دراسة نظرية لانتقال الحرارة بالحمل المختلط خلال قناة مثلثة درجة حرارة سطحها ثابتة

علي لفته كعيد*

تاريخ التسلم: 2004/12/19
تاريخ القبول: 2005/4/18

الخلاصة

في هذا البحث تم اجراء دراسة نظرية لانتقال الحرارة بالحمل المختلط خلال قناة مثلثة متساوية الاضلاع درجة حرارة سطحها ثابتة وموضوعة بشكل أفقي. جريان المائع خلالها طباقي ومكتمل النمو هيدروديناميكياً وفي طور التشكيل الحراري على افتراض ان المائع الجاري بعدد براندتل كبير حيث تم دراسة تأثير الحمل المختلط على انتقال الحرارة في منطقة الدخول ولاعداد رالي من 0 الى $4*10^5$ وذلك بحل معادلات نافير-ستوك ومعادلة الطاقة عددياً و باستخدام طريقة (الدوامية -دالة الانسياب) بعد تحويل هذه المعادلات التفاضلية المعقدة الى معادلات جبرية خطية بسيطة باستخدام تقنية الفروقات المحددة وبسبب التعقيد الموجود في الشكل الهندسي للقناة فقد تم استخدام نظام مطابقة احداثيات الجسم (B.F.C.S.)،ومن خلال النتائج التي تم الحصول عليها وجد ان زيادة عدد رالي تؤدي الى زيادة انتقال الحرارة في منطقة الدخول بسبب نشوء الجريان الثانوي الذي يزيد من سرعة مزج الحرارة خلال القناة وبالتالي يؤدي الى تقصير طول الدخول الحراري وان زيادة عدد بكلت تؤدي الى تقليل شدة الجريان الثانوي بسبب زيادة تأثير الحمل القسري الذي يحمل الجريان الثانوي وتبين ان وجود الزوايا يؤدي الى تقليل انتقال الحرارة بشكل كبير داخل القناة بسبب نمو طبقة متاخمة للزوايا تقلل من انتقال الحرارة من الجدار الى المائع.

الكلمات المفتاحية: انتقال الحرارة، الحمل المختلط، قناة مثلثة.

Theoretical Study Of Mixed Convection In Isothermal Triangular Channel

Abstract

Numerical study of mixed convection heat transfer within axial triangular channel was predicted. The channel surfaces have equal length and have a constant temperature. The fluid flow is hydrodynamic laminar buoyant and in thermal formed phase. The study involves the solution of partial differential equations for Navier-Stock and energy in terms of vorticity and stream-function by finite difference technique. The solution is done by using Body Fitted coordinate system due to the complex shapes of the triangular channel. The study demonstrates the effect of mixed convection heat transfer in entrance region for high Prandtl number and for Rayleigh numbers (0 - $4*10^5$), such that when Rayleigh number increases, the heat transfer in entrance region will increase due to generation of the secondary flow which causes increase in thermal mixing through the channel and finally reduces the thermal entrance length. When Peclet number increases, the secondary flow strength is reduced due to forced convection effect. The study shows that the channel angles reduce the heat transfer in channel because it generate boundary layer which decreases the heat transfer from surface to fluid.

* قسم هندسة المكائن والمعدات / الجامعة التكنولوجية

https://doi.org/10.30684/etj.24.7A.14
2412-0758/University of Technology-Iraq, Baghdad, Iraq
This is an open access article under the CC BY 4.0 license http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

قائمة الرموز

الرمز	الدلالة	الوحدات	الرمز
A	المساحة	m^2	A
B2	قاعدة المثلث	m	B2
D	القطر الهيدروليكي	m	D
g	التعجيل الارضي	m/s^2	g
H	ارتفاع المثلث	m	H
Th	زاوية الميل الراسية	°	Th
h	معامل انتقال الحرارة	$w/m^2.K$	h
k	الموصلية الحرارية	w/m .K	k
T	درجة الحرارة	K	T
T_w	درجة حرارة الجدار	K	T_w
P	الضغط	N/m^2	P
u, v, w	مركبات السرعة باتجاهات x,y,z	m/s	u,v,w
U,V,W	مركبات السرعة اللابعدية بالاتجاهات X,Y,Z	–	U,V,W
x, y, z	احداثيات القناة المثلثة	m	x,y,z
X,Y,Z	الاحداثيات اللابعدية	–	X,Y,Z
الرمز	الدلالة	الوحدات	الرمز
A	المساحة	m^2	A

الرموز اليونانية

الرمز	الدلالية	الوحدات
$\alpha\beta\gamma\alpha\lambda$	معاملات التحويل	–
ξ, η	الاحداثيات العمودية اللابعدية	–
θ	درجة الحرارة اللابعدية	–
μ	اللزوجة الديناميكية	$N.s/m^2$
ν	اللزوجة الكونماتية	m^2/s
ρ	الكثافة الكتلية	kg/m^3
ψ	دالة الانسياب	m^2/s
Ω	دالة التدويم	m/s
ψ	دالة الانسياب اللابعدية	–
Ω	دالة التدويم اللابعدية	–
αe	الانتشارية الحرارية	m^2/s
βe	معامل التمدد	1/K

الإعداد اللابعدية

Gr	عددكراشوف	–
Nu	عدد نسلت	–
Pe	عدد بكلت	–
Pr	عدد برانتدل	–
Ra	عددرالي	–
Re	عدد رينولدز	–

الرموز التحتية		الرموز الفوقية	
b	ظاهرية	–	معدل
i	المدخل	°	درجة
m	مزيج		
w	السطح		

1-مقدمة

ان للجريان وانتقال الحرارة خلال قناة مثلثة المقطع اهمية كبرى بسبب تطبيقاتها العملية الواسعة والمهمة في المبادلات الحرارية المكتنزة (Compact Heat Exchanger) التي تحوي زعانف تشكل مجاري مثلثة الشكل يجري فيها المائع حيث توفر مساحة انتقال حرارة كبيرة نسبة" الى الحجم الكلي تصل الى $700\ m^2/m^3$ لجريان الغازات و $400\ m^2/m^3$ لجريان السوائل،حيث تؤدي هذه الزعانف الى زيادة مساحة انتقال الحرارة ما بين السطح الصلب والمائع وبالتالي زيادة اداء المبادل الحراري وتقليل المساحة والوزن والطاقة المطلوبة علاوة على الكلفة، كما استخدمت هذه القنوات في بعض انواع أعادة توليد (Regeneration) المستخدمة في التوربينات الغازية ،علاوة على استخدامها في تبريد الاجهزة الالكترونية الدقيقة (Micro Heat Pipe) [1,2].

وقد بدأت دراسة الجريان و انتقال الحرارة في القنوات المثلثة في عام (1965) عندما قام كل من Sparrow و Haji-Sheikh [3] بتقديم دراسة نظرية عن انتقال الحرارة لجريان طباقي وتام التشكيل في قنوات غير دائرية المقطع والتي تضمنت قناة مثلثة متساوية الساقين وقطع دائرية درجة حرارة سطحها ثابتة حيث درس تأثير

نسبة الشكل للمثلث (نسبة القاعدة الى الارتفاع) على معامل انتقال الحرارة ومعامل الاحتكاك في القناة ، كما وجد ايضاً ان معامل انتقال الحرارة عندما زاوية الميل تساوي 90° يساوي النتائج عند الزاوية 0 ° وان معامل انتقال الحرارة للقناة المثلثة يعادل ربع ما هو عليه لحالة صفيحتين متوازيتين . وهذا يطابق ما توصل اليه كل من Shmidt و Newell [4] في عام (1967) من خلال دراستهما انتقال الحرارة بالحمل القسري في قناة مثلثة متساوية الساقين واخرى متكونه من صفيحتين متوازيتين ،اضافة الى دراستهما تأثير العزل الحراري لاحد اوجه القناة على معامل انتقال الحرارة . ،وفي عام (2002) قام Ibrahim Usun [5] بدراسة نظرية لانتقال الحرارة بالحمل القسري في مجموعة من القنوات غير الدائرية وكانت من ضمنها قناة مثلثة درجة حرارة سطحها ثابتة يجري خلالها مائع لانيوتوني(Non-Newtonion) (Pseudplastic ،n=0.5) مكتمل النمو هيدروديناميكيا وفي طور التشكيل الحراري ،حيث استخدم التحليل العددي في الحل بعد توليد شبكة عقد مؤلفة من الاحداثيات المنحنية الخطوط وتحويل المعادلات الحاكمة من نظام الاحداثيات الكارتيزية (x,y) الى نظام الاحداثيات المحسوبة (η,ζ) واستخدم طريقة الارخاء المفرط (Over Relaxation Method) في الحصول على النتائج التي بينت تأثير نوع المائع على متوسط معامل انتقال الحرارة خلال القناة في منطقة التشكيل الحراري التي وضحها بعلاقة عدد كراتيز مع متوسط معامل انتقال الحرارة

