دراسة عملية لتأثير الاهتزازات القسرية الشاقولية في معامل انتقال الحرارة بالحمل الحر من صفيحة مستوية مسخنة نحو الأعلى

أ.م.د زينة خليفة كاظم المهندس عبد الحميد رافع سرحان*
الجامعة التكنولوجية / قسم هندسة المكائن والمعدات

الخلاصة

تم إجراء دراسة عملية لبيان تأثير الاهتزازات القسرية الشاقولية في معامل انتقال الحرارة بالحمل الحر من صفيحة مستوية مصنعة من الألمنيوم بأبعاد(300 Length*100 Width*3 thickness mm) ، سخنت الصفيحة بفيض حراري ثابت نحو الأعلى يتراوح بين (250 – 1500W/m^2).أجريت الدراسة على الصفيحة في الوضع الافقي ولزوايا ميل عن الأفق (0^o،30^o,45^o,60^o, 90^o). تمت دراسة تأثير كل من التردد (f) لمدى (16 – 2 Hz) وسعة اهتزاز (a) من(7.16 – 1.63 mm), ولمدى عدد رايلي(138.991 < Ra < 487.275) . وتوصلت الدراسة إلى أن ازدياد معامل انتقال الحرارة بزيادة سعة الاهتزاز بشكل عام للزوايا من (0^o إلى60^o) حيث تكون أعلى زيادة في الوضع الأفقي ومقدارها (13%) ما عدا الوضع الشاقولي ($\theta= 90^o$) إذ يكون تأثير الاهتزاز في معامل انتقال الحرارة سلبيا حيث يكون أعلى انخفاض مقداره (7.6 %) ، كما وجد أن معامل انتقال الحرارة الإجمالي الاهتزازي يقل بزيادة عدد رينولدز الاهتزازي لزوايا الميل المعتمدة في البحث كافة .

ABSTRACT

The aim of this work is to perform an experimental study for the effect of forced vertical vibrations on free convection heat transfer coefficient, from flat plate made of Aluminum with dimension (300 Length*100 Width*3 thickness mm).It's heated under a constant heat flux of (250-1500 W/m^2) upward. The flat plate was located horizontally or inclined in multiple angles at rang of (0^o, 30^o, 45^o 60^o ، 90^o). The experimental study is carried out at a range of frequency (2-16 Hz) ، the amplitude at the range of (1.63-7.16 mm), and the Rayleigh number at the rang (138.991< Ra <487.275).

The results of this study show that, the relation between the heat transfer coefficient and the amplitude of vibration is incrementally for inclination angles from (0°-60°), and reaches a maximum ratio of (13%) in the horizontal position, except at the vertical position ($\theta=90^o$) the heat transfer coefficient decreases as the vibration response increases and the maximum decrease ratio occurs at (7.6 %).

الرمز	**الدلالة**	**الوحدة**
A_t	مساحة الصفيحة الكلية.	m^2
a	سعة الاهتزاز.	m
$acc.$	تعجيل الاهتزاز.	m/s^2
f	تردد الاهتزاز.	Hz
g	التعجيل الأرضي ويساوي (9.81).	m/s^2
h	معامل انتقال الحرارة بدون اهتزاز.	$W/m^2.C$
h_v	معامل انتقال الحرارة الاهتزازي.	$W/m^2.C$
$h_{av.}$	معامل انتقال الحرارة الإجمالي.	$W/m^2.C$
$hv_{av.}$	معامل انتقال الحرارة الإجمالي الاهتزازي.	$W/m^2.C$
I	التيار الكهربائي.	$Amp.$
k	معامل التوصيل الحراري للهواء.	$W/m.C$
k_p	معامل التوصيل الحراري للألمنيوم.	$W/m.C$
L	طول الصفيحة.	m
Nu	عدد نسلت الأجمالي.	_
P	محيط الصفيحة.	m
Pr	عدد براندتل.	_
Q	الفيض الحراري.	W/m^2
$Q_{conv.}$	الحرارة المنتقلة بالحمل الحر.	W
$Q_{gen.}$	الحرارة المتولدة نتيجة مرور تيار كهربائي.	W
$Q_{rad.}$	الحرارة المنتقلة بالإشعاع.	W
Ra	عدد رايلي.	_
Re_v	عدد رينولد الاهتزازي.	_
T_{air}	درجة حرارة المحيط.	K
T_f	معدل درجة حرارة الغشاء.	K
$T_{sur.}$	معدل درجة حرارة سطح الصفيحة.	K
u_v	سرعة الاهتزاز.	m/s
V	الفولتية.	$Volt$
w	عرض الصفيحة.	m
β	معامل التمدد الحراري	$1/K$

المقدمة:

أن لموضوع استعمال الاهتزازات لزيادة معدل انتقال الحرارة بالحمل الحر أهمية كبيرة لأجراء الأبحاث العلمية في كافة الاختصاصات الهندسية لذا أنصبت الدراسات العلمية على هذا الموضوع في العقود السابقة ، حيث اهتمت بزيادة معدل انتقال الحرارة في الوحدات الصناعية لتجنب انتقال الحرارة فوق القيمة التصميمية للعناصر التي تتعرض للاهتزازات ، كما أن المتطلبات الحديثة في أداء الماكنة تحت ظروف تشغيلية قصوى مثل الصواريخ أكدت على عجز أو نقص في معرفة مبادئ ميكانيكية انتقال الحرارة بوجود الاهتزازات ، كما أن مشاكل المحركات والمركبات الفضائية هي التي استقطبت الباحثين إلى دراسة تأثير الاهتزازات في انتقال الحرارة ،ففي محرك الدفع الصاروخي عند السعة العالية يحدث عدم استقرار في احتراق الوقود ، فعندما يكون انتقال الحرارة أعظم ما يمكن بين المحرك وجداره فان درجة الحرارة تصل إلى نقطة الانهيار أي تحطم المحرك الصاروخي [1]. كما اتجهت البحوث نحو دراسة القوى المعقدة المؤثرة في الأجسام والتي يمكن أن تؤثر في زيادة انتقال الحرارة بالحمل الحر ، إذ أن تكنولوجيا الفضاء تتطلب دراسة مستفيضة في هذا المجال لمعرفة تأثير القوى الناتجة من الاهتزازات والمغناطيسية [2] . ومن الأسباب التي دعت إلى دراسة تأثير الاهتزازات على المعدات الصناعية هي عدم السيطرة على الذبذبات التدميرية التي تحصل بشكل تلقائي في بعض أجهزة ومعدات انتقال الحرارة بالإضافة إلى إن الاهتزازات والنبضات تزيد من معامل انتقال الحرارة . لذا درس عدد من الباحثين عملية انتقال الحرارة من نماذج مختلفة بالحمل الحر، و اوجدوا علاقات تجريبية وعددية تحدد العلاقة ما بين عدد رايلي (Ra) وعدد نسلت (Nu).

في عام (2003) قدم الباحثون (Rodrig, et al) [3] دراسة عملية ونظرية لانتقال الحرارة بالحمل الحر من صفيحة مستوية عمودية من الألمنيوم بأبعاد (315 mm height * 35 mm width) معرضة إلى فيض حراري ثابت (W/m^2 10000,5000,3000,2500,2000,1500,1000) موضوعة داخل خزان زجاجي(560 mm long * 470 mm height * 130 mm width) مملوء بالماء ولعدد رايلي (10^{12}) .وجد الباحثون أن عدد نسلت الموضعي لا يعتمد على معدل تغير الفيض الحراري للجريان الطباقي . وقد توصل الباحثون إلى المعادلة التجريبية الآتية :

$$Nu = \frac{2}{360^{1/5}} \times \left[\frac{Pr}{\frac{4}{5} + Pr}\right]^{1/5} \times Ra_y^{1/5} \qquad (1)$$

وفي عام (2005) قدم الباحثان (**Fohanno & Polidori**)[4] دراسة نظرية لمعامل انتقال الحرارة بالحمل الحر للجريان الطباقي والاضطرابي عند الجدران والنوافذ العمودية المعرضة إلى فيض حراري منتظم داخل غرفة

معينة ، توصل الباحثان إلى إن معامل انتقال الحرارة بالحمل الحر يزداد مع زيادة معدل الفيض الحراري ومع زيادة طول الجدار.

