

دراسة تجريبية وعددية للحمل المختلط خلال وسط مسامي بين صفيحتين مائلتين

عدنان محمد حسين

مدرس مساعد

المعهد التقني - الحويجة

الخلاصة

أجريت دراسة تجريبية وعددية للحمل المختلط خلال وسط مسامي بين صفيحتين مائلتين بزاوية ومسخنة من الأسفل ومبردة من الأعلى ، تضمن الجانب العملي عمليات تصنيع الجهاز المستخدم وتثبيت المزدوجات الحرارية وبالتالي قراءة درجات الحرارة لكل مزدوج مع سرعة الهواء الداخل ضمن مدى : $100 < Ra < 650$, $5 < Pe < 100$, $0^\circ < \Phi < 90^\circ$.

أما الجانب النظري فقد تضمن حل معادلات الزخم والطاقة عددياً بطريقة الفروقات المحددة وبالتالي استخدامها في برنامج حاسبي بلغة بيسك السريعة لإيجاد درجات الحرارة لكل نقطة وعدد نسلت كما أجريت مقارنة بين النتائج العملية والنظرية وكان هناك نسبة خطأ مقدارها 2.5% .

قائمة الرموز				
المعنى	الوحدة	الرمز	المعنى	الوحدة
النسبة الباعية $H/L=$	-	Pr	عدد برانتدل v/α	-
السعة الحرارية النوعية	J/kg.k	Ra	عدد رايلي $= g\beta K\Delta TH/\alpha v$	-
قطر الحبيبة	m	Re	عدد رينولدز uH/v	-
التعجيل الأرضي	m/s^2	U	سرعة الهواء اللابعدية	-
ارتفاع المجرى	m	u	سرعة الهواء الأفقية	m/s
نفاذية الوسط المسامي	m^2	V	معدل سرعة الهواء	m/s
معامل التوصيل الحراري	W/m.C	X	المحور الأفقي اللابعدية	-
طول المجرى	m	x	المحور الأفقي	m
عدد نسلت $Hh/k=$	-	Y	المحور العمودي اللابعدية	-
عدد بكلييت $u.H/\alpha=$	-	y	المحور العمودي	m

الرموز الإغريقية		الرموز السفلية	
المعنى	الوحدة	الرمز	المعنى
الانتشارية الحرارية	m^2/s	av	المعدل
معامل التمدد الحراري	$1/^{\circ}k$	c	السطح البارد
المسامية	-	h	السطح الساخن
دالة الانسياب	m^2/s	i	مقطع الدخول
درجة الحرارة اللابعدية	-	∞	ظروف خارج المجرى
زاوية ميلان المجرى	$^{\circ}$	f	الجزء المائع
الكثافة	kg/m^3	s	الجزء الصلب
الحجم	m^3	t	الكلي
اللزوجة الكينماتية	m^2/s		

المقدمة

إن الدراسات في مجال الحمل المختلط خلال الأوساط المسامية تكاد تكون قليلة نوعاً ما ، رغم أهميتها في المجالات الصناعية والاقتصادية وما جريان النفط خلال الصخور والحرارة المنتقلة فيها والمجمعات الشمسية وما تحتويه من فرشاة مسامية لخزن الطاقة وكذلك المبادلات الحرارية وما فيها من حشوات مسامية والطاقة المنتقلة خلال هذه الحشوات إلا خير دليل على أهمية هذا النوع من الدراسات .

فقد أجريت دراسة تجريبية من قبل الباحث ^[1] للحمل المختلط خلال قناة عمودية مملوءة بوسط مسامي ضمن مدى $700 < Ra < 1500, 2 < Pe < 2200$ وتم قياس درجات الحرارة خلال المجرى بواسطة مزدوجات حرارية كما رسمت علاقة بين $(Nu/Pe^{0.5})$ من جهة و (Ra/Pe) من الجهة الأخرى، توصل الباحث إلى أن هناك ثلاثة مناطق وهي

منطقة الحمل الحر عندما (Ra/Pe > 105) ومنطقة الحمل المختلط عندما (1 < Ra/Pe < 105) ومنطقة الحمل القسري عندما (Ra/Pe < 1) .

كما أجريت دراسة نظرية وعملية للحمل المختلط خلال طبقة مسامية أفقية مسخنة من الأسفل ومعزولة من الأعلى من قبل الباحثين [4,3,2].

كذلك أجريت دراسة نظرية للحمل الحر خلال وسط مسامي داخل قناة مائلة بزاوية من قبل الباحثين [6,5] حيث أن المصدر الحراري من الصفيحة السفلى ومن الأعلى صفيحة معزولة ، أوجدت خطوط الثبوت الحراري (Isothermal Lines) وخطوط الانسياب (Stream Lines) ، كذلك أوجدت علاقة خطوط الثبوت الحراري والانسياب مع زاوية الميلان وعدد نسلت حيث أن تغيير زاوية الميلان يؤدي إلى تغير خطوط الثبوت الحراري والانسياب وكذلك عدد نسلت .

كذلك أجريت دراسة للحمل المختلط خلال وسط مسامي يملا اسطوانة مسخنة من قبل الباحثين [9,8,7] . مما تقدم يلاحظ أن الدراسات السابقة تناولت الحمل المختلط خلال وسط مسامي أفقي وكذلك عمودي ولم تتطرق إلى الحمل المختلط خلال قناة مائلة بزاوية ، أما الدراسات التي تناولت الوسط المسامي المائل بزاوية فقد درست الحمل الحر فقط ولم تتطرق إلى الحمل المختلط ، واغلب الدراسات كانت إما نظرية على حدة أو عملية على حدة ولم يجمع بين الدراستين .

