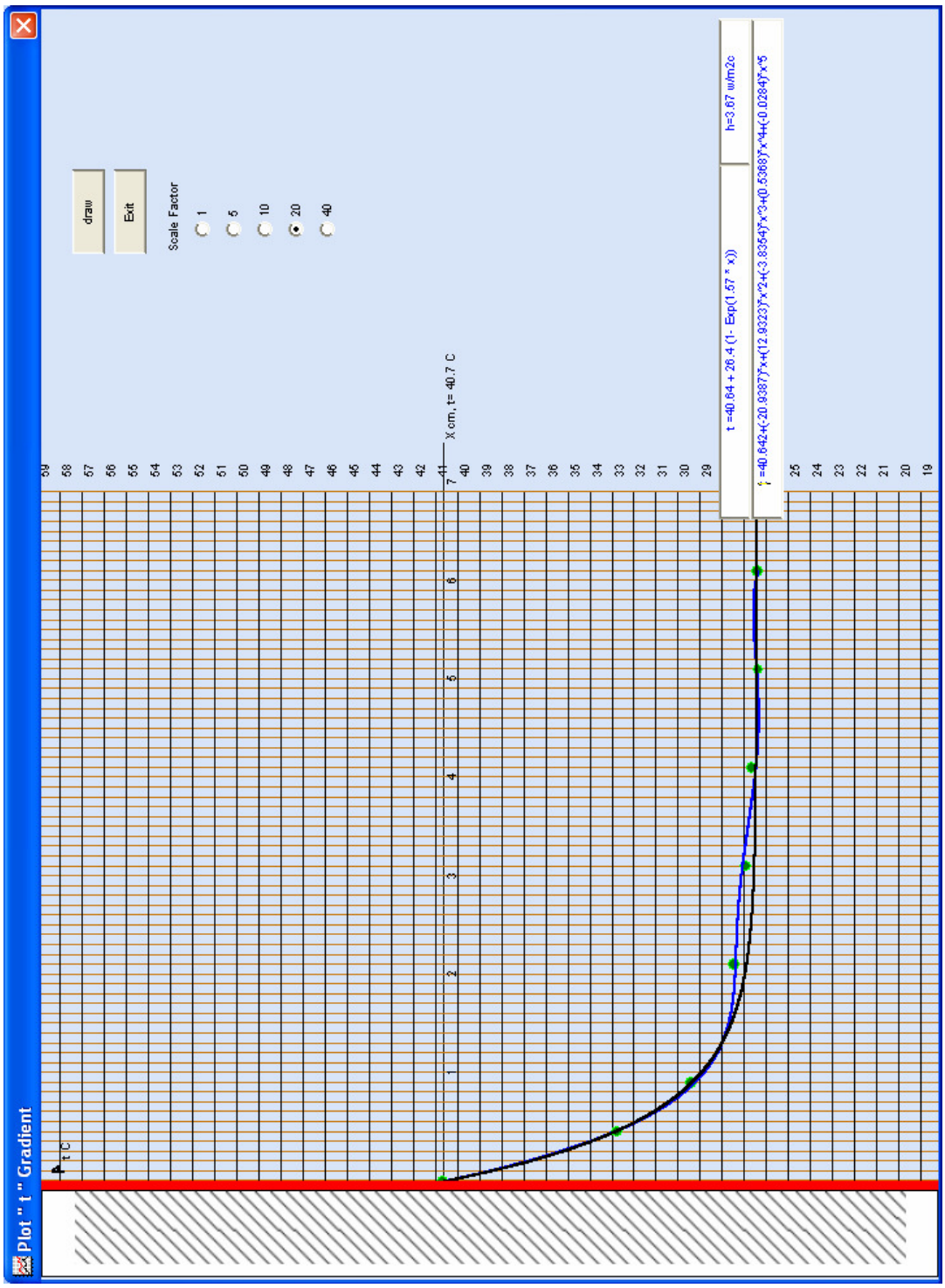

الشكل (4-7) التدرج الحراري في النقطة 5



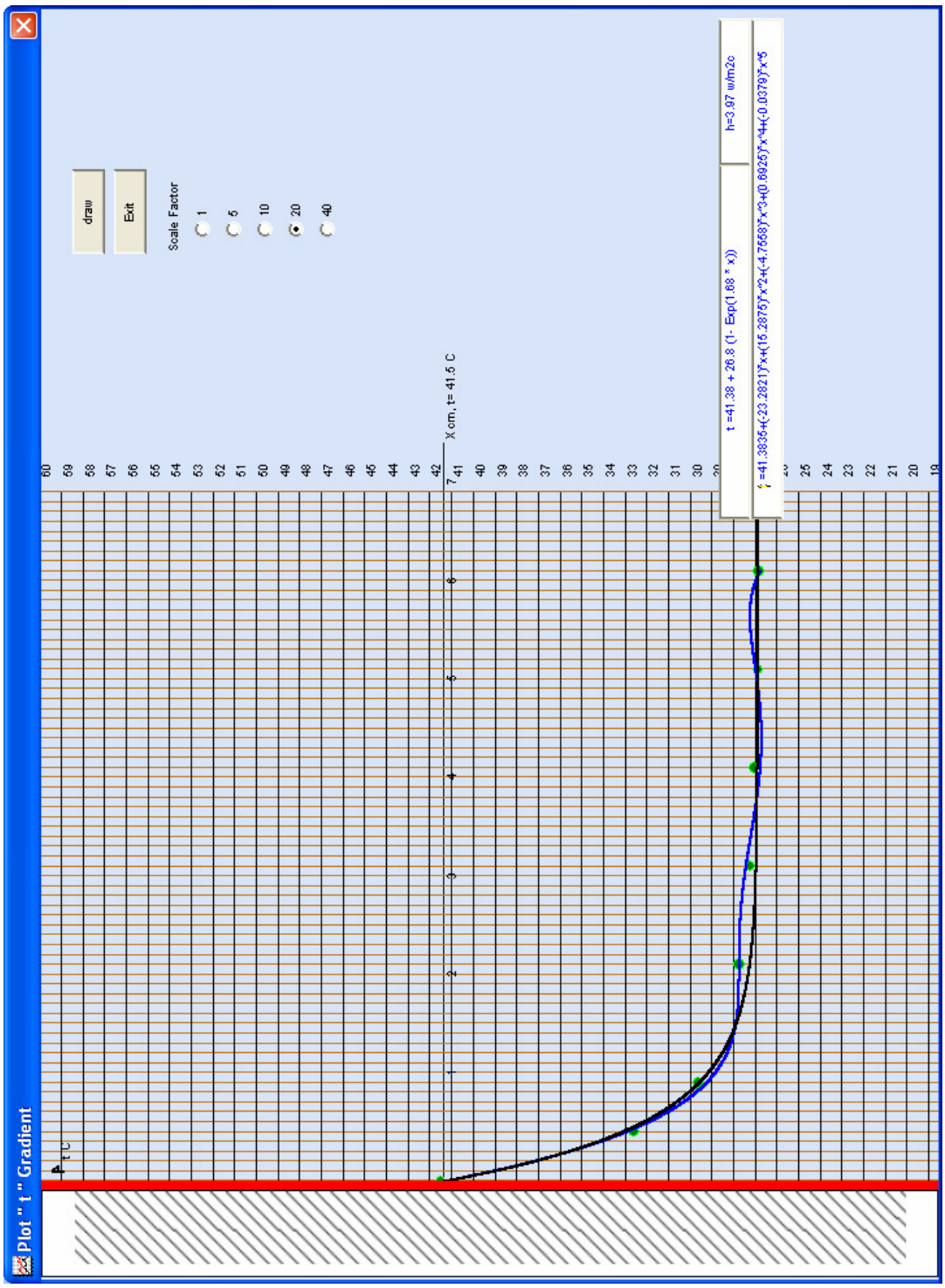

الشكل (4–8) التدرج الحراري في النقطة 6



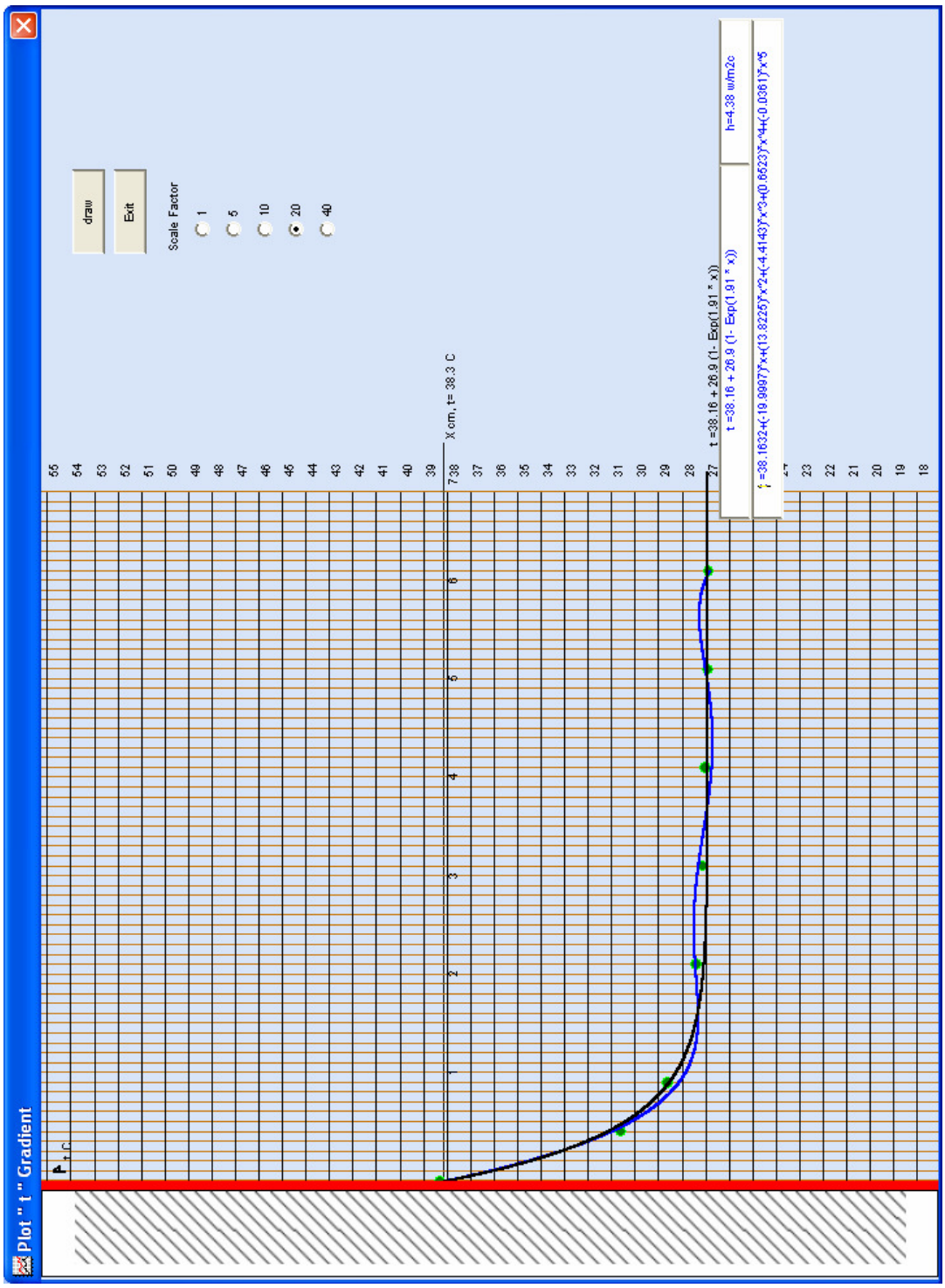

الشكل (4–9) التدرج الحراري في النقطة 7




الشكل (4–10) التدرج الحراري في النقطة 8




الشكل (4–11) التدرج الحراري في النقطة 9




الشكل (4–12) التدرج الحراري في النقطة 10

وبعد استيفاء توزع درجة الحرارة على سطح الاسطوانة (بالاتجاه$y$) كان من الشكل:

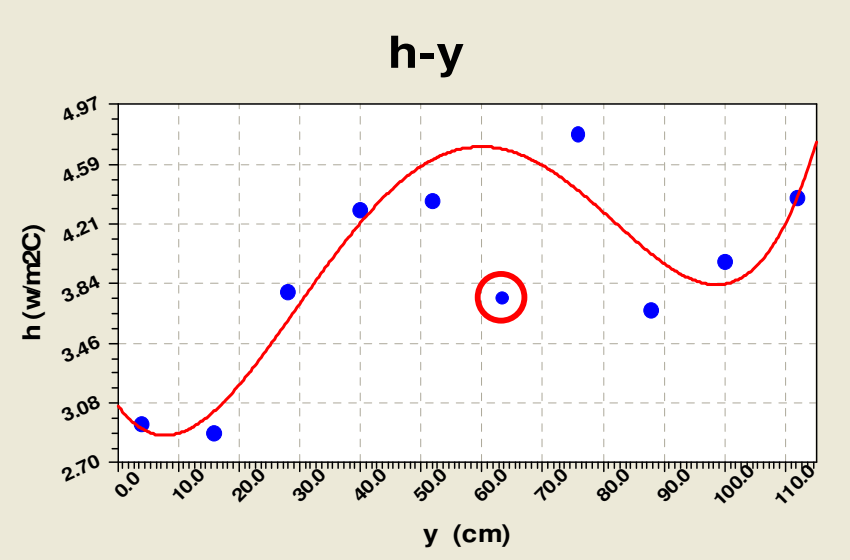
$$t = 27.59 + 0.353 \times y \; - 0.0085 \times y^2 + 0.00015 \times y^3 - 9.5 \times 10^{-7} \times y^4$$

وكون $\int_0^{112} t\,dy = 4063\ ^oC \times cm$ وبالتالي تكون درجة الحرارة الوسطية لسطح الاسطوانة $\bar{t} = \frac{4053}{112} = 36.3\ ^oC$. ودرجة الحرارة الوسطية للهواء المحيط $\bar{t}_i = 26.15\ ^oC$. وبالتالي تكون قيمة $\bar{h}_L$ الموافقة بتطبيق علاقات نوسلت المقدمة سابقاً هي كالتالي:

الجدول (4–3) قيمة عامل انتقال الحرارة الموافقة للاسطوانة الشاقولية

| $L$ [cm] | $\bar{t}_L$ [°C] | $\bar{t}_i$ [°C] | $Ra_L$ | $\overline{Nu}_L$ | $\bar{h}_L$ [w/m² °C] |
|---|---|---|---|---|---|
| **112** | **36.3** | **26.15** | **1.33E+09** | **134.27** | **3.117** |