2-التحليل النظري :-

في هذه البحث تم دراسة انتقال الحرارة بالحمل المختلط خلال قناة مثلثة متساوية الاضلاع موضوعة بشكل افقي درجة حرارة سطحها ثابتة وجريان المائع خلالها طباقي ومكتمل النمو هيدروديناميكيا وفي طور التشكيل الحراري مؤلف من الجريان القسري الذي يحمل معه الجريان الثانوي الناتج من الحمل الطبيعي ،حيث افترض ان هبوط الضغط بالاتجاه المحوري ثابت اي ان الجريان المحوري لا يتأثر بالجريان الثانوي الناتج من الحمل الطبيعي اما تغير الكثافة فيتم اهمالها في جميع المقادير التحليلية الموجودة في المعادلات الحاكمة ماعدا حد الوزن باستخدام فرضية تقريب بوسنسك (Boussinesque Approximation) وبالتالي فان جميع الحدود غير الخطية المرتبطة بالمعادلات التفاضلية والناتجة من تغير الكثافة مع درجة الحرارة سيتم اهمالها كما تم اهمال حد تبدد اللزوجة (Viscous Dissipation) والتوليد الحراري (Heat Generation) من معادلة الطاقة ،وتتضمن المعادلات الحاكمة المستخدمة في الحل :-

1-معادلة الاستمرارية

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

2-معادلات الزخم

$$u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+\nu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \qquad (2)$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \qquad (3)$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+g\beta e(T-T_0) \qquad (4)$$

3-معادلة الطاقة

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}=\alpha e\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \qquad (5)$$

في المعادلات اعلاه تم افتراض $\frac{\partial w}{\partial z}=\frac{\partial v}{\partial z}=\frac{\partial u}{\partial z}=0$ على اعتبار ان الجريان المحوري مكتمل لنمو هيدروديناميكيا ولا يتأثر بالجريان الثانوي الناتج عن الحمل الطبيعي

[8,9,10]،وباستخدام العوامل اللابعدية الآتية -:

$$X=\frac{x}{D},\ Y=\frac{y}{D},\ Z=\frac{z}{\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}\,D},$$

$$W=\frac{w}{\frac{-D_h^2}{\mu}\frac{\partial p}{\partial z}},\ U=\frac{u}{W},\ V=\frac{v}{W},$$

$$\theta=\frac{T-T_w}{T_i-T_w},\ Pe=\bar{w}.D\ /\alpha e$$

$$Gr=g\beta ekD^3(T_i-T_w)/\alpha_e^2$$

$$Nu=h.D\ /k,\ \mathrm{Pr}=\nu/\alpha e$$

$$Ra=g\beta ekD^3(T_i-T_w)/\nu\alpha_e$$

$$\mathrm{Re}=wD\ /\nu,$$

بتعويض العوامل اللابعدية السابقة في المعادلات الحاكمة فأن الصيغة النهائية للمعادلات تصبح كما يأتي [6]:-

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \qquad (6)$$

$$\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 W}{\partial y^2}\right)=-1 \qquad (7)$$

$$U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial Y}=\frac{\partial P}{\partial X}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right) \qquad (8)$$

$$U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}=$$

$$\frac{\partial P}{\partial Y}+\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right)+\frac{Gr}{Re^2}\theta \qquad (9)$$

المعادلة (7) هي معادلة السرعة المحورية حيث تم فرض الجريان الثانوي الناتج عن الحمل الطبيعي له تأثير ضعيف بالمقارنة مع السرعة المحورية بحيث يمكن اهمال حد الحمل (Convection Term) من المعادلة واعتبار ان الجريان المحوري يبقى مكتمل النمو هيدروديناميكياً خلال القناة، وبإعطاء تعريف مركبة السرعة الافقية والشاقولية بدلالة دالة الانسياب (Stream Function) -:

$$U=\frac{\partial \Psi}{\partial Y} \qquad (10)$$

$$V=-\frac{\partial \Psi}{\partial X} \qquad (11)$$

وباعطاء تعريف معادلة الدوامية (Vorticity Equation) التي تحقق معادلة الاستمرارية:-

$$\Omega=\frac{\partial V}{\partial X}-\frac{\partial U}{\partial Y} \qquad (12)$$

وبتعويض المعادلتين (10) و (11) في المعادلة الدوامية فان الصيغة النهائية لمعادلة الدوامية بدلالة دالة الانسياب تصبح:-

$$\Omega=-\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2}\right) \qquad (13)$$

ونظراً للصعوبات المتعلقة بايجاد الضغط فقد استخدام الاشتقاق المتعاكس لمعادلتي الزخم الافقية (8) والشاقولية (9) ومن ثم طرح احدهما من الاخر بحيث يمكن التخلص من حد الضغط والحصول على معادلة واحده ، وباستخدام المعادلات (10) و(11) و (13) فان الصيغة النهائية لهذه المعادلة تصبح كالأتي :-

$$\frac{\partial \Psi}{\partial Y}\frac{\partial \Omega}{\partial X}-\frac{\partial \Psi}{\partial X}\frac{\partial \Omega}{\partial Y}=\frac{1}{\mathrm{Re}}\nabla^2\Omega-\frac{\mathrm{Gr}}{\mathrm{Re}^2}\frac{\partial \theta}{\partial X} \qquad (14)$$

حيث يمثل الحد $\frac{\mathrm{Gr}}{\mathrm{Re}^2}\frac{\partial \theta}{\partial x}$ تأثير الحمل الطبيعي الذي يؤدي الى توليد الجريان الثانوي الناتج من الفرق المتدرج في درجة حرارة المائع القريب من الجدار ، وبافتراض $\mathrm{Gr}=0$ فان تأثير الحمل الطبيعي ينعدم من المعادلة السابقة ويصبح الجريان بحمل قسري فقط [8,9]،اما بالنسبة الى معادلة الطاقة فتاخذ الصيغة اللابعدي الاتية بعد التعويض عن السرعة الافقية والشاقولية بتعريف دالة الانسياب :-

$$\mathrm{RePr}\left(\frac{\partial \Psi}{\partial Y}\frac{\partial \theta}{\partial X}-\frac{\partial \Psi}{\partial X}\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right)+\frac{W}{\bar{W}}\frac{\partial \theta}{\partial Z}=\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}+\frac{1}{\mathrm{RePr}}\frac{\partial 2\theta}{\partial Z^2}\right) \qquad (15)$$

بوضع بعض الفرضيات التي لا تخل بالحل العام يمكن تحويل المعادلة السابقة من مسألة جريان ثلاثية الابعاد الى مسألة ارتحالية ثنائية البعد(Marching Problem)[8,9 ,11,4] حيث يتم اسقاط

المشتقة الثانية لدرجة الحرارة من المعادلة السابقة عندما يكون عدد بكلت Pe (Pecelt Number) اكبر من 100 [7]،حيث تتحول معادلة الطاقة الى معادلة قطع مكافيء تحل بالطريقة الارتحالية لدرجة الحرارة.

