تحليل رياضي لمعيد التسخين الدوار في محطة حرارية لتوليد الطاقة [+]

MATHEMATICAL ANALYSIS OF A AOTARY REGENERATOR IN A THERMAL POWER PLANT

وضاح حسين عبد الرزاق [*]

المستخلص:

في هذا البحث تم تحليل معيد التسخين الدوار عن طريق حل المعادلات التفاضلية الحاكمة لانتقال الحرارة في معيد التسخين رياضيا ومقارنة النتائج مع البيانات التصميمية لدراسة أداء معيد التسخين الدوار، وتم الاعتماد في الحل على عدة فرضيات أهمها (ثبوت درجتي الحرارة لكلا المائعين عند الدخول وعدم تغير معدل الجريان ألكتلي لكل من المائعين مع إهمال التوصيل الحراري طولياً باتجاه الجريان). وقد أظهرت النتائج تقارباً جيداً إذ بلغت نسبة الخطأ في درجة حرارة هواء الاحتراق الخارج (٣%) ودرجة حرارة غازات العادم (٤%)، ولذلك يمكن القول انه يمكن استخدام هذا الحل في دراسة العوامل المؤثرة على عمل معيد التسخين بهدف الوصول إلى أفضل عمل له.

Abstract:

In this research, the rotary regenerator is analyzed by solving government differential equations of heat transfer in the regenerator analytically and comparing the results with the designed data in order to study the performance of the rotary regenerator. In solving these equations, several assumptions have been considered; the most important are the constant temperature for both fluids at the inlet and the unchangeability of mass flow for each with the negligible of longitudinal heat transfer in flow direction. The results have shown good approach to the designed data. The percentage of error of the temperature of air combustion is (3%) and for flue gas temperature (4%). So, it can be said that this model can be used for studying the effective parameters on the work of the regenerator in order to reach the best performance of the regenerator.

الرموز المستخدمة:

[+] تاريخ استلام البحث : ٢٠٠٦/٩/٢٦ ، تاريخ قبول النشر : ٢٠٠٨/٨/١٣

[*] مدرس مساعد / المعهد التقني – الدور

الرمز	التعريف	الوحدة
A	المساحة السطحية الكلية للجزء الدوار	م^{2}
A_f	مساحة مقطع الجريان للمائع	م^{2}
B	الطول الكلي لمعدن الحشوة ولجانبين لكل فترة	م
c_m	الحرارة النوعية لمعدن الحشوة الخازن للحرارة	جول\كغم.^{o}م
c_f	الحرارة النوعية للمائع	جول\كغم.^{o}م
D	القطر	م
D_h	القطر الهيدروليكي	م
f	معامل الاحتكاك	-
F	الطول الكلي للمحيط المبتل	م
$\bar{h}$	معامل انتقال الحرارة .	واط \م^{2}.^{o}م
I_0	دالة (Bessel) المحسنة	-
J_o	دالة (Bessel)	-
k	الموصلية الحرارية	واط \م ^{o}م
L	طول المسترجع	م
M_m	كتلة مادة الحشوة	كغم
$\dot{m}$	التدفق ألكتلي للمائع	كغم\ثانية
P	المدة الزمنية للفترة	ثانية
Q	الحرارة المنتقلة	جول
R	نصف قطر المجدد الدوار	م
r	نصف قطر للمسافة القطرية	م
v	السرعة	م\ثانية
s	يمثل الموقع الزمني على شبكة الفرق المحدد	م
t	درجة الحرارة	^{o}م
x	المسافة المحورية من مدخل المائع الساخن	م
n_1	عدد التقسيمات باتجاه (x)	-
n_2	عدد التقسيمات باتجاه (s)	-

الرموز اللاتينية	التعريف	الوحدة
μ	اللزوجة الديناميكية	كغم/م.ثانية
ϖ	السرعة الزاوية	دورة \ ثانية

ρ	الكثافة	كغم \ م^3
τ	الزمن	ثانية
ζ	المسافة المحورية اللابعدية	-
η	الزمن اللابعدي	-
λ_{reg}	فعالية المسترجع	-
Π	الفترة المقننة الكلية (معامل لابعدي)	-
Λ	الطول المقنن الكلي(معامل لابعدي)	-
الرموز العلوية	التعريف	
′	إشارة إلى الفترة الحارة	-
″	إشارة إلى الفترة الباردة	-
الرموز التحتية	التعريف	
f	يشير إلى المائع	-
m	يشير إلى الحشوة المعدنية	-
i	يشير إلى الدخول	-
o	يشير إلى الخروج	-
c	الحرارة المنتقلة بالحمل	
c.v.	الحجم المسيطر	-

المجموعة اللابعدية	التعريف	المجموعة اللابعدية	التعريف
$Bi = \frac{\bar{h}\left(\frac{V}{A}\right)}{k}$	عدد بايوت	$Pe = Re\ Pr$	عدد بكلت
$Nu = \frac{\bar{h}D}{k}$	عدد نسلت	$Pr = \frac{Cp\mu}{k}$	عدد برانتل
		$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$	رقم رينولد

المقدمة:

إن الوظيفة الأساسية لمسخنات الهواء في محطات التوليد هو رفع درجة حرارة هواء الاحتراق الداخل إلى المرجل بالاستفادة من حرارة غازات العادم الناتجة من الاحتراق ورفع كفاءة المرجل. وتستخدم في محطات توليد القدرة مسخنات هواء من نوع معيد التسخين الدوار ويقع مسخن الهواء في مجرى كل من هواء الاحتراق وغازات العادم ويسمى لانكستروم[1]. وقد أجريت عدة دراسات لهذا النوع من المجددات لحل معادلات التفاضلية الحاكمة بهدف دراسة العوامل المؤثرة علية فقد قام الباحث (Frankovic)[2] بدراسة

المجدد الدوار باعتباره وسط مسامي مع الآخذ بنظر الاعتبار انتقال الحرارة طوليا باتجاه المحور ثم حل المعادلات الحاكمة ثلاثية الإبعاد عدديا باستخدام تقنية الفرق المحدد حيث قام بحساب درجات الحرارة لنموذج ثلاثي الإبعاد حيث وجد في النتائج توافقا جيدا مع النموذج ثنائي الإبعاد، كما أن الباحث (Alsaid)[3] قدم دراسة عمليه لمجرى يحتوي حشوة من حشوات المجدد الدوار حيث اعتبر الجريان بثلاث اتجاهات، وغير مستقر، طباقي،غير انضغاطي،ولزج مع استخدام تقنية الفرق المحدد مع شبكة غير منتظمة مستخدما طريقة (Transient simple algorithm method) حيث حققت النتائج تقاربا جيدا مع النتائج الحقيقية لمصادر أخرى.