وفي هذه البحث أجريت دراسة تجريبية وعددية للحمل المختلط خلال وسط مسامي مائل بزاوية ، الهدف من الدراسة هو إيجاد علاقة ترابطية بين عدد نسلت وعدد بكليت وعدد رايلي وزاوية الميلان ومقارنة النتائج النظرية والعملية ثم إيجاد طول منطقة الدخول الحراري .

الجانب العملي

تم بناء منشأ تجريبي قابل لاستقصاء انتقال الحرارة بالحمل المختلط خلال وسط مسامي مشبع بالهواء ، علماً أن حالة سطح المجرى التي تم استقصاؤها هي عند ثبوت درجة حرارة السطح . إن الجهاز التجريبي الموضح بالشكل (1) ، يتألف من مجرى بشكل متوازي مستطيلات بطول (60cm) وعرض (40cm) وارتفاع (20cm) وسمك الصفيحة (0.5mm) مصنوعة من الحديد المصقول ، ملئ المجرى بوسط مسامي من كريات زجاجية بقطر (12mm) وسخن من الأسفل بمسخن (heater) بقدرة (900w) ومن الأعلى مجهز بثلاج للحفاظ على درجة حرارة الصفيحة العليا عند الصفر المئوي، ثبت منفاخ هواء (Blower) بقدرة (1200w) عند فتحة الدخول ليتم دفع الهواء إلى فتحة الخروج. كما ثبتت مزدوجات حرارية على طول مقطع الاختبار (x) ومع المحور العمودي (y) نوع T وبعدد 16 مزدوج حراري ، وربطت إلى لوح من الخشب مستطيل الشكل حيث ربطت النهايات السالبة من المزدوجات الحرارية في نقطة مشتركة أما النهايات الموجبة فهي مرقمة حسب الموقع ليتم قياس درجات الحرارة بواسطة جهاز رقمي متعدد الأغراض (digital multimeter) نوع (MY-69) بدقة 0.01°C . أما سرعة الهواء فقد تم قياسها عن طريق جهاز رقمي نوع (Digital

AnemometerAM-4200) بدقة 0.1m/s عند مقطع الدخول .

بعد تشغيل المسخن ومنفاخ الهواء بفترة زمنية وذلك للوصول إلى حالة الاستقرار (steady state) أخذت قراءات المزدوجات الحرارية في كل نقطة مع سرعة الهواء الداخل ولمدى من القراءات $5 < \text{Pe} < 100$, $100 < \text{Ra} < 650$ والاختبارات تمت عند زاوية ميل بمدى $0^{\circ} < \phi < 90^{\circ}$.

أما المعاملات اللازمة توافرها فهي:

المسامية (porosity $\varepsilon=0.345$) وتم حسابها عن طريق العلاقة ^[10] :

$$\varepsilon = \frac{\forall t - \forall s}{\forall t} \quad (1)$$

حيث أن : $\forall t$ الحجم الكلي للإناء و $\forall s$ حجم الجزء الصلب .

كثافة الوسط المسامي^[9] (density $\rho=2225\text{kg/m}^3$)

نفاذية الوسط المسامي (permability $K=8*10^{-4}\text{m}^2$) تم حسابها من العلاقة^[9] :

$$K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{172.8(1-\varepsilon)^2} \quad (2)$$

حيث أن d يمثل قطر الحبيبة .

السعة الحرارية النوعية للزجاج (specific heat capacity $C_p=835\text{J/kg.k}$)^[9]

أما الموصلية الحرارية الفعلية (effective thermal conductivity) فتحسب من

المعادلة الآتية^[10]

$$k = \varepsilon.k_f + (1-\varepsilon) k_s \quad (3)$$

حيث ان : (ks) الموصلية الحرارية للزجاج و (kf) الموصلية الحرارية للهواء .

الانتشارية الحرارية الفعلية للوسط المسامي (Media thermal diffusivity):

$$\alpha = \frac{k}{\varepsilon(\rho C_p)_f + (1-\varepsilon)(\rho C_p)_s} \quad (4)$$

عدد رينولدز $Re=u_i H/v$ وعدد برانتدل $Pr=v/\alpha$ وعدد رايلي $Ra=g\beta K\Delta TH/\alpha v$

وعدد نسلت $Nu=q.H/k.\Delta T$ حيث أن $\Delta T=T_h-T_c$ ^[11] ، كمية الفيض الحراري

و u_i سرعة الهواء الداخل إلى المجرى، واللزوجة الكينماتية للهواء $v=15*10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$.

