

## انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي من مصادر حرارية مقطعة موضوعة في تجويف مغلق متموج

مصطفى زكي عبود<sup>2</sup>أحمد وحيد مصطفى<sup>1</sup><sup>2,1</sup> قسم الهندسة الميكانيكية، جامعة تكريت، صلاح الدين ، العراق

## الخلاصة

تم دراسة تأثير السطح العلوي المتموج جيبياً لحيز مغلق على انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي من مصدرين حراريين موضوعين على السطح السفلي للحيز. المصدران الحراريان درجة حرارتهما ثابتة ومرتفعة، طول كل مصدر حراري (10%) من طول السطح السفلي الكلي للحيز، المسافات التي لا تحتوي على مصدر حراري على السطح السفلي معزولة حرارياً، درجة حرارة الجدارين العموديين والسقف ثابتة ومنخفضة. السقف المتموج تم تغيير سعة موجته اللابعدية ما بين (0.1-0.3)، لعدد تموجات (3)، والمسافة اللابعدية بين المصدرين الحراريين تتراوح بين (0.2-0.8)، مدى أرقام راييلي تراوحت ما بين ( $10^3 \leq Ra \leq 10^5$ )، أما المائع داخل الحيز فكان الهواء رقم براندتل له (0.7). تم تحليل حقلي الجريان ودرجة الحرارة داخل الحيز المغلق عددياً بحل معادلات (Navier Stokes and Energy Equations)، وقد استخدمت مركبات السرعة الديكارتية والضغط على شبكة متحدة الموقع (Collocated Grid) كمتغيرات معتمدة في معادلتَي الزخم التي تم تقطيعها بطريقة الحجم المحدد (Finite Volume Method). ولتمثيل الشكل الهندسي للمسألة بشكل دقيق تم استخدام نظام مطابقة إحداثيات الجسم، وتم توليد الشبكة على أساس معادلات تفاضلية جزئية ذات القطع الناقص، واستعين بخوارزمية (SIMPLE) لتصحيح مجال السرعة لتحقيق حفظ الكتلة. بينت النتائج ان الزيادة في مقدار المسافة بين المصدرين الحراريين تؤدي إلى زيادة متوسط رقم نسلت ( $Nu_{av}$ ) ولجميع قيم رقم راييلي ( $10^3 \leq Ra \leq 10^5$ )، إذ تكون اعلى قيمة لمتوسط رقم نسلت عند المسافة اللابعدية (0.8) واقل قيمة له عند المسافة اللابعدية (0.2)، وان المسافة (0.6) هي حالة خاصة عند رقم راييلي ( $10^5$ ) إذ يقل متوسط رقم نسلت عن بقية القيم للمسافتين اللابعديتين (0.2) و(0.4)، كما ان متوسط رقم نسلت يزداد مع زيادة سعة موجة السقف لعدد تموجات (N=3) عند المسافة اللابعدية (0.8)، كذلك أظهرت مقارنة النتائج العددية توافقاً جيداً مع النتائج المنشورة.

الكلمات الدالة: مصادر حرارية، تجويف مغلق متموج، الحمل الطبيعي.

**Natural Convection from Discrete Heat Sources Placed in Wavy Enclosure****Abstract**

The effect of sinusoidal corrugated upper surface for enclosure on the heat transfer by natural convection from two heat sources placed on the bottom surface of the enclosure has been studied. The two heat sources constant and high temperature, length of each heat source (10%) from the total length of bottom surface, the distances that do not contain heat source on the bottom surface thermally insulated, temperature of verticals walls and upper surface low and constant. corrugating upper surface was change the dimensional corrugation amplitude between (0.1-0.3), for number of corrugations (3), the dimensional distances between the two heat sources were change between (0.2-0.8), the Rayleigh numbers ranged between ( $10^3 \leq Ra \leq 10^5$ ), the fluid inside the enclosure was air Prandtl number for it (0.7). were analyzed flow and temperature fields inside the enclosure numerically by solving Navier Stokes and Energy Equations, have been used Cartesian velocity components and pressure on a collocated grid are used as dependent variables in the momentum equations which discretized by finite volume method, body fitted coordinates are used to represent the geometry shape of the problem accurately, were grid generated technique based on elliptic partial differential equations, SIMPLE algorithm is used to adjust the velocity field to satisfy the conservation of mass. The results showed the increase in the magnitude of dimensional distance between two heat sources lead to increased average Nusselt number for all values of Rayleigh numbers ( $10^3 \leq Ra \leq 10^5$ ), as are the highest value of the average Nusselt number at dimensional distance (0.8)

and less value at the dimensional distance (0.2), the dimensional distance (0.6) is a special case when the Rayleigh number equal ( $10^5$ ) as at least average Nusselt number from the remaining values of the two dimensional distances (0.2) and (0.4), as the average Nusselt number increases with increasing dimensional corrugation amplitude for the number of corrugations ( $N=3$ ) for dimensional distance (0.8), as well as comparing numerical results showed good agreement with published results.

**Key words:** Heat sources, Wavy enclosure, Natural convection.

تدعى بقوه التعويم، إذ أن هذه القوه تنتج من تدرج الكثافة نتيجة وجود تدرج في درجات الحرارة وقوه الجاذبية، ولكونها سهلة الاستخدام وذات كلفة واطئة، لذلك تم التركيز على دراسة التجاويف المغلفة (Enclosures) التي يطلق على انتقال الحرارة فيها بالانتقال الحراري الداخلي، تُموج سطوح تلك التجاويف لتحسين انتقال الحرارة، ومن التطبيقات الهندسية تبريد الأجهزة الإلكترونية وتصميم المبادلات الحرارية وكذلك في المجمعات الشمسية المتموجة [1].

قام الباحثان (Das and Mahmud, 2003) [2] بدراسة عددية للسلوك الهيدروديناميكي والحراري للمانع داخل تجويف مغلق مربع الشكل ذي جدارين متموجين العلوي له درجة حرارة باردة والسفلي ساخنة وثابتة في كلا الحالتين، بينما الجداران الجانبيان مستقيمان ومعزولان حرارياً، المعادلات الحاكمة بصيغتها التكاملية تم حلها عددياً بطريقة الحجم المحدد على شبكة متحدة الموقع (collocated grid)، لمدى رقم كراشوف يتراوح بين ( $10^3-10^7$ )، ونسبة طول موجة الغزارة (السعة) كانت (0.05 , 0.1 , 0.15 , 0.0)، والمانع رقم براندتل له (1.0)، حيث ان النسبة الباعية (aspect ratio) تستمر بالزيادة إلى أن تساوي (0.04)، بينت النتائج ان نسبة طول موجة الغزارة (السعة) تؤثر على نسبة انتقال الحرارة وحقل التدفق، إذ انه كلما كان رقم كراشوف اعلى كان لنسبة طول موجة الغزارة (السعة) تأثير اكبر ويكون لها تأثير اقل عندما تكون قيم رقم كراشوف واطئة.

أجرى الباحثان (Varol and Oztop, 2006) [3] دراسة عددية لانتقال الحرارة بالحمل الطبيعي في تجويف مغلق متموج أفقي وضحل، الجدار السفلي متموج (دالة جيبييه) وذي درجة حرارة مرتفعة بينما الجدار العلوي مستوي و ذو درجة حرارة منخفضة ودرجة الحرارة ثابتة في الحالتين، الجداران الجانبيان معزولان حرارياً. تم استعراض النتائج بدلالة خطوط دالة الانسياب وخطوط ثبوت درجة الحرارة الايزوترمالية ورقم نسلت لنسب النسبة الباعية (aspect ratio) وطول موجة لابعدي وأرقام رايلي مختلفة، بينت النتائج ان انتقال الحرارة يزداد مع نقصان طول الموجة اللابعدي وزيادة نسبة الطول للعرض ورقم رايلي، كما بينت الدراسة ان حقل الجريان والحقل الحراري يتأثر بتغير رقم رايلي، وأوضحت ان أرقام نسلت الموضوعية تكون ذات اختلافات متموجة حيث ان اعلى قيمة لرقم نسلت هي عند قمة الموجة وتتذبذب قيمتها عند تجويف الموجة بسبب التدوير.

قام الباحثون (Saha et al. 2008) [4] بدراسة عددية لانتقال الحرارة بالحمل الطبيعي داخل تجويف مغلق مائل ومتموج، الجداران العموديان متموجان ولهما درجة

## الرموز والمصطلحات

$\rho$	الكثافة الكتلية	$\text{kg/m}^3$
$\mu$	اللزوجة الديناميكية	$\text{N.s/m}^2$
$\lambda$	طول الموجة	-
$\beta$	معامل التمدد الحجمي	$\text{K}^{-1}$
$\alpha$	الانتشارية الحرارية	$\text{m}^2/\text{s}$
$y$	الإحداثي العمودي في المجال الطبيعي	m
$x$	الإحداثي العمودي في المجال الطبيعي	m
$w$	تردد الموجة	1/s
$v$	مركبة السرعة بالاتجاه الإحداثي y	m/s
$U_c$	السرعة المميزة	m/s
$u$	مركبة السرعة بالاتجاه الإحداثي x	m/s
$T$	درجة الحرارة	k
$Ra$	عدد رايلي (Rayleigh)	-
$Pr$	عدد براندتل (Prandtl)	-
$p$	الضغط	Pa
$Nu$	عدد نسلت (Nusselt)	-
$N$	عدد التمجوجات للموجة	-
$L_s$	طول المصدر الحراري	m
$L$	طول التجويف	m
$K$	معامل التوصيل الحراري للمانع	W/m. K
$h$	معامل انتقال الحرارة بالحمل	W/m <sup>2</sup> . K
$H$	ارتفاع التجويف	m
$Gr$	رقم كراشوف (Grashof)	-
$g$	التعجيل الأرضي	$\text{m/s}^2$
$D$	المسافة بين المصدرين الحراريين	m
$A$	سعة الموجة	m
$a$	بداية المصدر الحراري	m
	الرموز الفوقية	
*	كمية لا بعدية	
	الرموز التحتية	
$c$	بارد	
$h$	ساخن	
$w$	الجدار	
$o$	هواء	
	الرموز الخاصة	
SIMPLE	طريقة شبة ضمنية لمعادلة ارتباط	

## المقدمة

إن موضوع الحمل الطبيعي لانتقال الحرارة مهم جداً نظراً لتطبيقاته الكثيرة في العديد من مجالات الطبيعة وبالرغم من انه لا توجد سرعة قسرية تولد هذا النوع من الحمل إلا انه تتولد تيارات الحمل الطبيعي داخل المانع التي تحته على الجريان نتيجة تأثيرات قوه الطفو أو ما

الجريان وانتقال الحرارة في داخل تجويف مغلق متموج السقف.