ومعيد التسخين(Regenerator) هو احد أنواع مسخنات الهواء إذ يشغل المائعان الساخن والبارد فيها الحيز نفسه بالتناوب في قلب المبادل الحراري (الحشاء) الذي يعمل كجهاز خزن حراري يسخن دوريا بأحد اسخن المائعين وبعد ذلك ينقلها إلى المائع الأبرد. وفي تركيب الحشاء الثابت يمر المائعان بالتناوب خلال المبادل الساكن، ولغرض استمرار التشغيل يكون من الضروري وجود حشائين أو أكثر. ومعيد التسخين الدوار (Rotary Regenerator) هو المفضل استخدامه في محطات القدرة كونه محكم متضام وسهل المنال ويمتاز بخفة وزنه وكفاءته العالية وصغر حجمه، فهو يتكون من صفائح فولاذية متموجة على شكل صندوق قطري مقسم إلى أجزاء أو مجموعات فصية لتكمل دائرة حول عمود الدوران،إذ يتم انتقال الحرارة عن طريق الصفائح المعدنية وتدعى بالحشوة المعدنية (Metal Matrix) أثناء دورانها خلال مجرى غازات العادم الساخنة ومجرى الهواء البارد اللذان يمران من خلال نصفي المسخن بصورة متعاكسة ومستمرة [٤] .

<u>وصف معيد التسخين الدوار:</u>

أخذ معيد التسخين في محطة كهرباء بيجي كنموذج للتحليل. إذ إن المحطة مجهزة بمسخنين لكل وحدة، حيث يدفع هواء الاحتراق بواسطة مروحتي الدفع ألقسري (Forced Draft Fan) ليمر على مسخن الهواء بالبخار (Steam Air Heater) (وهو مبادل حراري من النوع الأنبوبي) حيث ترتفع درجة حرارة الهواء من درجة حرارة الجو إلى ($٦٠^{o}C$) ثم يدخل إلى مسخن الهواء الدوار ومن ثم إلى المحرقة ليتم الاحتراق. وبفعل نواتج الاحتراق يتحول الماء في أنابيب المرجل إلى بخار مشبع وتستمر غازات العادم بتحركها على أجزاء المرجل مارة على محمصة البخار ومعيدة تسخين البخار والمقتصدة إذ يؤخذ قسم من هذه الغازات إلى مروحتين (Gas Recirculation Fans) لإعادة تدوير الغازات في أسفل الفرن في حين تستمر غازات العادم بالجريان لتدخل إلى المبادل الحراري المعني بتسخين الهواء والذي يتم فيه انتقال الحرارة بين هذه الغازات وهواء الاحتراق عن طريق حشوه معيد التسخين الدوار، وهي عبارة عن مجموعة من الصفائح المتموجة مرتبة على شكل سلال (Baskets) حيث تثبت على قرص يدور بانتظام لتتعرض بصورة متناوبة إلى غازات العادم الساخنة وهواء الاحتراق البارد نسبيا رافعة بذلك درجة حرارته من ($٦٠^{o}C$) إلى ($٣٤٠^{o}C$). ويتكون معيد التسخين الدوار من (الحشوة المعدنية الخازنة للحرارة، قرص دوار حامل للسلال المعدنية، حاصرات، دعائم ومساند منزلقة، ونظام ميكانيكي للتدوير). يبلغ قطر الجزء الدوار ($٨,٠٧m$) وبارتفاع كلي ($١,١٥٥m$) كما تبلغ كتلته الكلية ($72000kg$) والمساحة السطحية للتبادل($24300m^2$). تقسم الحشوة المعدنية الخازنة للحرارة محوريا إلى طبقتين :

الأولى : الطبقة العليا وتدعى بالجانب الساخن (Hot Side) وتدعى الصفائح المعدنية المتموجة (Corrugated Undulated Plate) ويرمز لها بالرمز (CU) وهي بسمك (٠,٦mm) ويبلغ ارتفاع هذا الجانب (٠,٨٥m) ومعدن الحشوة من نوع (Carbon Steel).

الثانية : الطبقة السفلى وتدعى بالجانب البارد (Cold Side) وتدعى الصفائح المتموجة (Double Undulated Plate) ويرمز لها (DU) وهي بسمك (١,٢mm) ويبلغ ارتفاع هذا الجانب(٠,٣٠٥m) ومعدن الحشوة مطلي بالمينا (Enameled Carbon Steel).

تدخل غازات العادم إلى مسخن الهواء بدرجة حرارة (٤١٠^{o}C) وبسرعة (١٨m/s) وبتدفق كتلي مقداره (368891.5kg/hr) من الأعلى وبمجرى يشغل نصف حيز المسخن ومن جهة واحدة ويخرج بدرجة حرارة (١٦٥^{o}C)، في حين يدخل هواء الاحتراق إلى المسخن بدرجة حرارة (٦٠^{o}C) وبسرعة (١٣m/s) وبتدفق كتلي مقداره (٣٤٩٦٦٢kg/hr) من الأسفل وبمجرى يشغل النصف الآخر من حيز المسخن ويخرج بدرجة حرارة (٣٤٠^{o}C) وتبلغ سرعة الدوران الجزء الدوار (1.4r.p.m)[1]، والشكل (١) يوضح رسم مخطط توضيحي لمعيد التسخين الدوار.

منهجية الدراسة:

مشكلة الدراسة:

تبرز مشكلة الدراسة من خلال ضرورة إيجاد آلية لتحليل مسخن الهواء (معيد التسخين الدوار) وحل المعادلات التفاضلية المتحكمة بإداء معيد التسخين رياضيا.

أهداف الدراسة:

تحاول الدراسة تحقيق الأهداف الآتية:

١. تحليل الحالة المستقرة والانتقالية لأداء المبادل الحراري (معيد التسخين) من خلال نموذج رياضي له عن طريق حل المعادلات التفاضلية .
٢. إمكانية دراسة العوامل المؤثرة على عمل معيد التسخين للوصول إلى أفضل عمل له من خلال إيجاد توزيع لدرجات حرارة كل من غازات العادم وهواء الاحتراق والكتلة الخازنة للحرارة .

افتراضات الدراسة:

تعتمد المعادلات التفاضلية المستخدمة في وصف اداء مسخن الهواء من نوع معيد التسخين الدوار على الافتراضات الآتية:

١- إهمال السعة الحرارية للمائع المتبقي في قنوات حشوة المسخن عند حالة التعاكس الدوري لجريان المائعين لصغرها قياسا بالسعة الحرارية للحشوة .
٢- بقاء درجات حرارة دخول هواء الاحتراق وغازات العادم إلى حشوة المسخن ثابتة في فترتي التسخين والتبريد (heating and cooling periods) .
٣- عدم تغير معدل جريان كتلة كلا المائعين.

٤- تمثيل الحرارة المنتقلة بين المائع والحشوة بدلالة متوسط معامل انتقال الحرارة (Average heat transfer coefficient) والتي تربط بين درجة حرارة المائع ومتوسط درجة حرارة معدن الحشوة.

٥- عدم تغير معامل انتقال الحرارة والخصائص الحرارية للحشوة المعدنية وللمائع خلال فترة التسخين أو التبريد وتكون متمثلة في كل أجزاء حشوة المسخن في تلك الفترة

٦- إهمال التوصيل الحراري طوليا باتجاه الجريان.