وقد استنتجا المعادلة التجريبية لكل من الجريان الطباقي والأضطرابي على التوالي وكما مدرج ادناه .

$$Nu_x = 0.496(Ra_x)^{1/5} \qquad (2)$$

$$Nu_x = 0.073(Ra_x)^{2/7} \qquad (3)$$

$Ra_x > 6.3\times10^9$

وفي عام (2007) قدم الباحث (عدي شاكر) [5] دراسة عملية لبيان تأثير الاهتزازات العمودية في معامل انتقال الحرارة بالحمل الحر وذلك باستعمال اسطوانة مزعنفة حلقية ذات مقاطع مختلفة وبطول مزعنف مقداره (300mm) وبقطر داخلي مقداره (16mm) وبقطر خارجي مع الزعنفة مقداره (48mm) مصنوعة من الألمنيوم معرضة إلى فيض حراري ثابت يتراوح بين $(1500\text{-}500)\mathrm{W/m^2}$ ، وكانت هذه الاسطوانة أفقية أو مائلة عن الأفق بزاوية تتراوح بين $(60^o\text{-}0^o)$ ، تمت دراسة تأثير التردد (f) ولمدى (20-2 Hz) وسعة الاهتزاز (a) من mm (-1.79 0) . وقد توصل الباحث إلى أن عدد رينولدز الاهتزازي (Re_v) يزداد مع شدة الاهتزاز ولمختلف الزوايا وتكون اكبر كلما كانت زاوية الميل اكبر ، وان معامل انتقال الحرارة الاهتزازي يقل بزيادة عدد رايلى (Ra) ويكون بأعلى مقدار عند اعلى مستوى للفيض الحراري . وقد استنتجت المعادلة التجريبية الآتية:

$$Nu = 118.6350 * Ra_v^n \qquad (8)$$

$$Nu = 118.6350 * Ra^{0.53506} * Re_v^{-o.11269} * \theta^{-1.30968} \qquad (9)$$

وفي عام (2009) قدم الباحث (فادي رياض) [6] إجراء دراسة عملية لبيان تأثير الاهتزازات على معامل انتقال الحرارة بالحمل القسري من اسطوانة مزعنفة حلقيا قطرها الداخلي (16mm) وقطرها الخارجي مع الزعنفة (48mm) مصنوعة من الألمنيوم ، سخنت بفيض حراري ثابت وذلك بإمرار تيار كهربائي متناوب خلال مقاومة مثبتة داخل الحيز الداخلي لهذه الاسطوانة التي كانت إما أفقية أو مائلة عن الأفق بزوايا تراوحت بين $(0^o, 45^o)$ ، وتمت دراسة تأثير كل من التردد (f) لمدى (16-2 Hz) وسعة اهتزاز (a) من (0 – 2.2 mm) ولمعدلات فيض حراري تراوحت بين $(1500\text{-}500\ \mathrm{W/m^2})$. وقد توصلت الدراسة إلى ازدياد معامل انتقال الحرارة مع زيادة سعة الاهتزاز بشكل عام وتصل قيمة أعلى زيادة إلى (13.34%)، كما إن زيادة زاوية الميل تقلل من قيم معامل انتقال الحرارة الاهتزازي وذلك بسبب عرقلة الزعانف في الحالة المائلة عن الأفق لتيارات الحمل أما في الوضع الأفقي فتعمل الزعانف عمل مسارات تساعد في زيادة حركة تيارات الحمل ومن ثم تزيد من معدلات معامل انتقال الحرارة . وقد توصل الباحث إلى المعادلة التجريبية الآتية :

$$h = [(2 * 10^{-3}) - (2 * 10^{-5} * Re)] * \theta + 0.004 * Re + 3.98 \qquad (10)$$

الجهاز المستخدم:

تم تصنيع نموذج الاختبار من صفيحة مستوية من الألمنيوم مستطيلة الشكل بإبعاد (300mm long * 100mm width * 3mm height) ولغرض تثبيت المزدوجات الحرارية المستخدمة في قياس درجة حرارة السطح تم تثقيب النموذج بعدد من الثقوب (30 ثقب) من الجانب الأسفل غير نافذ قطر الثقب (1mm) وعمق (1.5mm)، كما موضح بالشكل (1). تثبت المزدوجات الحرارية في الثقوب المخصصة لها باستخدام مادة لاصقة تتحمل درجات حرارية عالية (super glue). ولتسخين سطح التبادل الحراري تستخدم المسخنات الكهربائية ، والتي هي عبارة عن شرائط رقيقة مصنوعة من النيكروم ذي عرض (0.3mm) وسمك (0.06mm) حيث جرت عملية تثبيت هذه الأشرطة طوليا على طبقة من المايكا (Mica) سمكها (0.5mm) بصورة متجانسة لضمان توزيع الحرارة بشكل متجانس على الصفيحة ، ثم تغطية الوجهين العلوي والسفلي للمسخن بطبقتين من المايكا أيضا لغرض ضمان العزل الكهربائي ، ثقبت طبقات المايكا (ثلاث طبقات) بعدد من الثقوب مكافئ لعدد توزيع الثقوب الخاصة بسطح التبادل الحراري وذلك لضمان مرور المزدوجات الحرارية من خلالها، وعزل سطح التبادل الحراري من الجهة السفلى بالصوف الزجاجي لغرض تقليل الخسائر الحرارية ،وثبت النموذج في إطار من الخشب بإبعاد (330mm*125mm) وبسمك (18mm) وتم عزله عن سطح التبادل الحراري باستخدام مادة التفلون(Teflon). ثم ثبت على مسند بشكل حرف (U) إذ صنعت الجوانب و القاعدة من مادة الحديد يتم تثبيت النموذج من الوسط وبذلك يمكننا تحريك النموذج بزوايا مختلفة ولغرض قياس الزوايا تم تثبيت منقلة لضبط الزاوية. سخن نموذج الاختبار بإمرار تيار كهربائي في ملف تسخين ذي مقاومة حرارية مقدارها (V*I) وقدرة (1000 W) يلف حول طبقة من المايكا ثم يوضع بين طبقتين من المايكا لضمان عزله بشكل تام و تتغير الفولتية عن طريق منظم الفولتية (Varic) وقياس فرق الجهد بواسطة مقياس فرق الجهد والتيار بواسطة اميتر تمكنا من الحصول على فيض حراري مختلف .كما تم قياس درجات الحرارة باستخدام (30) مزدوجا حراريا من نوع (K) ثبتت على نموذج الاختبار بواسطة مادة لاصقة مقاومة للحرارة حيث وصلت بمفتاح انتقائي (Selector Switch) ثم إلى محرار رقمي (Thermometer) وسجلت قيم درجات الحرارة بعد الوصول إلى حالة الاستقرار البالغة (3إلى 3.5 ساعة) . كما تم توليد الاهتزازات عن طريق جهاز مولد الإشارة (Random Function Generator)الذي يولد الإشارة الجيبية ذات التردد المطلوب ويرسلها إلى راسم الإشارة (Digital Oscilloscope) ومكبر القدرة (Power Amplifier) الذي بدوره يضخم هذه الإشارة ويرسلها إلى جهاز مثير الاهتزاز(Vibration Exciter) الذي يهتز وفقا للتردد المطلوب وبمقياس الاهتزاز Vibration (Meter) تقاس هذه الاهتزازات عن طريق

متحسس للاهتزاز يتم تثبيته بصورة عمودية على المسند. لإجراء التجارب الخاصة بالبحث يتم ربط الأجهزة أعلاه كما في الشكل المصور(2) و (3) ، تم إتباع الإجراءات الأساسية في التجارب المختبرية وتدوين النتائج لاعتمادها في تحليل تأثير الاهتزاز في معامل انتقال الحرارة بالحمل الحر.

الحسابات :

إن كمية الحرارة المتولدة في المسخن الكهربائي الكلية (Q_{gen}) تتحول إلى حرارة تنتقل عبر الصفيحة بالتوصيل والى المحيط الخارجي من سطح الصفيحة بالحمل الحر (Q_{conv}) إضافة إلى حرارة المفقودة بالإشعاع (Q_{rad}) .

$$Q_{gen} = Q_{conv} + Q_{rad} \qquad (11)$$

إن كمية الحرارة المتولدة الكلية تحسب كما يأتي:

$$Q_{gen} = I * V \qquad (12)$$

وان كمية الحرارة المنتقلة بالإشعاع تحسب كما يأتي:

$$Q_{rad} = \sigma * \varepsilon * S_{sur} * A_t * (T_{sav}^4 - T_{air}^4) \qquad (13$$

حيث ان ε : عامل انبعاثية السطح وتساوي (0.04).