#### المعادلات الحاكمة

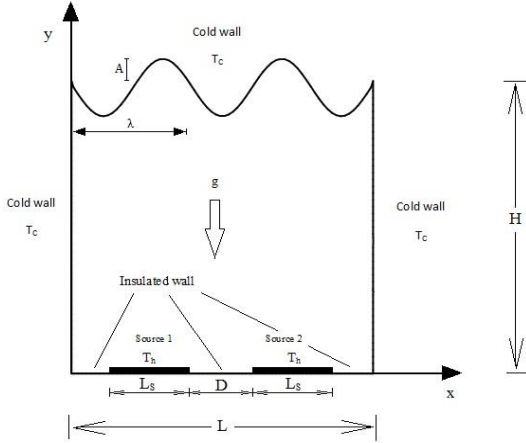
إن المعادلات الحاكمة التي تصف الجريان وانتقال الحرارة بالحمل الطبيعي في داخل التجويف الموضح في الشكل (1) تم وضعها بافتراض ان الجريان ثنائي الأبعاد مستقر وطباقي، درجة حرارة المصادر الحرارية وخصائص المائع ثابتة، ماعدا الكثافة في حد الطفو وحسب تقريب بوسنك (boussinesq approximation) لذلك معادلات الاستمرارية والزخم والطاقة تكون كالاتي:-

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

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_c) \quad (3)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$



شكل (1) الشكل الهندسي ونظام الإحداثيات

#### المعادلات والمقادير اللابعية

يمكن وضع المعادلات الحاكمة بالصيغة اللابعية، باستخدام المقادير اللابعية الآتية:

$$\left( T^* = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, p^* = \frac{pL^2}{\rho\alpha^2}, v^* = \frac{vL}{\alpha}, u^* = \frac{uL}{\alpha}, y^* = \frac{y}{L}, x^* = \frac{x}{L} \right),$$

بتعويض المتغيرات اللابعية في المعادلات الحاكمة يمكن الحصول على المعادلات اللابعية وكالاتي:-

حرارة منخفضة وثابتة لكليها، بينما الجدار العلوي مستوي ومعزول حرارياً أما الجدار السفلي فمعزول حرارياً أيضاً لكن يحتوي على مصدر حراري ثابت الفيض الحراري (uniform heat flux) يتراوح طوله من (20) إلى (80) بالمئة من الطول الكلي للتجويف، استخدموا طريقة العناصر المحددة لحل المعادلات الحاكمة (Navier-Stokes and energy conservation equations) مقترضين ان الحالة ثنائية البعد والجريان طبائقي مستقر ولزج وغير انضغاطي، وقد تحروا عن تأثيرات زاوية الميل وحجم المصدر الحراري المتقطع على انتقال الحرارة لقيم مختلفة من أرقام كراشوف تتراوح بين (10<sup>3</sup>-10<sup>6</sup>) ورقم براندتل (0.71). النتائج تم تمثيلها بواسطة خطوط دالة الانسياب وخطوط ثبوت درجة الحرارة الايزوثرمالية وقد تبين من هذه الدراسة ان رقم نسلت يزداد بزيادة زاوية الميل للتجويف لمختلف الحجم للمصدر الحراري.

أجرى الباحثون (Oztop et al. 2011) [5] دراسة عددية لانتقال الحرارة بالحمل الطبيعي والتدفق في تجويف مغلق له جدران متموجة ومصدر حراري حجمي، حلو المعادلات الحاكمة بشكلها التفاضلي باستخدام طريقة الحجم المحدد، الجدران العموديان للتجويف أحدهما ذو درجة حرارة باردة والأخر ذو درجة حرارة ساخنة وثابتة لكلا الجدارين بينما الجدران العلوي والسفلي المتموجان فأنهما معزولان حرارياً، العوامل المؤثرة هي أرقام رايلي الداخلية والخارجية وسعة التموج للجدران، حيث وجدوا ان هذه العوامل تؤثر على انتقال الحرارة والتدفق بشكل ملحوظ. أظهرت النتائج أن حقل التدفق وحقل انتقال الحرارة يتأثر بسبب تغير القيم الداخلية والخارجية لرقم رايلي وسعة الموجة (amplitude of wavy) وتموج الجدران، إذ ان نسبة انتقال الحرارة الأعلى كانت متوقعة عندما تكون سعة موجة الجدار المتموج عالية، وان انتقال الحرارة كان يعتمد بقوة على أرقام رايلي الداخلية وأرقام رايلي الخارجية ويصبح رقم براندتل نافذ المفعول عندما يكون أكبر من واحد.

قام الباحثون (Hasan et al. 2012) [6] بدراسة عددية لانتقال الحرارة بالحمل الطبيعي في داخل تجويف مغلق ذي شكل مربع متموج للسقف وثنائي البعد، اجروا الدراسة لترددات تموج مختلفة للسقف ولنسب باعية (aspect ratio) مختلفة أيضاً، لملاحظة السلوك الحراري والهيدروديناميكي لسعة تموج ثابتة، السقف مسخن بفيض حراري ثابت، والجدار السفلي للحيز معزول حرارياً، والجدران الجانبية العموديان ثابتا درجة الحرارة وبدرجة حرارة المحيط، المانع في الحيز هو الهواء رقم براندتل له (0.71)، المعادلات الحاكمة تم حلها باستخدام طريقة العناصر المحددة، وخطوط دالة الانسياب ومعدل رقم نسلت رسمت لمدى رقم رايلي (10<sup>3</sup>-10<sup>6</sup>) مع ثبوت الخواص الفيزيائية للمائع، وجدوا ان ظاهرة انتقال الحرارة تتأثر بوجود التموج على السقف عندما يكون الانتقال بالحمل لقيم رقم رايلي مرتفعة وتغير النسبة الباعية (aspect ratio).

تم التركيز في الدراسة الحالية على دراسة انتقال الحرارة من مصدرين حراريين وتأثير كل من المسافة التي تفصل بين المصدرين الحراريين وسعة التموجات على

$$Nu = \frac{hL}{K} = \frac{-K \left( \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \right) L}{(T_w - T_o)K} = -\frac{\partial T^*}{\partial y^*} \quad (11)$$

ويحسب متوسط رقم نسلت (Nu<sub>av</sub>) كما يلي:-

$$Nu_{av} = \frac{1}{L_S^*} \int_a^{a+L_S^*} Nu dx^* \quad (12)$$

#### الحل العددي

يمكن كتابة المعادلات الحاكمة بصيغتها الأبعدي بشكل عام في الإحداثيات الديكارتية لمتغير لابعدي معتمد (φ\*) كما جاء في دراسة على النحو الآتي [7]:-

$$\frac{\partial(u^* \phi^*)}{\partial x^*} + \frac{\partial(v^* \phi^*)}{\partial y^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \Gamma \phi^* \frac{\partial \phi^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left( \Gamma \phi^* \frac{\partial \phi^*}{\partial y^*} \right) + S_\phi^* \quad (13)$$

حيث ان (φ\*) يمثل أي متغير معتمد، (Γφ\*) يمثل معامل التبادل أو معامل الانتشار للمعامل (φ\*)، أما (S<sub>φ</sub><sup>\*</sup>) يمثل حد المصدر للمعامل (φ\*)، معادلة الاستمرارية (5) لا تحتوي على حدود الانتشار ولا على حدود المصدر لكن يتم استخدامها لاشتقاق معادلة تصحيح الضغط.

تم استخدام نظام إحداثيات مطابقة الجسم (Body fitted coordinate system) التي يتم توليدها بحل معادلات تفاضلية ذات القطع الناقص بحل معادلات لابلاس لتوليد الإحداثيات المنحنية [8]، المعادلة (13) يتم تحويلها من المجال الفيزيائي إلى المجال الحسابي باستخدام قاعدة السلسلة لتحويل المشتقات  $\left( \frac{\partial}{\partial x^*}, \frac{\partial}{\partial y^*} \right)$  [9]. الشكل النهائي لمعادلة التحويل يمكن ان تكتب بالشكل التالي:-

$$\frac{\partial}{\partial \xi^*} (\phi^* G_1^*) + \frac{\partial}{\partial \eta^*} (\phi^* G_2^*) = \frac{\partial}{\partial \xi^*} \left( \Gamma \phi^* J^* \alpha^* \frac{\partial \phi^*}{\partial \xi^*} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta^*} \left( \Gamma \phi^* J^* \gamma^* \frac{\partial \phi^*}{\partial \eta^*} \right) + S_{\xi, \eta}^* + \frac{S_\phi^*}{J^*} \quad (14)$$

إذ ان (G<sub>1</sub><sup>\*</sup>, G<sub>2</sub><sup>\*</sup>) تمثل معدل الجريان الكتلي، والحد (S<sub>ξ,η</sub><sup>\*</sup>) هو حد المصدر بسبب عدم التعامد، و (J\*) معامل جاكوبين، (β\*, γ\*, α\*) معاملات التحويل وتعطى بالمعادلات الآتية:-

$$\left. \begin{aligned} \alpha^* &= \left( \frac{\partial x^*}{\partial \eta^*} \right)^2 + \left( \frac{\partial y^*}{\partial \eta^*} \right)^2 \\ \beta^* &= \left( \frac{\partial x^*}{\partial \xi^*} \frac{\partial x^*}{\partial \eta^*} \right) + \left( \frac{\partial y^*}{\partial \xi^*} \frac{\partial y^*}{\partial \eta^*} \right) \\ \gamma^* &= \left( \frac{\partial x^*}{\partial \xi^*} \right)^2 + \left( \frac{\partial y^*}{\partial \xi^*} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

المعادلات الحاكمة المقطعة يتم الحصول عليها باستخدام طريقة الحجم المحدد لشبكة متحدة الموقع (grid collocated) من تكامل المعادلة الحاكمة العامة (14) على الحجم المسيطر في المجال الحسابي ويتم تقريب

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (5)$$

$$\left( u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) = -\frac{\partial p^*}{\partial x^*} + Pr \left( \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (6)$$

$$\left( u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) = -\frac{\partial p^*}{\partial y^*} + Pr \left( \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) + Ra Pr T^* \quad (7)$$

$$\left( u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \right) = \left( \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (8)$$