الجانب النظري

إن الفرضيات التي بنيت على أساسها مسألة انتقال الحرارة بالحمل المختلط هي

كما في الواقع العملي وهي انتقال الحرارة باتجاهين (x,y) ، وإن حد التوصيل المحوري

باتجاه (x) يهمل وإن الجريان وانتقال الحرارة في الحالة المستقرة (steady state) ،

والجريان من النوع (Slug Flow) أي أن السرعة لا تتغير مع المقطع Y وعد الوسط

متجانسا أي أن المادة الصلبة والمائع المنساب خلال المسامات موزعان بشكل منتظم في

الوسط المسامي . والحرارة المتولدة بتأثير اللزوجة مهملة. كما أن الوسط متساوي

الخواص في جميع الاتجاهات (ISOTROPIC) ، وخواص المائع ثابتة عدا الكثافة فإنها تتسبب من قوة الطفو مباشرة وحسب تقريب بويسينسك^[10] .

$$\rho = \rho_o [1 - \beta(T - T_o)] \quad (5)$$

$$\text{حيث } \beta = \frac{1}{T_{av}} = \frac{2}{T_h + T_c} = \text{معامل التمدد الحجمي}$$

أما المعادلات الحاكمة لمسألة انتقال الحرارة بالحمل المختلط خلال وسط مسامي مشبع فهي معادلة الاستمرارية والزخم والطاقة والمبين مخطط توضيحي لها في شكل (2) وكما يأتي^[10]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{-\rho_o g \beta}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \cos \Phi \quad (7)$$

$$\frac{u}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (8)$$

الصيغة اللابعدية :- إن الصيغة اللابعدية للمعاملات هي

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, Y = y/H, X = \frac{x/H}{\text{Re Pr}}, \Psi = \frac{\psi/H}{u}, Ra = \frac{g \beta K \Delta T H}{\alpha \nu}, Pe = \text{Re Pr} = \frac{u H}{\alpha}$$

$$, u = -\frac{\partial \Psi}{\partial y}, v = \frac{\partial \Psi}{\partial x}, U = u/V = 1$$

بعد تعويض هذه المعاملات في معادلة الزخم والطاقة تصبح بالشكل التالي :

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} + \frac{1}{(\text{Re Pr})^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} = \frac{Ra}{\text{Re Pr}} \frac{\partial \theta}{\partial X} \cos \Phi \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (10)$$

الفروقات المحددة

إن معادلات الزخم والطاقة بصيغة الفروقات المحددة تكون بالشكل الآتي^[10] :

$$\frac{\Psi_{i,j+1} - 2\Psi_{i,j} + \Psi_{i,j-1}}{\Delta Y^2} + \frac{1}{(\text{RePr})^2} \frac{\Psi_{i+1,j} - 2\Psi_{i,j} + \Psi_{i-1,j}}{\Delta X^2} = \frac{Ra}{\text{RePr}} \frac{\theta_{i+1,j} - \theta_{i-1,j}}{2\Delta X} \cos\Phi \quad (11)$$

$$\frac{\theta_{i+1,j} - \theta_{i-1,j}}{2\Delta X} = \frac{\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j} + \theta_{i,j-1}}{\Delta Y^2} \quad (12)$$

أما عدد نسلت فيتم حسابه كما يأتي :

$$Nu = \frac{Q_{net}}{Q_{cond}} \quad (13)$$

$$Q_{net} = \int -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} dx \quad (14)$$

$$Q_{cond} = kH\Delta T / L \quad (15)$$

$$Nux = \frac{\int_0^L \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} dx}{A\Delta T} \quad (16)$$

حيث أن :النسبة الباعية $A=H/L$

وبالصيغة اللابعدية :

$$Nux = \frac{\int_0^L \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{x=0} dX}{A} \quad (17)$$

وبصيغة الفروقات المحددة :

$$Nux = \frac{1}{A} \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\theta_{i+1,j} - \theta_{i-1,j}}{\Delta X} \quad (18)$$

الظروف الحدية :

1- $Y=0$, any X , $\Psi=0$, $\theta=1$

2- $Y=1$, any X , $\Psi=0$, $\theta=0$

3- $X=0$, any Y , $\Psi=0$, $\theta = \theta_{\infty}$

البرنامج الحاسوبي

استخدم برنامج حاسوبي بلغة بيسك السريعة (Q-Basic) كما يوضحه المخطط الانسيابي في شكل (3) لغرض الإسراع في الحساب يتم إدخال القيم الأولية من الظروف الحدية والخواص كافة في المعادلات (18,12,11) ثم تطبع النتائج على شكل ملفات ويتم تكرار العملية حتى تتساوى قيم درجات الحرارة الأولية والنهائية .

مناقشة النتائج

كما هو ملاحظ من الشكل (4) أن هناك طبقة متاخمة حرارية نمت على الجدار الساخن عندما ($Y=0$) وطبقة متاخمة باردة نمت على الجدار البارد عندما ($Y=1$) وللوهلة الأولى تبدو قليلة جداً أثناء الحمل القسري ($Pe=100$) في شكل (4-أ) ثم تزداد أثناء الحمل المختلط ($Pe=50$) في شكل (4-ب) وتبدو واضحة جداً أثناء الحمل الحر ($Pe \geq 0$) أي أن عدد بكليت قليل جداً في شكل (4-ج)، أما التوزيع الحراري فيلاحظ الانخفاض الواضح فيه مع الاستمرار بالتقدم إلى الأمام باتجاه المحور (x) فعند ($x=10\text{cm}$) تكون درجات الحرارة أعلى من المقطع ($x=30\text{cm}$) وكذلك عند ($x=50\text{cm}$) والسبب في ذلك يعود إلى برودة الهواء الداخل إلى المجرى . هذا بالنسبة للنتائج النظرية أما النتائج العملية فيلاحظ نفس السلوك ولكن بفارق قليل يعود إلى عدم دقة القراءة بسبب عدم توفر جهاز يقرأ جميع النقاط في آن واحد .