النموذج الرياضي لمسخن الهواء:

تم اعتبار حشوة المبادل الدوار مجموعة من صفائح رقيقة متوازية متماثلة والمثبتة في الحجم المسيطر(control volume) والموضحة في الرسم التخطيطي في الشكل(2). حيث يدخل المائع الحجم المسيطر في فترة التسخين عند موضع(x) بدرجة حرارة(t_f) ويغادر عند الموقع (x+dx) بدرجة حرارة $\left(t_f+\left(\frac{\partial t_f}{\partial x}\right)dx\right)$.

يحسب تغير الطاقة الداخلية للمائع في الحجم المسيطر(dQ_f) من العلاقة الآتية:

$$dQ_f = C_f d\dot{m}_f d\tau\left(t_f-\left(t_f+\frac{\partial t_f}{\partial x}dx\right)\right)$$

حيث ان:

$d\dot{m}_f$: تمثل معدل الجريان الكتلي للمائع خلال الحجم المسيطر.

$d\tau$: يمثل الزمن المطلوب لدخول وخروج معدن الحشوة الحجم المسيطر.

$$dQ_f = -C_f d\dot{m}_f d\tau\frac{\partial t_f}{\partial x}dx \qquad \text{.....(1)}$$

حيث يكون التغير في درجة الحرارة $\left(\frac{\partial t_f}{\partial x}\right)$طوليا سالبة في فترة التسخين وموجبة في فترة التبريد.

تنتقل الطاقة الحرارية بين المائع ومعدن الحشوة بواسطة الحمل (convection) وحسب العلاقة التالية:

$$dQ_c = \bar{h}.dA_{c.v}\left(t_f-t_m\right)d\tau \qquad \text{.....(2)}$$

بفرض إن:

$dA_{c.v}$: تمثل المساحة السطحية لمعدن الحشوة خلال الحجم المسيطر.

$$dA_{c.v} = \Delta B\cdot dx \qquad \text{.....(3)}$$

حيث إن:

ΔB : يمثل الطول الكلي للصفائح الرقيقة المتعامدة على جريان المائع داخل الحجم المسيطر.

dx : يمثل طول الحجم المسيطر في اتجاه جريان المائع.

فإذا كانت المساحة السطحية الكلية للصفائح في فترة التبريد لمعيد التسخين تساوي (A)، وطول معيد التسخين باتجاه الجريان يساوي (L)، فان (B=A/L)، لذلك (B) يمكن تقسيمها إلى قطاعات كما في الشكل (٣) حيث كل قطاع او حجم مسيطر (c.v) له طول كلي للصفيحة المتعامدة مع اتجاه جريان المائع وتكون مساوية إلى (ΔB).

بتعويض المعادلة (٤) في المعادلة (٣) تصبح:

$$dQ_c = \bar{h} \cdot \Delta B \cdot dx\left(t_f - t_m\right)d\tau \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

بالموازنة الحرارية بين المائع ومعدن الحشوة. المعادلة (١) والمعادلة (٤):

$$-C_f d\dot{m}_f d\tau \frac{\partial t_f}{\partial x} dx = \bar{h} \cdot \Delta B \cdot dx\left(t_f - t_m\right)dx$$

$$\therefore \frac{\partial t_f}{\partial x} = \frac{\bar{h} \cdot \Delta B}{C_f d\dot{m}_f}\left(t_m - t_f\right) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(5)$$

ويدخل معدن الحشوة الخازن للحرارة الحجم المسيطر في فترة التسخين عند موقع (s) بدرجة حرارة(t_m) ويغادر عند الموقع(s+ds) بدرجة حرارة $\left(t_m + \frac{\partial t_m}{\partial s} ds\right)$ والتي تعتبر درجة حرارة دخول معدن الحشوة للحجم المسيطر في فترة التبريد عند موقع (s) ويغادر عند موقع (s+ds) بدرجة حرارة (t_m) .

إذ يمكن حساب تغير الطاقة الداخلية لمعدن الحشوة من العلاقة الآتية:

$$dQ_m = C_m dM_{m.c.v.}\left(\left(t_m + \frac{\partial t_m}{\partial s} ds\right) - t_m\right)$$

حيث إن:

$dM_{m\cdot c\cdot v}$: تمثل الكتلة المعدنية لمعيد التسخين في الحجم المسيطر.

وبما إن:

$$S = \varpi \cdot r \cdot \tau$$
$$ds = \varpi \cdot r \cdot d\tau$$

لذلك

$$\frac{\partial t_m}{\partial s} ds = \frac{\partial t_m}{\partial(\varpi \cdot r \cdot \tau)} d(\varpi \cdot r \cdot \tau) = \frac{\partial t_m}{\partial \tau} d\tau$$

حيث إن درجة الحرارة ثابتة باتجاه (r) .

$$dQ_m = C_m . dM_{m.c.v} \frac{\partial t_m}{\partial \tau} d\tau \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(6)$$

تكون قيمة dQ_c موجبة في فترة التسخين وسالبة في فترة التبريد بالنسبة لمعدن الحشوة وبإجراء الموازنة الحرارية لأي من الفترتين ينتج :

$$dQ_m = dQ_c$$
$$\frac{\partial t_m}{\partial \tau} = \frac{\bar{h} . \Delta B \cdot dx}{C_m . dM_{m.c.v.}}\left(t_f - t_m\right) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(7)$$

وبما إن معامل انتقال الحرارة ($\bar{h}$) والخواص الفيزيائية لاتعتمد على درجة الحـــرارة، يمكـــن تبـــسيط المعادلتين (٥) و (٧) باستخدام المعاملات اللابعدية (ζ وη) وكما يأتي[٥] :

من المعادلة (٥) يمكن الحصول على:

$$d\zeta = \frac{\bar{h} \cdot \Delta B}{C_f \cdot \dot{m}_f} dx$$

وبالتكامل كما في الملحق (أ) ينتج الأتي:

$$\zeta = \frac{\bar{h} \cdot A}{C_f \cdot \dot{m}_f} \quad \text{.....}$$

.....(8)

ومن المعادلة (٧) يمكن الحصول على:

$$d\eta = \frac{\bar{h} \cdot \Delta B \cdot dx}{C_m \cdot dM_{m.c.v}} d\tau$$

وبالتكامل كما في الملحق (أ) ينتج الأتي:

$$\eta = \frac{\bar{h} \cdot A}{C_m M_m} \tau \quad \text{.....(9)}$$

ويمكن حساب كل من الطول المصغر (reduce length)(Λ) والفترة المـــصغرة (reduce period) (Π) اللابعديين ولكل فترة عندما يكون (x=L) و (τ = P)، كما يأتي[٦]:

<u>الفتـــرة</u> <u>الفترة التبريـــد</u>

<u>التسخين</u>

$$\Lambda' = \frac{\bar{h}'.A}{\dot{m}'_f.C_f} \qquad \Lambda'' = \frac{\bar{h}''A}{\dot{m}''_f C''_f}$$

$$\Pi' = \frac{\bar{h}'.A}{M_m C_m} p' \qquad \Pi'' = \frac{\bar{h}''A}{M_m C_m} p''$$