#### الموديل الرياضي للموجة على الجدار العلوي

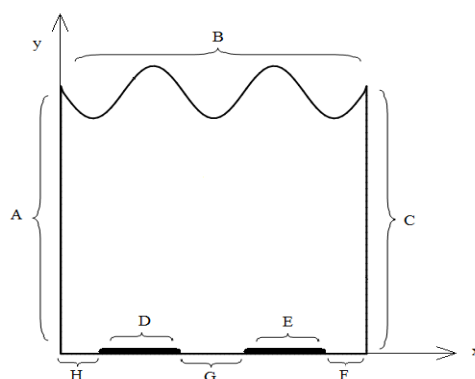
في هذه الدراسة تم استخدام موجة جيبية على السطح العلوي للتجوف المغلق، ويمكن تمثيل الموديل الرياضي لهذه الموجة بالمعادلة الآتية [6]:-

$$y^* = H^* - A^* \sin \left( \frac{N\pi wx^*}{w\lambda} \right) \quad (9)$$

#### الشروط الحدية

لحل المعادلات الحاكمة (الكتلة، الزخم، الطاقة)، يجب وضع الشروط الحدية لهذه المعادلات وهي كما موضحة بالشكل (2) وكما يلي:-

$$\left. \begin{aligned} (A, B \ \& \ C) \quad u^* = v^* = 0, T^* = 0 \\ (H, G \ \& \ F) \quad u^* = v^* = 0, \left( \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \right) = 0 \\ (D \ \& \ E) \quad u^* = v^* = 0, T^* = 1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

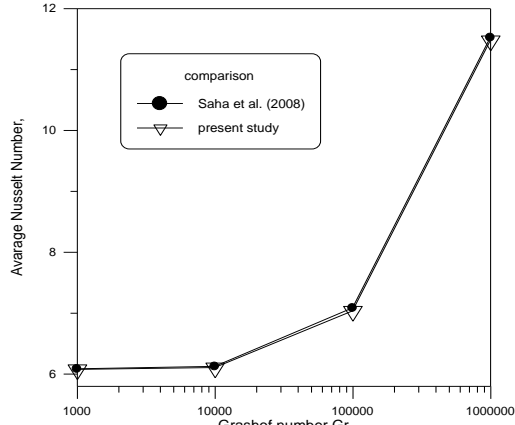


الشكل (2) الشروط الحدية

#### حساب متوسط رقم نسلت

إن حساب رقم نسلت ومنه متوسط رقم نسلت كما في المعادلة أدناه، إذ تتم بقسمة كمية الحرارة المنتقلة بالحمل على كمية الحرارة المنتقلة بالتوصيل، وهاتان الكميتان للحرارة المنتقلة تحسب عند محاذاة جدار التجوف للمنطقة المسخنة وبعد التعويض والتبسيط نحصل على رقم نسلت الموضعي (Nu) على مصدر الحرارة.

لمعدل رقم نسلت عند أرقام كراشوف تتراوح بين ( $10^6$ - $10^3$ ) وللحالة التي تكون فيها زاوية ميلان الحيز ( $\Phi=0$ ) ونسبة طول السطح السفلي المسخن بكمية حرارة ثابتة ( $L_s^*=0.2L^*$ ) من الطول الكلي، أما الجداران الجانبيين فمتموجان بموجة جيبيه واحدة لكل منهما وسعة الموجة ( $A=0.1$ ) والجدار العلوي معزول حرارياً وقد وجد ان التطابق جيد وكما مبين في الشكل (4)، علماً ان أبعاد الشكل في المقارنتين كانت ( $H^*=L^*=1.0$ ).



الشكل (4) مقارنة متوسط رقم نسلت للبحث الحالي مع دراسة (Saha et al. 2008) [4]

#### النتائج والمناقشة

#### تأثير المسافة ( $D^*$ ) بين المصادر الحرارية على متوسط رقم نسلت ( $Nu_{av}$ )

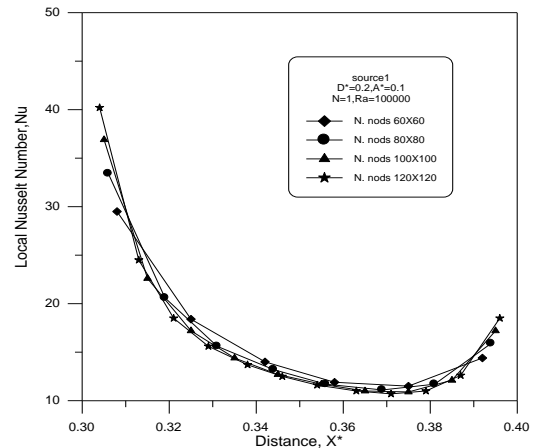
توضح الأشكال من (5) إلى (10) خطوط ثبوت درجات الحرارة إلى جهة اليسار وخطوط دالة الانسياب للمائع إلى جهة اليمين ولرقم براندتل ( $0.7$ ) لمدى رقم رايلي يتراوح ما بين ( $10^3$ - $10^5$ ) ولقيم مختلفة للمسافة ( $D^*$ ) بين المصدرين الحراريين تتراوح قيمها بين ( $0.8$ - $0.2$ ) ولعدة قيم لسعة تموجات الحيز تتراوح من ( $0.3$ - $0.1$ ) وعدد تموجات ( $N=3$ ).

بينت النتائج الموضحة في الأشكال من (11a) إلى (13b)، أن الزيادة في مقدار المسافة ( $D^*$ ) بين المصدرين الحراريين تؤدي إلى زيادة متوسط رقم نسلت ( $Nu_{av}$ ) إلى الضعف ولكل الحالات التي تمت دراستها في الأشكال من (5) إلى (10) ولكلا المصدرين الحراريين الأول والثاني، ذلك نتيجة لزيادة انحدار درجات الحرارة (temperature gradient) عند الحافات الخارجية والداخلية للمصدرين الحراريين كما يبدو من خطوط ثبوت درجات الحرارة في الأشكال من (5) إلى (10)، إذ يزداد معدل انتقال الحرارة، هذا يوصلنا إلى حقيقة هي ان المسافة ( $D^*$ ) هي عامل مهم جداً للسيطرة على حقل التدفق للمائع داخل الحيز المغلق وعلى عملية انتقال الحرارة من المصادر الحرارية. كما بينت النتائج ان متوسط رقم نسلت يزداد مع زيادة رقم رايلي ( $Ra$ ) ولكل الحالات، الأشكال من (5) إلى (10) ولمختلف المسافات ( $D^*$ ) بين المصدرين الحراريين ( $0.2$ - $0.8$ ) ولجميع مديات رقم رايلي التي تمت دراستها ( $10^3$ - $10^5$ )، يتبين ذلك جلياً من ملاحظة الأشكال (11a) إلى (13b)، ذلك لان

حدود الحمل باستخدام برنامج فوق الجريان الصاعد (upwind differencing scheme) من الدرجة الأولى، وتقرب حدود الانتشار بواسطة برنامج فوق الجريان المركزي (central differencing scheme) ذو الرتبة الثانية، وكذلك يقرب حد المصدر بواسطة فرق الجريان المركزي. استخدمت خوارزمية (SIMPLE) لتعديل مجال السرعة لتحقيق حفظ الكتلة [10]، وتخزن جميع المتغيرات في مركز الحجم المسيطر، واستخدمت طريقة الاستكمال في معادلة الضغط لتجنب حدوث الفصل بين السرعة والضغط [11]. ان معادلة الضغط المصحح تكون مصفوفة قطرية ذات تسعة عناصر للجريان ثنائي الأبعاد وان حل هذه المصفوفة معقد لذلك تحذف للتبسيط [12]، لكن في البحث الحالي تم حساب المشتقات المتقاطعة لمعادلة الضغط المصحح تقريباً [13]، وحلت المعادلات المقطعة تكرارياً باستخدام طريقة خط بعد خط والتي تستخدم خوارزمية مصفوفة ثلاثية قطرية (TDMA) إن معيار التقارب المستخدم في هذه الدراسة لإنهاء التكرار كان لمجموع القيمة المطلقة للفضلة (Residual) في جميع المعادلات اقل من ( $10^{-3}$ )، وتم الحصول على نتائج الدراسة الحالية بتحويل المعادلات المذكورة آنفاً إلى برنامج حاسوبي بلغة (Fortran 90).

#### اختبار عدم اعتماد الحل العددي على حجم الشبكة

تم إجراء اختبار الشبكة للتأكد من عدم اعتماد الحل العددي على عدد العقد لعدد من الحجم (العقد) المختلفة، إذ تم اختبار أربعة شبكات هي ( $60 \times 60$ ) عقدة و ( $80 \times 80$ ) عقدة و ( $100 \times 100$ ) عقدة و ( $120 \times 120$ ) عقده، بين الاختبار تشابه تصرف انتقال الحرارة وان رقم نسلت الموضعي كان متقارب لمختلف الشبكات المستخدمة كما مبين في الشكل (3)، وتم الحصول على نتائج متساوية تقريباً حيث كان التغير في متوسط رقم نسلت اقل من ( $1\%$ )، وتم اعتماد الشبكة المتكونة من ( $100 \times 100$ ) عقدة للدراسة الحالية.



الشكل (3) اختبار عدم اعتماد الحل العددي على حجم الشبكة

#### مقارنة الحل العددي مع بحوث سابقة

من اجل التأكد من صحة الحل العددي تم مقارنة نتائج الحل العددي للبحث الحالي مع نتائج دراسة الباحثون (Saha et al. 2008) [4]، وإن هذه المقارنة أجريت

اقترب المصدرين الحراريين من الجدارين العموديين الباردين مما يؤدي إلى قصر طريق انتقال الحرارة، حيث ان الطبقة المتاخمة الحرارية بالقرب من الجدار العمودي تصبح رقيقة عند اقتراب المصدر من الجدار العمودي، لذلك يزداد متوسط رقم نسلت مع اقتراب المصدرين من الجدارين العموديين، تتبين نتيجة ذلك بوضوح في الأشكال (11a) إلى (13b)، كما أنها تزداد مع زيادة رقم رايلي، لذلك تقفز قيم متوسط رقم نسلت إلى مستويات اعلى من قيم متوسط رقم نسلت عند قيم المسافات الأخرى ( $D^*=0.2$ )، ( $D^*=0.4$ ) و ( $D^*=0.6$ )، نتيجة الانحدار الكبير جداً في درجات الحرارة عند الحافة الخارجية القريبة من الجدار العمودي البارد إذ يزداد انحدار درجات الحرارة بين الجدار العمودي والمصدر الحراري مما يؤدي إلى زيادة معدل انتقال الحرارة ولكلا المصدرين، كذلك زيادة الانحدار لدرجات الحرارة عند الحافة الداخلية لكلا المصدرين وهذا بسبب بعد كل مصدر عن الآخر فيتصرف كل مصدر حراري كمصدر حراري مفرد ومستقل عن الآخر ويزداد انحدار درجات الحرارة بين الحافة الداخلية والمائع فيزداد معدل انتقال الحرارة أيضاً.