S_{sur} : معامل الشكل ويساوي (1) [7] .

وعليه فان معامل انتقال الحرارة بالحمل الحر تم حسابه من المعادلة الآتية التي تعرف بقانون نيوتن للتبريد.

$$h = \frac{Q_{conv}}{A_t * \Delta T} \qquad (14)$$

حيث إن (A_t): تمثل مساحة الصفيحة الكلية لنموذج الاختبار المعرضة للحمل وتساوي ($0.003\ m^2$)

$$A_t = W * L \qquad (15)$$

كما تم حساب معدل درجات الحرارة كما يلي :

$$T_{sav} = (T_1 + T_2 + \cdots\cdots + T_n)/N \qquad (16)$$

إما معدل درجة الطبقة المتاخمة (T_f) فقد تم حسابها كما يأتي:

$$T_f = \frac{T_{sav} + T_{air}}{2} \qquad (17)$$

اعتمدت هذه الدرجة في حساب الخواص الفيزياوية للمادة العاملة (الهواء) بعد إيجاد معادلات تمكننا من الحصول على أي خاصية عند أي درجة حرارة . كما تم حساب معامل التمدد الحجمي من المعادلة الآتية:

$$\beta = 1/(T_f + 273) \qquad (18)$$

لغرض حساب الفيض الحراري المسلط على نموذج الاختبار يتطلب حساب القدرة المتولدة نتيجة مرور تيار كهربائي في مقاومة التسخين بتطبيق المعادلة (11) . حيث أن المساحة السطحية المعرضة لهذه القدرة هي المساحة السطحية للصفيحة وتحسب كما في المعادلة (15).

الأعداد اللابعدية (Dimensionless Parameter

اعتمدت درجة حرارة الغشاء (T_f) في حساب الخواص الخاصة بالمائع الخارجي والتي يعتمد عليهما في حساب القيم اللابعدية الآتية عدد رينولدز الاهتزازي (Vibration Reynolds number)، عدد رايلي (Rayleigh number) ، عدد نسلت (Nusselt number) .

$$Re_v = \frac{2.\pi.f.a.\delta}{v} \qquad (19)$$

$$Ra = \frac{\beta * g * (T_{sav} - T_{air}) * \delta^3}{v^2} * Pr \qquad (20)$$

$$Nu = \frac{h * \delta}{k_f} \qquad (21)$$

وفي حالة ميل النموذج عن الأفق بزاوية (θ) ضمن المدى المحدد يتم اعتماد مركبة التعجيل الأرضي في حساب المقادير اللابعدية وكما يأتي[5].

$$Ra = \frac{\beta * g \sin\theta * (T_{sav} - T_{air}) * \delta^3}{v^2} * \mathrm{Pr} \qquad (22$$

أما إذا كان النموذج في وضع أفقي الطول المميز يكتب بالمعادلة المدرجة أدناه (8):

$$\delta = \frac{W * L}{2(W + L)} \qquad (23)$$

إذا كان النموذج مائل عن الأفق بزاوية اكبر من (0^o) واصغر من (90^o):

$$\delta = \frac{W * L\cos\theta}{2(W + L\cos\theta)} \qquad (24)$$

إذا كان النموذج بالوضع الشاقولي :

$$\delta = L = 300\ mm \qquad (25)$$

حيث :

(δ)تمثل الطول المميز للصفيحة.

$$Pr = \frac{\mu * Cp}{k_f} \qquad (26)$$

أما سرعة الاهتزاز(Vibration Velocity) و سعة الاهتزاز تم حسابها كما في مدرج أدناه:

$$u_v = a \times f \qquad (27)$$

$$a = \frac{acc. * \sqrt{2}}{(2\pi * f)^2} \qquad (28)$$

مناقشة النتائج:

يتناول هذا الجانب من البحث تحليل النتائج العملية المستحصلة من (225) اختباراً لنموذج اختبار ذو مساحة مقطع ثابتة و لفيض حراري يساوي $(1500,1000,750,500,250\ W/m^2)$ ، ولزوايا ميل مقدارها $(90^o,60^o,45^o,30^o,0^o)$ ، لذا تضمن هذا الجانب من البحث تأثير العناصر الآتية في معامل انتقال الحرارة بالحمل .

تأثير تردد الاهتزاز في سعة وسرعة الاهتزاز:

توضح الأشكال (5,4) تأثير الترددات القسرية في سعة الاهتزاز (.Amp) وسرعة الاهتزاز (u_v) ،لنموذج الاختبار في الوضع الافقي ولفيض حراري $(250 W/m^2)$ حيث يتضح أن سعة الاهتزاز تكون بأعلى مقدار عند الترددات الواطئة وتقل بزيادة التردد كما إن سرعة الاهتزاز تزداد مع ازدياد الترددات وتصل أقصى قيمة عند الترددات المتوسطة (6 Hz) وتتذبذب بين زيادة ونقصان بزيادة الترددات وتصبح بأعلى قيمة عند التردد (16 Hz).

تأثير عدد رينولدز الاهتزازي (Re_v) في معامل انتقال الحرارة الإجمالي الاهتزازي $(hv_{av.})$:

يوضح الشكل (6) تأثير زيادة عدد رينولدز الاهتزازي في معامل انتقال الحرارة الإجمالي الاهتزازي لزوايا الميل المعتمدة في البحث و لكافة الترددات القسرية (16,10,6,2 Hz)

ولمختلف مستويات الفيض الحراري المعتمدة في البحث، حيث نلاحظ أن قيمة معامل انتقال الحرارة الإجمالي الاهتزازي تقل مع زيادة عدد رينولدز الاهتزازي بشكل عام ولكافة زوايا الميل إلا أن أقصى زيادة تكون عند الزاوية صفر وللتردد (6 Hz) إلا أن هذه الزيادة تتباين عند الزاوية (30^o) حيث تكون بأعلى مقدار عند التردد (16 Hz) ويعزى ذلك إلى تأثير كل من سعة الاهتزاز و سرعة الاهتزاز ، حيث تعمل السعات الاهتزازية العالية على اختراق الطبقة المتاخمة الحرارية ويقل هذا التأثير عند السعات الاهتزازية الواطئة كما إن سرعة الاهتزاز تعمل على خلق جريان ثانوي يعمل بالاشتراك مع الجريان الرئيسي على تحسين معامل انتقال الحرارة .

تأثير عدد رايلي في عدد نسلت (Nu) الاجمالي بوجود وعدم وجود الاهتزاز:

توضح الأشكال (11,10,9,8,7) تأثير عدد رايلي في قيم عدد نسلت الاجمالي بوجود وعدم وجود الاهتزاز ولجميع زوايا الميل وللترددات القسرية المعتمدة (16,10,6 ,2 Hz) حيث يتضح من الأشكال زيادة عدد نسلت بزيادة عدد رايلي بشكل عام إلا أن هذه الزيادة تكون أعلى بوجود الاهتزاز وبالنسبة الموضحة في الجدول (1) ولزوايا الميل ($60^o,45^o,30^o,0^o$) ، وعندما يكون نموذج الاختبار في الوضع الشاقولي يكون تأثير الاهتزاز سلبياً في قيم عدد نسلت الاجمالي حيث تكون قيم عدد نسلت بوجود الاهتزاز أقل مما في حالة عدم وجود الاهتزاز ويعزى ذلك إلى تغير أتجاه الاهتزازت القسرية المسلطة على نموذج الاختبار من أهتزاز مستعرض الى أهتزاز طولي مما يؤدي الى خلق حركة دوامات هواء معاكسة لقوى الطفو والجريان الرئيسي مسببة إضافة مقاومة خارجية تعمل على تسخين نموذج الاختبار لنفسه مما يؤدي الى عدم تحسين معامل انتقال الحرارة.