أما الشكل (5) فيبين الانحدار الحراري مع المحور العمودي اللابعد في منطقة الدخول الحراري ويلاحظ الانحدار الحراري بطئ نوعاً ما وهناك فرق بسيط بين النتائج النظرية والعملية ، حيث أن قيمة درجات الحرارة اللابعدية تنخفض من 1 إلى 0 بازدياد Y من 0 إلى 1 .

والشكل (6) يبين الانحدار الحراري مع المحور العمودي اللابعد في منطقة تمام التشكيل الحراري ويلاحظ الانحدار سريعا وهو مطابق لكل من [8,5].

الشكل (7) والذي يتضمن علاقة عدد نسلت (Nu) بالمحور الأفقي (x) فيلاحظ انخفاض قيمة عدد نسلت من (3.65) إلى (2.2) ثم تثبت عند هذه القيمة في حالة (Ra/Pe=130) وتنخفض قيمة (Nu) من (3.6) إلى (2.2) في حالة (Ra/Pe=65) كذلك تنخفض قيمة (Nu) من (3.2) إلى (2.2) في حالة (Ra/Pe=5) ، إن نقطة بداية ثبات عدد نسلت (Nu=2.2) تعتبر بداية منطقة التشكيل الحراري وبذلك فإن طول منطقة الدخول الحراري يكون (x=20cm) .

الشكل (8) يبين العلاقة الطردية بين عدد نسلت (Nu) و (Ra/Pe) حيث إن أعلى قيمة لعدد نسلت هي (3.64) عندما (Ra/Pe=130) وأقل قيمة لعدد نسلت هي (1.85) عندما (Ra/Pe=5) .

أما الشكل (9) فيبين تغير عدد نسلت مع زاوية ميلان مقطع الاختبار ولعدة حالات تبعا لتغير Ra/Pe ويلاحظ ازدياد عدد نسلت ببطء عند الزوايا القريبة من الأفق ولكن تصبح الزيادة سريعة عند الاقتراب من الخط العمودي .

الاستنتاجات

1- ظهرت ثلاثة حالات لانتقال الحرارة بالحمل وهي:

- a. حالة الحمل القسري (جريان سريع جدا) وهي عندما $Ra/Pe < 5$
- b. حالة الحمل المختلط (جريان بطيء) وهي عندما $5 < Ra/Pe < 130$
- c. حالة الحمل الحر (جريان معدوم أو بطيء جدا) وهي عندما $Ra/Pe > 130$

وهذه النتائج مقارنة لما جاء به المصدر [1]

2- يزداد عدد نسلت مع زيادة Ra/Pe والمعادلة الارتباطية بينهما هي :

$$Nu = 0.56 * \exp(0.72 \frac{Ra}{Pe}) \quad (19)$$

3- يزداد عدد نسلت مع زيادة ميلان الزاوية من 0 إلى 90 والمعادلة الارتباطية بينهما هي :

$$Nu = 2.45 * \exp(0.0125\phi) \quad (20)$$

3- يقل عدد نسلت باتجاه محور الجريان (x) .

4- طول منطقة الدخول الحراري هي (x=20 cm) لحالة الحمل المختلط Pe=50 .

5- الانحدار الحراري في منطقة تمام التشكيل الحراري أسرع منه في منطقة الدخول الحراري .

6- يوجد توافق جيد بين النتائج النظرية والعملية مع نسبة خطأ 2.5% .

المصادر

1-P.Cheng and T.S.Zhao “An Experimental Study of Mixed Convection Heat Transfer In Vertical Packed Channels” AIAA Journal of Thermodynamics and Heat Transfer, Vol.13(4),pp.517-521 , 1999 .

2-Haajizadeh ,M. “Convection in Horizontal Porous Media With Different end Temperatures” Ph.D.Thesis California University,Berkeley.

3-Jorge Llagostera “Numerical Study on Mixed Convection in Horizontal Flow Past a Square Porous Cavity using UNIFAES Scheme” J.Brazil Soc.Mech.Sci. Vol.22, No.4 ,Riode Janieiro 2000.

4-Pai-Yu Cheng “Mixed Convection in an Isothermally Horizontal Channel With Packed Spheres” J.C.C.I.T.,Vol.33,No.2,May,2005.

5-J.J.Shu "Inclined wall plumes in porous media" Fluid Dynamics Research ,vol.21, pp.303-317,(1997).

6- W.Koutsoheras "Natural Convection Phenomena In Inclined Cells With Finite Side Walls A Numerical Solution" J.Solar Energy ,Vol.19, pp.433-438, (1976).

7- T. S. Zhao* and Q. Liao " Mixed Convective Boiling Heat Transfer In A Vertical Capillary Structure Heated A Symmetrically" AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer ,Vol. 13 (3), pp. 302-307, 1999.