وعند المسافة ( $D^*=0.2$ ) يكون المصدران الحراريين بعيدين عن الجدارين العموديين الباردين فتكون الانحدارات في درجات الحرارة عند الحافة الخارجية للمصدرين اقل مقارنةً بالانحدارات عند المسافة ( $D^*=0.8$ ) والمسافتين ( $D^*=0.4$ ) و ( $D^*=0.6$ )، أما عند الحافة الداخلية للمصدرين فتكون الانحدارات في درجات الحرارة قليلة نتيجة قرب المصدرين من بعضهما البعض وتأثر كل مصدر بالآخر فيقل معدل انتقال الحرارة لذلك يكون متوسط رقم نسلت ( $Nu_{av}$ ) قليل ولجميع قيم رقم رايلي ( $10^3-10^5$ )، أما عند زيادة المسافة إلى ( $D^*=0.4$ ) تزداد قيمة متوسط رقم نسلت وذلك بسبب زيادة انحدار درجات الحرارة عند الحافتين الخارجيتين للمصدرين الحراريين نتيجة لاقتراب المصدرين من الجدارين العموديين الباردين وزيادة المسافة بين الحافتين الداخليتين فيزداد الانحدار في درجات الحرارة عند الحافة الداخلية فيزداد معدل انتقال الحرارة من المصدرين.

المسافة ( $D^*=0.6$ ) هي حالة خاصة عند رقم رايلي ( $10^5$ ) فبالرغم من زيادة متوسط رقم نسلت ( $Nu_{av}$ ) مع زيادة رقم رايلي ( $Ra$ ) لجميع الحالات إلا ان الزيادة عند رقم رايلي ( $10^5$ ) تكون اقل من معدل الزيادة عند المسافتين ( $D^*=0.2$ ) و ( $D^*=0.4$ )، بسبب الانحدار لدرجات الحرارة عند الحافتين الداخلية والخارجية للمصدرين الحراريين الذي يكون اقل عند المسافة ( $D^*=0.6$ ) و ( $Ra=10^5$ )، فعند هذه المسافة يكون المصدرين بعيدين عن بعضهما البعض من جهة وعن الجدارين العموديين الباردين من جهة أخرى لذلك يكون انحدار درجات الحرارة عند الحافتين الداخلية قليلاً بالمقارنة مع ( $D^*=0.2$ ) و ( $D^*=0.4$ ) وعند الحافتين الخارجية قليلاً أيضاً بالمقارنة مع ( $D^*=0.8$ )، فيقل معدل انتقال الحرارة عند رقم رايلي ( $10^5$ ) كما موضح في الأشكال (11a) إلى (13b).

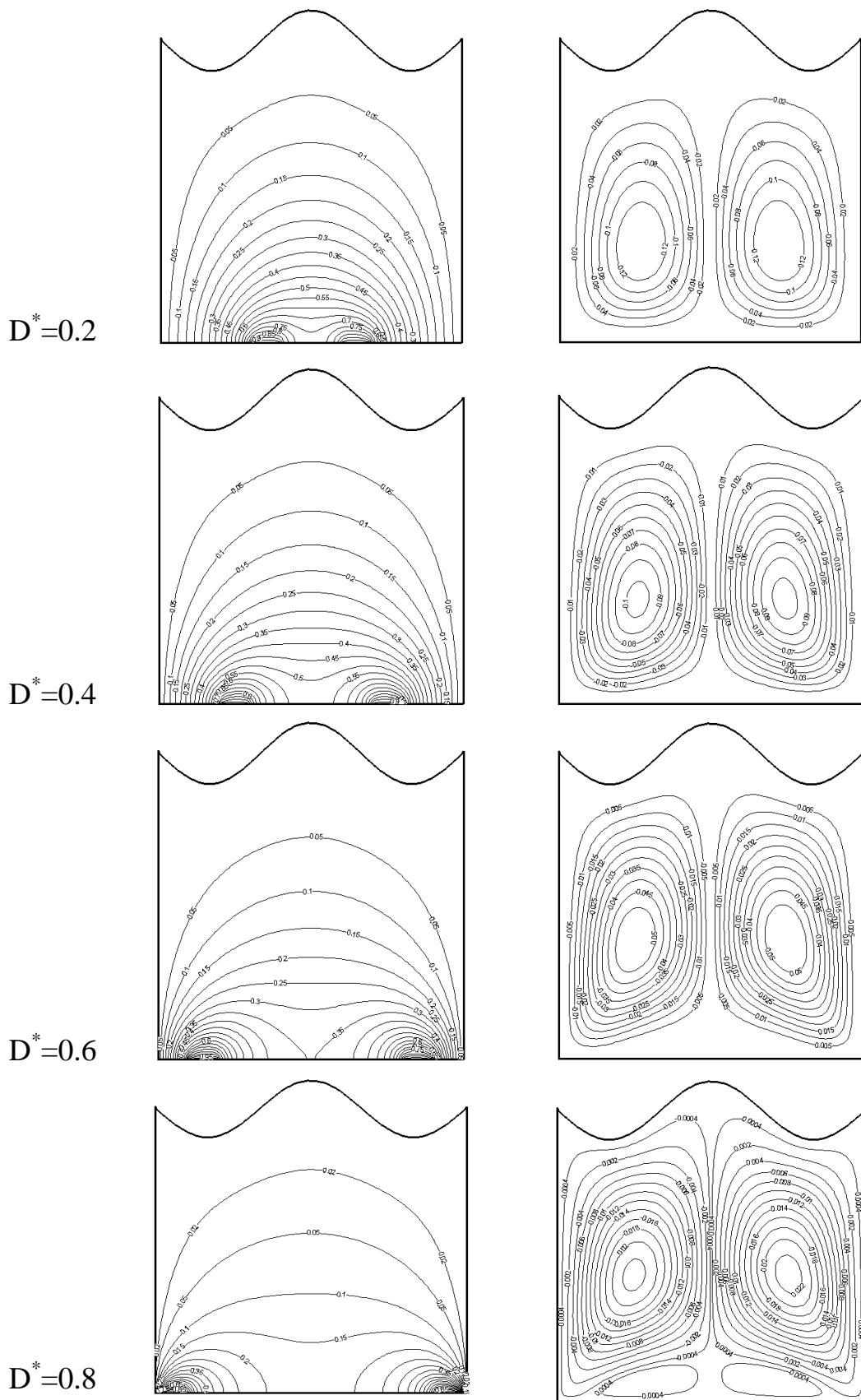
عملية انتقال الحرارة من المصدرين الحراريين إلى طبقات المائع (الهواء) الملاصق لها والموجود فوقها تكون بطريقة التوصيل عند قيم رقم رايلي ( $Ra$ ) المنخفضة وعند ( $10^3$ ) كما هو واضح في الشكل (5) إذ تكون خطوط ثبوت درجات الحرارة نصف دائرية ومتوازية، إلا انه عند زيادة قيم رقم رايلي إلى ( $10^4$ ) فان انتقال الحرارة يكون بطريقة الحمل فيزداد معدل الانتقال الحراري ويكون اكبر عند رقم رايلي (105) كما هو واضح من خطوط توزيع درجات الحرارة في الشكل (6).

تُظهر الأشكال من (5) إلى (10) السلوك الحراري للمائع (الهواء) داخل الحيز المغلق فمن ملاحظة خطوط دالة الانسياب للمائع الموضحة إلى جهة اليمين نلاحظ تشكل دوامات فوق كل مصدر حراري ذلك نتيجة لتلامس المائع فوق المصدرين الحراريين معهما فيسخن المائع الملاصق وتقل كثافته وبسبب تأثير قوة الطفو وقوة الجاذبية تتكون دوامتان كبيرتان فوق كل مصدر حراري، تتلامس هاتان الدوامتان مع بعضهما البعض عند نقطة المنتصف للحيز المغلق، يدور المائع فوق المصدر الحراري الأول إلى جهة اليسار للحيز باتجاه عكس عقرب الساعة ويدور فوق المصدر الحراري الثاني إلى جهة اليمين للحيز مع اتجاه عقرب الساعة، هذا السلوك هو نفسه لكل الحالات ولجميع قيم رقم رايلي ( $10^3-10^5$ ) مع ملاحظة زيادة قيم دالة الانسياب مع زيادة رقم رايلي نتيجة لزيادة قوة الطفو كما توضحه الأشكال (5) إلى (10)، لكن عند المسافة ( $D^*=0.8$ ) تظهر دوامتان ثانويتان صغيرتان بين المصدرين الحراريين ولمختلف قيم رقم رايلي ( $Ra$ )، هاتان الدوامتان تكونان أكثر وضوحاً واكبر حجماً عند رقم رايلي ( $10^5$ ) ولا تظهران عند نقصان المسافة ( $D^*$ ) عن (0.8)، ان كثافة هذه الدوامات الثانوية الصغيرة لا يكاد يذكر عند مقارنتها مع الدوامات الرئيسية الكبيرة لان قيم دالة الانسياب لها منخفض جداً مقارنةً بالدوامات الكبيرة.