العلاقات التجريبية المستنبطة:

تم التوصل في هذا البحث إلى وضع علاقة تجريبية تعبر عن قيم عدد نسلت الإجمالي مع عدد رايلي وعدد رينولدز الاهتزازي وزاوية الميلان كما في المعادلة الآتية:

$$Nu = C * Ra^m * \mathrm{Re}_v^n * \theta^l$$

(29)

حيث أن (C , m , l) ثوابت .إن العلاقات الآتية قد استنتجت لوصف البيانات العملية لهذا البحث ، حيث تم استخدام برنامج (DGA-V1) لإيجاد المعادلات ولكل حالة من حالات البحث علماً ان نسبة الخطأ لهذه المعادلات هي (% 2.5-1). هذا ويمكن وضع ثوابت هذه المعادلات في الجداول الآتية:

الجدول (2) يوضح قيم الثوابت للمعادلة (29) لمختلف مستويات الفيض الحراري ولترددات الاهتزازالمحدة في البحث.

الاستنتاجات

في ضوء تحليل النتائج العملية التي تم الحصول عليها من التجارب العملية ومناقشة العلاقات البيانية ودراسة تأثير المتغيرات

المدرجة أدناه والمحددة في البحث (زاوية الميل ، الفيض الحراري ، عدد رايلي ، الترددات القسرية) تم التوصل إلى ما يأتي :

1- هز الصفيحة المستوية بتأثير قوى قسرية عمودية يؤدي إلى زيادة معامل انتقال الحرارة وتكون أعلى زيادة في الوضع الأفقي ومقدارها (13%) نسبة إلى عدم وجود الاهتزاز.

2- هز الصفيحة الشاقولية بتأثير قوى قسرية عمودية يؤدي إلى نقصان معامل انتقال الحرارة بنسبة (7.6 %) نسبة إلى عدم وجود الاهتزاز.

3- السعات الاهتزازية الصغيرة محدودة التأثير في الطبقة المتاخمة الحرارية ، ومن اجل تحسين معامل انتقال الحرارة يجب اختراق الطبقة المتاخمة الحرارية بسعات اهتزازية كبيرة.

4- يقل معامل انتقال الحرارة الإجمالي الاهتزازي بزيادة عدد رينولدز الاهتزازي لجميع زوايا الميل المعتمدة في البحث.

5- يزداد عدد نسلت الإجمالي بوجود وعدم وجود الاهتزاز بازدياد عدد رايلي ولجميع الزوايا المعتمدة في البحث.

المصادر:

[1] حميد عبد العالي “تأثير الاهتزازات الميكانيكية الأفقية على متوسط معامل انتقال الحرارة بواسطة الحمل الطبيعي من سطوح الاسطوانات الأفقية " رسالة ماجستير، كلية الهندسة، جامعة الموصل (1981).

[2] M.C.Charrier Mojtabi, Y.P.Razi, K.Maliwan and A.Mojtabi, “Heat transfer due to high frequency vibration “, Int. J. Heat and mass transfer, (2003).

[3] Rodrigo G.L. , Jose' A.F. And Douglas M.R. "Natural convection of Vertical flat plates" from Internet, (2003).

[4] S. Fohanno, G. Polidori “Modeling of natural convective heat transfer at an internal surface “from Internet, (2005) .

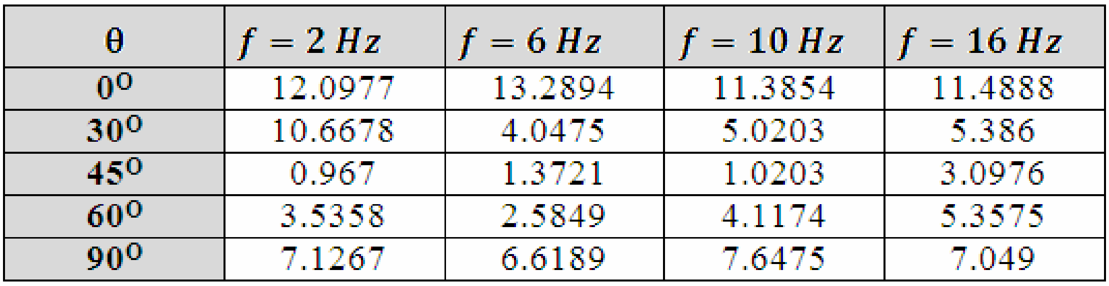
[5] عدي شاكر هادي "دراسة عملية لتأثير الاهتزازات في معامل انتقال الحرارة بالحمل الحر من اسطوانة مزعنفة حلقيا" أطروحة ماجستير، هندسة المكائن والمعدات الجامعة التكنولوجية، بغداد، (2007).

[6] فادي رياض شمعون “دراسة عملية لتأثير الاهتزازات على معامل انتقال الحرارة بالحمل القسري من اسطوانة مزعنفة حلقيا " أطروحة ماجستير، هندسة المكائن والمعدات الجامعة التكنولوجية، بغداد، (2009).

[7] K.L.Kumar, "Engineering Fluid Mechanics", 5th.Edition, Boston, 1990.

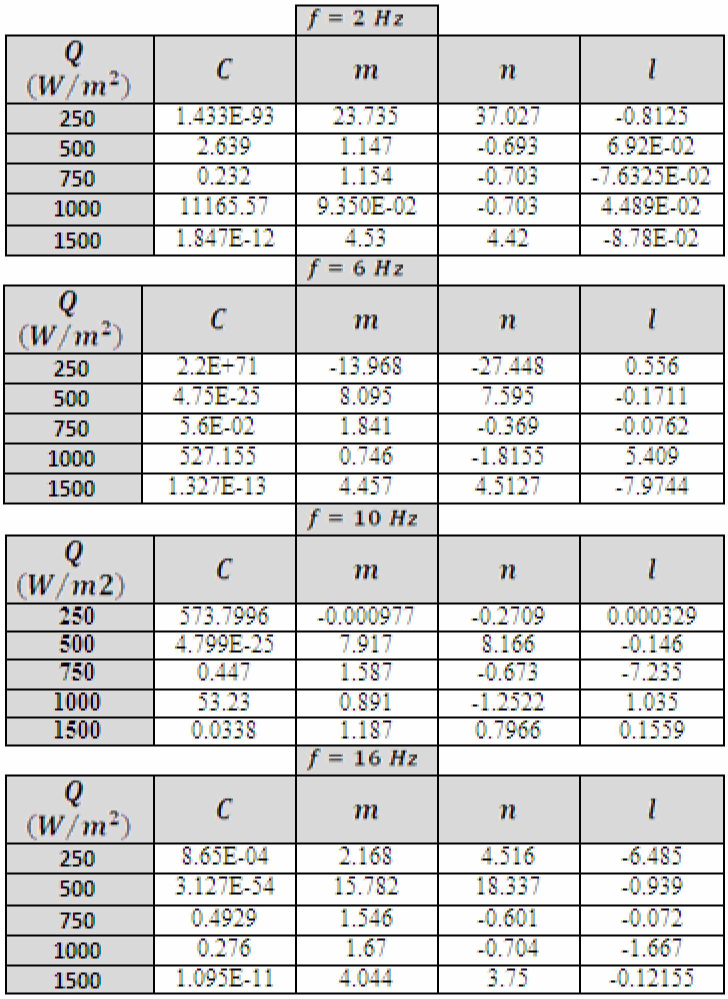
[8] P.K.Nag, “Heat and Mass Transfer”, Second Edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2007.

الجدول (1) يوضح النسب المئوية لقيم معامل انتقال الحرارة بوجود الاهتزاز إلى عدم وجوده.



θ	$f = 2\ Hz$	$f = 6\ Hz$	$f = 10\ Hz$	$f = 16\ Hz$
0^o	12.0977	13.2894	11.3854	11.4888
30^o	10.6678	4.0475	5.0203	5.386
45^o	0.967	1.3721	1.0203	3.0976
60^o	3.5358	2.5849	4.1174	5.3575
90^o	7.1267	6.6189	7.6475	7.049

الجدول (2) يوضح قيم الثوابت للمعادلة (29) لمختلف مستويات الفيض الحراري ولترددات الاهتزازالمحدة في البحث.