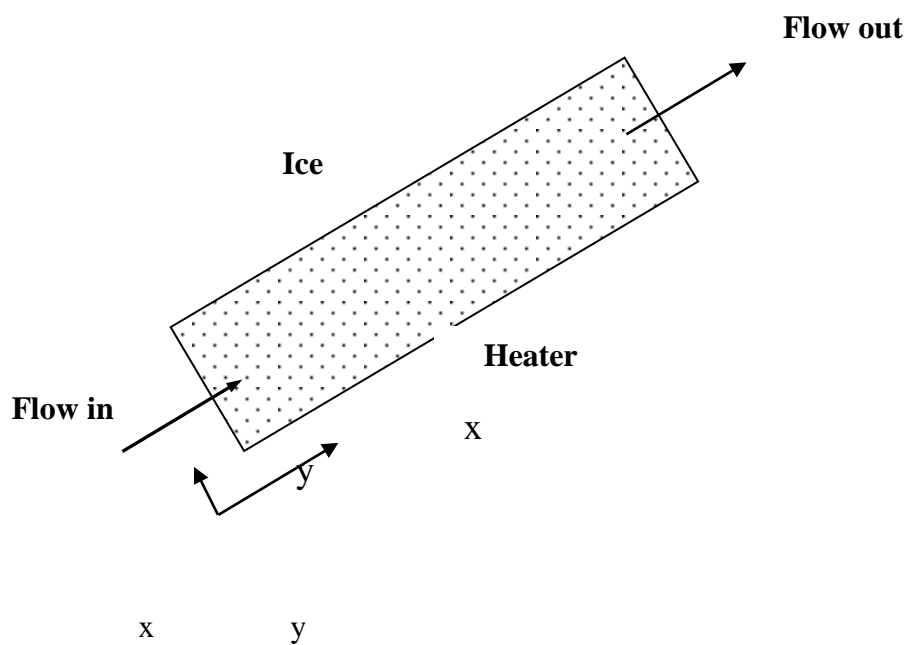
8- Vadim N.Kurdyumov "Free and Forced Convection Around Line Sources Of Heat and Heated Cylinders In Porous Media" J.Fluid Mech. Vol.427,pp.389-409,(2001).

9-Ka Kheng,TAN &Torng,SAM "Simulations Of The Onset Of Transient Convection In Porous Media Under Fixed Surface Temperature Boundary Condition" 2nd International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO,Melbourne,Australia .(1999)

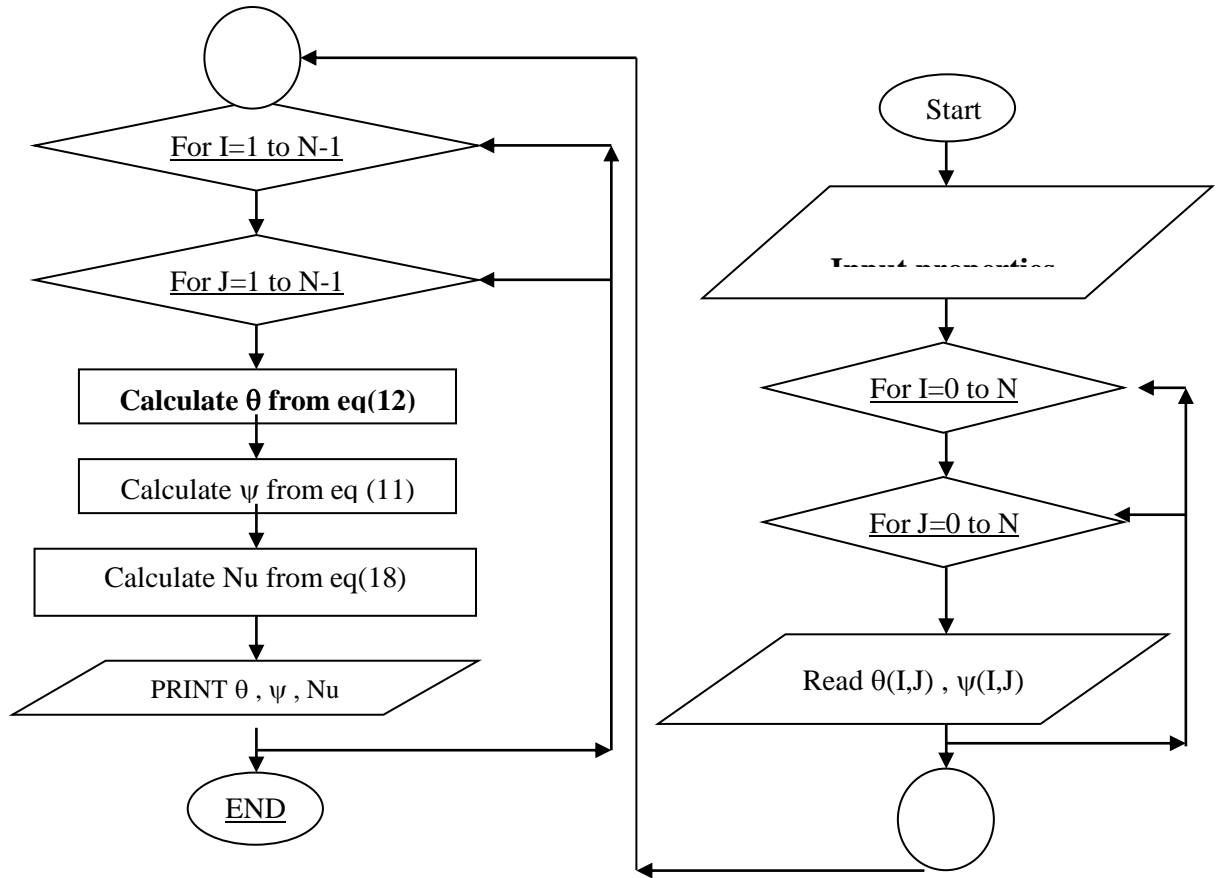
10- A.Bejan "Convection Heat Transfer" Text Book , John Wiley&Sons, New Yourk (1984).