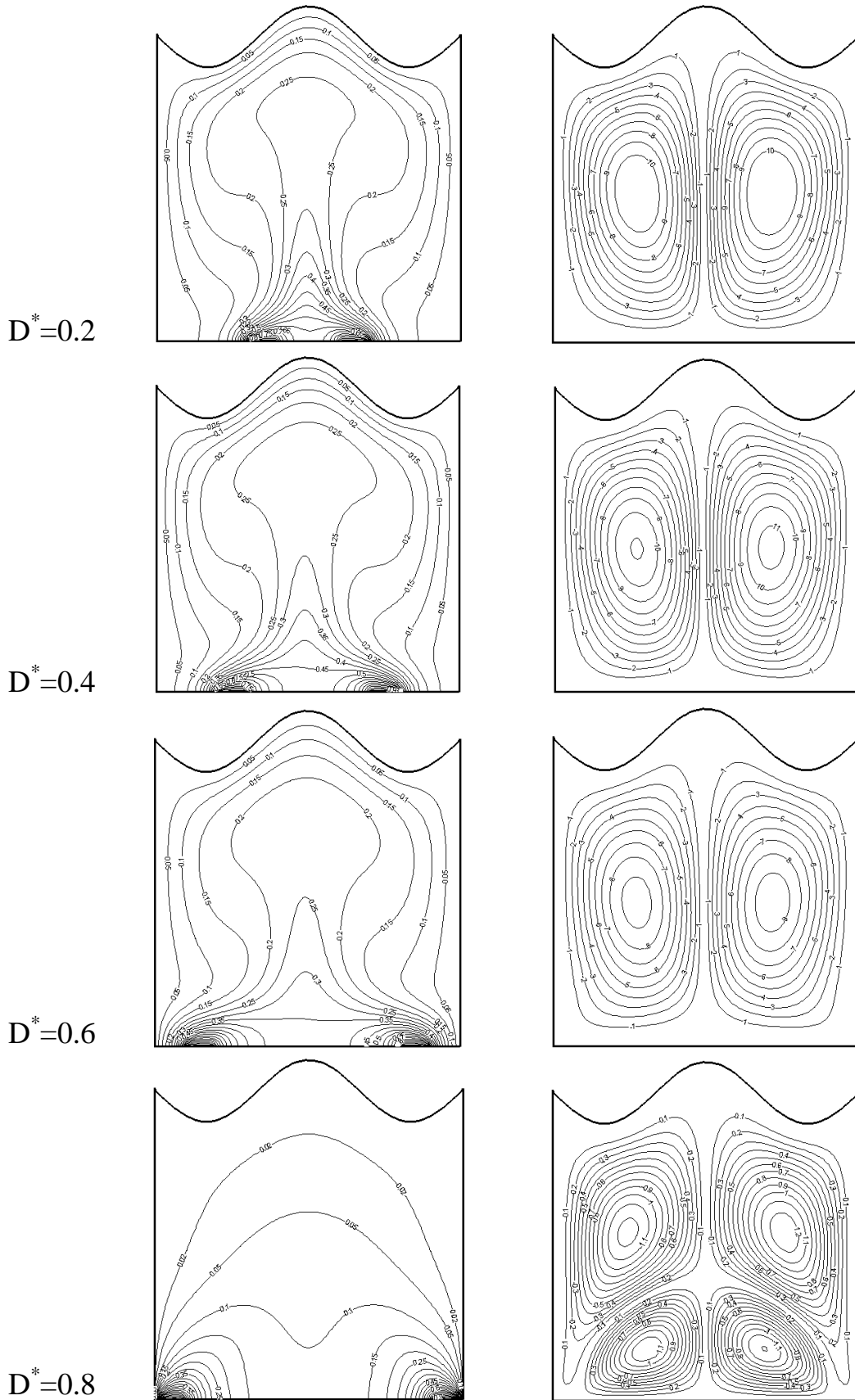
جميع الدوامات المتكونة تكون متناظرة حول محور المنتصف للحيز المغلق كذلك خطوط ثبوت درجات الحرارة والتي يكون توزيعها بشكل موازي لبعضها البعض تقريباً ويكون شكلها نصف دائري حول كل مصدر حراري كما مبين في الأشكال إلى جهة اليسار ولجميع قيم المسافة ( $D^*$ ) بين المصدرين وللحالات المبينة في الأشكال (5) إلى (10)، ذلك بسبب تناظر الحيز.

وبينت النتائج أيضاً ان قوة التدفق للمائع تزداد مع انخفاض قيمة المسافة ( $D^*$ ) بين المصدرين الحراريين وعندما يكون المصدران الحراريان اقرب إلى بعضهما البعض عند نفس قيمة رقم رايلي، لأنه وعند المسافة ( $D^*=0.2$ ) يتصرف المصدرين كمصدر حراري واحد فتكون قوة التدفق أكبر مقارنة مع المسافات الأخرى ( $D^*=0.4$ )، ( $D^*=0.6$ ) و ( $D^*=0.8$ )، لان قيمة دالة الانسياب عند المسافة ( $D^*=0.2$ ) تكون كبيرة وهذا واضح في الشكلين (5) و (6).

عند المسافة ( $D^*=0.8$ ) لجميع الأشكال من (11a) إلى (13b)، تكون قيم متوسط رقم نسلت كبيرة بالمقارنة مع متوسط رقم نسلت عند المسافات ( $D^*=0.2$ )، ( $D^*=0.4$ ) و ( $D^*=0.6$ ) حيث تصل إلى أكثر من ضعف القيمة ولكل قيم رقم رايلي ( $10^3-10^5$ )، الزيادة نتيجة

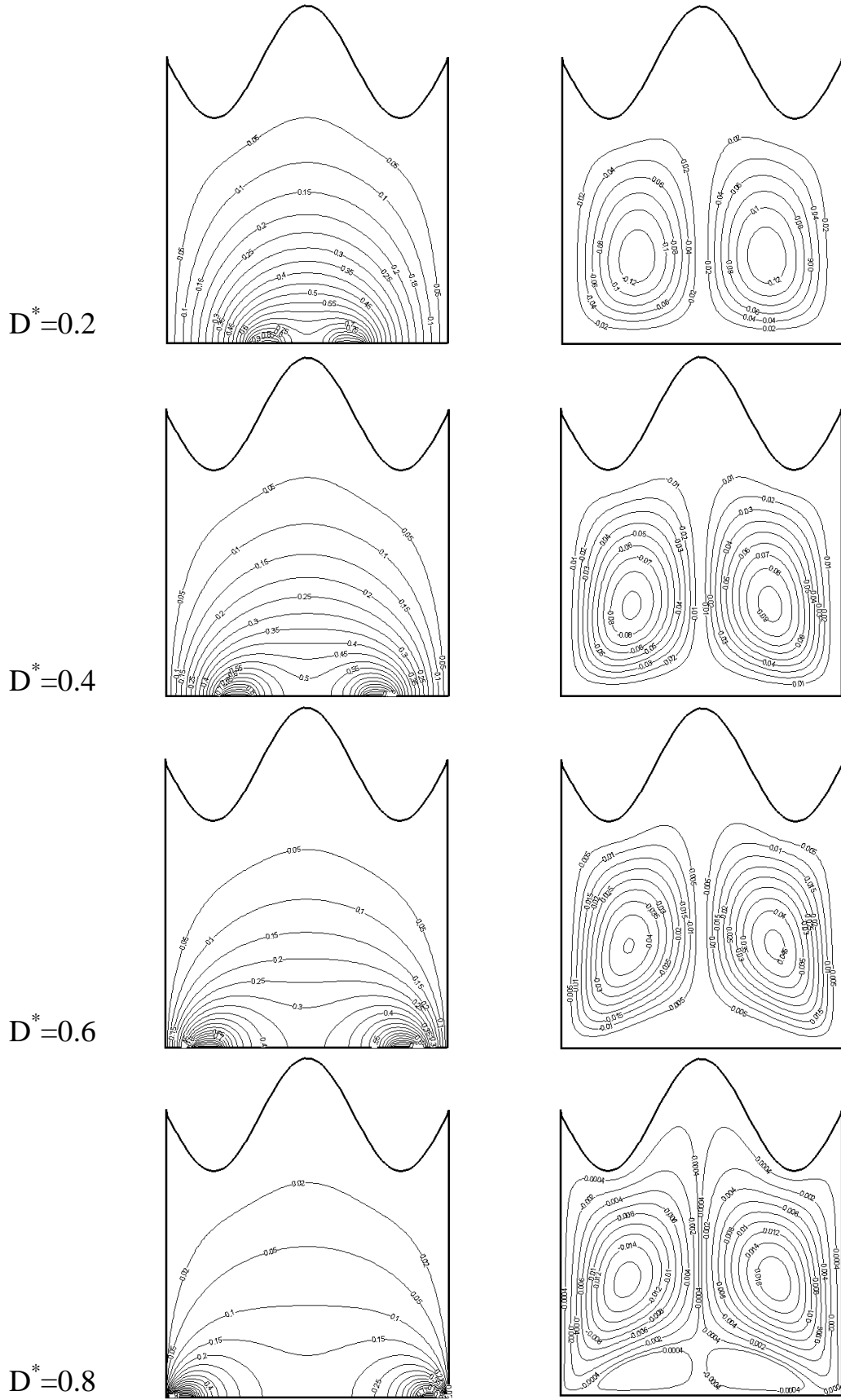


شكل (5) خطوط الانسياب وخطوط ثبوت درجات الحرارة عند رقم رايلى ( $Ra=10^3$ ) و ( $A^*=0.1, N=3$ ) ولمختلف المسافات ( $D^*$ ) بين المصدرين الحراريين

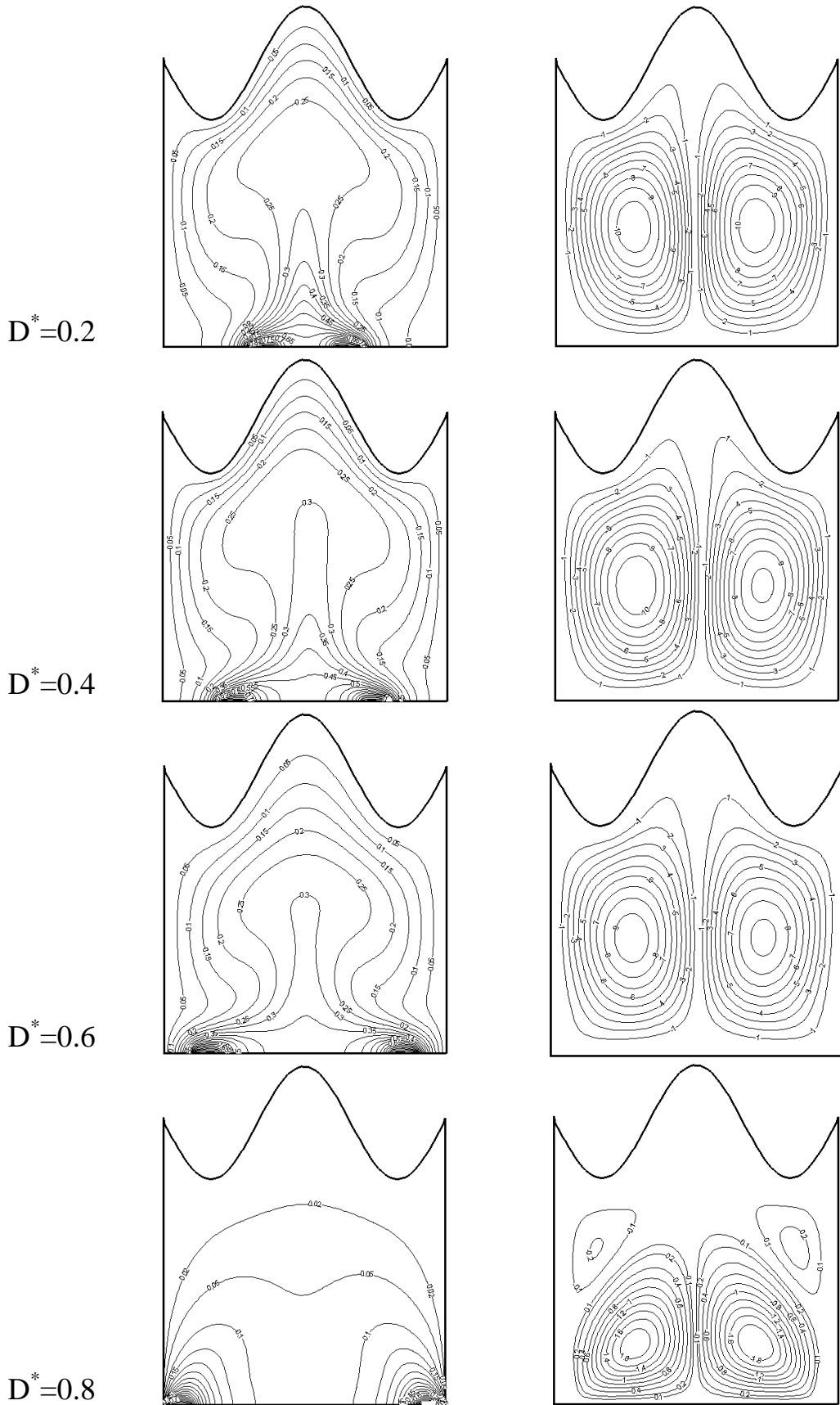


شكل (6) خطوط الانسياب وخطوط ثبوت درجات الحرارة عند رقم راييلي ( $Ra=10^5$ ) و ( $A^*=0.1, N=3$ ) ولمختلف المسافات ( $D^*$ ) بين المصدرين الحراريين