$f = 2\ Hz$

Q (W/m^2)	C	m	n	l
250	1.433E-93	23.735	37.027	-0.8125
500	2.639	1.147	-0.693	6.92E-02
750	0.232	1.154	-0.703	-7.6325E-02
1000	11165.57	9.350E-02	-0.703	4.489E-02
1500	1.847E-12	4.53	4.42	-8.78E-02

$f = 6\ Hz$

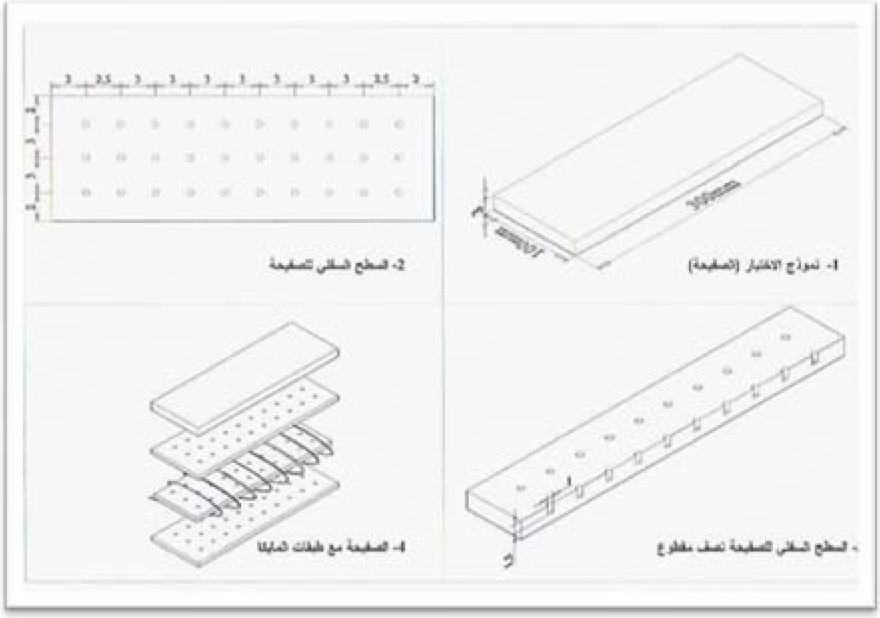
Q (W/m^2)	C	m	n	l
250	2.2E+71	-13.968	-27.448	0.556
500	4.75E-25	8.095	7.595	-0.1711
750	5.6E-02	1.841	-0.369	-0.0762
1000	527.155	0.746	-1.8155	5.409
1500	1.327E-13	4.457	4.5127	-7.9744

$f = 10\ Hz$

Q $(W/m2)$	C	m	n	l
250	573.7996	-0.000977	-0.2709	0.000329
500	4.799E-25	7.917	8.166	-0.146
750	0.447	1.587	-0.673	-7.235
1000	53.23	0.891	-1.2522	1.035
1500	0.0338	1.187	0.7966	0.1559

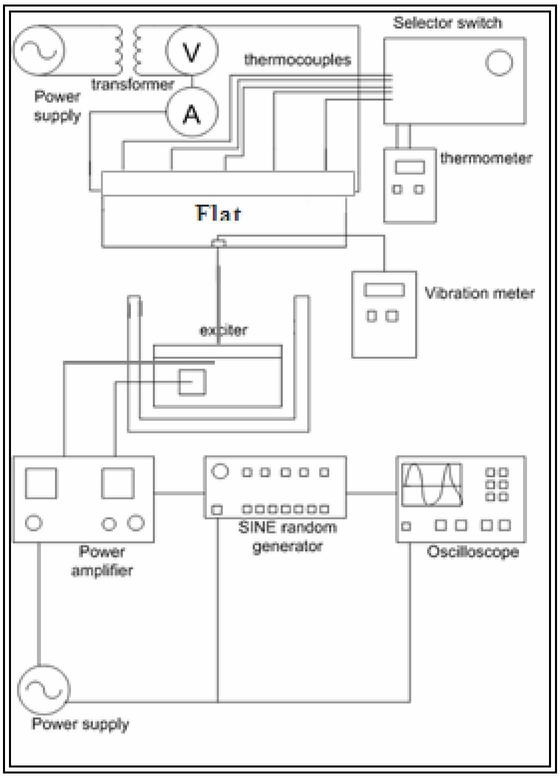
$f = 16\ Hz$

Q (W/m^2)	C	m	n	l
250	8.65E-04	2.168	4.516	-6.485
500	3.127E-54	15.782	18.337	-0.939
750	0.4929	1.546	-0.601	-0.072
1000	0.276	1.67	-0.704	-1.667
1500	1.095E-11	4.044	3.75	-0.12155

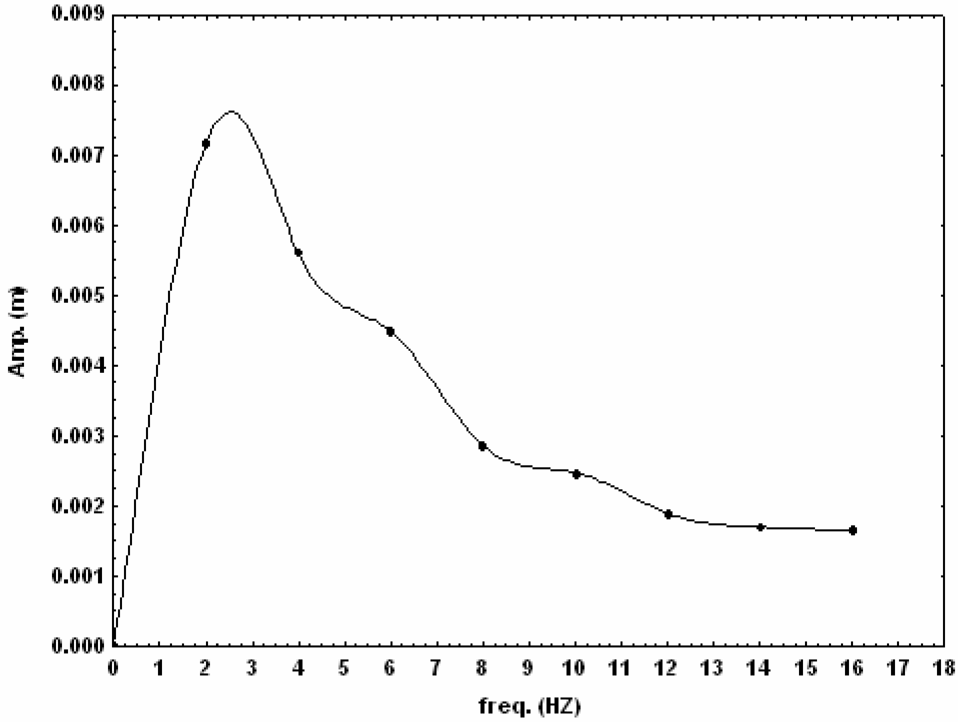


شكل (1) مخطط يوضح نموذج الاختبار المستخدم في البحث

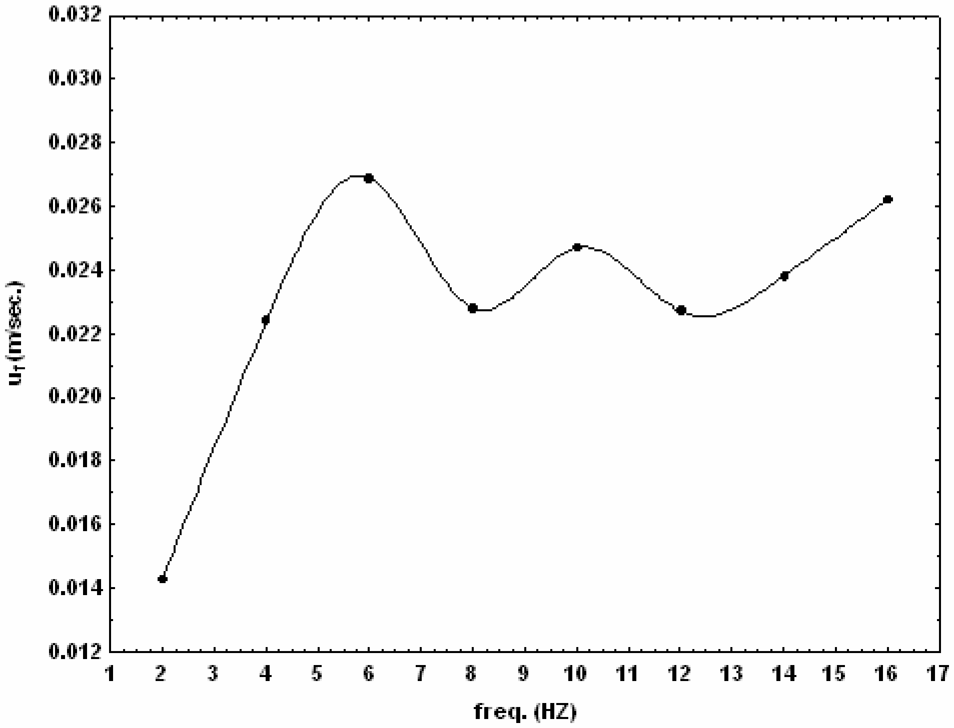
الشكل (2) صورة فوتوغرافية لمنظومة الاختبار



