

دراسة تأثير زاوية شفرات الهواء الرئيسي على خصائص الاحتراق والتوزيع الحراري لحراق دوامي باستخدام المحاكاة العددية

أ.د.م هيثم حسن¹ د.م إياد دبوراً² م. علاء نوفل³

الملخص:

تم إجراء دراسة عددية لعملية احتراق الغاز الطبيعي في حراق دوامي باستخدام ديناميك الموائع الحسابي (CFD)، وذلك من أجل التحقق من تأثير زاوية شفرات الهواء الرئيسي على أداء الحراق من حيث التوزيع الحراري وانبعاث الملوثات (CO ; CO_2)، حيث تم تغيير زاوية الشفرات إلى ثلاثة زوايا مختلفة (40° ; 50° ; 55°) عن الزاوية التصميمية للحراق (45°)، إذ تم إجراء عملية المحاكاة باستخدام الكود (ANSYS Fluent). أظهرت النتائج أن لزاوية شفرات الهواء الرئيسي تأثير كبير على شكل اللهب، حيث مع زيادة زاوية الشفرات يزداد قطر اللهب بالاتجاه الشعاعي وينخفض الطول المحوري له، مما يساعد على إتمام عملية الاحتراق بشكل كامل وإمكانية امتصاص جدران حجرة الاحتراق أكبر كمية من الحرارة. خلصت النتائج إلى أن الزاوية 55° هي الأفضل من حيث الانبعاثات، إذ حققت أقل نسبة لـ CO وأعلى نسبة لـ CO_2 عند مخرج حجرة الاحتراق.

الكلمات المفتاحية: ديناميك الموائع الحسابي، زاوية ريش الهواء الرئيسي، غاز طبيعي، حراق دوامي، توزيع حراري، انبعاثات.

¹ أستاذ في قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين.

² أستاذ مساعد في قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث.

³ طالب ماجستير في قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث.

Studying the effect of the main air blade angle on the combustion characteristics and heat distribution of a swirl burner using numerical simulation

Haitham Hasan¹

Eyad Dabboura²

Alaa Nofl³

Abstract:

A numerical study of the natural gas combustion process in a swirl burner was performed using computational fluid dynamics (CFD), in order to verify the effect of the angle of the main air blades on the performance of the burner in terms of heat distribution and pollutants emission (CO ; CO_2), where the angle of the blades was changed to three different angles (55° ; 50° ; 40°) from the designed angle of the burner (45°), as the simulation was performed using the code (ANSYS Fluent). The results showed that the angle of the main air blades has a great effect on the shape of the flame, as with the increase in the angle of the blades, the diameter of the flame increases in the radial direction and the axial length decreases, which helps to complete the combustion process completely and the possibility of absorbing the largest amount of heat from the walls of the combustion chamber. The results concluded that the 55 degree angle is the best in terms of emissions, as it achieved the lowest CO ratio and the highest CO_2 ratio at the outlet of the combustion chamber.

Keywords: CFD, Main air blades angle, Natural gas, Swirl burner, Heat distribution, emissions.

¹ Professor in the Department of Mechanical Power Engineering - Faculty of Mechanical Engineering - Tishreen University.

² Assistant Professor in the Department of Mechanical Power Engineering - Faculty of Mechanical Engineering - Al-Baath University.

³ Master's student in the Department of Mechanical Power Engineering - Faculty of Mechanical Engineering - Al-Baath University.

1- مقدمة:

الاحتراق هو أحد العمليات المادية الأساسية في الحياة اليومية. 80 ٪ من الطاقة تأتي من احتراق الوقود السائل والغازي والمواد الصلبة، إذ يمتاز الوقود الغازي بسهولة مزجه مع الهواء وعدم الحاجة إلى عامل زيادة هواء مرتفع، وإن خلط الهواء بالوقود الغازي يتم إما داخل الحراق، وفي هذه الحالة يشتعل الخليط في الحال لدى وصوله إلى حجرة الاحتراق، أو يتم الخلط والاشتعال في حجرة الاحتراق بآن واحد. إذ أن الطريقة الأولى تناسب الاستطاعات الصغيرة فقط، إذ إنه عند الاستطاعات الكبيرة، يصعب التحكم بسرعة إرسال الخليط [1]. لذلك تم اللجوء إلى الطريقة الثانية في المراحل الكبيرة، ومن أجل تحسين كفاءة الاحتراق في هذه الطريقة، تم استخدام عدة أساليب ومن بينها استخدام طريقة تدويم المزيج، إذ يمكن تحقيق مستوى أعلى من الاضطراب في التدفقات الدوامية مما يعزز بدوره عملية الاختلاط. إلى جانب ذلك يتم استخدام التدفقات الدوامية لتثبيت اللهب في أنظمة الاحتراق، وبالتالي يمكن التحكم في عملية الاحتراق [2].