اما الشروط الحدية المفروضة على الجدار فهي:-

$$\theta = U = V = W = \psi = 0$$

وعند المدخل:-

$$\theta_i = 1$$

ولغرض ايجاد معامل انتقال الحرارة الموضعي على محيط القناة يستخدم تدرج درجة الحرارة على الجدار[8]:-

$$Nu = -\frac{\left(\frac{\partial \theta}{\partial n}\right)_w}{\theta_b} \qquad (16)$$

اما متوسط عدد نسلت فيتم ايجاده من اجراء التكامل لعدد نسلت الموضعي على السطح ، او من اجراء موازنة حرارية على المائع الجاري خلال القناة [8,9]:-

$$\overline{Nu} = -\frac{\overline{W}\frac{\partial \theta}{\partial Z}}{4\theta_b} \qquad (17)$$

حيث تمثل θ_b درجة الحرارة الظاهرية التي يمكن استخراجها من المعادلة الأتية :-

$$\theta_b = \int_A W\theta \cdot dA \Big/ \int_A W \cdot dA \qquad (18)$$

اما معامل الاحتكاك فيمكن الحصول عليه بصيغة $f.Re$ باستخدام قانون دارسي بعد التعويض عن العوامل اللابعدية المستخدمة وكما يأتي :-

$$f.Re = \frac{2D_h\frac{\partial \bar{p}}{\partial z}}{\rho \overline{w}^2} \cdot \frac{\rho \overline{w} D_h}{\mu} = \frac{2}{\overline{W}} \qquad (19)$$

$\overline{W}$ تمثل متوسط السرعة المحورية التي يمكن استخراجها كما يأتي :-

$$\overline{W} = \int_A W \cdot dA \Big/ \int_A dA \qquad (20)$$

3-نظام مطابقة احداثيات الجسم (Body Fitted Coordinate System)

نظرا لتعقيد الشكل الهندسي للقناة فقد تم استخدام نظام مطابقة احداثيات الجسم (B.F.C.S) لتحويل نظام الاحداثيات الفيزيائية(y,x) الى نظام الاحداثيات العمومية (η,ζ) بتحويل الفراغ الفيزيائي الغير متعامد (y,x)الى فراغ حسابي متعامد متحول (η,ζ) مما يمكننا من انجاز الشروط الحدية بسهولة لان حدود الفراغ الفيزيائي تقع على خطوط الاحداثي المحسوب الشكل (2) [15,16]، وقد تم توليد شبكة العقد الثنائية الابعاد الموضحة بالشكل (3) بحل معادلة بويسن (Poisson equation) التي هي معادلة قطع مكافئ كما يأتي:-

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} = P(\zeta,\eta) \qquad (21)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = Q(\zeta,\eta) \qquad (22)$$

حيث تمثل P (η,ζ) و Q(η,ζ) دوال معروفة تستخدم للتحكم في تجمع الشبكة الداخلية ،وعن طريق اشتقاقات طويلة يتم تحويل الحسابات العددية الى المستوي المستطيل المتحول المنتظم ، حيث ينتج عن ذلك نظام ثنائي من معادلتين تفاضليتين جزئيتين :-

$$\alpha\frac{\partial^2 x}{\partial \zeta^2} - 2\beta\frac{\partial^2 x}{\partial \zeta \eta} + \gamma\frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} = -J\left(\frac{\partial x}{\partial \zeta}P(\zeta,\eta) + \frac{\partial x}{\partial \eta}Q(\zeta,\eta)\right) \qquad (23)$$

$$\alpha\frac{\partial^2 y}{\partial \zeta^2} - 2\beta\frac{\partial^2 y}{\partial \zeta \eta} + \gamma\frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} = -J\left(\frac{\partial y}{\partial \zeta}P(\zeta,\eta) + \frac{\partial y}{\partial \eta}Q(\zeta,\eta)\right) \qquad (24)$$

حيث ان :-

$$\alpha = \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \qquad (25)$$

$$\beta = \frac{\partial x}{\partial \zeta}\frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial y}{\partial \zeta}\frac{\partial y}{\partial \eta} \qquad (26)$$

$$\gamma = \frac{\partial^2 x}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial \zeta^2} \qquad (27)$$

المعادلة	ϕ	ω	A	B	S
معادلة السرعة المحورية	W	0	0	1	1
معادلة الزخم	Ω	Ψ	1	$\frac{1}{Re}$	$\frac{Gr}{Re^2}\frac{\partial\theta}{\partial x}$
معادلة الدوامية	Ψ	Ω	0	0	1
معادلة الطاقة	θ	Ψ	RePr	1	$-\frac{W}{\overline{W}}\frac{\partial\theta}{\partial Z}$

(31)

$$J=\frac{\partial(x,y)}{\partial(\zeta,\eta)}=\frac{\partial x}{\partial\zeta}\frac{\partial y}{\partial\eta}-\frac{\partial x}{\partial\eta}\frac{\partial y}{\partial\zeta} \qquad (28)$$

اما فيما يخص دوال التحكم المستخدمة فهي [18]:-

$$P(\zeta,\eta)=\frac{\partial x}{\partial\zeta}\frac{\partial^2 x}{\partial\zeta^2}+\frac{\partial y}{\partial\zeta}\frac{\partial^2 y}{\partial\zeta^2}\Bigg/\left(\frac{\partial^2 x}{\partial\zeta^2}+\frac{\partial^2 y}{\partial\zeta^2}\right) \qquad (29)$$

$$Q(\zeta,\eta)=\frac{\partial x}{\partial\eta}\frac{\partial^2 x}{\partial\eta^2}+\frac{\partial y}{\partial\eta}\frac{\partial^2 y}{\partial\eta^2}\Bigg/\left(\frac{\partial^2 x}{\partial\eta^2}+\frac{\partial^2 y}{\partial\eta^2}\right) \qquad (30)$$

ويتم تحويل المعادلات التفاضلية الحاكمة من نظام الاحداثيات الكارتيزية (x,y) الى نظام الاحداثيات العامة (ζ,η) حيث تصبح بذلك ملائمة مع استخدام نظام مطابقة احداثيات الجسم ويتم الاعتماد عليها في الحلول العددية ، ويمكن اعطاء معادلة تعطي تحويل لجميع المعادلات الحاكمة السابقة من المجال الفيزيائي (x,y) الى المجال المحسوب (ζ,η) ومعادلة التحويل هذه تأخذ الصيغة الأتية:-

$$A\left[\left(-\frac{\partial\omega}{\partial\zeta}\frac{\partial\phi}{\partial\eta}+\frac{\partial\omega}{\partial\eta}\frac{\partial\phi}{\partial\zeta}\right)\Big/J\right]=B\left[\left(\lambda\frac{\partial\phi}{\partial\zeta}+\sigma\frac{\partial\phi}{\eta}+\alpha\frac{\partial^2\phi}{\partial\zeta^2}-2\beta\frac{\partial^2\phi}{\partial\zeta\eta}+\gamma\frac{\partial^2\phi}{\partial\eta^2}\right)\Big/J^2\right]+S$$

حيث تمثل ϕ و ω المتغيرات المستخدمة بالمعادلات الحاكمة و A و B الثوابت و S تمثل (source term) و باستخدام

الجدول (1) يمكن الحصول على جميع المعادلات الحاكمة المطلوبة .

الجدول (1)

يتم الحصول على الدوامية على محيط القناة باستخدام متسلسلة تايلر(Taylar Series) من الدرجة الاولى والتي تكون صيغتها النهائية بعد تحويلها الى نظام الاحداثيات المحسوبة كما يأتي [17]:-

$$\Omega=\frac{\gamma}{J^2}\frac{\partial^2\Psi}{\partial\eta^2} \qquad (32)$$

لحالة خطوط (η) ثابتة

$$\Omega=\frac{\alpha}{J^2}\frac{\partial^2\Psi}{\partial\zeta^2} \qquad (33)$$

لحالة خطوط (ζ) ثابتة

فيما يتعلق بالمعادلة (16) التي تحوي على مشتقة من الدرجة الاولى عمودية على محيط القناة فقد تم تحويلها باستخدام المعادلات الموجودة بالملحق (2) التي يمكن من خلالها تحويل المعادلات الى نظام الاحداثيات العمومية وتوفير تعامد مع نقاط الشبكة الداخلية بنفس الوقت .[15,16,17]

4-الحل العددي :-

باستخدام تقنية الفروقات المحددة في الحل العددي تم تحويل المعادلات التفاضلية اللاخطية السابقة الذكر الى معادلات جبرية خطية لتتحول المسألة من مشكلة جسمانية دقيقة الى مشكلة جبرية تقريبية يمكن حلها بسهولة باستخدام طرق التحليل العددي ،وقد استخدم طرق مختلفة في الحل العددي للوصول الى النتائج يمكن ايجاز طريقة الحل المستخدمة لكل معادلة بما يأتي :-

1-تم توليد شبكة العقد بحل المعادلتين (23) و (24) بطريقة S.O.R (Successful (Over-relaxation Methed [!8,16] حيث يتم الحصول على توزيع X(i, j) و Y(i, j) الموضح بالشكل(3) .