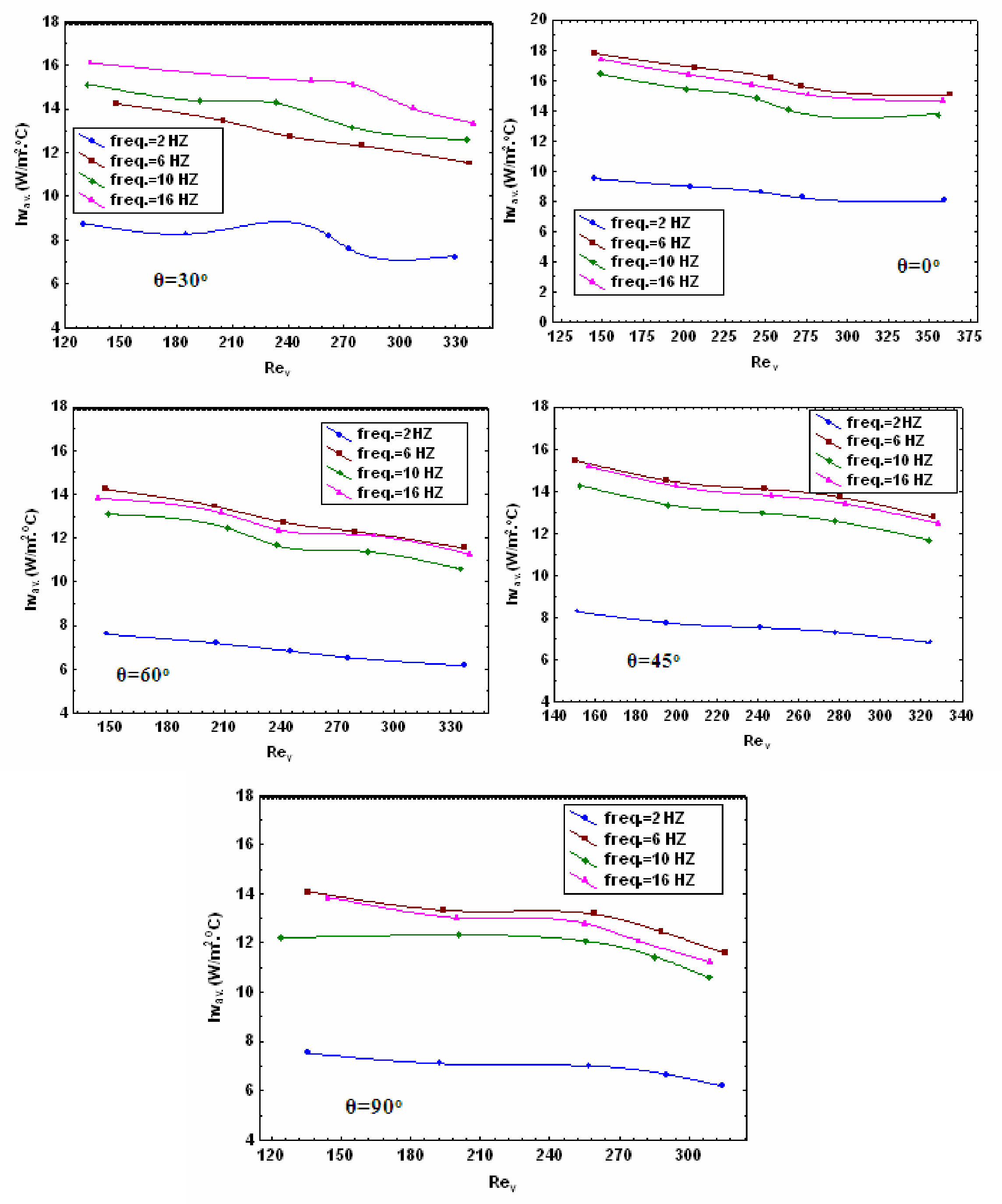
الشكل (3) يوضح منظومة الاختبار المستخدمة



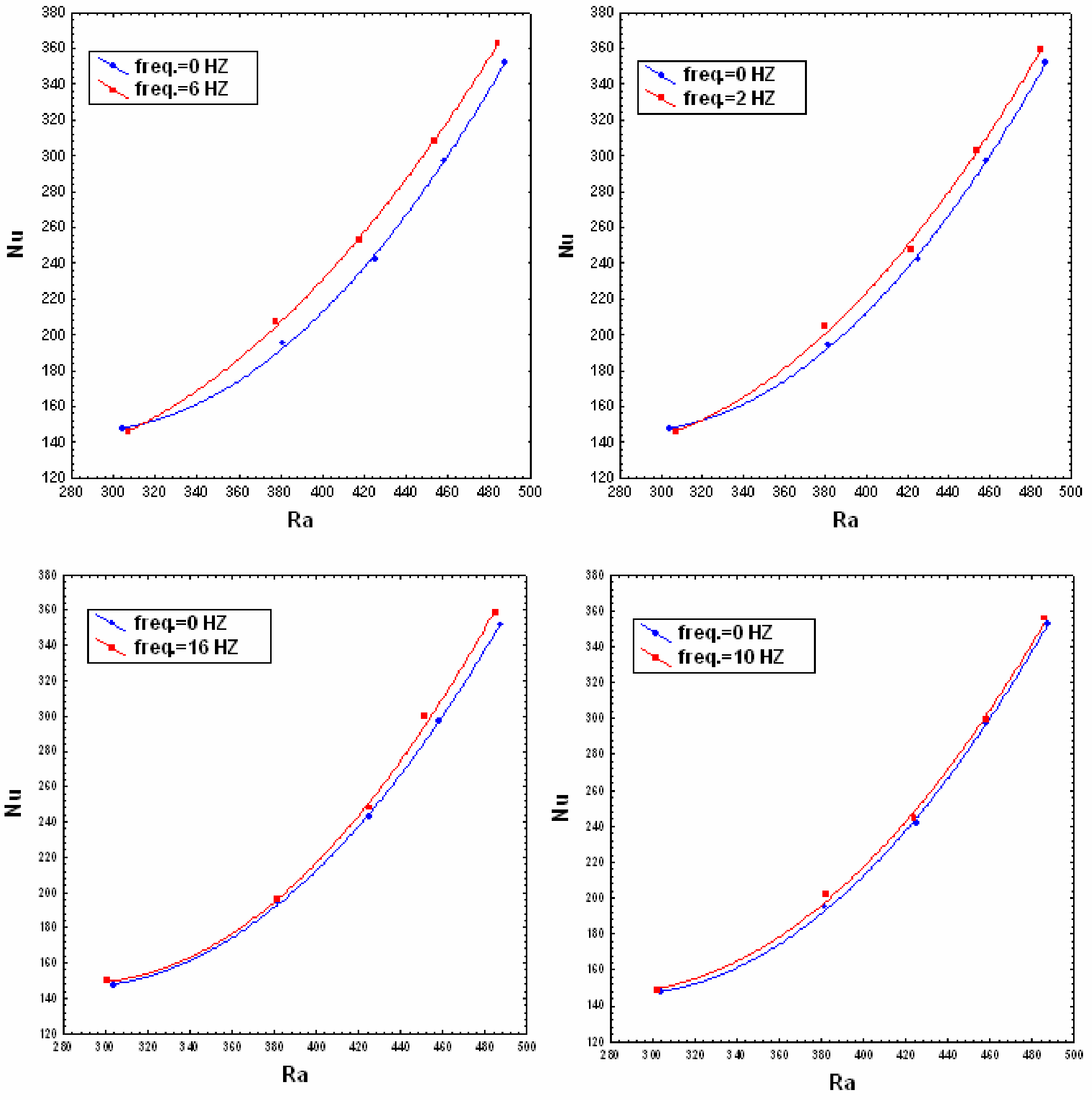
الشكل (4) يوضح تأثير تردد الاهتزاز في السعة لفيض حراري ($250\ W/m^2$) ولزاوية (θ=0°)