2- هدف البحث وأهميته:

2-1- هدف البحث:

يهدف البحث إلى دراسة تأثير زاوية شفرات الهواء الرئيسي للحراقات الدوامية العاملة على المراحل البخارية في مصفاة حمص بهدف تقليل المشاكل ذات التأثير السلبي على أداء هذه الحراقات.

2-2- أهمية البحث:

وتكمن أهمية البحث في الفائدة البيئية والفنية والاقتصادية التي سوف تنعكس على الشركة العامة لمصفاة حمص إذا تم تحقق التحسن في أداء الحراقات الدوامية للمرجل، كما أن استخدام المحاكاة الرياضية لا يتطلب كلفة اقتصادية كبيرة ويحتاج جهد مخبري محدود مقارنة بالعمل الحقل.

3- مواد وطرق البحث:

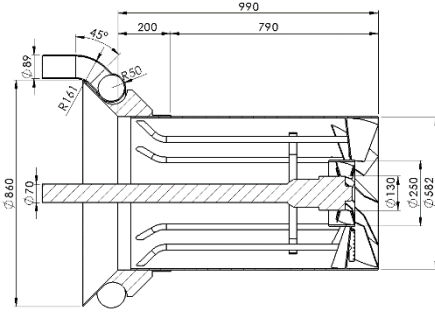
يعتمد البحث على النمذجة بتطبيق تقنية ديناميك الموائع الحسابية (CFD) على نموذج يحاكي الحراقات الدوامية المدروسة ضمن حجرة احتراق اسطوانية، من اجل دراسة تأثير تغيير زاوية شفرات الهواء الرئيسي عن الزاوية التصميمية حيث سيتم دراسة ثلاثة زوايا مختلفة (40° ; 50° ; 55°) بالإضافة إلى الزاوية التصميمية (45°) باستخدام الكود (ANSYS Fluent)، مما سيجعل النموذج قريب من أرض الواقع، وبالنتيجة تقديم بعض القيم والمتغيرات للحراق المدروس، عند كل زاوية من الزوايا المذكورة سابقاً، ومن ثم اختيار الزاوية الأفضل.

3-1- وصف المرجل والحراقات الدوامية والنموذج الهندسي:

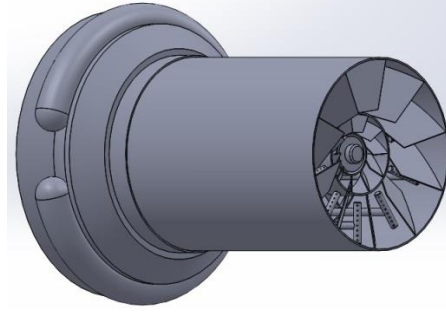
تحتوي محطة القوى في مصفاة حمص على مرجلين بخاريين، المورد من جمهورية التشيك وقد تم تصنيعهم من قبل شركة (První Brněnská Strojírna)، تتميز المرجل البخارية بأنها ذات أسطوانة أحادية ثنائية الممرات، وذات تدوير طبيعي. تم تصميم مولد البخار ليكون قادر على تقديم تدفق مستمر للبخار 190 ton/h بمواصفات للبخار المحمص الخارج من المرجل 540°C ، و 9.41 MPa . ويتوضع في الجانب الأمامي لحجرة الاحتراق تسع حراقات (فيول-غاز) موجودة ضمن غلاف هوائي مشترك، ولدى الحراقات التسعة لكل مرجل صندوق نفخ (Wind box) مجهز من الجانب الأيمن والأيسر بمداخل للهواء، ويزود كل حراق بصمام خانق وفوهات للغاز، وتدفق هواء الاحتراق مناسب لتدفق الغاز الطبيعي أو الفيول [3].