كما كان توزع قيم عامل انتقال الحرارة بالحمل على طول الاسطوانة (بعد استثناء النقطة 6 الشاذة بشكل واضح) من الشكل




الشكل (4–13) منحنى استيفاء قيم $h$ كتابع للارتفاع $y$

نلاحظ أن توزع قيم $h$ غير خطي، وكذلك ولا يتجه باتجاه واحد. فهو متناقص ثم متزايد ثم متناقص ثم متزايد. إن هذا التوزع منطقي. فعند النقطة 10 تغير اتجاه الجريان الحراري من أفقي إلى شاقولي بتحول السطح إلى أفقي مما أثَّر على الانتقال الحراري ومنه على قيمة معامل الانتقال الحراري. كذلك الأمر بالنسبة للنقطة 1 حيث المقطع قبلها أفقي مما يؤثر أيضاً على شكل المجال الحراري. فلا ننسى أن قيمة $h$ تابعة لفرق درجات الحرارة بين السطح والهواء كما هي تابعة للخصائص الفيزيوحرارية للهواء أيضاً.

إن استيفاء قيم $h$ بمعادلة من الدرجة الخامسة هو من الشكل:

$$h = 3.063 - 0.052 \times y + 0.004 \times y^2 - 6.06 \times 10^{-5} y^3 + 2.28 \times 10^{-7} \times y^4 - 2.9 \times 10^{-10} \times y^5$$

ويكون $\int_0^{112} h\,dy = 443.76\ W/m^2C^o cm$. وبالتالي يكون عامل الانتقال الحراري الوسطي بالحمل هو $\bar{h} = \frac{443.76}{112} = 3.95 W/m^2C^o$.

**الفائدة العملية من النتيجة:**

يمكن حساب التدفق الحراري على طول الاسطوانة عملياً بمكاملة المنحنى الناتج لـ$h$ بتغير الارتفاع وضربه بمحيط الاسطوانة ومكاملة تابع درجة حرارة السطح على طول الاسطوانة، وهما $h=f(y), t=f(y)$.