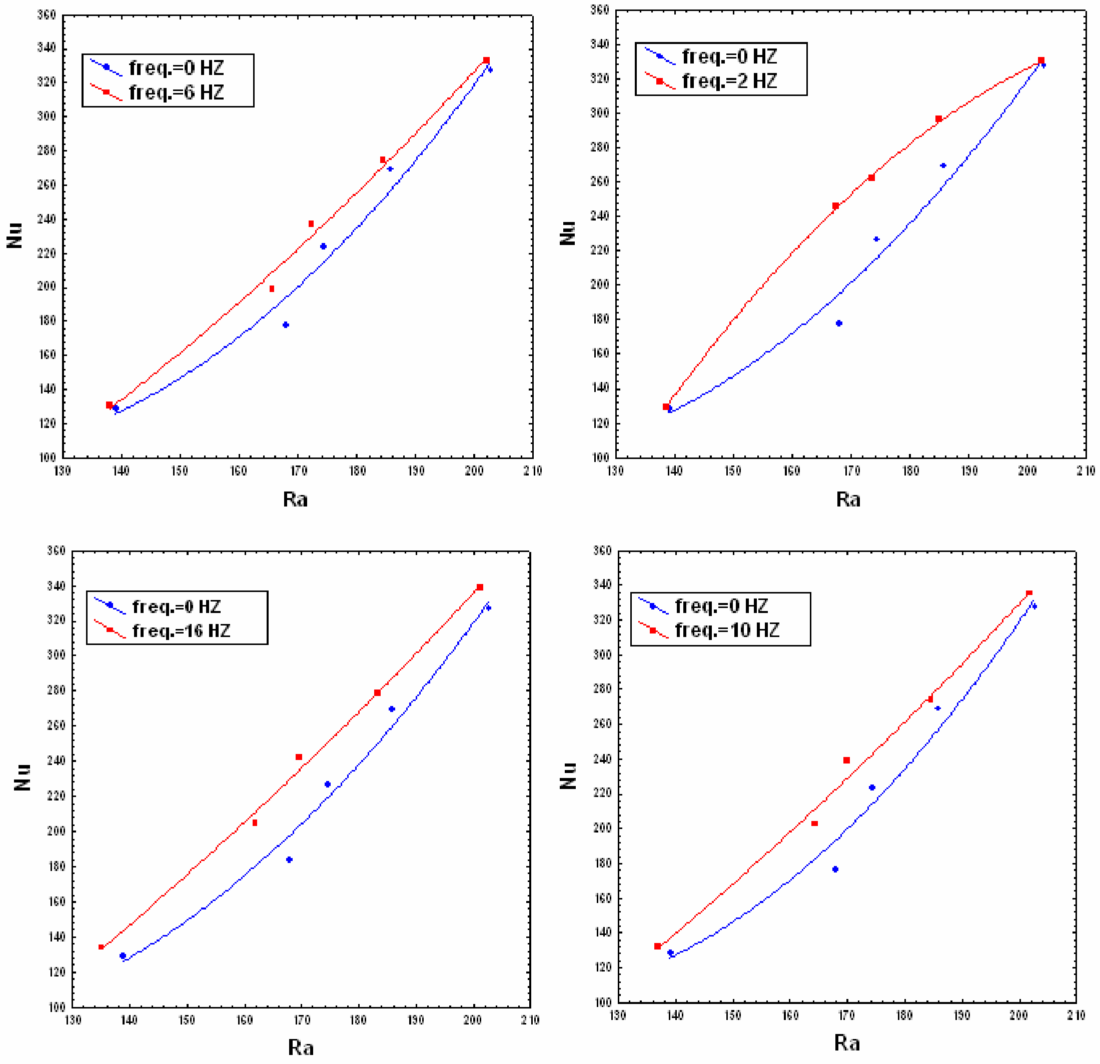
الشكل (5) يوضح تأثير تردد الاهتزاز في سرعة الاهتزاز لفيض حراري($250\ W/m^2$)
ولزاوية($\theta = 0°$)



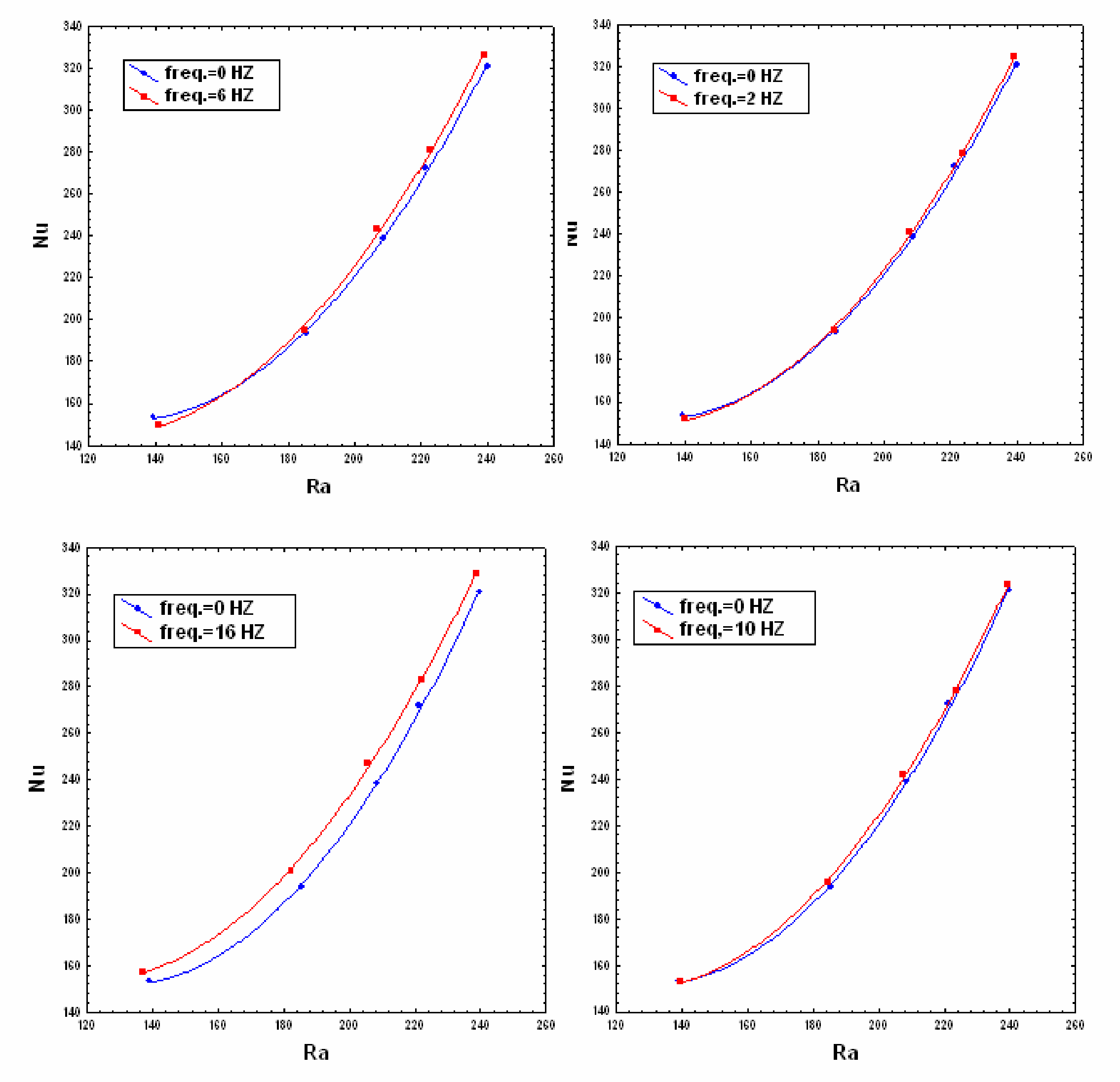
الشكل (6) يبين تأثير عدد رينولدز في معامل انتقال الحرارة الإجمالي الاهتزازي لمختلف مستويات الفيض الحراري