يشكل الحراق الدوامي الجزء الرئيسي لعملية الاحتراق في هذه المرجل، حيث يوجه تيار هواء الاحتراق إلى شفرات التدويم، بينما تعمل شفرات تدويم الهواء الثابتة على تدويم هواء الاحتراق من أجل مزج الهواء بالوقود وتثبيت اللهب في مخرج الحراق، وللتدويم تأثير حاسم على تشكيل اللهب وعلى الاحتراق [4].

يوضح الشكل (1) رسم ثلاثي الأبعاد للحراق الدوامي المدروس، حيث تم رسم أجزاء الحراق وتجميعها ضمن بيئة SolidWorks، بينما يوضح الشكل (2) الأبعاد الهندسية للحراق بالـ mm.

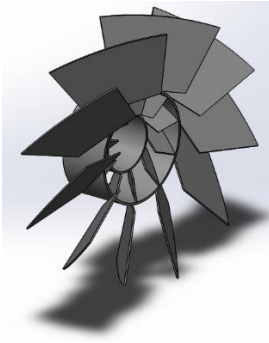


الشكل (2): الأبعاد الهندسية للحراق الدوامي



الشكل (1): رسم ثلاثي الأبعاد للحراق الدوامي

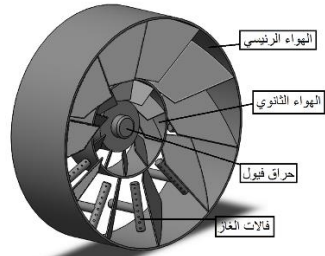
بسبب التعقيد الكبير للحراق المدروس كان لا بد من تبسيط النموذج من أجل تقليل عدد عناصر شبكة التجزئة أثناء إجراء عملية المحاكاة والحصول على نتائج أكثر دقة، حيث يوضح الشكل (3) الحراق الدوامي ومقطع أمامي له بعد التبسيط، حيث أن الجزء الأهم في هذه الدراسة هي شفرات التدويم، ويوضح الشكل (4) الشفرات الدوامية التي تمت الدراسة عليها حيث تم تغيير زاوية الشفرات الخارجية فقط أي شفرات الهواء الرئيسي.



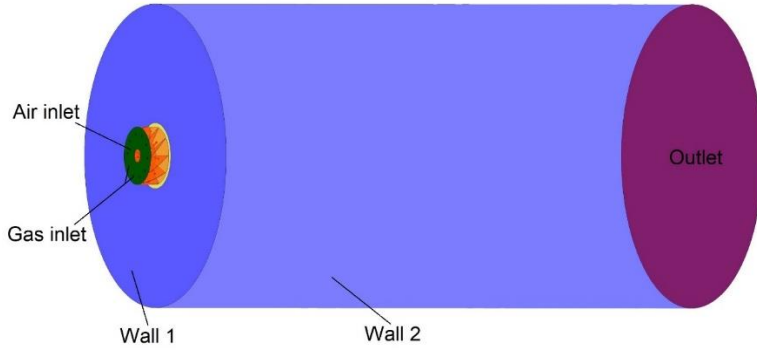
الشكل (4): شفرات التدويم للحراق المدروس



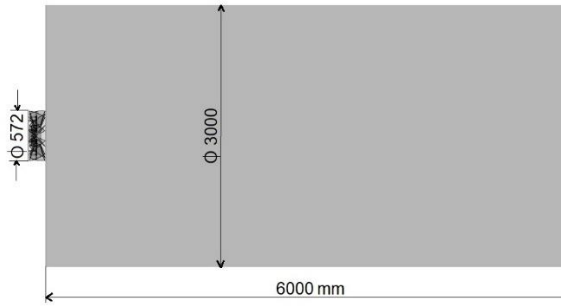
الشكل (3): رسم ثلاثي الأبعاد للحراق الدوامي بعد التبسيط



يوضح الشكل (5) رسم ثلاثي الأبعاد لجزء الاحتراق المدروسة مع حراق دوامي، بينما يوضح الشكل (6) أبعاد حجرة الاحتراق الرئيسية بوحدة [mm].