2-تم حل معادلة السرعة المتمثلة بمعادلة بويسن (Poisson equation) والتي هي معادلة قطع مكافيء باستخدام طريقة (S.O.R) حيث يتم الحصول على توزيع السرعة المحورية W(i,j) التي تبقى ثابتة خلال القناة ولا تتأثر بالجريان الثانوي الناتج عن الحمل الطبيعي.

3-تم استخدام طريقة الارخاء (Relaxation Method) في حل معادلة دالة الانسياب حيث يمكن استخراج دالة الانسياب Ψ(i,j) في كل عقدة بالأرخاء الى اصغر قيمة للمتبقي والتي فرضت 0.001.

4-للحصول على الدوامية Ω(i,j) في كل نقطة فقد استخدم طريقة ADI Alternating Direction Implicit) (Method[16] في حل معادلة نقل الدوامية.

5-فيما يخص معادلة الطاقة التي هي معادلة قطع مكافيء فقد تم استخدام طريقة ADI في الحل العددي للحصول على توزيع درجة الحرارة بالاتجاه المحوري حيث تمثل $\theta^n(i,j)$ في الخطوة الاولى درجة الحرارة عند مدخل القناة و $\theta^{n-1}(i,j)$ درجة الحرارة في نقطة تبعد dz عن مدخل القناة.

6-يستمر باعادة الخطوات من (3) الى (4) حتى يتحقق الشرط التالي:-

$$\varepsilon = \frac{Nu^{n+1} - Nu^{n}}{Nu^{n+1}} < 10^{-5}$$

حيث يكون الجريان قد اصبح تام التشكيل حراريا ويثبت قيمة عدد نسلت لحالة الحمل القسري عند Nu=2.51 تقريبا والتي تعطي نسبة خطأ 1.62% مع النتائج التي حصل عليها Shah [2].

5-مناقشة النتائج:

ان الجريان وانتقال الحرارة خلال قناة مثلثة تواجه بعض التعقيد بسبب وجود الزوايا التي تؤدي الى حدوث تغيرات كبيرة في كل من اجهاد القص وانتقال الحرارة على محيط القناة ،ولغرض التأكد من موثوقية النموذج الرياضي العددي والنتائج التي تم الحصول عليها في الدراسة الحالية التي تضمنت انتقال الحرارة بالحمل المختلط خلال قناة مثلثة متساوية الاضلاع (Th=60) فقد تم في البداية مقارنة نتائج الحل العددي لمعدل معامل انتقال الحرارة ودرجة الحرارة الظاهرية في اثناء التشكيل الحراري عندما يكون انتقال الحرارة بالحمل القسري حيث Ra=0 في قناة مثلثة زاوية ميلها الرأسية90° مع النتائج التي حصل عليها Ibrahim Uzun [5] الموضح في الشكل (4) حيث وجد توافق جيد في النتائج ،ونظراً لعدم توفر دراسات سابقة لانتقال الحرارة بالحمل المختلط خلال قناة مثلثة فقد تم اجراء تحوير للبرنامج المستخدم لايجاد معدل معامل انتقال الحرارة خلال قناة مربعة اثناء عملية التشكيل الحراري وبمقارنة هذه النتائج مع دراسة Jenn-Wuu and Cheng and [11] Chau وجدت النتائج مطابقة كما موضح في الشكل (5)..

ان تأثير الزوايا على الجريان المحوري خلال القناة والتي افترضت تامة التشكيل هيروديناميكيا يمكن ملاحظته من خلال الشكل (6) الذي يعطي توزيع السرعة داخل القناة حيث نجد ان سرعة المائع تقل بالاقتراب من الزوايا بسبب الزيادة التي تحدث في اجهاد القص قرب الزوايا والتي تؤدي الى زيادة سمك طبقة المائع المتاخمة للزوايا ،كما ان معامل انتقال الحرارة ومعامل الاحتكاك لحالة الجريان بالحمل القسري تكون اقل بالمقارنة مع القناة الدائرية والمستطيلة والجريان بين لوحين [8,9,11,12, 13, 14,]بسبب التغيرات المحيطية التي تسببها وجود الزوايا. اما بالنسبة الى انتقال الحرارة بالحمل المختلط خلال القناة حيث يظهر تأثير الحمل الطبيعي الذي يؤدي الى توليد الجريان الثانوي الذي يحمل بالجريان الرئيسي (المحوري) خلال القناة فنجد من الشكل (7) الذي يوضح مركبة السرعة الافقية والشاقولية التي تشكل الجريان الثانوي خلال القناة لحالة التبريد ، ان ميكانيكية نشوء هذا الجريان يعتمد على ان المائع الساخن الملاصق لجدار القناة يبدأ بالتبريد ويتحرك بموازاة السطح المائل الى

الاسفل وعند اصطدامه بالزوايا الموجودة في قاعدة القناة فان اتجاه حركته تنحرف الى داخل القناة حيث يجري بموازاة القاعدة وعند اصطدامه بتيار المائع القادم من النصف الثاني من القناة والتي تكون متساوية بالشدة فان اتجاه حركته تنحرف الى الاعلى بموازاة المحور الشاقولي المنصف للقناة حيث يسحب معه المائع الساخن الموجود في منتصف القناة وعند اصطدامه بزاوية الرأسية الموجودة في قمة القناة فانه ينحرف باتجاهين متعاكسين ويجري بموازاة السطح المائل في كل نصف من القناة حيث يبرد مره ثانية ، ويساعده في هذه الحركة زيادة كثافة المائع البارد الملاصق لجدار المائل ونزوله الى الاسفل وانخفاض كثافة المائع الساخن الموجود في منتصف القناة بالمقارنة مع المائع البارد وبالتالي صعوده الى الاعلى حيث ينتج من هذه الحركة الجريان الثانوي الذي تعتمد شدته على عدد رالي المستخدم ،ويمكن معاينة الجريان الثانوي الناتج من الحمل الطبيعي خلال القناة برسم خطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الجريان في اماكن متتالية من مدخل القناة وحتى منطقة تمام التشكيل ومن اجل توضيح تاثير عدد رالي على شدة الجريان الثانوي فقد استخرجت النتائج عندما يكون عدد بكلت 300 وعدد رالي 3000 و80000 في مقاطع مختلفة خلال القناة كما موضح بالاشكال من (8) الى (19) حيث نجد ان جريان الثانوي يبدأ بالنمو من مدخل القناة ويشتد تأثيره تدريجياً حتى يأخذ اعظم شده له في منطقة ما من مدخل القناة بالاعتماد على عدد رالي المستخدم حيث يصل اعظم شده له عند Z=0.03 عندما يكون عدد رالي 3000 وعند Z=0.005 عندما عدد رالي يكون 80000 ، يبدأ الجريان الثانوي بعدها يضعف تدريجياً حتى الوصول الى منطقة تمام التشكيل حيث يتلاشى الجريان الثانوي نهائياً لان الفرق بين درجة حرارة الجدار ودرجة الحرارة الظاهرية للمائع الجاري يصبح قليل ولا يسمح بنشوء الجريان الثانوي . ويلاحظ ان استخدام اعداد رالي كبيرة تؤدي الى سرعة الوصول الى منطقة تمام التشكيل بسبب المزج الكبير للحرارة الذي يولده الجريان الثانوي مما يؤدي الى تقصير طول الدخول حيث ان الجريان يصل تمام التشكيل عند استخدام عدد رالي 3000 عندما Z=0.984 وعند Z=0.804 عندما يكون عدد رالي 80000 ،اما بالنسبة الى مركز الجريان الثانوي فنجد أنه يكون قريباً من السطح المائل في منطقة الدخول حيث يشغل تغير درجة الحرارة حيزا قليلا قرب السطح المائل وعند الابتعاد اكثر عن المدخل فأنه يبدأ بالابتعاد عن السطح المائل ويصعد الى الاعلى لان المائع الساخن يستمر بالصعود في حين يشغل المائع البارد سمكا اكبر من الطبقة المتاخمة لقاعدة القناة ،اما بالنسبة الى خطوط تساوي درجة الحرارة الموضحة في الطرف اليمين من الاشكال السابقة فنجد ان تغير درجة الحرارة لا يشغل الا حيزاً ضيق بمحاذاة السطح في بداية القناة ولكن بالابتعاد عن منطقة الدخول فأن هذا التأثير يبدأ بالتقدم الى داخل القناة بسبب زيادة فرق درجة الحرارة بين المائع المتاخم للجدار ودرجة الحرارة الظاهرية والذي يؤدي الى نشوء الجريان الثانوي الذي يقوم بحمل المائع الساخن الموجود في منتصف القناة الى الاعلى في الوقت الذي ينزل المائع البارد الملاصق للجدار المائل الى الاسفل مما يؤدي الى حدوث تغير كبير في خطوط تساوي درجة الحرارة في منتصف قاعدة القناة بسبب شدة الجريان الثانوي الذي يستمر بدفع المائع الساخن الى اعلى القناة في حين تنخفض درجة حرارة المائع الملاصق لقاعدة القناة لنزول المائع البارد ويشتد هذا التاثير في منتصف قاعدة القناة عند استخدام اعداد رالي كبيره ويمكن ملاحظة ذلك في الاشكال (13)و(15) و(17) ،بعد ذلك يبدأ تأثير التبريد يتقدم تدريجياً الى داخل القناة من القاعدة في حين يبقى درجة حرارة المائع القريب من قمة القناة اعلى بسبب استمرار صعود المائع الساخن اليه ، وباستمرار الابتعاد عن منطقة الدخول فأن تأثير التبريد يصل الى جميع