وبالنتيجة يكون التدفق الحراري بالحمل على طول الاسطوانة:

$$\bar{q}_c = \bar{h}_c.A.(\bar{t}_s - t_{air}) = 3.95\times1.27\times(36.3-26.15) \cong 49.8\ W$$

ويكون التدفق الحراري على طول الاسطوانة بالإشعاع مساوياً:

$$\bar{q}_r = \bar{h}_r.A.(\bar{T}_s^4 - T_{air}^4) = 6.237\times10^{-8}\times1.27\times((36.3+273)^4-(26.15+273)^4) \cong 9.06\ W$$

حيث: $\bar{h}_r = \sigma.\varepsilon = 5.67\times10^{-8}\times0.11 \cong 6.237\times10^{-8}[\mathrm{W\ m^{-2}\ K^{-4}}]$، ومع العلم أن الاسطوانة مصنوعة من الستانلس ستيل اللماع وله $\varepsilon = 0.11$.

### 4. 3. 1. 2. براد منزلي

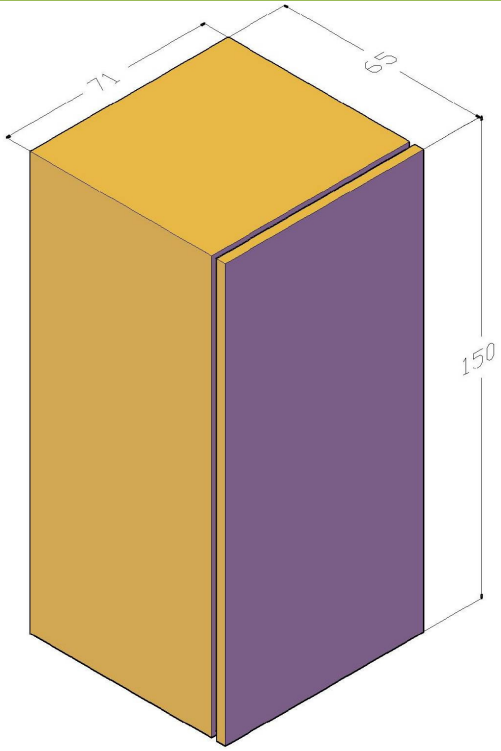
بنفس الفرضيات والتقريبات والبيئة السابقة، تم قياس التدرج الحراري للبراد المبين بالشكل (4-14) ذو الأبعاد 65×71×150 سم. بحيث تم قياس مجموعة من النقاط على الوجه الأمامي ومجموعة من النقاط على الجانبين ومجموعة من النقاط على السطح العلوي.

والقيم الناتجة عن البرنامج كما هي مبينة بالجدول (4-12):

الجدول (4-3) نتائج القياس وحساب الأخطاء لحالة البراد

| | | جانب | | سقف | | | أمام | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| النقطة | | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| حساس1 | t0 [°C] | 21.02 | 22.08 | 28.18 | 28.1 | 28.1 | 27.28 | 25.72 |
| حساس2 | t1 [°C] | 22.62 | 23.14 | 29.61 | 29.67 | 29.67 | 29.16 | 27.9 |
| حساس3 | t2 [°C] | 22.37 | 22.63 | 29.09 | 29.06 | 29.06 | 28.79 | 27.21 |
| حساس4 | t3 [°C] | 22.12 | 22.16 | 28.73 | 28.51 | 28.51 | 28.28 | 26.83 |
| حساس5 | t4 [°C] | 22.64 | 22.59 | 28.97 | 28.75 | 28.75 | 28.63 | 27.07 |
| حساس6 | t5 [°C] | 22.63 | 22.61 | 29.02 | 28.79 | 79 | 28.69 | 27.14 |
| حساس7 | t6 [°C] | 22.81 | 22.63 | 29.07 | 28.81 | 28.81 | 28.76 | 27.14 |
| حساس8 | t7 [°C] | 23.19 | 23.16 | 29.5 | 29.11 | 29.11 | 29 | 27.37 |
| انحراف 1 | σ(0) | 0.064 | 0 | 0.059 | 0.026 | 0 | 0.19 | 0.108 |
| انحراف 2 | σ(1) | 0 | 0.046 | 0.198 | 0.15 | 0.15 | 0.125 | 0.136 |
| انحراف 3 | σ(2) | 0.146 | 0.031 | 0.122 | 0.107 | 0.107 | 0.115 | 0.111 |
| انحراف 4 | σ(3) | 0.064 | 0.07 | 0.122 | 0.182 | 0.182 | 0.08 | 0.085 |
| انحراف 5 | σ(4) | 0.05 | 0.052 | 0.105 | 0.108 | 0.108 | 0.132 | 0.065 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **انحراف 6** | σ(5) | 0.031 | 0.039 | 0.06 | 0.121 | 0.121 | 0.095 | 0 |
| **انحراف 7** | σ(6) | 0.088 | 0.031 | 0 | 0.124 | 0.124 | 0.096 | 0 |
| **انحراف 8** | σ(7) | 0.056 | 0 | 0.08 | 0.121 | 0.121 | 0.096 | 0.124 |
| **انحراف عام 1** | σ(0)t | 0.014 | 0 | 0.013 | 0.006 | 0 | 0.043 | 0.024 |
| **انحراف عام 2** | σ(1)t | 0 | 0.01 | 0.044 | 0.033 | 0.033 | 0.028 | 0.03 |
| **انحراف عام 3** | σ(2)t | 0.033 | 0.007 | 0.027 | 0.024 | 0.024 | 0.026 | 0.025 |
| **انحراف عام 4** | σ(3)t | 0.014 | 0.016 | 0.027 | 0.041 | 0.041 | 0.018 | 0.019 |
| **انحراف عام 5** | σ(4)t | 0.011 | 0.012 | 0.023 | 0.024 | 0.024 | 0.03 | 0.015 |
| **انحراف عام 6** | σ(5)t | 0.007 | 0.009 | 0.013 | 0.027 | 0.027 | 0.021 | 0 |
| **انحراف عام 7** | σ(6)t | 0.02 | 0.007 | 0 | 0.028 | 0.028 | 0.021 | 0 |
| **انحراف عام 8** | σ(7)t | 0.013 | 0 | 0.018 | 0.027 | 0.027 | 0.021 | 0.028 |
| **عدم دقة 1** | U(0) | 0.121 | 0.12 | 0.121 | 0.12 | 0.12 | 0.127 | 0.122 |
| **عدم دقة 2** | U(1) | 0.12 | 0.12 | 0.128 | 0.125 | 0.125 | 0.123 | 0.124 |
| **عدم دقة 3** | U(2) | 0.124 | 0.12 | 0.123 | 0.122 | 0.122 | 0.123 | 0.123 |
| **عدم دقة 4** | U(3) | 0.121 | 0.121 | 0.123 | 0.127 | 0.127 | 0.121 | 0.121 |
| **عدم دقة 5** | U(4) | 0.121 | 0.121 | 0.122 | 0.122 | 0.122 | 0.124 | 0.121 |
| **عدم دقة 6** | U(5) | 0.12 | 0.12 | 0.121 | 0.123 | 0.123 | 0.122 | 0.12 |
| **عدم دقة 7** | U(6) | 0.122 | 0.12 | 0.12 | 0.123 | 0.123 | 0.122 | 0.12 |
| **عدم دقة 8** | U(7) | 0.121 | 0.12 | 0.121 | 0.123 | 0.123 | 0.122 | 0.123 |
| **القيمة المحسوبة** | H [w/m$^2$ °C] | 4.89 | 6.91 | 5.42 | 7.77 | 6.3 | 5.47 | 6.61 |
| **عدم الدقة** | Uh [w/m$^2$ °C] | 0.80 | 1.75 | 1.62 | 2.15 | 1.61 | 2.32 | 2.65 |




الشكل (4-14) براد منزلي كمثال للقياس

نلاحظ من النتائج في الجدول (4–3) عدم انتظام درجة حرارة الهواء المحيط بالبراد (السطر عند الحساس *t7*). كما أن المجال الحراري المقاس (*t7-t0*) صغير لا يتعدى *1.5 °C*. مما يعني عدم صلاحية النتائج المقدمة من هذه التجربة.

### 4. 3. 1. 3. حالة نافذة

بنفس الفرضيات والتقريبات والبيئة السابقة، تم قياس التدرج الحراري لعدة حالات لنوافذ شاقولية شفافة فعلية على أرض الواقع. وكنموذج للقياس نقدم القياس التجريبي التالي عند ارتفاع *x=3 cm* من أسفل نافذة شاقولية. ونتائج القياس وحساب الأخطاء مبين بالجدول (4–4).