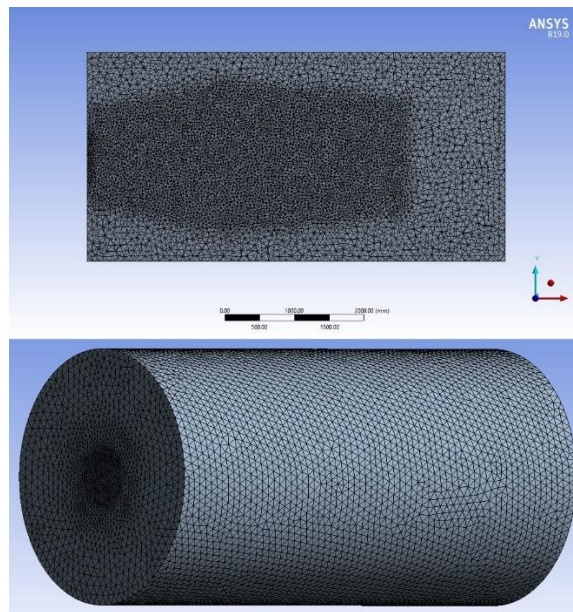
الشكل (5): رسم ثلاثي الأبعاد لحجرة الاحتراق الاسطوانية المدروسة مع الحراق



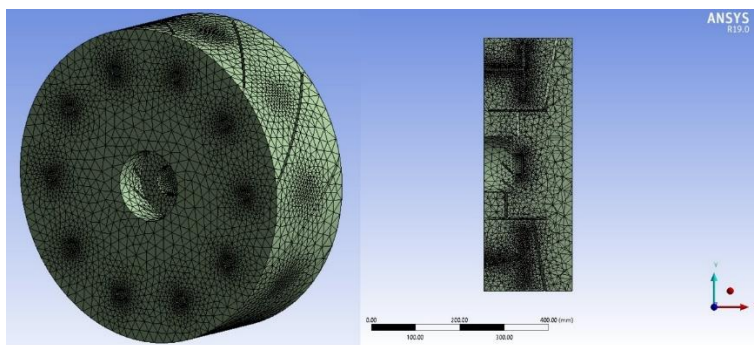
الشكل (6): الأبعاد الرئيسية لحجرة الاحتراق

3-2- تقطيع النموذج الهندسي:

تم تقطيع النموذج الهندسي باستخدام تطبيق Ansys Meshing Application، حيث تم تقطيع النموذج الهندسي باستخدام خلايا رباعية الأوجه (Tetrahedral) بالنسبة للحراق ولحجرة الاحتراق أيضاً، حيث نلاحظ من الشكل (7) كيف تم زيادة عدد العناصر في منطقة الاحتراق (أمام الحراق مباشرة)، ويظهر الشكل (8) مساقط منظور شبكة عناصر الحراق، كما نلاحظ أيضاً من الشبكة المستخدمة للحراق كيف تم زيادة عدد العناصر في المناطق القريبة من الجدار وخصوصاً في المناطق القريبة من جريان الغاز الطبيعي، حيث بلغ العدد الوسطي للعناصر الكلية للشبكة (1.650) مليون عنصر.



الشكل (7): منظور ثلاثي الأبعاد لشبكة عناصر حجرة الاحتراق



الشكل (8): منظور شبكة عناصر الحراق، ومسقط لقطع في منتصفه.

3-3- النماذج الفيزيائي والشروط الحدية:

3-3-1- المعادلات الحاكمة:

ينتج قانون حفظ الكتلة من معادلة استمرار الكتلة [5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

حيث x_j ($j = x, y, z$) بالإحداثيات الديكارتية، (u_j) أو (u_x, u_y, u_z) المركبات الديكارتية لمتجه السرعة (\vec{u}) ووحدته $[m/s]$ ، الزمن واهدته $[s]$ ، و (ρ) كثافة الخليط واهدتها $[kg/m^3]$.