اجزاء المائع الموجود في القناة وتصبح درجة الحرارة الظاهرية مساويه لدرجة حرارة الجدار في منطقة تمام التشكيل حيث يضمحل الجريان الثانوي نهائياً من القناة ويصبح الجريان بحمل قسري فقط .

من اجل توضيح تأثير الحمل الطبيعي على مركبة السرعة الافقية على طول المحور الشاقولي المنصف للقناة نلاحظ من الشكل (20) و(21) ان اكبر شدة لمركبة السرعة الافقية يكون في مدخل القناة ويقل تدريجياً بالابتعاد عن المدخل وينعكس اتجاهه في منطقة ما من مدخل القناة بالاعتماد على عدد رالي المستخدم حتى يزول نهائياً في منطقة تمام التشكيل حيث ينعدم الجريان الثانوي ويلاحظ ان شدة الجريان يكون اكبر عند استخدام عدد رالي عالي ، فيما يخص الى تأثير عدد بكلت على الجريان الثانوي فنجد من خلال الشكل (22) ان زيادة عدد بكلت تؤدي الى تقليل شدة مركبة السرعة الافقية بسبب زيادة تأثير الحمل القسري وبالتالي تقليل شدة الجريان الثانوي نسبة" الى السرعة المحورية ،اما تغير درجة حرارة المائع على طول المحور الشاقولي المنصف للقناة فنجد من خلال الشكل (23) و (24) ان زيادة عدد رالي تؤدي الى سرعة انخفاض درجة حرارة المائع القريب من القاعدة في الوقت الذي تزداد فيه درجة حرارة المائع الموجود قرب الزاوية الرأسية وسبب ذلك هو صعود المائع الساخن الى الاعلى بواسطة الجريان الثانوي في الوقت الذي ينزل فيه المائع البارد الى القاعدة .

ونظراً لأهمية تأثير قوة الطفو على تحسين انتقال الحرارة داخل القناة فقد تم ايجاد القيمة الموضعية لمعامل انتقال الحرارة على محيط القناة لتوضيح تأثير الزوايا فيها ،حيث تم في البداية توضيح انتقال الحرارة على محيط القناة لحالة الحمل القسري من خلال الشكل (25) فتبين ان اعظم قيمة لمعامل انتقال الحرارة يكون في منتصف القاعدة والسطح المائل ويقل تدريجياً بالاقتراب من الزوايا حتى ينعدم في الزاويا والسبب في ذلك ان مساحة انتقال الحرارة من الجدار الى المائع يكون اكبر عند الزوايا مما يؤدي الى نمو طبقة متاخمة من المائع تعيق وصول تأثير الحرارة من الزوايا الى باقي اجزاء المائع الموجود داخل القناة، كما نجد ان معامل انتقال الحرارة يقل على جميع محيط القناة عند الابتعاد عن المدخل ويثبت في منطقة تمام التشكيل ،فيما يخص الشكلين (26) و (27) اللذان يوضحان معامل انتقال الحرارة لحالة الحمل المختلط لعدد رالي يساوي 3000 و 80000 على التوالي فنجد أن معامل انتقال الحرارة يبدأ بالزيادة تدريجياً على السطح المائل ويقل في القاعدة كلما ابتعدنا عن مدخل القناة بسبب الجريان الثانوي الذي يسحب معه المائع البارد الى اسفل القناة ويدفع المائع الساخن الى الاعلى الا انها تبدأ بالعودة الى قيمتها المحاذية لانتقال الحرارة بالحمل القسري في منطقة تمام التشكيل حيث يتلاشى الجريان الثانوي نهائياً من القناة ،ونلاحظ من الشكل (28) ان زيادة معامل انتقال الحرارة على السطح المائل وتناقصها في القاعدة تزداد كلما ازداد عدد رالي بسبب الزيادة في شدة الجريان الثانوي كما نجد ان موضع اكبر معامل انتقال حرارة يقترب من الزاوية الرأسية كلما ازداد عدد رالي بسبب الزيادة في شدة الجريان الثانوي الذي يحمل معه المائع الساخن الى الاعلى ،اما بالنسبة الى معدل معامل انتقال الحرارة فنجد من الشكل (29) ان معامل انتقال الحرارة لحالة الحمل القسري يقل تدريجياً بالابتعاد عن مدخل القناة ويصل اقل قيمة له في منطقة تمام التشكل حيث تصبح درجة حرارة المائع مساوية لدرجة حرارة السطح ،اما عند زيادة عدد رالي فنجد ان معامل انتقال الحرارة يبدأ بالزيادة في منطقة الدخول واعظم قيمة يصلها يكون في الموقع الذي يحدث فيه اعظم جريان ثانوي حيث يزداد معدل انتقال الحرارة من الجدار الى المائع بسبب سرعة مزج الحرارة داخل القناة وبالتالي سرعة وصول معامل انتقال الحرارة الى قيمتها المحاذية لانتقال الحرارة بالحمل القسري

،ويمكن ملاحظة تأثير عدد رالي على درجة الحرارة الظاهرية للمائع من خلال الشكل (30) حيث نجد ان زيادة عدد رالي تؤدي الى الاسراع من عملية التشكيل الحراري للمائع داخل القناة وتقصير طول الدخول والذي يمكن توضيحه من خلال الشكل (31) كما ويمكن إعطاء علاقة ارتباطية بين طول الدخول وعدد رالي عند انتقال الحرارة بالحمل المختلط في قناة مثلثة متساوية الأضلاع درجة حرارة سطحها ثابتة بالمعادلة الاتية:-

$$Z = 2.3085 * Ra^{-0.095}$$

6-الاستنتاجات :-

1-ان انتقال الحرارة بالحمل المختلط خلال قناة مثلثة درجة حرارة سطحها ثابتة يكون ذا اهمية في منطقة الدخول فقط حيث يؤدي الى تحسين معامل انتقال الحرارة بسبب الجريان الثانوي الذي يسببه الحمل الطبيعي في حين تعود الى حالتها المحاذية لانتقال الحرارة بالحمل القسري في منطقة تمام التشكيل وان تأثير الحمل الطبيعي يمكن ان يهمل عندما يكون $Ra \leq 1500$ ،كما ان تأثير الحمل الطبيعي يتلاشى تأثيره تدريجيا لجميع اعداد رالي عندما يصل الجريان الى $Z=0.2$ تقريبا من مدخل القناة.

2- ان زيادة عدد رالي تؤدي الى تقصير طول الدخول بسبب سرعة مزج الحرارة الذي يولده الجريان الثانوي الناتج عن الحمل الطبيعي

3- ان زيادة عدد بكلت تؤدي الى تقليل شدة الجريان الثانوي بسبب زيادة تأثير الحمل القسري المتمثلة بالجريان المحوري الذي يحمل معه الجريان الثانوي الناتج من الحمل الطبيعي .

4-ان الدراسة الحالية اهملت تأثير الحمل الطبيعي على الجريان المحوري حيث فرضت ان الجريان يبقى تام التشكيل هيدروديناميكيا خلال القناة وعدد برانتل للمائع الجاري كبير بالاعتماد على نتائج الدراسات السابقة التي اعتبرت ان استخدام عدد برانتل اكبر من 10 لا يؤدي الى حدوث تغيرات كبيرة في معامل انتقال الحرارة مهما ازداد Re Ra [8] .