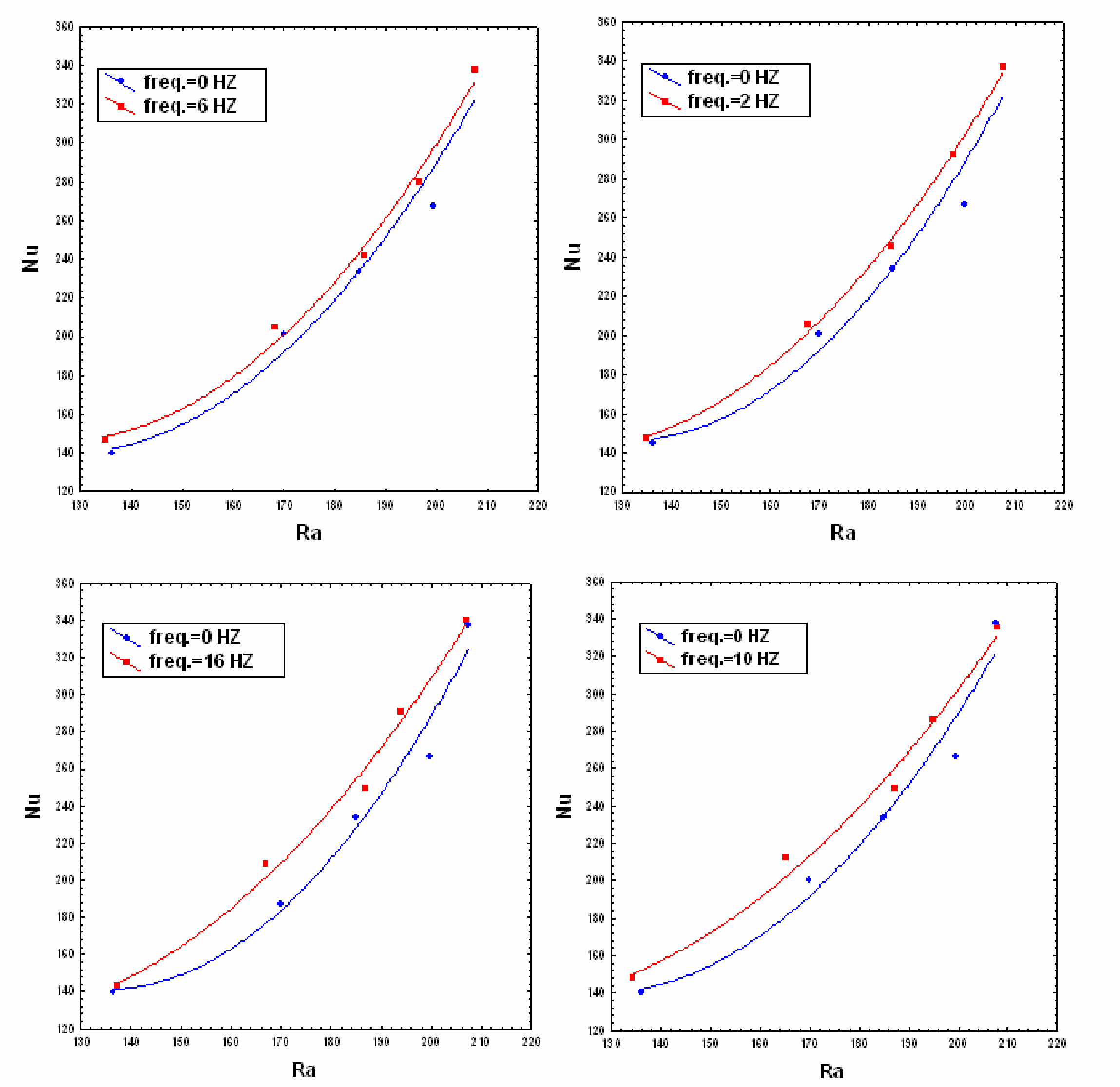
الشكل (7) يبين تأثير عدد رايلي في عدد نسلت الاجمالي بوجود وعدم وجود الاهتزاز للزاوية $\theta=0^\circ$ ولمختلف مستويات الفيض الحراري



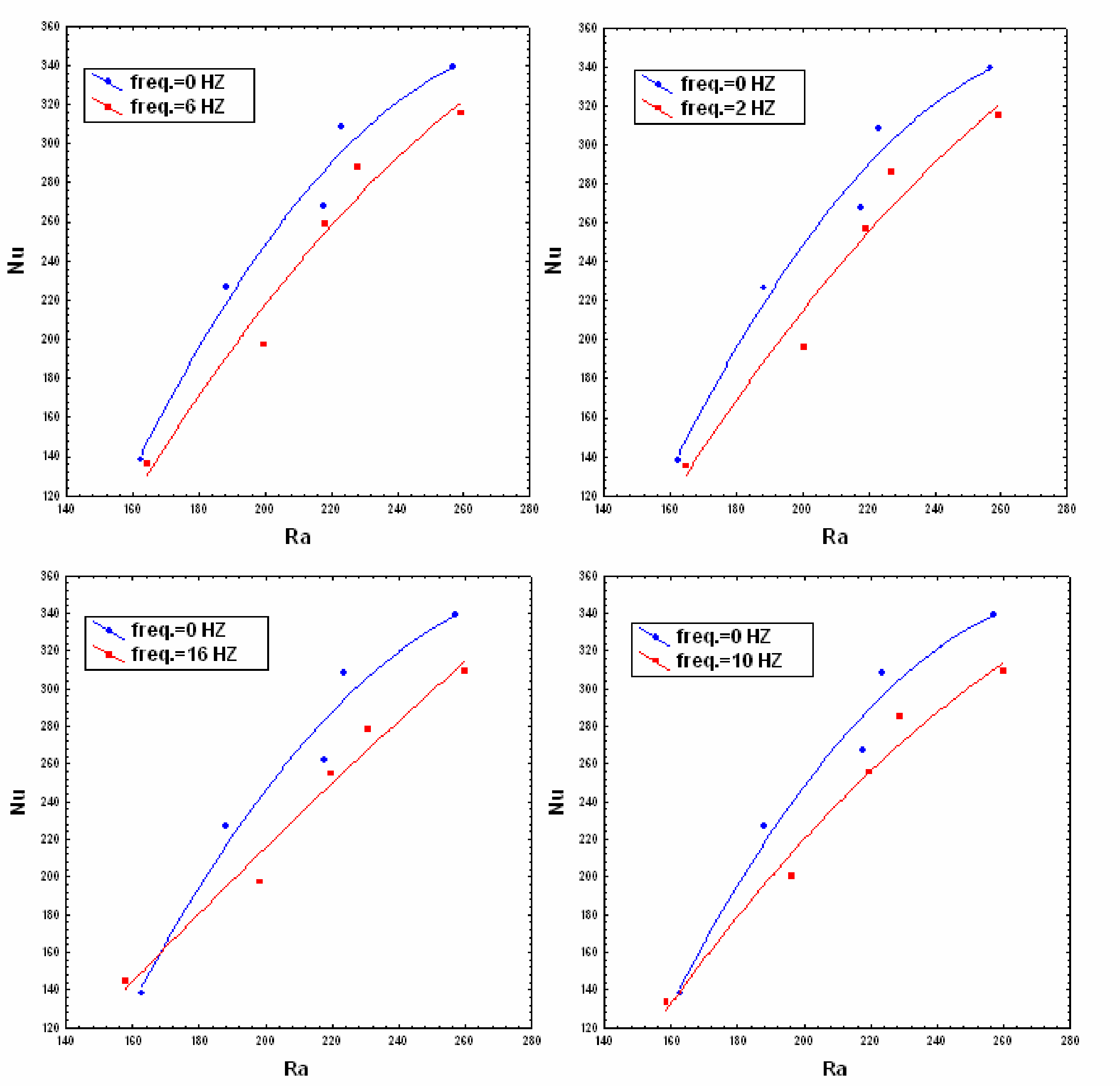
الشكل (8) يبين تأثير عدد رايلي في عدد نسلت الاجمالي بوجود وعدم وجود الاهتزاز للزاوية $\theta=30^\circ$ ولمختلف مستويات الفيض الحراري



الشكل (9) يبين تأثير عدد رايلي في عدد نسلت الإجمالي بوجود وعدم وجود الاهتزاز للزاوية θ=45° ولمختلف مستويات الفيض الحراري



الشكل (10) يبين تأثير عدد رايلي في عدد نسلت الإجمالي بوجود وعدم وجود الاهتزاز للزاوية θ=60° ولمختلف مستويات الفيض الحراري



الشكل (11) يبين تأثير عدد رايلي في عدد نسلت الإجمالي بوجود وعدم وجود الاهتزاز للزاوية θ=90° ولمختلف مستويات الفيض الحراري