الجدول (4–4) نتائج القياس وحساب الأخطاء لحالة النافذة كما تم حسابها في برنامج المعالجة

| النقطة | | | | | | Win | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| حساس1 | t0 | 20.65 | انحراف 1 | σ(0) | 0.145 | انحراف عام 1 | σ(0)t | 0.032 | عدم دقة 1 | U(0) | 0.124 |
| حساس2 | t1 [°C] | 22.5 | انحراف 2 | σ(1) | 0.111 | انحراف عام 2 | σ(1)t | 0.025 | عدم دقة 2 | U(1) | 0.123 |
| حساس3 | t2 [°C] | 22.38 | انحراف 3 | σ(2) | 0.158 | انحراف عام 3 | σ(2)t | 0.035 | عدم دقة 3 | U(2) | 0.125 |
| حساس4 | t3 [°C] | 22.37 | انحراف 4 | σ(3) | 0.131 | انحراف عام 4 | σ(3)t | 0.029 | عدم دقة 4 | U(3) | 0.124 |
| حساس5 | t4 [°C] | 22.62 | انحراف 5 | σ(4) | 0.12 | انحراف عام 5 | σ(4)t | 0.027 | عدم دقة 5 | U(4) | 0.123 |
| حساس6 | t5 [°C] | 22.64 | انحراف 6 | σ(5) | 0.113 | انحراف عام 6 | σ(5)t | 0.025 | عدم دقة 6 | U(5) | 0.123 |
| حساس7 | t6 [°C] | 22.84 | انحراف 7 | σ(6) | 0.124 | انحراف عام 7 | σ(6)t | 0.028 | عدم دقة 7 | U(6) | 0.123 |
| حساس8 | t7 [°C] | 22.91 | انحراف 8 | σ(7) | 0.123 | انحراف عام 8 | σ(7)t | 0.028 | عدم دقة 8 | U(7) | 0.123 |
| القيمة المحسوبة | | h= | 5.12 | [w/m² °C] | | عدم الدقة | Uh= | 0.26 | [w/m² °C] | | |

الجدول (4–5) قيمة عامل انتقال الحرارة بالحمل لنافذة شاقولية عند ارتفاع 3 سم من الأسفل [واحدات خصائص الهواء كما في (م–1)]

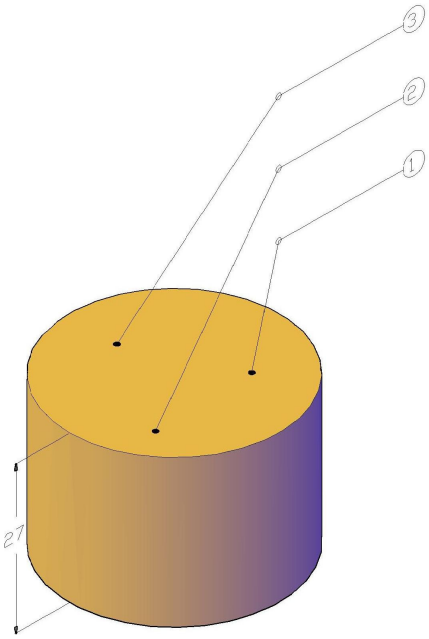
| x cm | Tx [°C] | Ti [°C] | ν | α | k | β | Rax | Nux | hx [w/m² °C] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 20.65 | 22.9 | 15.11 | 21.6 | 0.0257 | 3.412969 | 15233.85 | 5.96 | 5.163 |

### 4. 3. 2. انتقال حرارة شاقولي

تمت التجربة على سطح أفقي لإسطوانة تحتوي على الماء الساخن بدرجة حرارة [°C] **35** (الشكل (4–15)) ذات القطر . باعتبار نفس الفرضيات والبيئة والتقريبات السابقة. ولثلاث نقاط قياس وتكرار التجربة لكل نقطة *20* مرة بفاصل زمني *15 Sec* ثانية والنتائج مبينة بالجدول (4–5). ومبين في الجدول (4–6) القيم الناتجة عن برنامج المعالجة.

الجدول (4–5) نتائج القياس مع النتائج المحسوبة وفق المعادلات الناظمة لحالة السطح الأفقي

| No. | Ts [°C] | Ti [°C] | $Ra_L$ | $Nu_L$ | $h_L$ [w/m² °C] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 31.47 | 22.49 | 3.15E+09 | 219.79 | 3.69 |
| 2 | 32.16 | 22.86 | 3.21E+09 | 221.23 | 3.73 |
| 3 | 31.61 | 22.26 | 3.28E+09 | 222.77 | 3.75 |




الشكل (4–15) نقاط القياس لسطح أفقي ساخن بالنسبة للهواء المحيط

الجدول (4–6) نتائج القياس وحساب الأخطاء لحالة السطح الأفقي

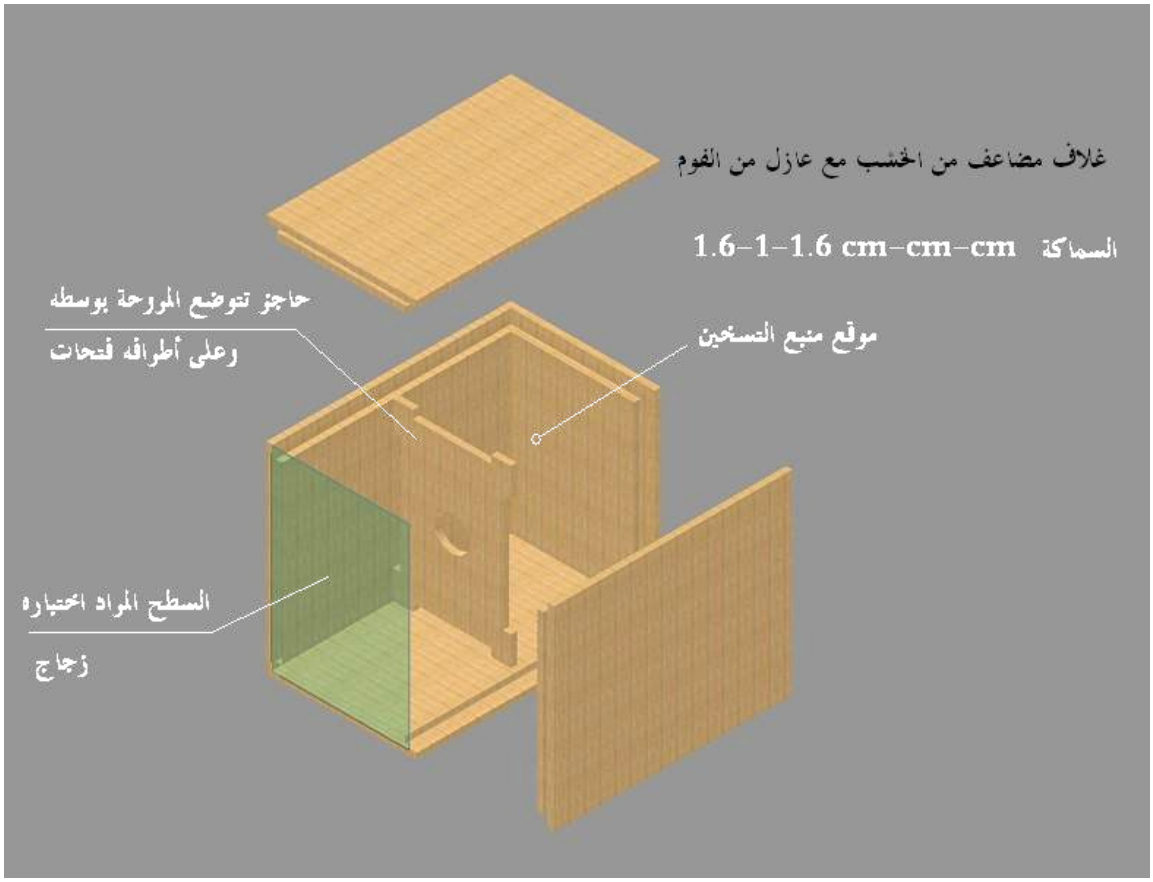
| النقطة | | 1 | 2 | 3 | النقطة | | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| حساس1 | t0 [°C] | 31.47 | 32.16 | *31.61* | انحراف 1 | σ(0) | 0.307 | 0.2 | *0.178* |
| حساس2 | t1 [°C] | 26.47 | 28.06 | *26.69* | انحراف 2 | σ(1) | 0.575 | 0.568 | *0.406* |
| حساس3 | t2 [°C] | 23.47 | 23.7 | *23.59* | انحراف 3 | σ(2) | 0.431 | 5.459 | *0.356* |
| حساس4 | t3 [°C] | 22.47 | 23.31 | *22.41* | انحراف 4 | σ(3) | 0.334 | 0.412 | *0.288* |
| حساس5 | t4 [°C] | 22.47 | 23.09 | *22.37* | انحراف 5 | σ(4) | 0.314 | 0.367 | *0.262* |
| حساس6 | t5 [°C] | 22.22 | 22.81 | *22.17* | انحراف 6 | σ(5) | 0.334 | 0.355 | *0.256* |
| حساس7 | t6 [°C] | 22.34 | 22.8 | *22.15* | انحراف 7 | σ(6) | 0.349 | 0.328 | *0.256* |
| حساس8 | t7 [°C] | 22.49 | 22.86 | *22.26* | انحراف 8 | σ(7) | 0.324 | 0.282 | *0.236* |
| انحراف عام 1 | σ(0)t | 0.069 | 0.045 | *0.04* | عدم دقة 1 | U(0) | 0.138 | 0.128 | *0.126* |
| انحراف عام 2 | σ(1)t | 0.129 | 0.127 | *0.091* | عدم دقة 2 | U(1) | 0.176 | 0.175 | *0.15* |
| انحراف عام 3 | σ(2)t | 0.096 | 1.221 | *0.08* | عدم دقة 3 | U(2) | 0.154 | 1.227 | *0.144* |
| انحراف عام 4 | σ(3)t | 0.075 | 0.092 | *0.065* | عدم دقة 4 | U(3) | 0.141 | 0.151 | *0.136* |
| انحراف عام 5 | σ(4)t | 0.07 | 0.082 | *0.059* | عدم دقة 5 | U(4) | 0.139 | 0.145 | *0.134* |
| انحراف عام 6 | σ(5)t | 0.075 | 0.079 | *0.057* | عدم دقة 6 | U(5) | 0.141 | 0.144 | *0.133* |
| انحراف عام 7 | σ(6)t | 0.078 | 0.073 | *0.057* | عدم دقة 7 | U(6) | 0.143 | 0.141 | *0.133* |
| انحراف عام 8 | σ(7)t | 0.073 | 0.063 | *0.053* | عدم دقة 8 | U(7) | 0.14 | 0.136 | *0.131* |
| القيمة المحسوبة | | | h | 3.95 | 3.63 | *3.69* | | [w/m$^2$ °C] | |
| عدم الدقة | | | Uh | 0.56 | 0.51 | *0.5* | | [w/m$^2$ °C] | |