المصادر

1. Baliga B.R. and Azrak R.R. ," Laminar Fully Developed Flow and Heat Transfer in Triangular Plate – Fin Ducts ", J. Heat Transfer , Vol. 108, P.P. 24-32, February 1986.
2. Shah R.k., "Laminar Flow Friction and Forced Convection Heat Transfer in Ducts of Arbitrary Geometry ", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 18, P.P. 849-862, 1975.
3. Sparrow E.M. and Haji-sheikh A., " Laminar Heat Transfer and Pressure Drop in Isosceles Triangular, Right Triangular, and Circular Sector Ducts", J. Heat Transfer, P.P. 426-427, August 1965.
4. Schmidt F.W. and Newell M.E., "Shorter Commu-nications Heat Transfer in Fully Developed Laminar Flow Through Rectangular And Isosceles Triangular Ducts ",Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 10, P.P. 1121-1123, 1967.
5. Ibrahim Uzun, "Heat Transfer to a Power-Law Fluid in Arbitrary Cross-Sectional Ducts", J. Eng. Env. Sci 26, P.P. 7-14, 2002.
6. Dale A. Andrson ,John C.Tannehill, Richard H.Plectcher, "Computatio-nal Fluid Mechanics and Heat Transfer ", 1984.
7. Kays W.M. Convective Heat And Mass Transfer, McGraw-Hill Inc. 1975.
8. Cheng K.C., Hong S. W. and Hwang G.J., "Buoyancy Effects On Laminar Heat Transfer in the Thermal Entrance Region Of

Horizontal Rectangular Channels With Uniform Wall Heat Flux For Large Prandtl Number Fluid", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 15, P.P. 1819-1836, 1972.

9. Cheng K.C. and Guang- jyh Hwang, "Numerical Solution For Combined Free and Forced Laminar Convection in Horizontal Rectangular Channels", J. Heat Transfer, P.P. 59-66, February 1969.

10. مهند عبد الفتاح الظاهر "انتقال الحرارة بالحمل المختلط خلال أنبوب دائري افقي مملوء بوسط مسامي مشبع" اطروحة دكتوراه ،الجامعة التكنولوجية، هندسة المكائن والمعدات، تشرين الاول 2000.

11. Jenn-Wuu Ou, Cheng K.C. and Chau Lin,. , " Natural Convection Effects On Graetz Problem In Horizontal Rectangular Channel With Temperature for large Pr ",Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 17, P.P. 835-843, 1974.

12. Depew C.A., August S.E., " Heat Transfer Due to Combined Free and Forced Convection in a Horizontal and Isothermal Tube ",J. Heat Transfer , P.P. 380-384, November 1971.

13. Abou-Ellail M. M. M. ,Morocos S. M., "Buoyancy Effect in the Entrance Region of Horizontal Rectangular channels", J. Heat Transfer, Vol. 105, P.P. 924-928, November 1983.

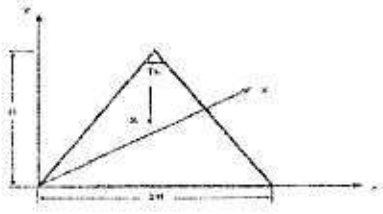
14. Newell P.H., Bergles A.E., "Analysis of Combined Free and Forced Convection For Fully Developed Laminar Flow in Horizontal Tubes", J. Heat Transfer, P.P. 83-93, February 1970.

15. Joe F. Thampson , Warsi Z.U.A. "Numerical Gride Generation", 1985.

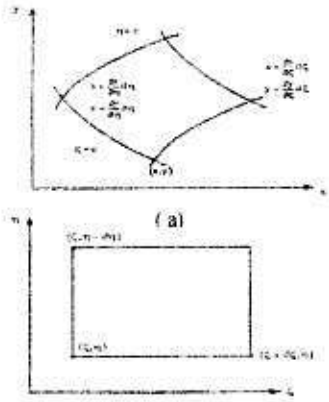
16. علي لفته كميد، " دراسة عددية لانتقال الحرارة بالحمل القسري خلال مجموعة من الانابيب باستخدام نظام مطابقة احداثيات الجسم (B.F.C.) "،اطروحة ماجستير ،الجامعة التكنولوجية،هندسة المكائن والمعدات، شباط 2002 م.

17. Broughton R.C. and OliverA.J."A Numerical Model for convection in complex two-dimensional geometries and its application to buoyancy flow in power cable ",Int. Heat Transfer Conference ,Vol.2,P.P.447-451,1986.

18. Fletcher C.A.J. and Srinivas K., "Computational Techniques For Fluid Mechanics",Berlin,Spring-Verlag 1992.



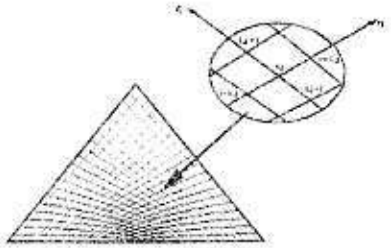
الشكل (1) يوضح شكل و احداثيات القناة



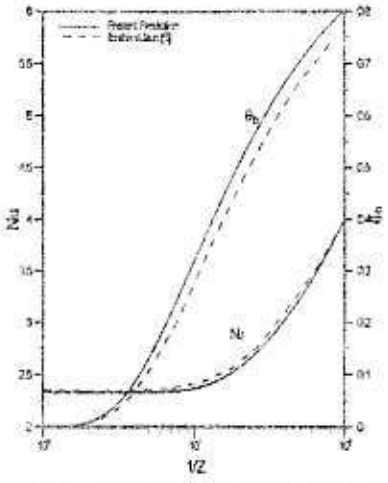
(a)

(b)

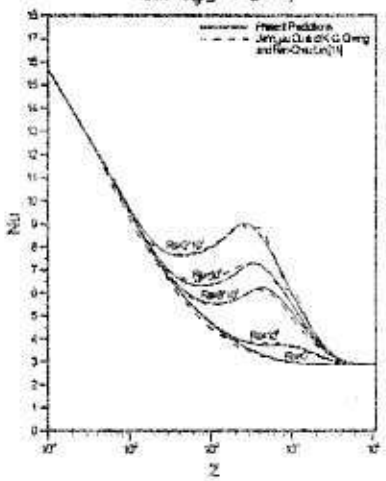
الشكل (2) (a) المستوي الفيزيائي
(b) المستوي المحسوب



الشكل (3) يوضح التوليد الشبكي
بدلالة الاحداثيات المحسوبة

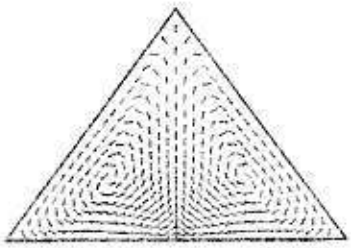


الشكل (4) مقارنة النتائج العددية للبحث الحالي مع نتائج دراسة Ibrahim Uzun [5] لحالة انتقال الحرارة بالحمل القسري(Ra=0).

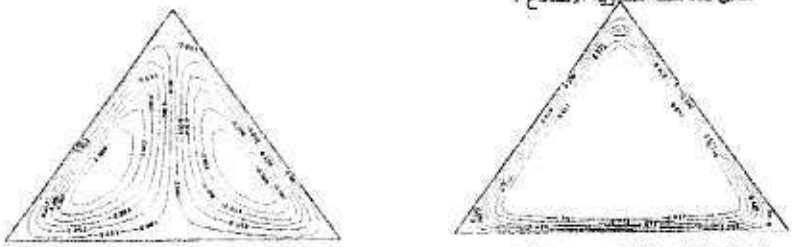


الشكل (5) مقارنة نتائج انتقال الحرارة بالحمل المختلط في مدخل قناة مربعة مع نتائج [11]Jenn-Wuu and Cheng and Ran-Chau .

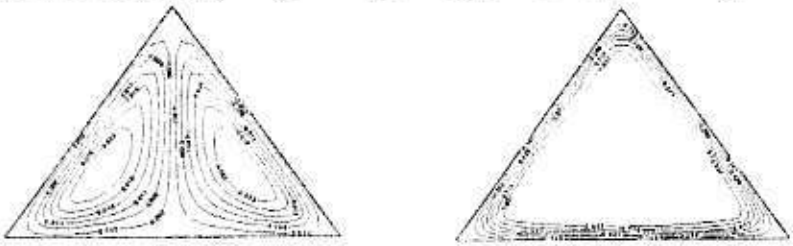
الشكل (6) يوضح الجريان المحوري
خلال قناة مثلثة متساوية الاضلاع .