وبتعويض المعادلتين (٨) و(٩) في المعادلتين (٥) و (٧) ينتج:

$$\frac{\partial t_f}{\partial \zeta} = t_m - t_f \quad \text{.....(١٠)}$$

$$\frac{\partial t_m}{\partial \eta} = t_f - t_m \quad \text{.....(١١)}$$

الحل النظري:

بحل المعدلات التفاضلية (١٠) و(١١)، وتم مفاضلة المعادلة (١٠) نسبة إلى (η) والمعادلة (١١) نسبة إلى (ζ) وطرح إحداهما من الأخرى ينتج الأتي:

$$\frac{\partial^2 t_f}{\partial\zeta\partial\eta} = \frac{\partial(t_m - t_f)}{\partial\eta}$$

$$\frac{\partial^2 t_m}{\partial\eta\partial\zeta} = \frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial\zeta}$$

بالطرح :

$$\frac{\partial^2 t_f}{\partial\zeta\partial\eta} - \frac{\partial^2 t_m}{\partial\zeta\partial\eta} = \frac{\partial(t_m - t_f)}{\partial\eta} - \frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial\zeta}$$

$$\frac{\partial^2(t_f - t_m)}{\partial\zeta\partial\eta} + \frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial\eta} + \frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial\zeta} = 0 \qquad \text{.....(١٢)}$$

وهذه المعادلة حلت من قبل(W.Nusselt)[7] وبعده من قبل (A.Anzelius)[8].

1. $\Delta = \{\exp(\zeta + \eta)\}(t_f - t_m)$ .....(١٣)

ويمكن مفاضلة المعادلة (١٣) مرة بالنسبة الى(ζ) ومرة الى (η) :

$$\frac{\partial\Delta}{\partial\zeta} = \exp(\zeta+\eta)\frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial\zeta} + \exp(\zeta+\eta)(t_f - t_m)$$

$$\frac{\partial^2\Delta}{\partial\zeta\partial\eta} = \exp(\zeta+\eta)\frac{\partial^2(t_f - t_m)}{\partial\zeta\partial\eta} + \exp(\zeta+\eta)\frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial\zeta}$$
$$+\exp(\zeta+\eta)\frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial\eta} + \exp(\zeta+\eta)(t_f - t_m)$$

وبتعبير آخر

$$\frac{\partial^2\Delta}{\partial\zeta\partial\eta} = \exp(\zeta+\eta)\left[\frac{\partial^2(t_f - t_m)}{\partial\zeta\partial\eta} + \frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial\zeta} + \frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial\eta}\right]$$
$$+\exp(\zeta+\eta)(t_f - t_m)$$

إن التعبير الموجود على الجانب الأيمن مساوي للصفر طبقا إلى المعادلة (12)، لذلك:

$$\therefore \frac{\partial^2\Delta}{\partial\zeta\partial\eta} = \Delta \qquad \text{.....(14)}$$

وبفرض حل السلسلة (Δ) بالشكل الأتي :-

$$\Delta = a_o + a_1\zeta\eta + a_2(\zeta\eta)^2 + -------+a_n(\zeta\eta)^n$$

بالتعويض في المعادلة (١٤) وبمقارنة العلاقات يمكن الحصول على الأتي:-

$$a_1 = \frac{a_0}{1^2}, \qquad a_2 = \frac{a_1}{2^2}, ----------, a_n = \frac{a_{n-1}}{n^2}$$

أو

$$a_1 = \frac{a_0}{(1!)^2}, \qquad a_2 = \frac{a_0}{(2!)^2}, ----------, a_n = \frac{a_0}{(n!)^2}$$

وبالتالي:-

$$\Delta = a_0 \sum_0^\infty \frac{(\zeta\eta)^n}{(n!)^2} \qquad \text{.....(١٥)}$$

إن الثوابت المسيطرة (a_o) يمكن حسابها من الشروط الحدية:

فعندما (ζ =٠ و η = ٠) فان ($t_{fl} = t_f$ وكذلك $t_m = t_{m1}$)

ومن المعادلتين (١٣) و(١٥) تكون:

$a_o = (t_{fl}-t_{m1})$

إن دالة (Bessel) النوع الأول والمرتبة صفر تعرف بالمعادلة[٩]:

$$J_o(z) = \sum_0^\infty \frac{(-1)^n\left(\frac{z}{2}\right)^{2n}}{(n!)^2}$$

لذلك يمكن كتابة المعادلة (١٤) بدلالة ($a_o = t_{fl}-t_{m1}$) و (J_o) لينتج الآتي:

$$\Delta = (t_{fl} - t_{m1})J_o\left(2i\sqrt{\zeta\eta}\right)$$

ومن خلال دالة (Bessel) المحسنة[١٠]:

$$I_\circ(x) = J_\circ(ix)$$

لذلك:

$$\Delta = (t_{f1} - t_{m1})I_\circ\left(2\sqrt{\zeta\eta}\right) \qquad \text{---------- (16)}$$

وبتعويض المعادلة (١٦) في المعادلة (١٣) ينتج الآتي :-

$$(t_{f1} - t_{m1}) I_0\left(2\sqrt{\zeta\eta}\right) = \exp(\zeta + \eta)(t_f - t_m)$$

ومنها ينتج:

$$t_f - t_m = (t_{f1} - t_{m1}) \exp[-(\zeta + \eta)] I_0\left(2\sqrt{\zeta\eta}\right) \quad \text{.....} \quad (17)$$

إن t_m , t_f : يمكن إيجادهما من حل المعادلتين (١٠) و (١١) بالتكامل وبالشروط الحدية الآتية:

عندما $\zeta=0$ ، فان: $t_f = t_{f1}$

وعندما $\eta=0$ ، فان: $t_m = t_{m1}$

أي ان:

$$t_f = t_{f1} - \int_0^{\zeta} (t_f - t_m) d\zeta$$

$$t_m = t_{m1} + \int_0^{\eta} (t_f - t_m) d\eta$$

وبتعويض $(t_f - t_m)$ من المعادلة (١٧) يمكن الحصول على:

$$t_f = t_{f1} - (t_{f1} - t_{m1}) \int_0^{\zeta} \exp[-(\zeta + \eta)] I_o\left(2\sqrt{\zeta\eta}\right) d\zeta$$

.....(١٨)

$$t_m = t_{m1} + (t_{f1} - t_{m1}) \int_0^{\eta} \exp[-(\zeta + \eta)] I_0\left(2\sqrt{\zeta\eta}\right) d\eta \quad \text{..... ....} \quad (١٩)$$

<u>طريقة الحل:</u>

تقسم حشوة المسخن الى مقاطع زاوية محيطية (AngularCircumferential Segmenys) تمثل عدد خطوات التكامل بالنسبة للزمن خلال دوران المسخن، والى طبقات تمثل عدد خطوات التكامل بالنسبة للمسافة باتجاه الجريان،كما موضحة في الشكل(٣).