من الجدولين نلاحظ أن القيمة الوسطية لـ $h$ التجريبية هي $\overline{h} = 3.76\, W/m^2C$ والقيمة الوسطية النظرية لـ $h$ هي $\overline{h} = 3.72\, W/m^2C$. ولحساب انتقال الحرارة بالحمل الحر من السطح الأفقي:

$$\overline{q} = \overline{h}.A.(\overline{t}_s - t_{air}) = 3.76 \times 0.13 \times (31.75 - 22.54) \cong 4.5\, W$$

## 4. 4. منصة الاختبار

تم تصنيع منصة للاختبار عبارة عن متوازي مستطيلات معزول من 5 جوانب ويبقى السطح السادس لتثبيت السطح المراد إجراء الاختبار عليه كما هو مبين بالشكل (4-16) تصلح لاختبار السطوح الشاقولية والأفقية يتوضع المنبع الحراري الساخن (أو البارد) ضمن الحجرة المعدة له وتعمل المروحة المتوضعة في الحاجز على ضخ الهواء من أمامه باتجاه عبوة المنبع الحراري، ليخرج الهواء باتجاه الحجرة الملاصقة للسطح المراد اختباره عبر الفتحات الجانبية للحاجز، وذلك لتأمين اضطراب وحركة داخل الحجرة الثانية لتتوازن درجة حرارته فينتج عن ذلك توازن في درجة حرارة السطح المراد اختباره ليصبح إيزوتيرمياً بالتقريب.




الشكل (4-16) منصة تجربة تصلح لسطوح أفقية وشاقولية.

## 4. 3. المناقشة:

بمقارنة النتائج النظرية مع النتائج التجريبية للحالات التي تم التجريب عليها، تبين مايلي:

نلاحظ أن الخطأ النسبي كبير عند مجال حراري مقاس صغير (كما هو الحال عند قياس نتائج البراد) وبازدياد المجال الحراري ينخفض الخطأ في القياس. لذلك يفضل استخدام الجهاز لمجال درجات الحرارة المقاس أعلى من 3.5 درجة بحيث يصبح الخطأ في القياس مقبولاً. حيث نلاحظ أنه عند استخدام الجهاز لمجال درجات الحرارة الصغير نسبياً أن قيمة القراءة على الجهاز لا تتوافق بتاتاً مع القيم النظرية.

إن جميع العلاقات في الحساب تفترض السطح إيزوتيرمي بينما في الواقع توزع درجة الحرارة للسطح غير منتظم.

## 4. 4. التوصيات

من الممكن:

- تصنيع نماذج لاختبارها على الجهاز.
- تصنيع سلسلة حساسات أخرى لتلائم الحمل القسري. وكذلك تصنيع سلسلة حساسات لتتلاءم مع حالة قذف سائل ضمن آخر.
- تصنيع جهاز لقراءة مصفوفة ثلاثية البعد من الحساسات، بحيث يمكن ترئية الجريان الحراري بالأبعاد الثلاث.

# الرموز والمصطلحات

| الرمز | المعنى | الواحدة |
|---|---|---|
| $Ts$ | درجة حرارة السطح | $^oC$ |
| $Ti$ | درجة حرارة الهواء الداخلي | $^oC$ |
| $Ra$ | عدد رايلي | لا بعدي |
| $T\infty$ | درجة حرارة الهواء الداخلي | $^oC$ |
| $Nu$ | عدد نوسلت | لا بعدي |
| $h_L$ | عامل انتقال الحرارة الوسطي بالحمل | $W/(m^2\ ^oC)$ |
| $h_x$ | عامل انتقال الحرارة الموضعي بالحمل | $W/(m^2\ ^oC)$ |
| $Gr$ | عدد غراشوف | لا بعدي |
| $\partial T/\partial y$ | التدرج الحراري بالاتجاه $y$ | $^oC/m$ |
| $k$ | عامل انتقال الحرارة بالتوصيل | $W/(m\ ^oC)$ |
| $q''_y$ | التدفق الحراري بالاتجاه $y$ | $W$ |
| $\partial p/\partial x$ | تدرج الضغط بالاتجاه $x$ | $Pa/m$ |
| $\rho_\infty$ | كثافة الهواء الحر | $kg/m^3$ |
| $g$ | تسارع الجاذبية الأرضية | $m/s^2$ |
| $\beta$ | معامل التمدد الحراري الحجمي | $1/^ok$ |
| $R$ | ثابت الغازات العام | $R=8.314472\ J.\ K^{-1}.mol^{-1}$ |
| $Re$ | عدد رينولدز | لا بعدي |
| $Pr$ | عدد براندل | لا بعدي |
| $v$ | اللزوجة الحركية | $m^2/s$ |
| $\alpha$ | الانتشار الحراري | $m^2/s$ |
| $\mu$ | اللزوجة التحريكية | $Pa\ s$ |
| $cp$ | السعة الحرارية عند ضغط ثابت | $J/(kg\ K)$ |
| $\overline{T}$ | القيمة المتوسطة لمجموعة قراءات | $^oC$ |
| $n$ | عدد مرات تكرار تجربة | عدد |
| $di$ | الانحراف عن القيمة المتوسطة لقراءة معينة | $^oC$ |
| $\sigma$ | الانحراف المعياري لقيمة معينة | $^oC$ |
| $U$ | الخطأ الكلي (عدم دقة قراءة معينة) | $W/m^2\ ^oC$ |
| $t=a-e^{bx}$ | معادلة نيوتن في التبريد | $^oC$ |
| اللاحقة $x$ | القيمة موضعية | |
| اللاحقة $L$ | القيمة وسطية | |

# المراجع


*[1]. ASHRAE 2009 Handbook of Fundamentals, SI_F09_Ch04, "HEAT TRANSFER," American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA.*

*[2]. Latif M. Jiji, Heat Convection, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.*

*[3]. Incropera, Fundamentals_of_Heat_and_Mass_Transfer- -6th, free convection, Introduction to heat Transfer 2006.*

*[4]. ASTM C680 Standard Practice for Estimate of the Heat Gain or Loss and the Surface Temperatures of Insulated Flat, Cylindrical, and Spherical Systems by Use of Computer Programs, 2008.*