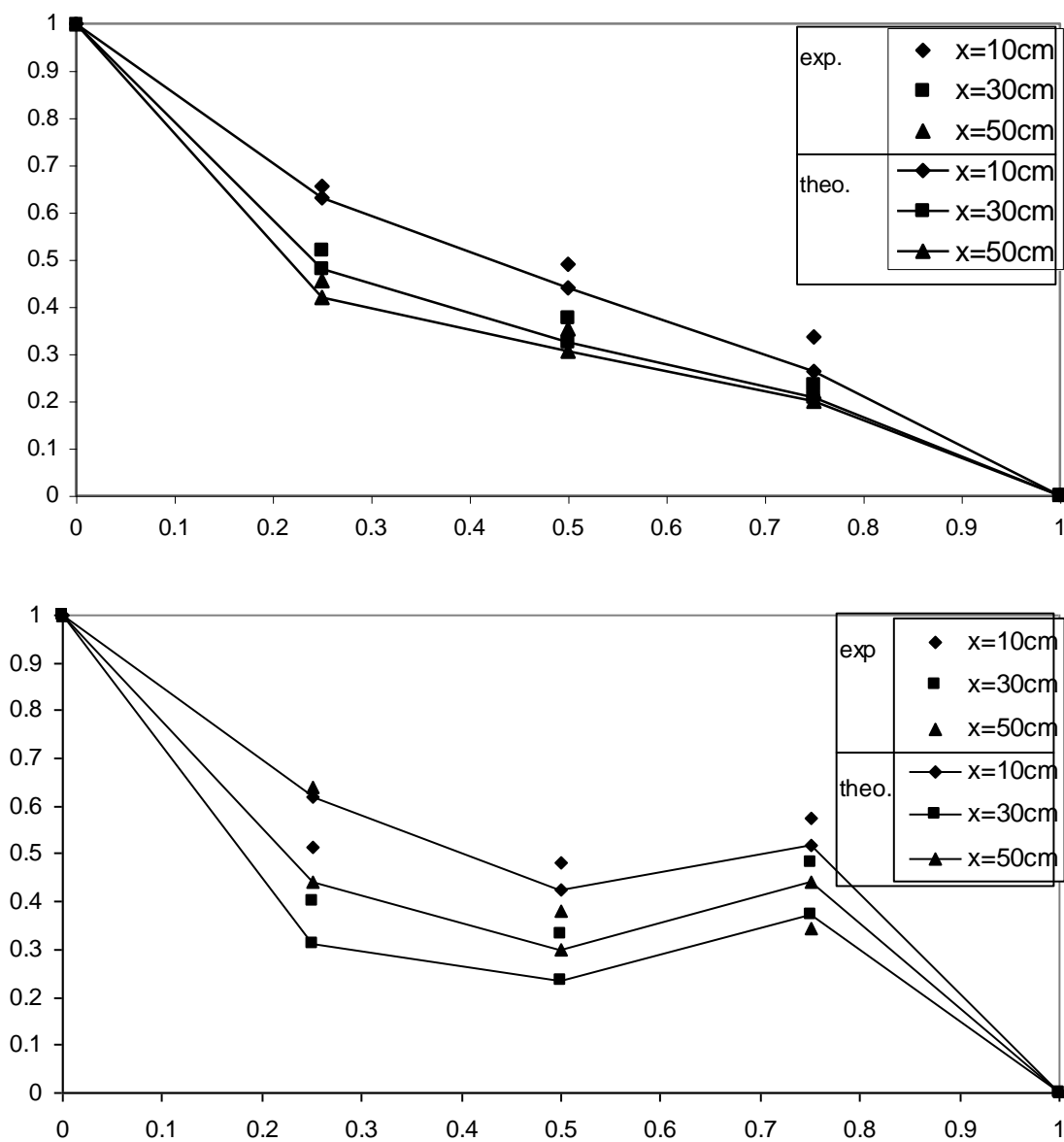
شكل (1) صورة الجهاز المستخدم



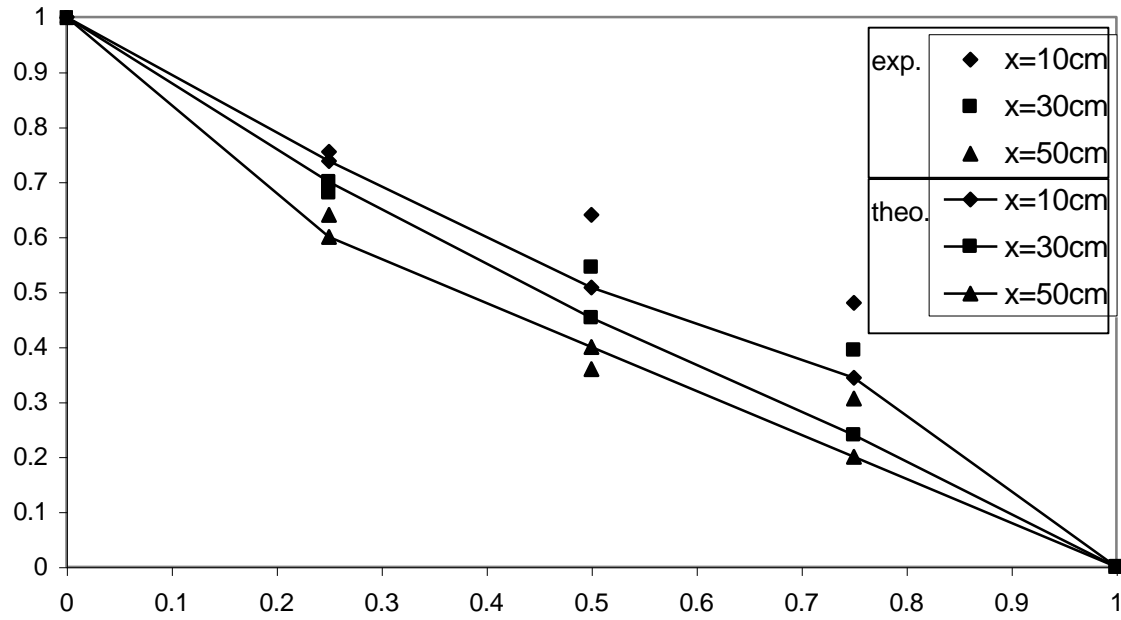
شكل (2) مخطط توضيحي للمسألة



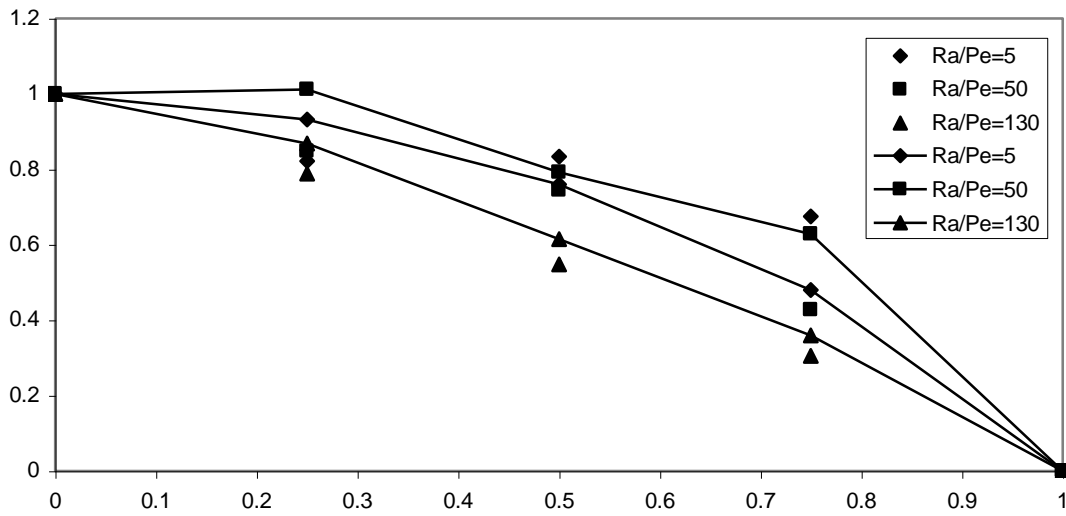