تصاغ المعادلتان (١٠) و(١١) باشكال مختلفة والموضحة في الفقرة السابقة(المعادلات التفاضلية) الى المعادلتين (١٨) و(١٩) ويتم تكاملهما بطريقة (simpson's rule) خطوة بخطوة ، واللتان تستخدمان لحساب درجتي حرارة كل من المائع وحشوة المعدن وللفترتين الساخنة والباردة، وذلك بواسطة برنامج حاسوبي لمحاكاة اداء المسخن.

ان نتائج حل المعادلات المختلفة هي قيم درجات حرارة غازات العادم وهواء الاحتراق ومعدن الحشوة عند ابعاد فراغية متساوية ($\Delta\zeta$) الى اسفل المسخن وبفترات فراغية متساوية من الزمن ($\Delta\eta$) لاعتمادها في البرنامج الحاسوبي .

اذ ان: $\dfrac{\Lambda}{n1} = \Delta\xi$ و $\dfrac{\Pi}{n2} = \Delta\eta$

حيث ان:

n = عدد خطوات التكامل باتجاه المسافة.

n2 = عدد خطوات التكامل في الزمن.

وكما موضح بالمخطط الشبكي في الشكل(٣) إذ تشير الرموز (s) إلى الزمن و(x) إلى المسافة.

ولغرض إيجاد توزيع درجات حرارة غازات العادم وهواء الاحتراق ومعدن الحشوة ، يتبع الحل الخطـــوات التالية :

١. تثبيت درجتي حرارة دخول غازات العادم وهواء الاحتراق إلى المسخن ولفترتي التسخين والتبريد على التوالي.
٢. افتراض درجة حرارة معدن الحشوة في بداية فترة التسخين، وعادة ما تؤخذ مساوية لمعدل درجتي حرارة الدخول للمائعين.
٣. حساب درجات حرارة غازات العادم ومعدن الحشوة لبقية العقد في فترة التسخين.
٤. تثبيت درجات حرارة معدن الحشوة في بداية فترة التبريد بنفس قيمة درجات حرارة معدن الحـــشوة في نهاية فترة التسخين.
٥. حساب درجات حرارة هواء الاحتراق ومعدن الحشوة لبقية العقد في فترة التبريد.
٦. إعادة الحساب للخطوة (٢) باعتبار درجات حرارة معدن الحشوة في بداية فترة التسخين هي نفسها في نهاية فترة التبريد.
٧. إعادة حساب بقية الخطوات (٥،٤،٣) وهكذا لحين ثبوت درجات حرارة معدن الحشوة فـــي نهايـــة فترة التبريد ومساواتها لدرجات حرارة معدن الحشوة في بداية فترة التسخين السابقة لها، وتعـــرف هذه الحالة بالتوازن الدوري (Cyclic Equilibrium) وعند ذلـــك تحتـــسب النـــسبة الحراريـــة (thermal ratio) أو الفعالية (Effectiveness) (λ_{reg}) للفترتين وكما يأتي:

$$\lambda'_{reg} = \frac{t'_{fi} - t'_{fo}}{t'_{fi} - t''_{fi}} \qquad \text{.....(٢٠)}$$

$$\lambda''_{reg} = \frac{t''_{fo} - t''_{fi}}{t'_{fi} - t''_{fi}} \qquad \text{.....(٢١)}$$

<u>حساب العوامل الداخلة في التحليل:</u>

١. حسابات الصفيحة المتموجة:

المساحة السطحية الكلية للصفائح (الجزء الساخن او الجزء البارد) =

مساحة المقطع الكلية * عدد الصفائح*نسبة التموج * الارتفاع* عدد الأوجه

حيث ان: نسبة التموج : هي المساحة الزائدة نتيجة التموج = ١,١[١].

المساحة السطحية الكلية = المساحة السطحية للجزء البارد + المساحة السطحية للجزء الساخن

الكتلة الكلية للصفائح في الجزء (الساخن أو البارد) = [المساحة السطحية للجزء(الساخن او البارد)*السمك * الكثافة] / ٢

الكتلة الكلية للصفائح = الكتلة الكلية للصفائح في الجزء الساخن + الكتلة الكلية للصفائح في الجـــزء البارد

٢. حساب مساحة مقطع الجريان:

تمثل مساحة مقطع الجريان(٠,٣٥%) من مساحة المقطع الكلية للمسخن البالغـــة($٥١,١٥m^2$) وذلـــك حسب المعلومات التصميمية للمحطة، حيث إن الصفيحتان المتموجتان احداهما متموجة بشكل خطـــي والأخرى بشكل موجة جيبيه[1].

$A_f = (51.15*0.35)/2 = 8.95\ m^2$

٣. حساب القطر الهيدروليكي:

يمكن حساب القطر الهيدروليكي لحشوة معيد التسخين لكلا الصفيحتين المتموجتين كما فـــي الـــشكل واستنادا على قياس مساحة الجريان وطول المحيط المبتل، من المعادلة التالية[٦]:

$$D_h = \frac{4 * A}{F}$$

حيث ان:

A : تمثل مساحة مقطع الجريان(م^٢).

F : يمثل طول المحيط المبتل (م).

٤. حساب معامل انتقال الحرارة:

يمكن حساب قيمة معامل انتقال الحرارة لغازات العادم ولهواء الاحتراق لكل من الجـــانبين الـــساخن والبارد بعد تحديد رقم رينولدز وعدد نسلت وباستخدام خواص غازات العادم وهواء الاحتراق عنـــد متوسط درجة الحرارة في الدخول والخروج،والمبينة في الجدول (١)، من العلاقات الآتية[١٠]:

$$G = \frac{\dot{m}}{A_f}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{G \cdot D_h}{\mu}$$

$$Nu = 0.036\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.33}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}\left(\frac{D_h}{L}\right)^{0.054}$$

$$\bar{h} = \frac{k \cdot Nu}{D_h}$$

<u>النتائج والمناقشة:</u>

تم إيجاد توزيع درجات الحرارة لغازات العادم وهواء الاحتراق والكتلة الخازنة للحرارة (الحشوة)، من خلال الحل النظري (exact solution) للمعادلات التفاضلية المسيطرة على اداء مسخن الهواء بالاســـتعانة

بالبيانات الحقيقية لمحطة التوليد، والأشكال من رقم (٤) إلى (٧) توضح توزيع درجات حرارة غازات العادم وهواء الاحتراق والكتلة الخازنة (حشوة المسخن) لفترتي التسخين والتبريد للحالة التصميمية للمحطة، ويلاحظ من الأشكال إن معدل درجة حرارة خروج غازات العادم من مسخن الهواء بلغت (169.5^oC) في حين إن درجة الحرارة التصميمية هي(165^oC) أي بانحراف قدره (٣%)، وان معدل درجة حرارة خروج هواء الاحتراق من مسخن الهواء بلغت (326^oC) في حين إن درجة الحرارة التصميمية هي (340^oC)، أي بانحراف قدره (٤%)، كما بلغت فعالية المسخن (0.6689) لفترة التسخين، و(0.7823) لفترة التبريد.