*[5]. Introduction to Thermal Systems Engineering*

*[6]. Correlations for Convective heat transfer.*

*[7]Heat Transfer Handbook_Bejan_Wiley_2003*

*[8] سامح جزماتي,الرياضيات العددي,1993,Aleppo University Press.*

*[9]. Measurement instrumentation sensors*

*[10]. Ostrach, S., "Natural Convection in Enclosures." In J P. Hartnett and T. F. Irvine, Eds., Advances in Heat Transfer, Vol. 8, Academic Press, New York.1972. pp. 161-227.*

*[11]. LeFevre, E. J., "Laminar Free Convection from a Vertical Plane Surface," Proc. Ninth Int. Congr. Appl. Mech., Brussels, Vol. 4, p. 168, 1956.*

*[12]. Rich, B. R., "An Investigation of Heat Transfer from an Inclined Flat Plate in Free Convection," Trans. ASME, 75,489, 1953.*

*[13]. Churchill, S. W., and H. H. S. Chu, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder," Int. J. Heat Mass Transfer, 18, 1049, 1975.*

*[14]. Raithby, G. D., and K. G. T. Hollands, in W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, and E. N. Ganic, Eds .. Handbook of Heat Transfer Fundamentals, Chap. 6. McGraw-Hill, New York, 1985.*

*[15]. Churchill, S. W., "Combined Free and Forced Convection in Channels," in E. U. Schliinder, Ed.-in-Chief, Heat Exchanger Design Handbook, Section 2.5.10, Hemisphere Publishing, New York, 1983.*

*[16]. Churchill, S. W., and Ozoe, H., "Correlations for Laminar Forced Convection in Flow over an Isothermal Flat Plate and in Developing and Fully Developed Flow in an Isothermal Tube," J.Heat Transfer, Vol 95, 1973, p. 78.*

*[17]. Churchill, S. W., "A Comprehensive Correlating Equation for Forced Convection from Flat Plates," AIChE Journal, Vol 22, No. 2, 1976, pp 264-268.*

*[18]. Churchill, S. W., and Chu, H. H. S., "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol 18, 1975, pp. 1323-1329.*

*[19]. Thermometrics, Inc., Thermometrics NTC & PTC Thermistors, Edison, NJ, 1993.*

*[20]. J. Fabien, Heating with PTC thermistors, EDN Products Edition, 41(12A), 10, 1996.*

*[21]. J. S. Seinhart and S. R. Hart, Calibration curves for thermistors, Deep Sea Research, 15, 497, 1968.*

*[22]. B. W. Mangum, The triple point of succinonitrile and its use in the calibration of thermistor thermometers, Rev. Sci. Instrum., 54(12), 1687, 1983.*

# الملحق

الجدول (م–1) مواصفات الهواء لدرجات حرارة بين 0 و 60 درجة مئوية [3]

| Temperature - t - °C | k | Density - ρ - (kg/m3) | Thermal conductivity - k - (W/m K) | Kinematic viscosity - v - (m2/s) x $10^{-6}$ | Expansion coefficient - β - (1/K) x $10^{-3}$ | Prandtl's number - Pr - | thermal diffusivity α (m2/s) x $10^{-6}$ | viscosity μ (N.s/m2) x $10^{7}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 273 | 1.293 | 0.0243 | 13.30 | 3.66 | 0.715 | 18.90 | 171.1 |
| 1 | 274 | 1.289 | 0.0244 | 13.39 | 3.65 | 0.715 | 19.04 | 171.6 |
| 2 | 275 | 1.284 | 0.0244 | 13.48 | 3.64 | 0.715 | 19.17 | 172.1 |
| 3 | 276 | 1.280 | 0.0245 | 13.57 | 3.63 | 0.715 | 19.31 | 172.6 |
| 4 | 277 | 1.275 | 0.0246 | 13.66 | 3.61 | 0.715 | 19.44 | 173.1 |
| 5 | 278 | 1.271 | 0.0247 | 13.75 | 3.60 | 0.715 | 19.58 | 173.6 |
| 6 | 279 | 1.267 | 0.0247 | 13.84 | 3.59 | 0.715 | 19.71 | 174.1 |
| 7 | 280 | 1.262 | 0.0248 | 13.93 | 3.58 | 0.715 | 19.85 | 174.6 |
| 8 | 281 | 1.258 | 0.0249 | 14.02 | 3.56 | 0.715 | 19.98 | 175.1 |
| 9 | 282 | 1.253 | 0.0249 | 14.11 | 3.55 | 0.715 | 20.12 | 175.6 |
| 10 | 283 | 1.249 | 0.0250 | 14.21 | 3.54 | 0.715 | 20.25 | 176.1 |
| 11 | 284 | 1.245 | 0.0251 | 14.30 | 3.53 | 0.715 | 20.39 | 176.6 |
| 12 | 285 | 1.240 | 0.0251 | 14.39 | 3.51 | 0.715 | 20.52 | 177.1 |
| 13 | 286 | 1.236 | 0.0252 | 14.48 | 3.50 | 0.715 | 20.66 | 177.6 |
| 14 | 287 | 1.231 | 0.0253 | 14.57 | 3.49 | 0.715 | 20.79 | 178.1 |
| 15 | 288 | 1.227 | 0.0254 | 14.66 | 3.48 | 0.715 | 20.93 | 178.6 |
| 16 | 289 | 1.223 | 0.0254 | 14.75 | 3.46 | 0.715 | 21.06 | 179.1 |
| 17 | 290 | 1.218 | 0.0255 | 14.84 | 3.45 | 0.715 | 21.20 | 179.6 |
| 18 | 291 | 1.214 | 0.0256 | 14.93 | 3.44 | 0.715 | 21.33 | 180.1 |
| 19 | 292 | 1.209 | 0.0256 | 15.02 | 3.43 | 0.715 | 21.47 | 180.6 |
| 20 | 293 | 1.205 | 0.0257 | 15.11 | 3.41 | 0.715 | 21.60 | 181.1 |
| 21 | 294 | 1.201 | 0.0258 | 15.20 | 3.40 | 0.713 | 21.74 | 181.6 |
| 22 | 295 | 1.197 | 0.0258 | 15.30 | 3.39 | 0.713 | 21.88 | 182.1 |
| 23 | 296 | 1.193 | 0.0259 | 15.39 | 3.38 | 0.713 | 22.02 | 182.5 |
| 24 | 297 | 1.189 | 0.0260 | 15.48 | 3.37 | 0.713 | 22.16 | 183.0 |
| 25 | 298 | 1.186 | 0.0261 | 15.58 | 3.36 | 0.713 | 22.30 | 183.5 |
| 26 | 299 | 1.182 | 0.0261 | 15.67 | 3.35 | 0.712 | 22.44 | 184.0 |
| 27 | 300 | 1.178 | 0.0262 | 15.76 | 3.34 | 0.712 | 22.58 | 184.5 |
| 28 | 301 | 1.174 | 0.0263 | 15.85 | 3.33 | 0.712 | 22.72 | 184.9 |
| 29 | 302 | 1.170 | 0.0263 | 15.95 | 3.31 | 0.712 | 22.86 | 185.4 |
| 30 | 303 | 1.166 | 0.0264 | 16.04 | 3.30 | 0.712 | 23.00 | 185.9 |
| 31 | 304 | 1.162 | 0.0265 | 16.13 | 3.29 | 0.712 | 23.14 | 186.4 |
| 32 | 305 | 1.158 | 0.0265 | 16.23 | 3.28 | 0.712 | 23.28 | 186.9 |
| 33 | 306 | 1.154 | 0.0266 | 16.32 | 3.27 | 0.712 | 23.42 | 187.3 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *34* | *307* | *1.150* | *0.0267* | *16.41* | *3.26* | *0.712* | *23.56* | *187.8* |
| *35* | *308* | *1.147* | *0.0268* | *16.51* | *3.25* | *0.712* | *23.70* | *188.3* |
| *36* | *309* | *1.143* | *0.0268* | *16.60* | *3.24* | *0.711* | *23.84* | *188.8* |
| *37* | *310* | *1.139* | *0.0269* | *16.69* | *3.23* | *0.711* | *23.98* | *189.3* |
| *38* | *311* | *1.135* | *0.0270* | *16.78* | *3.22* | *0.711* | *24.12* | *189.7* |
| *39* | *312* | *1.131* | *0.0270* | *16.88* | *3.21* | *0.711* | *24.26* | *190.2* |
| *40* | *313* | *1.127* | *0.0271* | *16.97* | *3.19* | *0.711* | *24.40* | *190.7* |
| *41* | *314* | *1.124* | *0.0272* | *17.07* | *3.19* | *0.711* | *24.55* | *191.2* |
| *42* | *315* | *1.121* | *0.0272* | *17.16* | *3.18* | *0.711* | *24.70* | *191.7* |
| *43* | *316* | *1.118* | *0.0273* | *17.26* | *3.17* | *0.711* | *24.85* | *192.1* |
| *44* | *317* | *1.115* | *0.0274* | *17.36* | *3.16* | *0.711* | *25.00* | *192.6* |
| *45* | *318* | *1.112* | *0.0275* | *17.45* | *3.15* | *0.711* | *25.15* | *193.1* |
| *46* | *319* | *1.109* | *0.0275* | *17.55* | *3.14* | *0.710* | *25.30* | *193.6* |
| *47* | *320* | *1.106* | *0.0276* | *17.65* | *3.13* | *0.710* | *25.45* | *194.0* |
| *48* | *321* | *1.103* | *0.0277* | *17.74* | *3.12* | *0.710* | *25.60* | *194.5* |
| *49* | *322* | *1.100* | *0.0277* | *17.84* | *3.11* | *0.710* | *25.75* | *195.0* |
| *50* | *323* | *1.097* | *0.0278* | *17.94* | *3.10* | *0.710* | *25.90* | *195.5* |
| *51* | *324* | *1.094* | *0.0279* | *18.03* | *3.09* | *0.710* | *26.05* | *195.9* |
| *52* | *325* | *1.091* | *0.0279* | *18.13* | *3.08* | *0.710* | *26.20* | *196.4* |
| *53* | *326* | *1.088* | *0.0280* | *18.22* | *3.07* | *0.710* | *26.35* | *196.9* |
| *54* | *327* | *1.085* | *0.0281* | *18.32* | *3.06* | *0.710* | *26.50* | *197.4* |
| *55* | *328* | *1.082* | *0.0282* | *18.42* | *3.05* | *0.710* | *26.65* | *197.8* |
| *56* | *329* | *1.079* | *0.0282* | *18.51* | *3.04* | *0.709* | *26.80* | *198.3* |
| *57* | *330* | *1.076* | *0.0283* | *18.61* | *3.03* | *0.709* | *26.95* | *198.8* |
| *58* | *331* | *1.073* | *0.0284* | *18.71* | *3.02* | *0.709* | *27.10* | *199.3* |
| *59* | *332* | *1.070* | *0.0284* | *18.80* | *3.01* | *0.709* | *27.25* | *199.7* |
| *60* | *333* | *1.067* | *0.0285* | *18.90* | *3.00* | *0.709* | *27.40* | *200.2* |