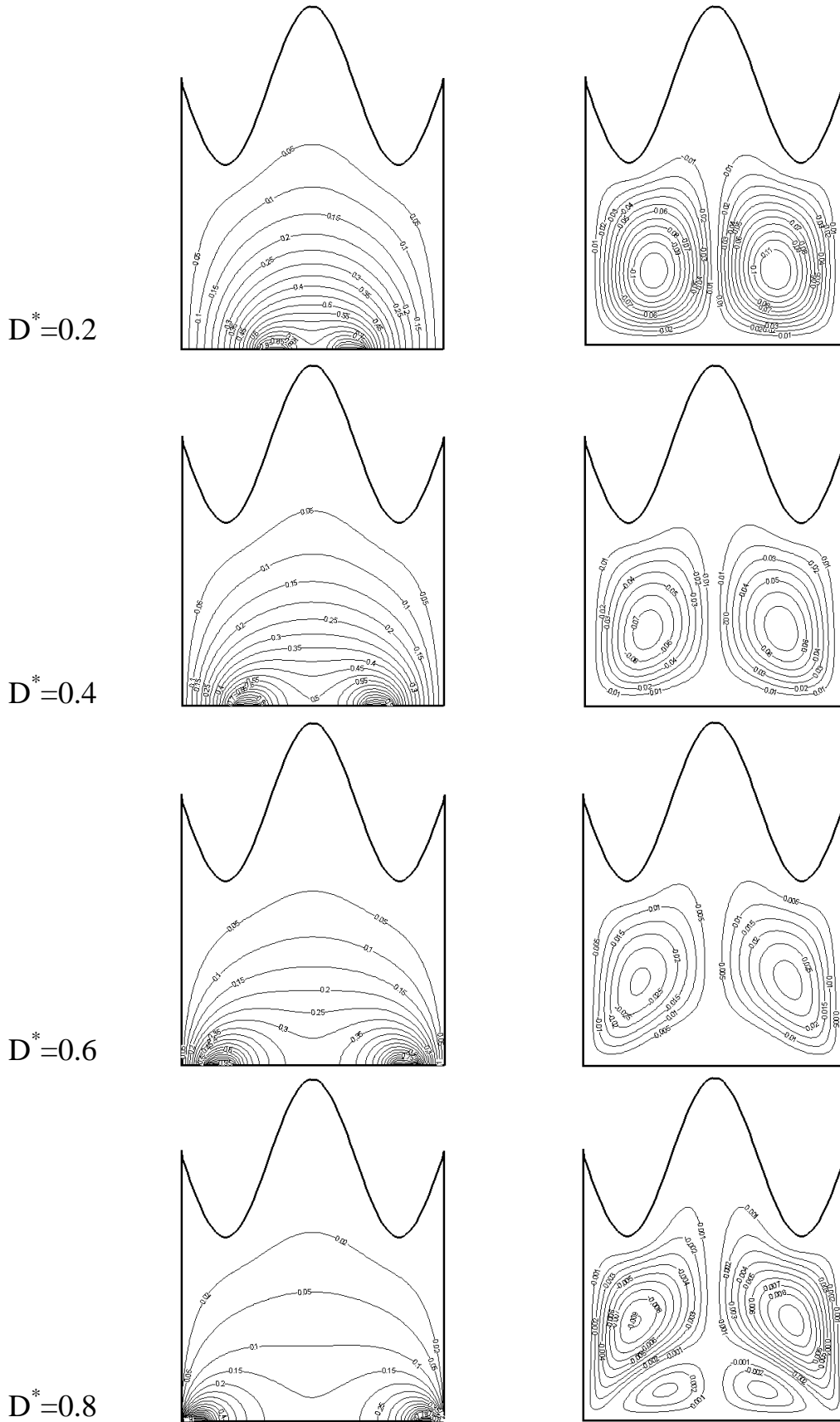




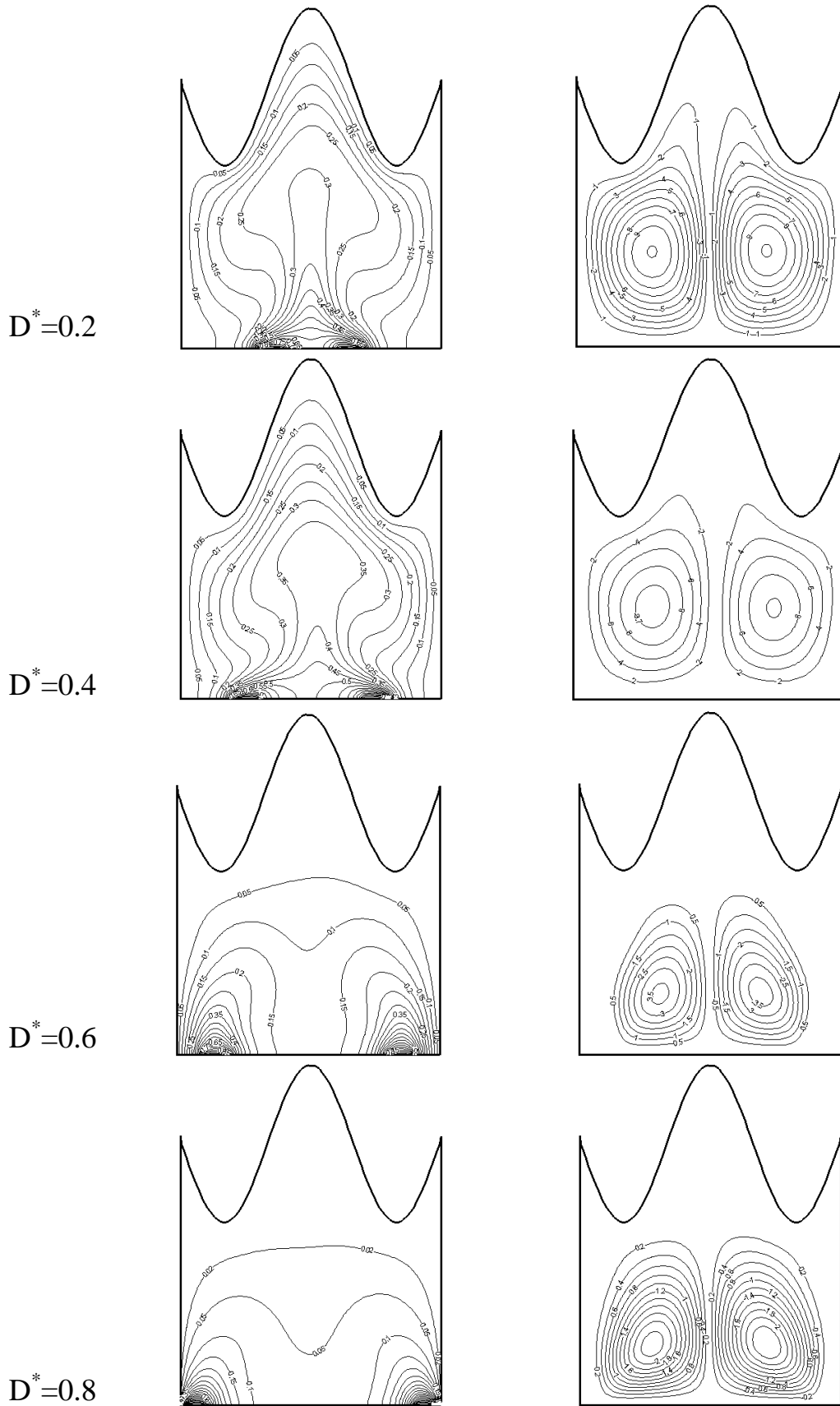
شكل (7) خطوط الانسياب وخطوط ثبوت درجات الحرارة عند رقم راييلي ( $Ra=10^3$ ) و ( $A^*=0.2, N=3$ ) ولمختلف المسافات ( $D^*$ ) بين المصدرين الحراريين



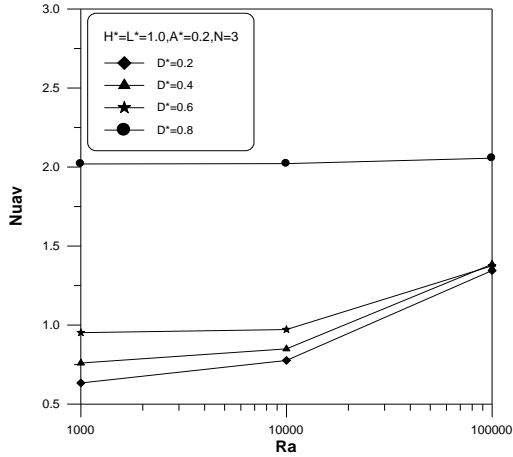
شكل (8) خطوط الانسياب وخطوط ثبوت درجات الحرارة عند رقم رايلى  $(Ra=10^5)$  و  $(A^*=0.2, N=3)$  ولمختلف المسافات  $(D^*)$  بين المصدرين الحراريين



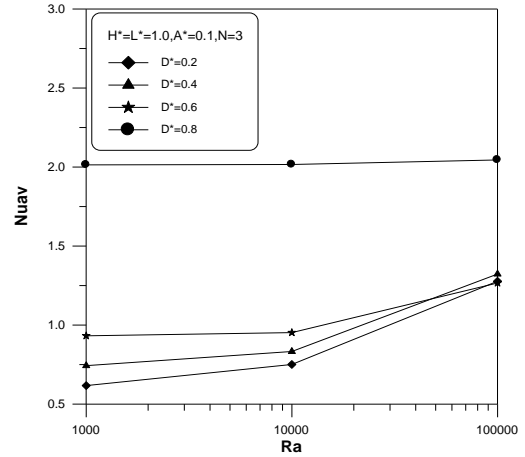
شكل (9) خطوط الانسياب وخطوط ثبوت درجات الحرارة عند رقم رابلي ( $Ra=10^3$ ) و ( $A^*=0.3, N=3$ ) ولمختلف المسافات ( $D^*$ ) بين المصدرين الحراريين