كما يوضح الشكل(٤) توزيع درجات الحرارة في حالة التوازن لغازات العادم وهواء الاحتراق مع الزمن ضمن المسافات المختلفة من دخول المائعين لفترتي التسخين والتبريد على الترتيب، ويلاحظ تغير درجات حرارة غازات العادم خطيا في فترة التسخين باتجاه الدوران بنسبة تصاعدية كمعدل بحدود (٧%) وبنسبة تناقصية كمعدل بحدود(١٢%) في فترة التبريد.

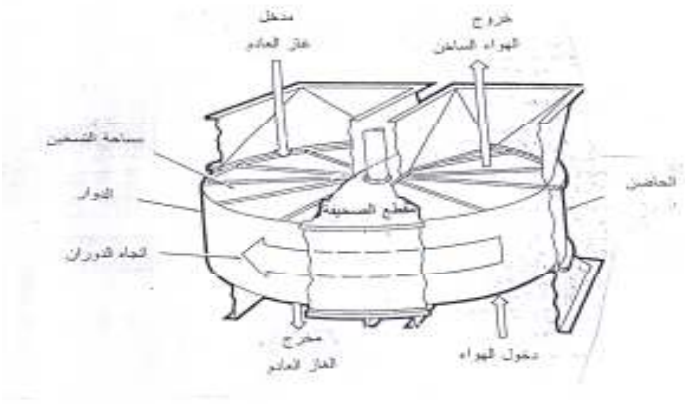
بينما يبين الشكل(٥) توزيع درجات الحرارة في حالة التوازن لغازات العادم وهواء الاحتراق مع الزمن ضمن المسافات المختلفة من دخول المائعين لفترتي التسخين والتبريد على الترتيب، ويلاحظ هنا تغير درجات حرارة غازات العادم خطيا في فترة التسخين باتجاه الدوران بنسبة تصاعدية كمعدل بحدود(٨%) وبنسبة تناقصية كمعدل بحدود(١٣%) في فترة التبريد باتجاه الدوران.

بينما الشكل(٦) يوضح توزيع درجات الحرارة وبصورة متناظرة في حالة التوازن للكتلة الخازنة للحرارة مع المسافة الطولية لحشوة المسخن ضمن المراحل المختلفة للزمن لفترتي التسخين والتبريد، ويلاحظ من الشكل إن درجات حرارة كتلة الحشوة الخازنة للحرارة تتغير خطيا تقريبا في فترة التسخين باتجاه جريان غازات العادم بنسبة تناقصية كمعدل بحدود(٦٨%) وبنسبة تصاعدية كمعدل بحدود(٢١%) في فترة التبريد باتجاه جريان هواء الاحتراق.

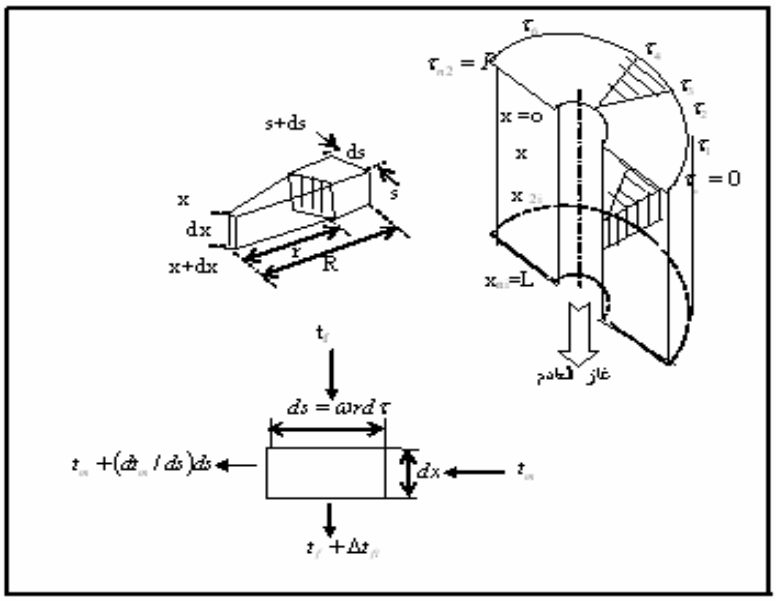
أما الشكل(٧) فيوضح توزيع درجات الحرارة وبصورة متناظرة في حالة التوازن للكتلة الخازنة للحرارة مع الزمن ضمن المسافات المختلفة من دخول غازات العادم وهواء الاحتراق لفترتي التسخين والتبريد على الترتيب، ويتضح من الشكل بان درجات حرارة الكتلة الخازنة للحرارة تتغير خطيا في فترة التسخين باتجاه الدوران بنسبة تصاعدية كمعدل بحدود (١٧%)، وبنسبة تناقصية كمعدل بحدود (١٤%)، في فترة التبريد باتجاه الدوران، إذ تتماثل درجات الحرارة للكتلة الخازنة للحرارة في نهاية فترة التسخين وبداية فترة التبريد وكذلك في نهاية فترة التبر وبداية فترة التسخين.

جدول(١): يبين خواص الهواء وغازات العادم

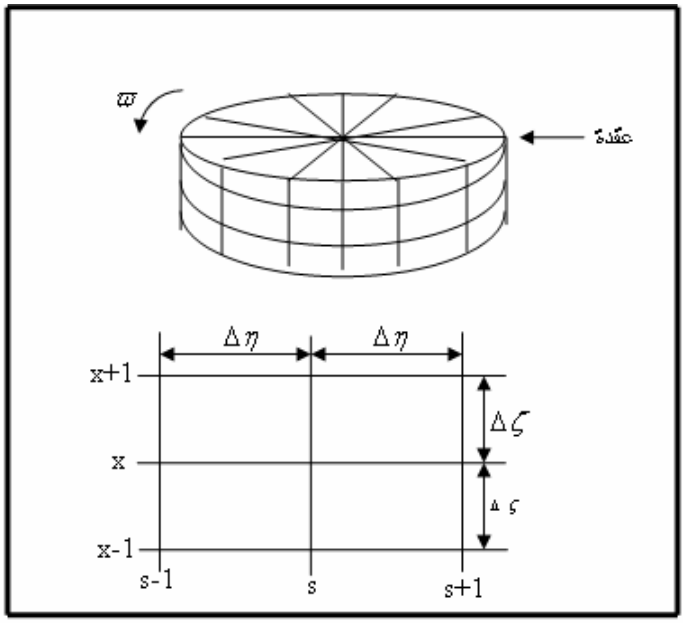
الخاصية/المائع	هواء($60^{O}C$)	هواء ($340^{O}C$)	غازعادم ($410^{O}C$)	غازعادم ($165^{O}C$)
الكثافة Kg/m^3	٠,٩١٦	٠,٦٧٥	٠,٦١٤	٠,٧٧
الحرارة النوعية (Kj/Kg.K)	١٠٢٢	١٠٣٩,٥	١١٣٣,٨٢	١١٠١,١٤
الموصلية الحرارية $(W/m^2.K)$	٠,٠٣٠٧	٠,٠٣٩٢٥	٠,٠٤٥٢	٠,٠٣٧٢٣
اللزوجة (m^2/s)	$21.67*10^{-6}$	$27*10^{-6}$	$28.351*10^{-6}$	$24*10^{-6}$
عدد برا نتل	٠,٧١	٠,٧١	٠,٧١	٠,٧١