الجدول (م–2) البث الحراري لمجموعة من المواد الشائعة [3]

| *Material* | Emissivity* | *Material* | Emissivity* |
|---|---|---|---|
| **Aluminium, polished** | **0.05** | **Iron, wrought, polished** | **0.28** |
| **Aluminum, rough surface** | **0.07** | **Lacquer, Bakelite** | **0.93** |
| **Aluminum, strongly oxidized** | **0.25** | **Lacquer, black, dull** | **0.97** |
| **Asbestos board** | **0.96** | **Lacquer, black, shiny** | **0.87** |
| **Asbestos fabric** | **0.78** | **Lacquer, white** | **0.87** |
| **Asbestos paper** | **0.94** | **Lampblack** | **0.96** |
| **Asbestos slate** | **0.96** | **Lead, gray** | **0.28** |
| **Brass, dull, tarnished** | **0.22** | **Lead, oxidized** | **0.63** |
| **Brass, polished** | **0.03** | **Lead, red, powdered** | **0.93** |
| **Brick, common** | **0.85** | **Lead, shinym** | **0.08** |
| **Brick, glazed, rough** | **0.85** | **Mercury, pure** | **0.1** |
| **Brick, refractory, rough** | **0.94** | **Nickel, on cast iron** | **0.05** |
| **Bronze, porous, rough** | **0.55** | **Nickel, pure polished** | **0.05** |
| **Bronze, polished** | **0.1** | **Paint, silver finish**** | **0.31** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Carbon, purified** | **0.8** | **Paint, oil, average** | **0.94** |
| **Cast iron, rough casting** | **0.81** | **Paper, black, shiny** | **0.9** |
| **Cast iron, polished** | **0.21** | **Paper, black, dull** | **0.94** |
| **Charcoal, powdered** | **0.96** | **Paper, white** | **0.9** |
| **Chromium, polished** | **0.1** | **Platinum, pure, polished** | **0.08** |
| **Clay, fired** | **0.91** | **Porcelain, glazed** | **0.92** |
| **Concrete** | **0.54** | **Quartz** | **0.93** |
| **Copper, polished,** | **0.01** | **Rubber** | **0.93** |
| **Copper, commercial burnished** | **0.07** | **Shellac, black, dull** | **0.91** |
| **Copper, oxidized** | **0.65** | **Shellac, black, shiny** | **0.82** |
| **Copper, oxidized to black** | **0.88** | **Snow** | **0.8** |
| **Electrical tape, black plastic** | **0.95** | **Steel, galvanized** | **0.28** |
| **Enamel **** | **0.9** | **Steel, oxidized strongly** | **0.88** |
| **Formica** | **0.93** | **Steel, rolled freshly** | **0.24** |
| **Frozen soil** | **0.93** | **Steel, rough surface** | **0.96** |
| **Glass** | **0.92** | **Steel, rusty red** | **0.69** |
| **Glass, frosted** | **0.96** | **Steel, sheet, nickelplated** | **0.11** |
| **Gold, polished** | **0.02** | **Steel, sheet, rolled** | **0.56** |
| **Ice** | **0.97** | **Tar paper** | **0.92** |
| **Iron, hot rolled** | **0.77** | **Tin, burnished** | **0.05** |
| **Iron, oxidized** | **0.74** | **Tungsten** | **0.05** |
| **Iron, sheet galvanized, burnished** | **0.23** | **Water** | **0.98** |
| **Iron, sheet, galvanized, oxidized** | **0.28** | **Zinc, sheet** | **0.2** |
| **Iron, shiny, etched** | **0.16** | | |

* Emissivities of almost all materials are measured at 0 ℃ but do not differ significantly at room temperature.

**Paint, silver finish is measured at 25 ℃ and Paint, enamel at 27 ℃.

الجدول (م-3) معاملات المقاومة الحرارية حسب تركيب الجدران والأسقف [1]

| العامل | العنصر | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ***WALL*** | | ***CEILING*** | |
| *1/αo [ $m^2$.c/w]* | *F01* | *0.04* | *0.04* | *F01* |
| *R [ $m^2$.c/w]* | *M03* | *0.41* | *0.06* | *F13* |
| | | | *0.38* | *M13* |
| | | | *0.18* | *F05* |
| *1/αin [ $m^2$.c/w]* | *F02* | *0.12* | *0.16* | *F03* |
| *R* | | *0.57* | *0.82* | *$m^2$.c/w* |
| *U* | | *1.75* | *1.22* | *w/$m^2$.c* |