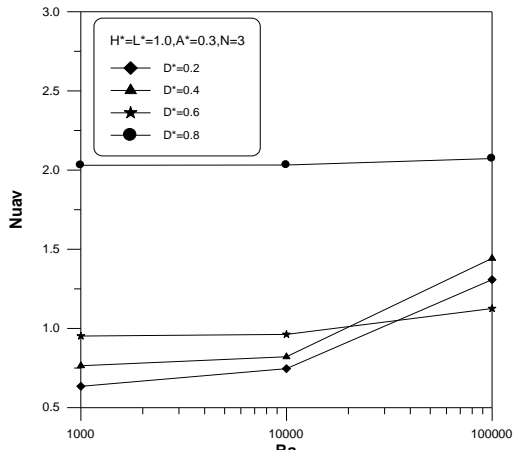
شكل (10) خطوط الانسياب وخطوط ثبوت درجات الحرارة عند رقم رايلى  $(Ra=10^5)$  و  $(A^*=0.3, N=3)$  ولمختلف المسافات  $(D^*)$  بين المصدرين الحراريين



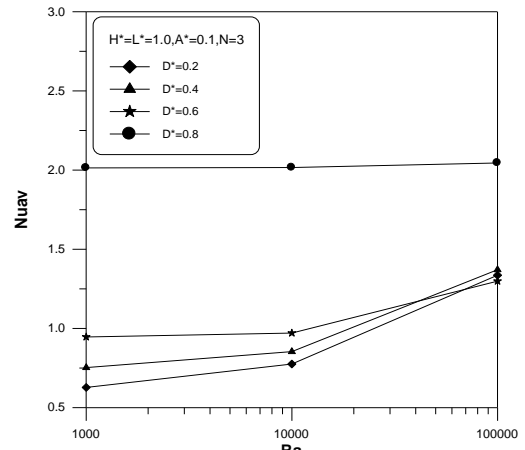
الشكل (12b) يوضح تأثير المسافة ( $D^*$ ) على متوسط رقم نسلت عندما ( $A^*=0.2$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الثاني



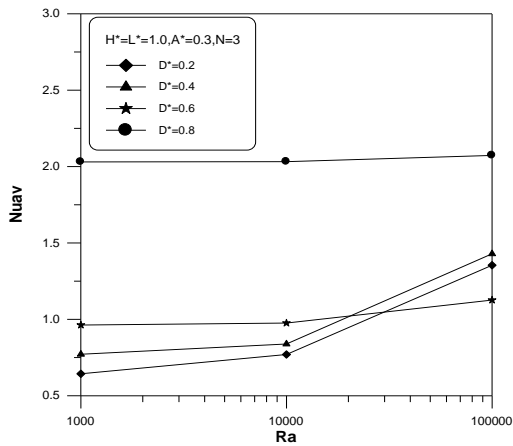
الشكل (11a) يوضح تأثير المسافة ( $D^*$ ) على متوسط رقم نسلت عندما ( $A^*=0.1$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الأول



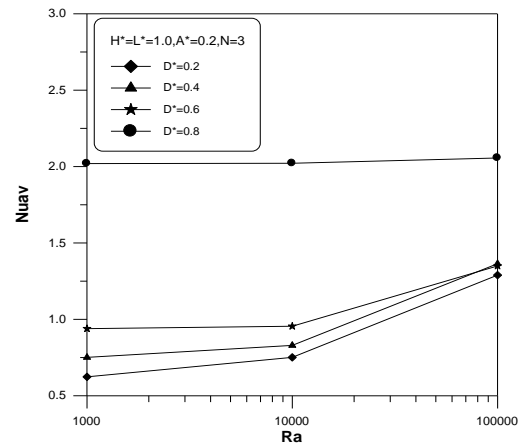
الشكل (13a) يوضح تأثير المسافة ( $D^*$ ) على متوسط رقم نسلت عندما ( $A^*=0.3$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الأول



الشكل (11b) يوضح تأثير المسافة ( $D^*$ ) على متوسط رقم نسلت عندما ( $A^*=0.1$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الثاني

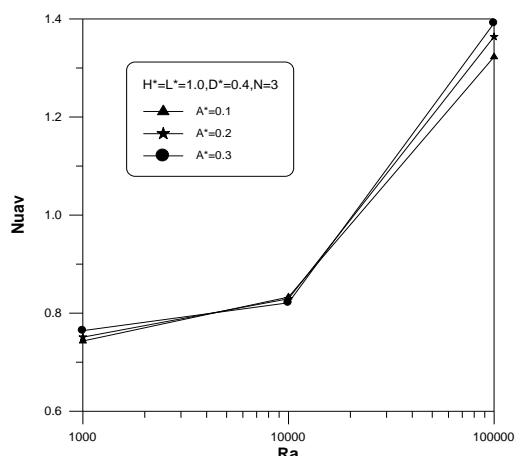


الشكل (13b) يوضح تأثير المسافة ( $D^*$ ) على متوسط رقم نسلت عندما ( $A^*=0.3$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الثاني

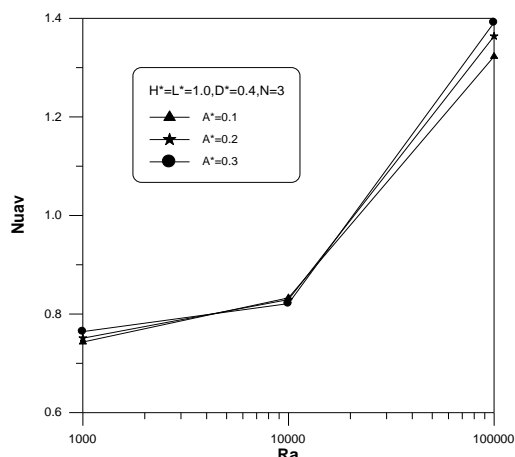


الشكل (12a) يوضح تأثير المسافة ( $D^*$ ) على متوسط رقم نسلت عندما ( $A^*=0.2$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الأول

لنفس حالة السقف أعلاه والمسافة ( $D^*=0.4$ )، الشكلان (15a) و (15b) يبينان حدوث تغير لقيم متوسط رقم نسلت عند رقم رايلي ( $10^5$ ) وتغير السعة ( $A^*$ ) بين (0.1-0.3) للمصدرين الحراريين الأول والثاني، إذ تزداد قيم متوسط رقم نسلت مع زيادة سعة الموجة، وذلك بسبب زيادة التطبيق في خطوط توزيع درجات الحرارة (Temperature Stratification) في منتصف الحيز وبدأ منطقة الانفصال الحراري (plume) في منتصف الحيز بالنقصان مع زيادة السعة لعدد التموجات ( $N=3$ )، فيزداد معدل انتقال الحرارة مع زيادة السعة لرقم رايلي ( $10^5$ )، ذلك يبدو من ملاحظة خطوط ثبوت درجات الحرارة وخطوط دالة الانسياب للأشكال من (5) إلى (10).



الشكل (15a) يوضح تأثير السعة ( $A^*$ ) على متوسط رقم نسلت عند ( $D^*=0.4$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الأول

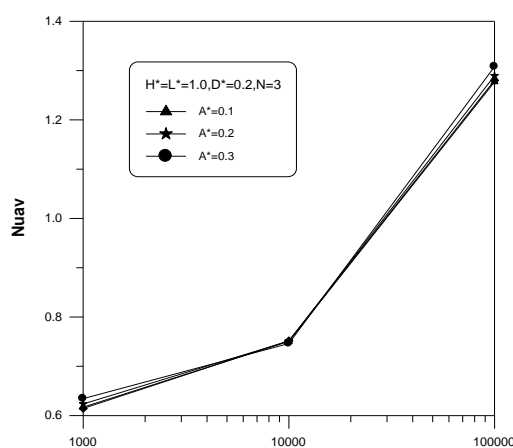


الشكل (15b) يوضح تأثير السعة ( $A^*$ ) على متوسط رقم نسلت عند ( $D^*=0.4$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الثاني

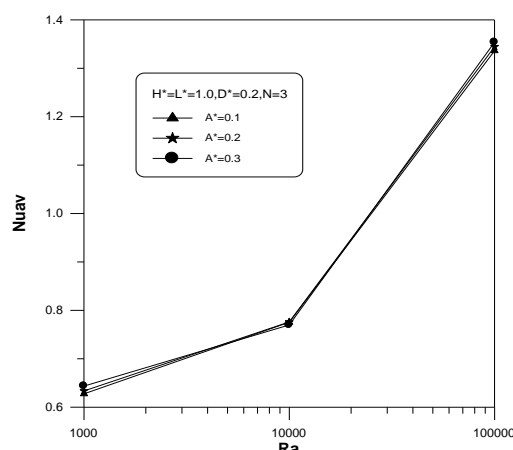
عند المسافة ( $D^*=0.6$ ) يوضح الشكل (16a) والشكل (16b) زيادة متوسط رقم نسلت مع زيادة سعة الموجة ( $A^*$ ) لأرقام رايلي ( $10^3-10^4$ ) للمصدرين الحراريين الأول والثاني، ذلك بسبب زيادة التطبيق

### تأثير سعة الموجة ( $A^*$ ) على متوسط رقم نسلت ( $Nu_{av}$ )

من خلال الدراسة العددية التي أجريت تبين اختلاف تأثير متوسط رقم نسلت بسعة الموجة ( $A^*$ ) حسب قيمة المسافة ( $D^*$ ) بين المصدرين الحراريين، في هذه الفقرة سيتم استعراض تأثير سعة الموجة ( $A^*$ ) على متوسط رقم نسلت. إذ يلاحظ من الشكلين (14a) و (14b) للمصدرين الحراريين الأول والثاني على التوالي والذين يكون فيهما سقف الحيز متموجاً بعدد تموجات ( $N=3$ ) والمسافة ( $D^*=0.2$ )، ان متوسط رقم نسلت ( $Nu_{av}$ ) لا يتأثر بتغير سعة الموجة ( $A^*$ ) المتغيرة بين القيم (0.1-0.3) وتكون قيم رقم نسلت متقاربة لجميع قيم رقم رايلي ( $10^3-10^5$ ) ولكلا المصدرين الحراريين، ذلك بسبب عدم تأثير خطوط دالة الانسياب وانحدار درجات الحرارة بتغير سعة التموج ولا بشكل الحيز حيث يبقى شكل الحيز متناظراً، ذلك يظهر بوضوح من ملاحظة خطوط ثبوت درجات الحرارة وخطوط دالة الانسياب للمائع في الأشكال من (5) إلى (10) التي تكون متشابهة عند المسافة ( $D^*=0.2$ ).