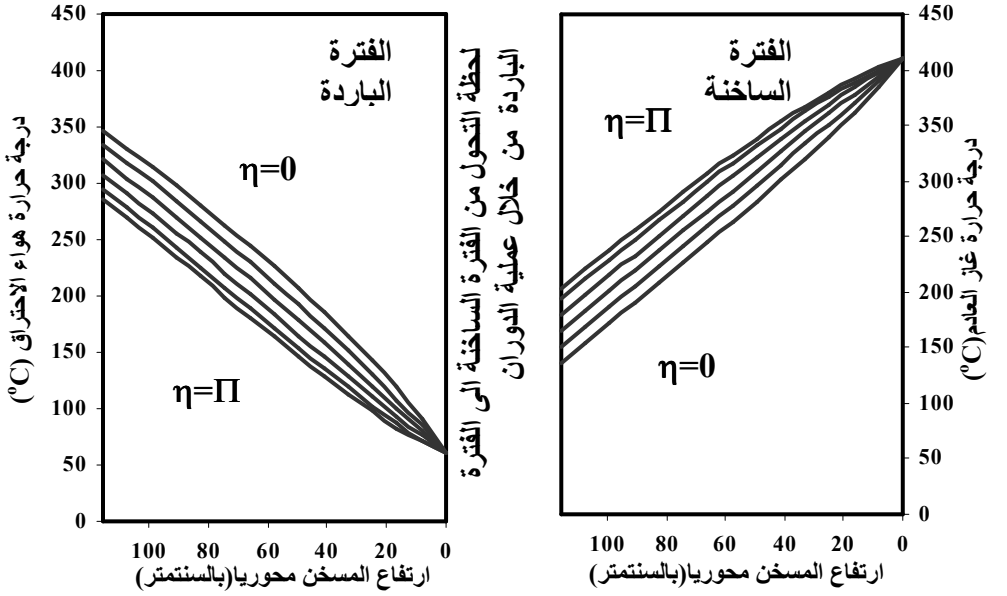
شكل (١): رسم تخطيطي لمعيد التسخين الدوار مع اتجاه دخول وخروج لكلا المائعين



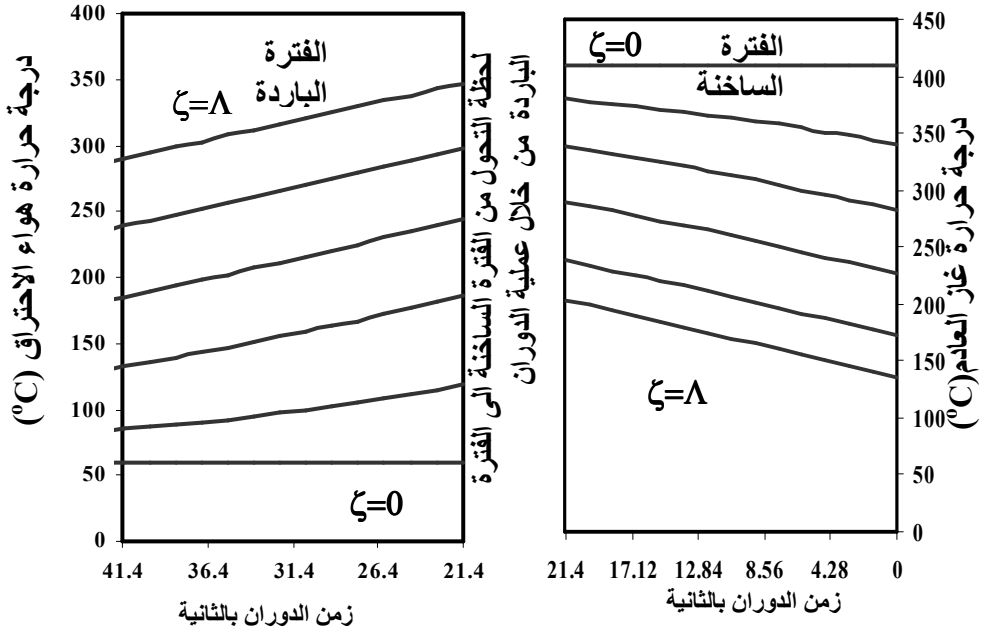
شكل (٢): يوضح مقطع للفترة الساخنة كنموذج للتحليل



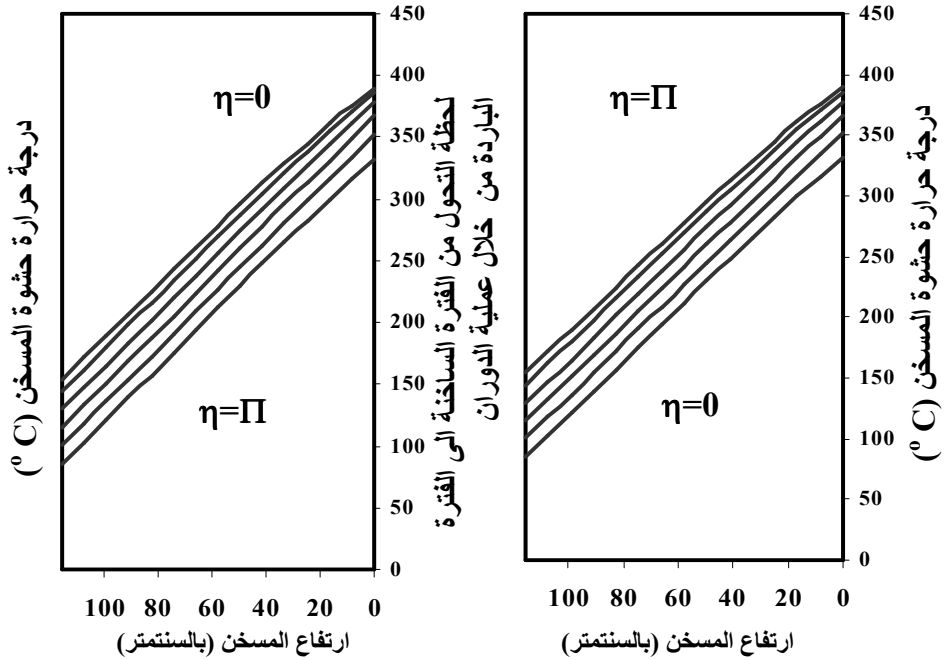
شكل (٣): مخط يوضح تقسيم حشوة المسخن الى مقاطع زاوية محيطية وطبقات والى ابعاد فراغية متساوية وبفترات زمنية متساوية