# الجدول (م–4) رموز تركيب الجدران والأسقف [1]

**Thermal Properties and Code Numbers of Layers Used in Wall and Roof Descriptions for Tables 16 and 17**

| Layer ID | Description | Thickness, mm | Conductivity, W/(m·K) | Density, kg/m³ | Specific Heat, kJ/(kg·K) | Resistance, (m²·K)/W | R | Mass, kg/m² | Thermal Capacity, kJ/(m²·K) | Notes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F01 | Outside surface resistance | — | — | — | — | 0.04 | 0.04 | — | — | 1 |
| F02 | Inside vertical surface resistance | — | — | — | — | 0.12 | 0.12 | — | — | 2 |
| F03 | Inside horizontal surface resistance | — | — | — | — | 0.16 | 0.16 | — | — | 3 |
| F04 | Wall air space resistance | — | — | — | — | 0.15 | 0.15 | — | — | 4 |
| F05 | Ceiling air space resistance | — | — | — | — | 0.18 | 0.18 | — | — | 5 |
| F06 | EIFS finish | 9.5 | 0.72 | 1856 | 0.84 | — | 0.01 | 17.7 | 14.92 | 6 |
| F07 | 25 mm stucco | 25.4 | 0.72 | 1856 | 0.84 | — | 0.04 | 47.2 | 39.45 | 6 |
| F08 | Metal surface | 0.8 | 45.28 | 7824 | 0.50 | — | 0.00 | 6.0 | 3.07 | 7 |
| F09 | Opaque spandrel glass | 6.4 | 0.99 | 2528 | 0.88 | — | 0.01 | 16.1 | 14.10 | 8 |
| F10 | 25 mm stone | 25.4 | 3.17 | 2560 | 0.79 | — | 0.01 | 65.1 | 51.71 | 9 |
| F11 | Wood siding | 12.7 | 0.09 | 592 | 1.17 | — | 0.14 | 7.5 | 8.79 | 10 |
| F12 | Asphalt shingles | 3.2 | 0.04 | 1120 | 1.26 | — | 0.08 | 3.6 | 4.50 | |
| F13 | Built-up roofing | 9.5 | 0.16 | 1120 | 1.46 | — | 0.06 | 10.7 | 15.74 | |
| F14 | Slate or tile | 12.7 | 1.59 | 1920 | 1.26 | — | 0.01 | 24.4 | 30.67 | |
| F15 | Wood shingles | 6.4 | 0.04 | 592 | 1.30 | — | 0.17 | 3.8 | 4.91 | |
| F16 | Acoustic tile | 19.1 | 0.06 | 368 | 0.59 | — | 0.31 | 7.0 | 4.09 | 11 |
| F17 | Carpet | 12.7 | 0.06 | 288 | 1.38 | — | 0.22 | 3.7 | 5.11 | 12 |
| F18 | Terrazzo | 25.4 | 1.80 | 2560 | 0.79 | — | 0.01 | 65.1 | 51.71 | 13 |
| G01 | 16 mm gyp board | 15.9 | 0.16 | 800 | 1.09 | — | 0.10 | 12.7 | 13.90 | |
| G02 | 16 mm plywood | 15.9 | 0.12 | 544 | 1.21 | — | 0.14 | 8.6 | 10.42 | |
| G03 | 13 mm fiberboard sheathing | 12.7 | 0.07 | 400 | 1.30 | — | 0.19 | 5.1 | 6.54 | 14 |
| G04 | 13 mm wood | 12.7 | 0.15 | 608 | 1.63 | — | 0.08 | 7.7 | 12.67 | 15 |
| G05 | 25 mm wood | 25.4 | 0.15 | 608 | 1.63 | — | 0.17 | 15.5 | 25.35 | 15 |
| G06 | 50 mm wood | 50.8 | 0.15 | 608 | 1.63 | — | 0.33 | 30.9 | 50.49 | 15 |
| G07 | 100 mm wood | 101.6 | 0.15 | 608 | 1.63 | — | 0.66 | 61.8 | 100.97 | 15 |
| I01 | 25 mm insulation board | 25.4 | 0.03 | 43 | 1.21 | — | 0.88 | 1.1 | 1.43 | 16 |
| I02 | 50 mm insulation board | 50.8 | 0.03 | 43 | 1.21 | — | 1.76 | 2.2 | 2.66 | 16 |
| I03 | 75 mm insulation board | 76.2 | 0.03 | 43 | 1.21 | — | 2.64 | 3.3 | 4.09 | 16 |
| I04 | 89 mm batt insulation | 89.4 | 0.05 | 19 | 0.96 | — | 1.94 | 1.7 | 1.64 | 17 |
| I05 | 154 mm batt insulation | 154.4 | 0.05 | 19 | 0.96 | — | 3.34 | 3.0 | 2.86 | 17 |
| I06 | 244 mm batt insulation | 243.8 | 0.05 | 19 | 0.96 | — | 5.28 | 4.7 | 4.50 | 17 |
| M01 | 100 mm brick | 101.6 | 0.89 | 1920 | 0.79 | — | 0.11 | 195.2 | 155.34 | 18 |
| M02 | 150 mm LW concrete block | 152.4 | 0.49 | 512 | 0.88 | — | 0.31 | 78.1 | 68.68 | 19 |
| M03 | 200 mm LW concrete block | 203.2 | 0.50 | 464 | 0.88 | — | 0.41 | 94.3 | 82.99 | 20 |
| M04 | 300 mm LW concrete block | 304.8 | 0.71 | 512 | 0.88 | — | 0.43 | 156.2 | 137.36 | 21 |
| M05 | 200 mm concrete block | 203.2 | 1.11 | 800 | 0.92 | — | 0.18 | 162.7 | 149.83 | 22 |
| M06 | 300 mm concrete block | 304.8 | 1.40 | 800 | 0.92 | — | 0.22 | 244.0 | 224.84 | 23 |
| M07 | 150 mm LW concrete block (filled) | 152.4 | 0.29 | 512 | 0.88 | — | 0.53 | 78.1 | 68.68 | 24 |
| M08 | 200 mm LW concrete block (filled) | 203.2 | 0.26 | 464 | 0.88 | — | 0.78 | 94.3 | 82.99 | 25 |
| M09 | 300 mm LW concrete block (filled) | 304.8 | 0.29 | 512 | 0.88 | — | 1.04 | 156.2 | 137.36 | 26 |
| M10 | 200 mm concrete block (filled) | 203.2 | 0.72 | 800 | 0.92 | — | 0.28 | 162.7 | 149.83 | 27 |
| M11 | 100 mm lightweight concrete | 101.6 | 0.53 | 1280 | 0.84 | — | 0.19 | 130.1 | 108.95 | |
| M12 | 150 mm lightweight concrete | 152.4 | 0.53 | 1280 | 0.84 | — | 0.29 | 195.2 | 163.52 | |
| M13 | 200 mm lightweight concrete | 203.2 | 0.53 | 1280 | 0.84 | — | 0.38 | 260.3 | 218.10 | |
| M14 | 150 mm heavyweight concrete | 152.4 | 1.95 | 2240 | 0.90 | — | 0.08 | 341.6 | 307.62 | |
| M15 | 200 mm heavyweight concrete | 203.2 | 1.95 | 2240 | 0.90 | — | 0.10 | 455.5 | 410.23 | |
| M16 | 300 mm heavyweight concrete | 304.8 | 1.95 | 2240 | 0.90 | — | 0.16 | 683.2 | 615.24 | |
| M17 | 50 mm LW concrete roof ballast | 50.8 | 0.19 | 640 | 0.84 | — | 0.27 | 32.5 | 27.19 | 28 |

*Notes:* The following notes give sources for the data in this table.

1. Chapter 26, Table 1 for 3.4 m/s wind
2. Chapter 26, Table 1 for still air, horizontal heat flow
3. Chapter 26, Table 1 for still air, downward heat flow
4. Chapter 26, Table 3 for 40 mm space, 32.2°C, horizontal heat flow, 0.82 emittance
5. Chapter 26, Table 3 for 90 mm space, 32.2°C, downward heat flow, 0.82 emittance
6. EIFS finish layers approximated by Chapter 26, Table 4 for 10 mm cement plaster, sand aggregate
7. Chapter 33, Table 3 for steel (mild), 22 gage
8. Chapter 26, Table 4 for architectural glass
9. Chapter 26, Table 4 for marble and granite
10. Chapter 26, Table 4, density assumed same as Southern pine
11. Chapter 26, Table 4 for mineral fiberboard, wet molded, acoustical tile
12. Chapter 26, Table 4 for carpet and rubber pad, density assumed same as fiberboard
13. Chapter 26, Table 4, density assumed same as stone
14. Chapter 26, Table 4 for nail-base sheathing
15. Chapter 26, Table 4 for Southern pine
16. Chapter 26, Table 4 for expanded polystyrene
17. Chapter 26, Table 4 for glass fiber batt, specific heat per glass fiber board
18. Chapter 26, Table 4 for clay fired brick
19. Chapter 26, Table 4, 7.3 kg block, 200 × 400 mm face
20. Chapter 26, Table 4, 8.6 kg block, 200 × 400 mm face
21. Chapter 26, Table 4, 14.5 kg block, 200 × 400 mm face
22. Chapter 26, Table 4, 15 kg normal weight block, 200 × 400 mm face
23. Chapter 26, Table 4, 22.7 kg normal weight block, 200 × 400 mm face
24. Chapter 26, Table 4, 7.3 kg block, vermiculite fill
25. Chapter 26, Table 4, 8.6 kg block, 200 × 400 mm face, vermiculite fill
26. Chapter 26, Table 4, 14.5 kg block, 200 × 400 mm face, vermiculite fill
27. Chapter 26, Table 4, 15 kg normal weight block, 200 × 400 mm face, vermiculite fill
28. Chapter 26, Table 4 for 640 kg/m³ LW concrete