شكل (3) المخطط الانسيابي للبرنامج المستخدم



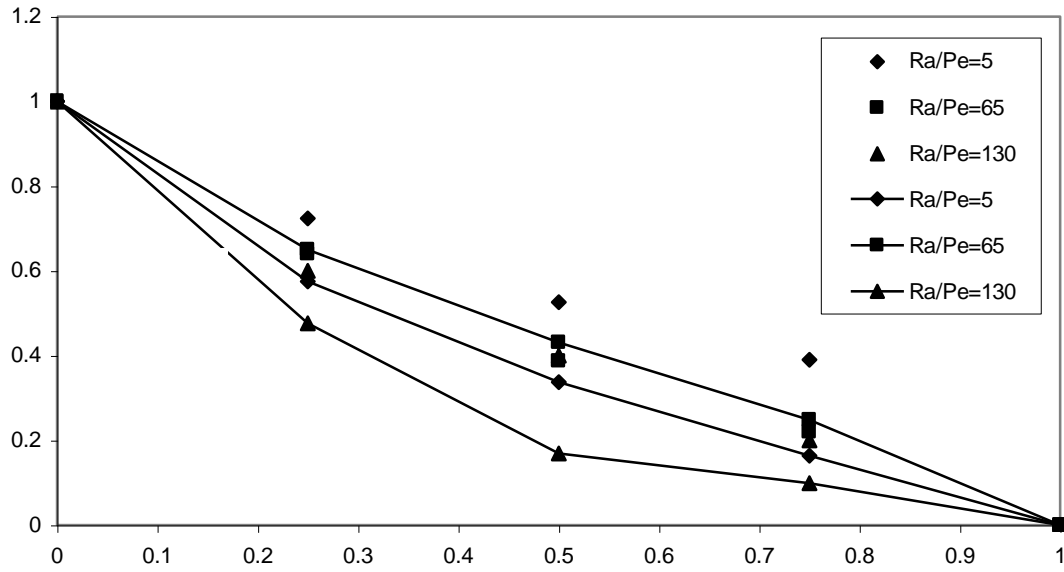
شكل (4) توزيع درجات الحرارة اللابعدية مع المحور العمودي اللابعد