يعطى قانون حفظ كمية الحركة بالمعادلة التالية [5]:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial}{\partial x_i} P + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) + \rho g_i \quad (2)$$

حيث P الضغط الستاتيكي (Pa)، و τ_{ij} توتر الإجهاد اللزج $[N/m^2]$ ، و ρg_i قوة ثقالة الجسم (الوزن الحجمي) $[N/m^3]$.

يتم الحصول على الطاقة الحركية للاضطراب وفق نموذج $k - \varepsilon$ القابل للتحقيق من معادلة الانتقال التالية [6]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

ويحسب معدل تبدد الاضطراب وفق نموذج $k - \varepsilon$ القابل للتحقيق من المعادلة [6]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4)$$

تعطى معادلة الطاقة عند اختيار نموذج الاحتراق بدون خلط مسبق غير الأديباتي بالشكل التالي [6]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_{eff}}{C_p} \nabla H \right) + S_h \quad (5)$$

يفترض أن عدد لويس $(Le = 1)$ ، حيث السعة الحرارية النوعية للخليط تحت ضغط ثابت، و k_{eff} الايصالية الفعالة $(k + k_t)$ ، حيث k_t الايصالية الحرارية المضطربة المحددة وفقاً لنموذج الاضطراب المستخدم)، ويعطى المحتوى الحراري الكلي بالعلاقة:

$$H = \sum_i Y_i h_i \quad (6)$$

حيث h_i الإنتالبي الداخلي المطلق للأنواع (i) ، و Y_i الكسر الكتلي للأنواع (i) في الخليط.

$$h_i(T) = h_i^o + \int_{T_o}^T C_{p,i}(T)dT \quad (7)$$

h_i^o : حرارة تشكل الأنواع (i) عند درجة الحرارة المرجعية ($T_o = 298.15 K$).

تعطى معادلة انتقال الحرارة بالإشعاع لنموذج DO في الاتجاه \vec{s} بالعلاقة [6]:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s})\phi(\vec{s}, \vec{s}')d\Omega' \quad (8)$$

إذ أن I شدة الإشعاع [W/m^2]، و a ، σ_s معاملي الامتصاص والتشتت على التوالي [m^{-1}]، و n قرينة الانكسار، و Ω' الزاوية المجسمة، و \vec{s} ، \vec{s}' متجهات اتجاه الإشعاع الواردة والصادرة، و \vec{r} متجه الموضع، و ϕ تابع طور التشتت.

تعطى معادلة الكسر الواسطي للخليط وفق نموذج Non-premixed Combustion model بالعلاقة [6]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\left(\frac{k}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (9)$$

إذ أن k الموصلية الحرارية الصفائحية للخليط، و σ_t رقم براندتل، و μ_t للزوجية المضطربة، ويرجع حد المصدر S_m فقط إلى انتقال الكتلة في مرحلة الطور الغازي من قطرات الوقود السائل أو الجسيمات المتفاعلة (مثل الفحم)، وتعطى معادلة حفظ تباين كسر الخليط \bar{f}'^2 [7]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}'^2) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}'^2) = \nabla \cdot \left(\left(\frac{k}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \bar{f}'^2 \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \bar{f}'^2 \quad (10)$$

3-3-2- النموذج الفيزيائي:

تم حل معادلات نافير - ستوكس للجريان ثلاثي الأبعاد بالحالة المستقرة (steady)، وتم اختيار نموذج الاضطراب k-ε Realizable، ونموذج الإشعاع الحراري (DO) Discrete ordinates، ونموذج امتصاصية الغاز WSGGM، ونموذج الاحتراق Non premixed combustion غير الأديباتي مع افتراض الدخول انتشاري.

3-3-3- تقطيع النموذج الفيزيائي:

ترتبط معادلات السرعة والضغط معاً لذلك تم استخدام خوارزمية (Simi-infinite SIMPLE (Method for Pressure Linked Equation لتحقيق العلاقة بين تصحيحات السرعة والضغط في معادلات الاستمرار وكمية الحركة، وللحصول على مجال الضغط.

تم استخدام الاستيفاء من المرتبة الأولى (First order upwind Interpolation) لكافة المعادلات، وتم اختيار مخطط (PRESTO!) لاستيفاء الضغط، وتم اختيار مخطط المربعات الدنيا لتقدير التدرج اعتماداً على خلية (Least Squares Cell-Based). وضعت قيم الأخطاء المقبولة عند حدود (10^{-5}) لمعادلة الطاقة والإشعاع و(10^{-4}) لباقي المعادلات، وتم اعتبار الجريان متقارب عند استقرار قيم الأخطاء.