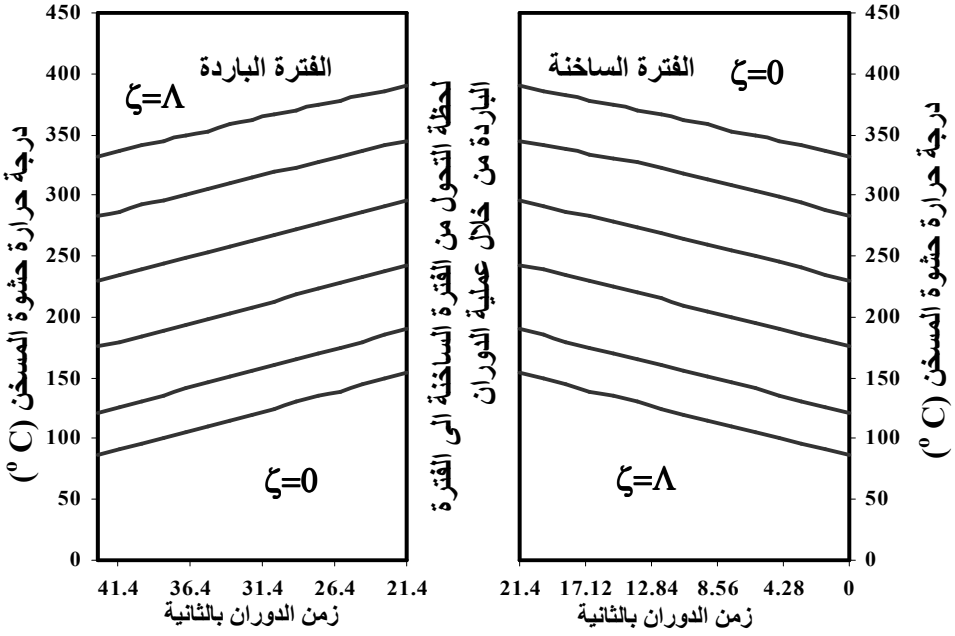
شكل(4): يبين توزيع درجات الحرارة للمائعين على طول المسخن لقيم مختلفة من زمن الدوران وللفترتين الساخنة والباردة



شكل(5): يبين توزيع درجات الحرارة للمائعين مع زمن الدوران ولمسافات محورية مختلفة من المسخن و للفترتين الساخنة والباردة



شكل (٦): يبين توزيع درجات حرارة حشوة المسخن مع المسافة المحورية للمسخن ولفترات زمنية مختلفة وللفترتين الساخنة والباردة



شكل(٧): يبين توزيع درجات حرارة حشوة المسخن مع زمن الدوران ولمسافات محورية مختلفة من المسخن وللفترتين الساخنة والباردة

الاستنتاجات :

من خلال نتائج البحث يمكن الاستنتاج بان الحل النظري يمكن تطبيقه على معيد التسخين الـــدوار فـــي محطة توليد الطاقة الكهربائية لدراسة العوامل المؤثرة عليه كما يمكن من خلاله دراسة مشاكل هذه المسخنات وإمكانية حلها من خلال هذا الحل. ومن ذلك يلاحظ إن تقاربا جيدا مع النتائج الحقيقية حيث بلغت نسبة الخطأ في درجة حرارة هواء الاحتراق الخارج (٣%) ودرجة حرارة غاز العادم (٤%)، وعليه يمكن استخدام هذا الحل في دراسة العوامل المؤثرة على عمل معيد التسخين بهدف الوصول إلى أفضل عمل له.

التوصيات:

بهدف المساهمة في رفع اداء مسخن الهواء، يمكن استنباط التوصيات الآتية:

١. دراسة فكرة تطوير منظومة تنظيف مسخن الهواء.
٢. تصميم برنامج حاسبي يمكن من خلاله حساب عوامل اداء المسخن.
٣. دراسة إمكانية تصميم حشوة المسخن.

المصادر:

١. محطة كهرباء بيجي الحرارية، (*بيانات تصميمية ما خوذه من مستندات الشركة الايطالية المـــصنعة للمحطة*) .(زيارة موقعيه). ٢٠٠٤.

2. Frankovic, B."*Heat transfer analysis in dry rotary heat exchanger*" Strojarstove 35, 3-4 pp.111-120,1993.
3. Al-SAID M.M. "*A Theoretical Study to Improve the Performance and Life of Air Heaters Associated with Steam Boilers*" M.Sc.Thesis, Baghdad University 2000.
4. J.L.BOYEN ."*Practical heat recovery*". A Wiley interscience publication. John Wiley and Sons. New York. 1975.
5. Schmidt F.W.and Willmott, A.L. "*Thermal Energy Storage and Regenerative*", 1981
6. Hausen, Helmuth, " *Heat Transfer in Counter Flow, Parallel Flow, and Cross Flow* ", McGraw-Hill, New York, 1983.
7. W.Nsselt, Der Beharrungszultard ;Winderhitzen. Z. ver.Dtsch.Ing.72 .p1052. 1054.1928.
8. A.Anzelius.Uber erwarmung vermittels durchstromender medien,Z angew Math.Mech.6. 201-204.1929.
9. C.Ray Wylie, Louis C. Barrett, " *Advanced Engineering Mathematics* ", McGraw-Hill Int. Book Company, 1982.
10. Chudnovskaya I. and Others, "*Thermal resistance of Internal Tube deposits during boiler*", Thermal Engineering, vol.31,No.7,1984.

الملحق (أ):

المعاملات اللابعدية (ζ) و (η):

$$d\zeta = \frac{\bar{h} \cdot \Delta B}{C_f d\dot{m}_f} dx$$

المعادلة رقم (٣):

$$dA_{c.v} = \Delta B \cdot dx$$

$$d\zeta = \frac{\bar{h} \cdot dA_{c.v}}{C_f d\dot{m}_f}$$

$$\zeta = \int_0^L \frac{\bar{h}\, dA_{c.v}}{C_f d\dot{m}_f}$$

وبما ان:

$$\int_0^L dA_{c.v} = dA = \Delta B \cdot L$$

$$\therefore \zeta = \frac{\bar{h}\, dA}{C_f d\dot{m}_f}$$

إذا كان (n_z) تمثل عدد التقسيمات او المقاطع في اتجاه معين، فان :

$$dA = \frac{A}{n_z} \quad , \quad d\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_f}{n_z}$$

$$\therefore \zeta = \frac{\bar{h} \cdot A}{C_f \dot{m}_f}$$

وكذلك:

$$d\eta = \frac{\bar{h} \cdot \Delta B \cdot dx}{C_m dM_{m.c.v}} d\tau \quad \Rightarrow \quad d\eta = \frac{\bar{h} \cdot dA_{c.v}}{C_m dM_{m.c.v}} d\tau$$

وبما ان:

$$dA = dA_{c.v} \cdot L \quad , \quad dM_m = dM_{m.c.v} \cdot L$$

$$dA = \frac{A}{n_z} \quad , \quad dM_m = \frac{M_m}{n_z}$$

$$\therefore d\eta = \frac{\bar{h} \cdot dA}{C_m \cdot dM_m} d\tau \quad \Rightarrow \quad \eta = \int_0^L \frac{\bar{h} \cdot A}{C_m \cdot M_m} d\tau \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{\bar{h} \cdot A}{C_m \cdot M_m} \tau$$