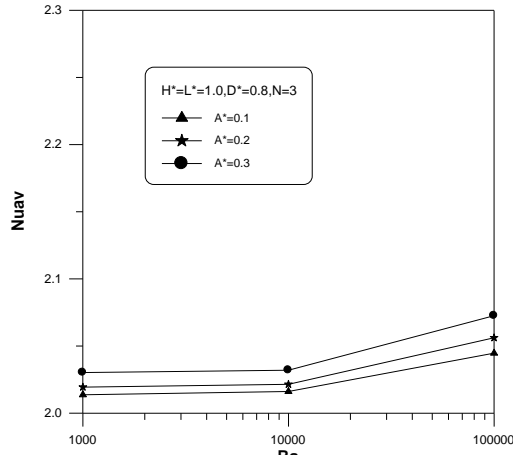


الشكل (14a) يوضح تأثير السعة ( $A^*$ ) على متوسط رقم نسلت عند ( $D^*=0.2$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الأول

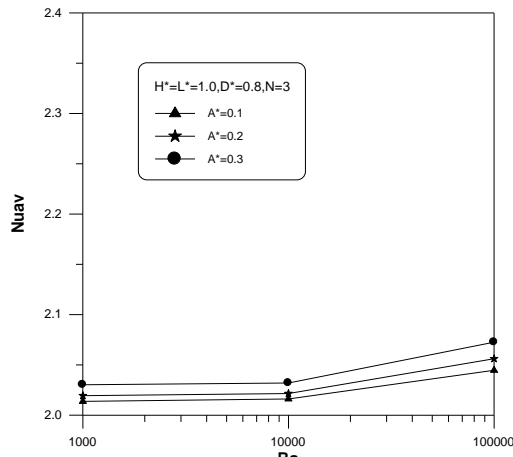


الشكل (14b) يوضح تأثير السعة ( $A^*$ ) على متوسط رقم نسلت عند ( $D^*=0.2$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الثاني

الموجة ( $A^*$ ) ولكل قيم رايلي بسبب اقتراب الحافتين الخارجيتين للمصدرين من الجدارين العموديين وابتعاد الحافتين الداخليتين عن بعضهما البعض الأمر الذي يؤدي إلى تكون دوامتين ثانويتين إضافة إلى الدوامتين الرئيسيتين، يزداد حجمهما مع زيادة رقم رايلي فتزداد قيم دالة الانسياب، وتصبح دوامتان رئيسيتان عند رقم رايلي ( $10^5$ )، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة انحدار درجات الحرارة عند الحافتين الداخليتين للمصدرين الحراريين، يظهر ذلك من ملاحظة خطوط دالة الانسياب وخطوط ثبوت درجات الحرارة في الأشكال (5) إلى (10).



الشكل (17a) يوضح تأثير السعة ( $A^*$ ) على متوسط رقم نسلت عند ( $D^*=0.8$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الأول

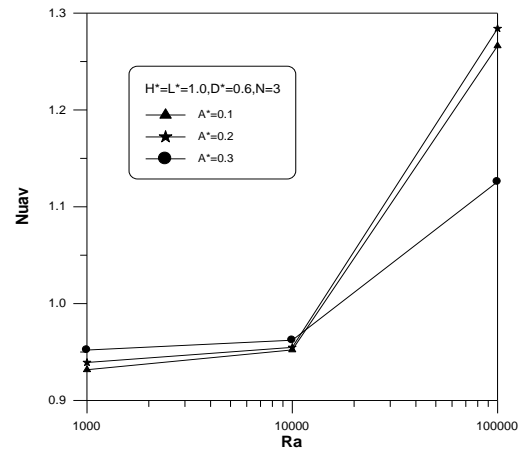


الشكل (17b) يوضح تأثير السعة ( $A^*$ ) على متوسط رقم نسلت عند ( $D^*=0.8$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الثاني.

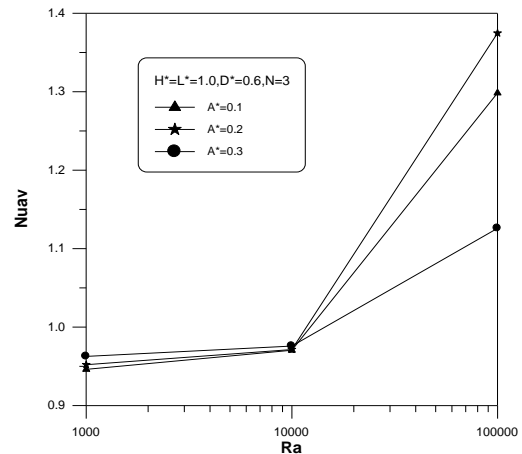
#### الاستنتاجات

الزيادة في مقدار المسافة ( $D^*$ ) بين المصدرين الحراريين تؤدي إلى زيادة متوسط رقم نسلت ( $NU_{av}$ ) ولجميع قيم رقم رايلي ( $Ra$ ) إذ تكون اعلى قيمة لمتوسط رقم نسلت عند المسافة ( $D^*=0.8$ ) واقل قيمة له عند

(Temperature Stratification) في خطوط توزيع درجات الحرارة فوق كل مصدر وزيادة انحدار درجات الحرارة على الحافات الخارجية للمصدرين الحراريين كما يظهر من مقارنة الأشكال (5)، (7) و(9)، كذلك الحال لرقم رايلي ( $10^4$ )، ألا أن هذه الزيادة لا تستمر فيحدث تذبذب في قيم متوسط رقم نسلت عند رقم رايلي ( $10^5$ )، إلا أنه وعند سعة الموجة ( $A^*=0.3$ ) و رايلي ( $10^5$ ) تقل قيم متوسط رقم نسلت عن باقي القيم ذلك بسبب انخفاض قيم دالة الانسياب وتحول طريق انتقال الحرارة إلى طريقة التوصيل بسبب صغر حجم الحيز الذي تسببه كبر سعة التمججات مما يؤدي إلى انخفاض انحدار درجات الحرارة على الحافتين الداخلية والخارجية للمصدرين الحراريين فيقل معدل انتقال الحرارة ذلك يظهر بوضوح من ملاحظة الشكل (10).



الشكل (16a) يوضح تأثير السعة ( $A^*$ ) على متوسط رقم نسلت عند ( $D^*=0.6$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الأول



الشكل (16b) يوضح تأثير السعة ( $A^*$ ) على متوسط رقم نسلت عند ( $D^*=0.6$ ) لمختلف أرقام رايلي المصدر الحراري الثاني

في الشكلين (17a) و(17b) والمسافة ( $D^*=0.8$ ) تكون الزيادة واضحة لمتوسط رقم نسلت مع زيادة سعة

- 5- Oztop, H. F., Abu-Nada, E., Varol, Y. and Chamkha, A., "Natural Convection in Wavy Enclosures with Volumetric Heat Sources", Firat University, TR-23119 Elazig, Turkey, Int. J. Therm. Sci., Vol. 50, pp. 502-514, 2011.
- 6- Hasan, M. N., Saha, S. and Saha, S. C., "Effects of Corrugation Frequency and Aspect Ratio on Natural Convection within an Enclosure Having Sinusoidal Corrugation over a Heated Top Surface", Primeasia University, Bangladesh, Int. Communications in Heat and Mass Transfer, ICHMT-02518, 2012.
- 7- Ferziger, J. H. and Peric, M., "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1996.
- 8- Hoffmann, K. A., "Computational Fluid Dynamics for Engineers", Engineering Education System, Austin, Tex, 1989.
- 9- Thompson, J. F., Warsi, Z. U. A. and Mastin, C. W., "Numerical Grid Generation Foundations and Applications", North-Holland, Amsterdam, 1985.
- 10- Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, McGraw-Hill, New York, 1980.
- 11- Rhie, C. M. and Chow, W. L., "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation", AIAA Journal, Vol. 21, PP. 1525-1532, 1983.
- 12- Peric, M., "Analysis of Pressure-Velocity Coupling on Non-orthogonal Grids", Numerical Heat Transfer, Part B, Vol. 17, PP. 63-82, 1990.
- 13- Wang, Y. and Komori, S., "On the Improvement of the SIMPLE-like Method for Flows with Complex eometry", Heat and Mass Transfer, Vol. 36, pp. 71-78, 2000.
- المسافة ( $D^*=0.2$ )، أما المسافة ( $D^*=0.6$ ) فهي حالة خاصة عند رقم رايلي ( $10^5$ ) إذ يقل متوسط رقم نسلت ( $Nu_{av}$ ) عن بقية القيم للمسافتين ( $D=0.2$ ) و ( $D=0.4$ ). لعدد التموجات ( $N=3$ ) وعند رقم رايلي ( $10^5$ ) وللمسافة ( $D^*=0.2$ ) لا يتأثر متوسط رقم نسلت ( $Nu_{av}$ ) بتغير سعة الموجة ( $A^*$ )، أما عند المسافة ( $D^*=0.4$ ) يزداد متوسط رقم نسلت ( $Nu_{av}$ ) بزيادة سعة الموجة ( $A^*$ ). كذلك عند المسافة ( $D^*=0.6$ ) يزداد متوسط رقم نسلت ( $Nu_{av}$ ) مع زيادة سعة الموجة ( $A^*$ ) لأرقام رايلي ( $10^4$ - $10^3$ ) للمصدرين الحراريين الأول والثاني، أما بالنسبة لسعة الموجة ( $A^*=0.3$ ) و رايلي ( $10^5$ ) فتقل قيم متوسط رقم نسلت عن باقي القيم. يزداد متوسط رقم نسلت ( $Nu_{av}$ ) أيضا مع زيادة السعة ( $A^*$ ) عند المسافة ( $D=0.8$ ).
- المصادر**
- 1- Gao, W., Lin, W., Liu, T., Xia, C., "Analytical and Experimental Studies on the Thermal Performance of Cross-Corrugated and Flat-Plate Solar Air Heaters", Yunnan Normal University, China, Applied Energy, Vol. 84, pp. 425-441, 2007.
- 2- Das, p. k., Mahmud, S., "Numerical Investigation of Natural Convection Inside a Wavy Enclosure", Bangladesh University of Engineering and Technology, Int. J. Therm. Sci., Vol. 42, pp. 397-406, 2003.
- 3- Varol, Y. and Oztop, H. F., "Free Convection in a Shallow Wavy Enclosure", Vanderbilt University, USA, Int. Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 33, pp. 764-771, 2006.
- 4- Saha, S., Sultana, T., Saha, G. and Rahman, M. M., "Effects of Discrete Isoflux Heat Source Size and Angle of Inclination on Natural Convection Heat transfer flow inside a sinusoidal Corrugated Enclosure", Bangladesh University of Engineering and Technology, Int. Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 35, pp. 1288-1296, 2008.