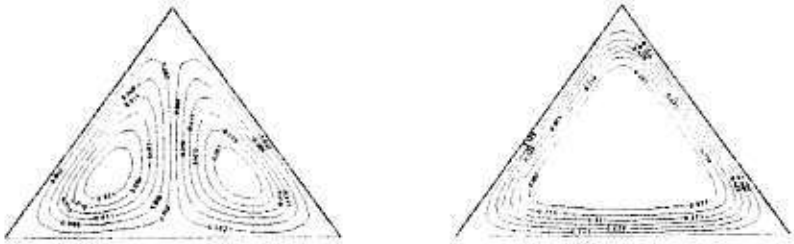
الشكل (7) مركبة السرعة الافقية والثانوية.



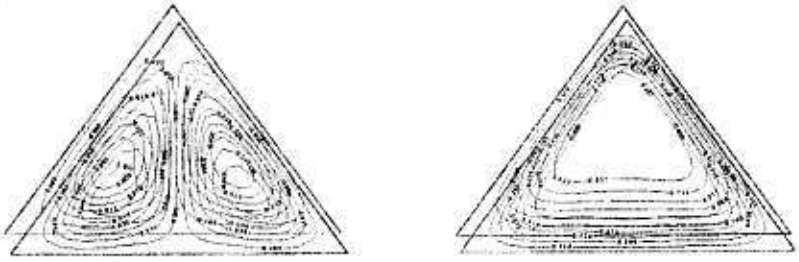
الشكل (8) المخطط الكنتوري لخطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الانسياب عندما (Ra=3000,Pe=300,Z=0.001)



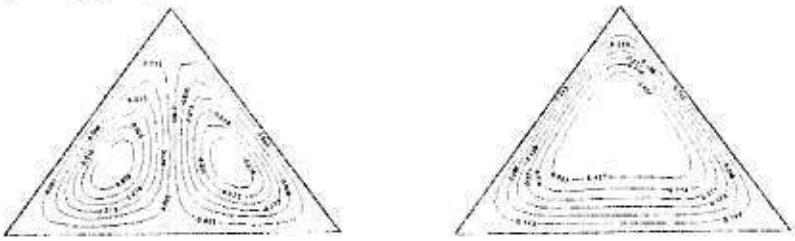
الشكل (9) المخطط الكنتوري لخطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الانسياب عندما (Ra=80000,Pe=300,Z=0.001)



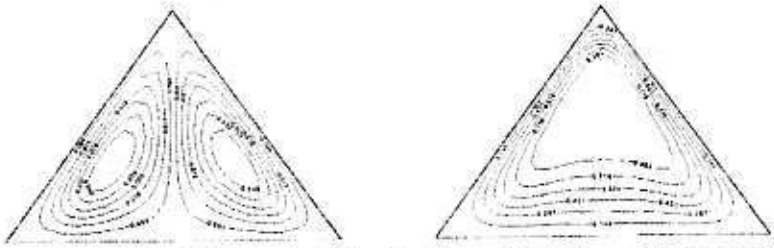
الشكل (10) المخطط الكنتوري لخطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الانسياب عندما (Ra=3000,Pe=300,Z=0.005)



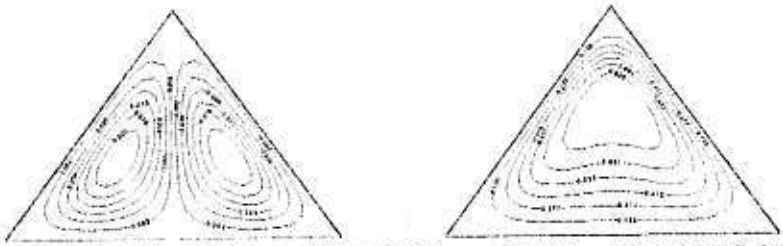
الشكل (11) المخطط الكنتوري لخطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الانسياب عندما (Ra=80000,Pe=300,Z=0.005)



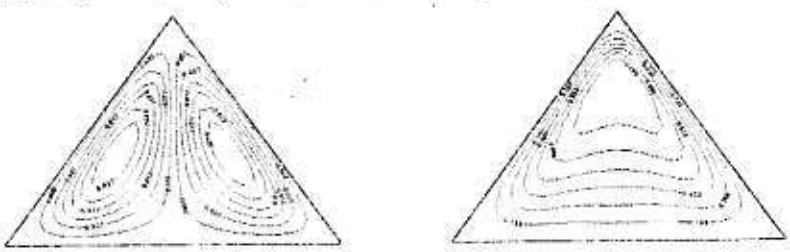
الشكل (12) المخطط الكنتوري لخطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الانسياب عندما (Ra=3000,Pe=300,Z=0.015)



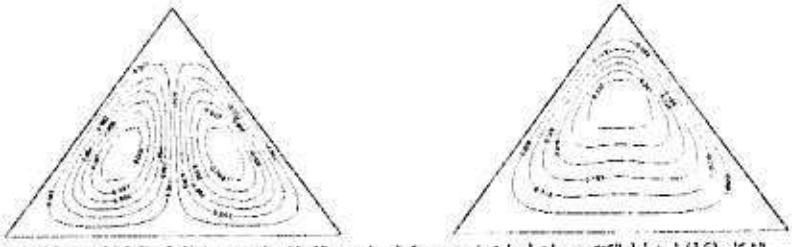
الشكل (13) المخطط الكنتوري لخطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الانسياب عندما (Ra=80000,Pe=300,Z=0.015)



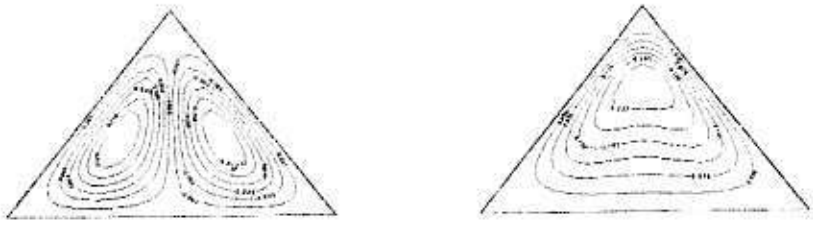
الشكل (14) المخطط الكنتوري لخطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الانسياب عندما (Ra=3000,Pe=300,Z=0.03)



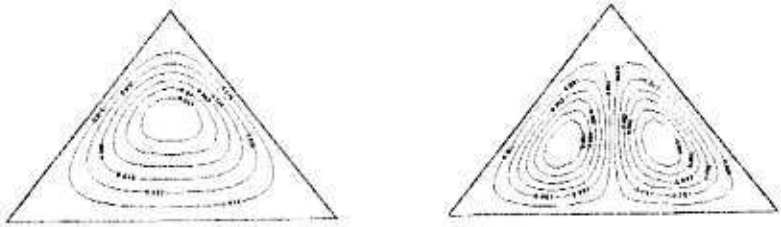
الشكل (15) المخطط الكنتوري لخطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الانسياب عندما (Ra=80000,Pe=300,Z=0.03)



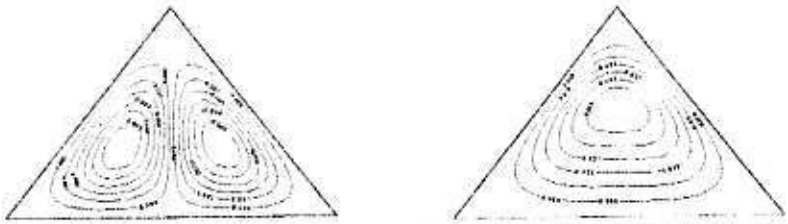
الشكل (16) لمخطط الكنتوري لخطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الانسياب عندما (Ra=3000,Pe=300,Z=0.1)



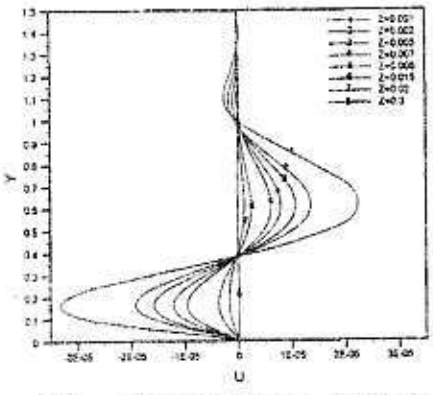
الشكل (17) المخطط الكنتوري لخطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الانسياب عندما (Ra=80000,Pe=300,Z=0.1)