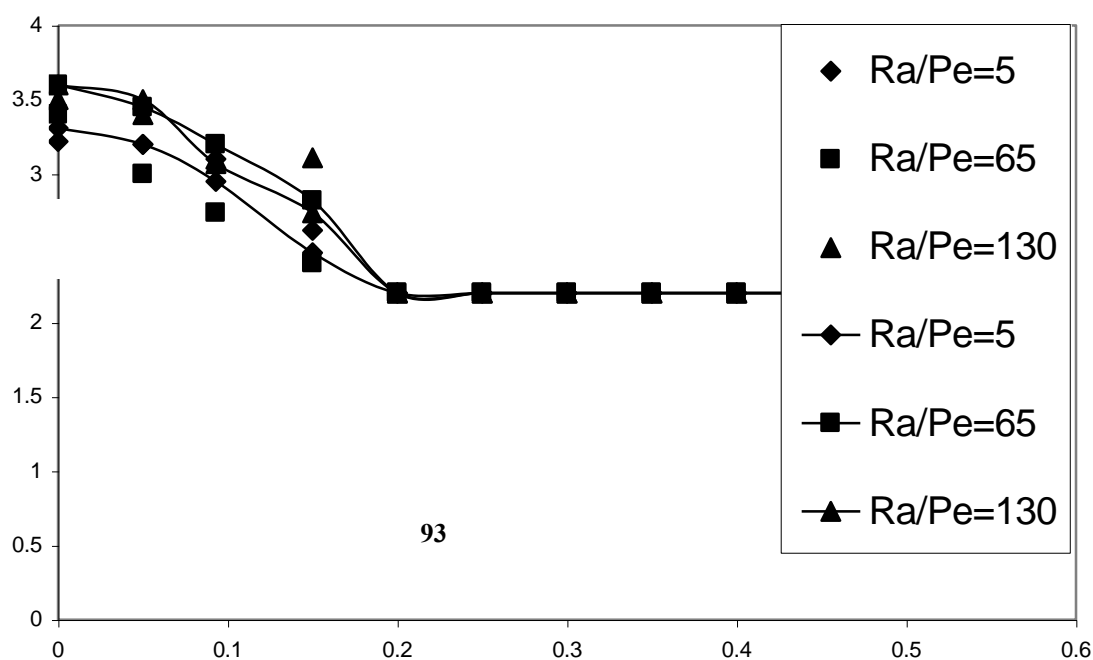
تابع لشكل (4)



شكل (5) توزيع درجات الحرارة اللاحدية مع المحور العمودي اللاحدي في منطقة الدخول الحراري

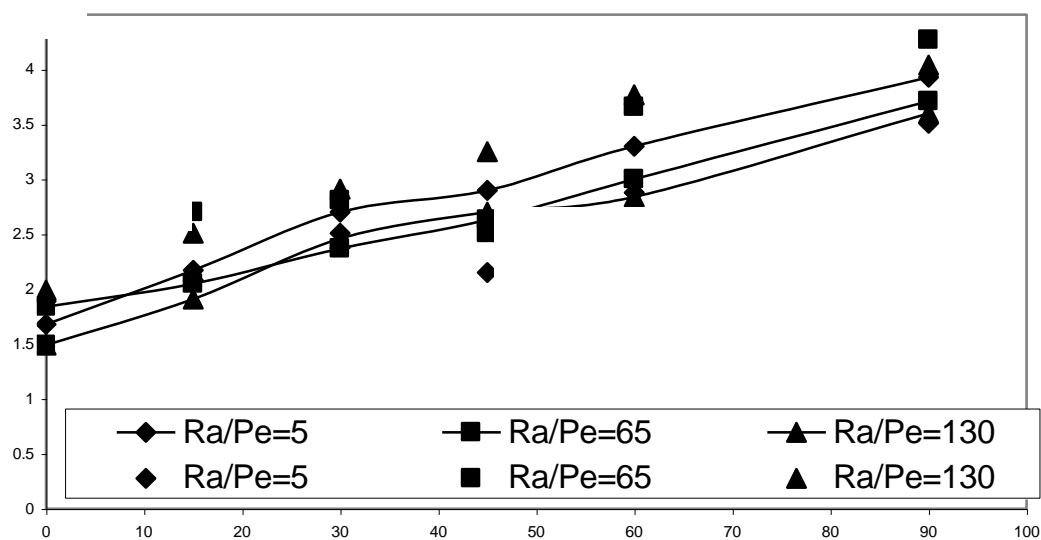


شكل (6) توزيع درجات الحرارة الالاعدية مع المحور العمودي الالاعدي في منطقة تمام التشكيل الحراري



شكل (7) تغير عدد نسلت مع المحور الأفقي

شكل (8) تغير عدد نسلت مع Ra/Pe



شكل (9) تغير عدد نسلت مع زاوية الميلان

AN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF MIXED CONVECTION THROUGH POROUS MEDIUM BETWEEN INCLINED TWO PLATES

**Adnan M.Hussein
Assistant Lecturer
Al-Hawija Institute**

ABSTRACT

An experimental and numerical study conducted on mixed convection through porous medium between inclined two plates , heated from below and cooled from top, an experimental contains manufacturing device and connecting thermocouples then reading temperatures for every thermocouple with inlet air velocity in the range : $5 < Pe < 100$, $100 < Ra < 650$, $0^\circ < \alpha < 90^\circ$.

A numerical study contains a solved of moment ,energy equations numerically with finite differences methods then ,using computer program written by Quick Basic Language to find temperatures for every point , Nu no. and then making comparisons between experimental and numerical results with error 2.5% .