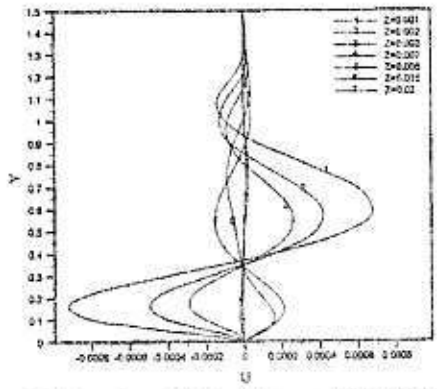
الشكل (18) المخطط الكنتوري لخطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الانسياب عندما (Ra=3000,Pe=300,Z=0.2)



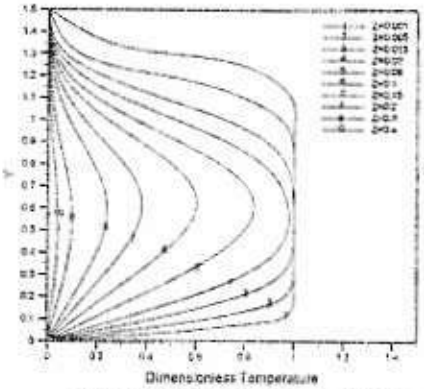
الشكل (19) المخطط الكنتوري لخطوط تساوي درجة الحرارة ودالة الانسياب عندما (Ra=80000,Pe=300,Z=0.2)



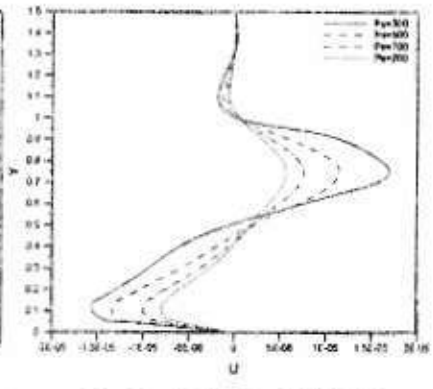
الشكل (20) تغير مركبة السرعة الافقية مع المحور الشاقولي
في اماكن مختلفة خلال القناة عندما (Ra=3000,Pe=300)



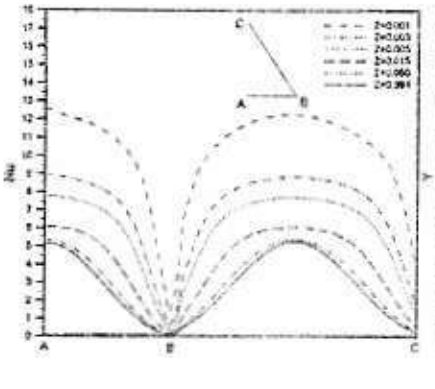
الشكل (21) تغير مركبة السرعة الافقية مع المحور الشاقولي
في اماكن مختلفة خلال القناة عندما (Ra=80000,Pe=300)



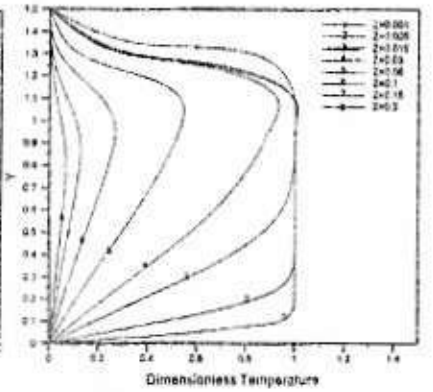
الشكل (23) يوضح تغير درجة الحرارة على طول المحور الشاقولي المنصف للقناة عندما Ra=3000



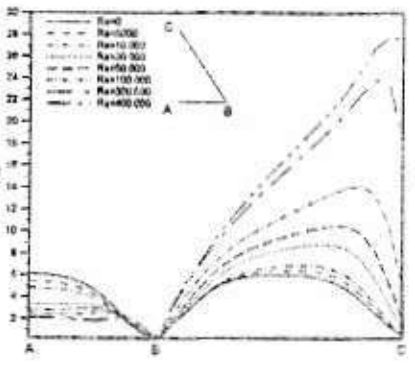
الشكل (22) تأثير عدد بكلت على شدة مركبة السرعة الافقية عندما (R=80000,Z=0.015)



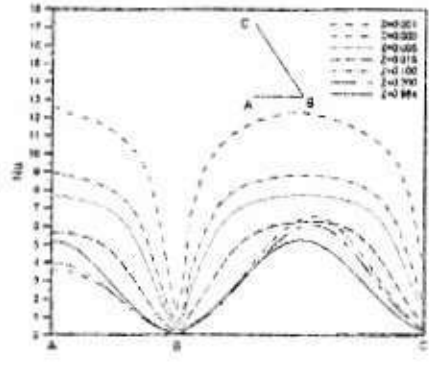
الشكل (25) تغير معامل انتقال الحرارة الموضعي على محيط القناة في مواقع مختلفة خلال القناة عندما Ra=0



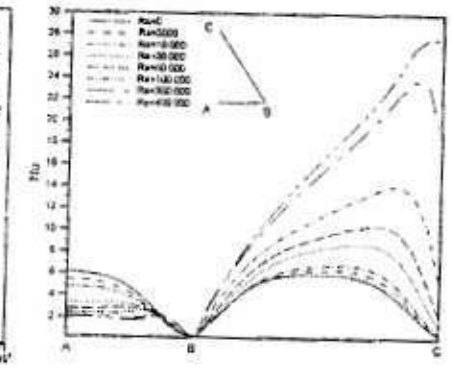
الشكل (24) يوضح تغير درجة الحرارة على طول المحور الشاقولي المنصف للقناة عندما Ra=80000



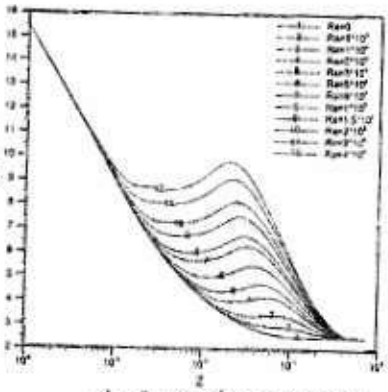
الشكل (27) تغير معامل انتقال الحرارة الموضعي على محيط القناة في مواقع مختلفة خلال القناة عندما Ra=80000



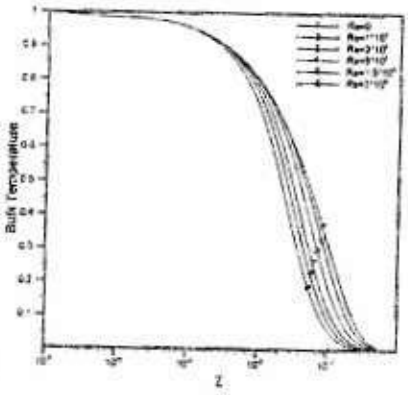
الشكل (26) تغير معامل انتقال الحرارة الموضعي على محيط القناة في مواقع مختلفة خلال القناة عندما Ra=3000



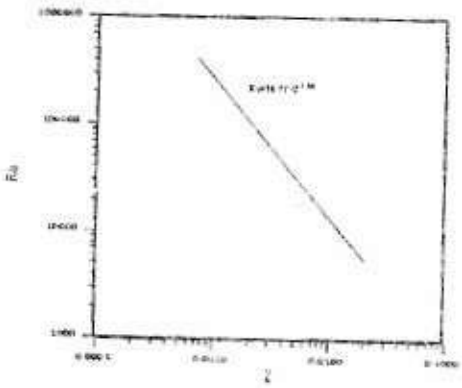
الشكل (28) تأثير زيادة عدد رالي على القيمة الموضعية لمعامل انتقال الحرارة على محيط القناة عندما (Z=0.0015)



الشكل (29) يوضح تأثير عدد رالي على معدل معامل انتقال الحرارة داخل القناة



الشكل (30) يوضح تأثير عدد رالي على تغير درجة الحرارة الظاهرية للمائع الجاري خلال القناة



الشكل (31) يوضح تأثير عدد رالي على تقصير طول الدخول الحراري خلال القناة