تطلبت عملية المحاكاة لعملية الاحتراق داخل حجرة الاحتراق من أجل الزوايا الأربعة المختلفة حوالي 260 ساعة خلال إجراء الحل العددي، وذلك باستعمال حاسب بمواصفات معالج رباعي النوى AMD A10-7300 Radeon R6, 10 Compute Cores 4C+6G بتردد 1.09GHz وذاكرة 6GB RAM.

3-3-4- الشروط الحدية:

قيمة التدفق الكتلي لهواء الاحتراق (5.654 kg/s)، وللوقود (0.3 kg/s)، ودرجة حرارة الهواء (553 K)، والوقود (293 K)، ودرجة الحرارة الوسطية لجدران حجرة الاحتراق ($Wall_1 = 550 \text{ K}$) و ($Wall_2 = 1500 \text{ K}$)، وانبعائية الجدران ($Wall_1 = 0.5$ & $Wall_2 = 0.6$)، ويوضح جدول (1) تركيب الوقود المستخدم، والذي تم الحصول عليه من المخبر المركزي في الشركة العامة لمصفاة حمص.

جدول (1): تركيب الوقود المستخدم

| اسم المركب | ميثان | ايثان | بروبان | بيوتان | بنتان |
|------------|-------|-------|--------|--------|-------|
| | | | | | |

| | | | | | |
|---------------|---------------|------------|------------|----------|--------------------|
| (C_5H_{12}) | (C_4H_{10}) | (C_3H_8) | (C_2H_6) | (CH_4) | |
| 0.2 | 0.3 | 3.2 | 3 | 93.3 | النسبة المئوية (%) |

3-4- التحقق من صحة النموذج:

لتأكد من صحة النتائج التي حصلنا عليها من عملية المحاكاة والتأكد من صحة الكود، وبما أنه لا يتوفر لدينا قراءات أو قيم تجريبية من أجل حراق واحد، تم اللجوء إلى حساب الطاقة الحرارية التي ينتجها حراق واحد حسابياً بالاعتماد على الطريقة المذكورة في المرجع [8].

بالاعتماد على تركيب الوقود المذكور سابقاً نوجد الوزن الجزيئي لكل مركب من مركبات الوقود كما هو مبين بالجدول (2):

جدول (2): الوزن الجزيئي لمركبات الوقود [8]

| اسم المركب | ميثان (CH_4) | ايثان (C_2H_6) | بروبان (C_3H_8) | بيوتان (C_4H_{10}) | بنتان (C_5H_{12}) |
|---------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|------------------------|
| الوزن الجزيئي (mol) | 16 | 30 | 44 | 58.11 | 72.14 |

$$[(93.3 \times 16) + (3 \times 30) + (3.2 \times 44) + (0.3 \times 58.11) + (0.2 \times 72.14)] = 1755.46$$

حساب النسب المئوية لوزن كل مركب من المركبات في الوقود:

$$\% \text{ weight of } CH_4 \text{ in fuel} = \frac{93.3 \times 16}{1755.46} = 0.85$$

$$\% \text{ weight of } C_2H_6 \text{ in fuel} = \frac{3 \times 30}{1755.46} = 0.051$$

$$\% \text{ weight of } C_3H_8 \text{ in fuel} = \frac{3.2 \times 44}{1755.46} = 0.08$$

$$\% \text{ weight of } C_4H_{10} \text{ in fuel} = \frac{0.3 \times 58.11}{1755.46} = 0.01$$

دراسة تأثير زاوية شفرات الهواء الرئيسي على خصائص الاحتراق والتوزيع الحراري لحراق دوامي باستخدام المحاكاة العددية

$$\% \text{ weight of } C_5H_{12} \text{ in fuel} = \frac{0.2 \times 72.14}{1755.46} = 0.009$$

مجموع هذه النسب يساوي الواحد.

من جدول ثوابت الاحتراق [8]، نوجد القيمة الحرارية الدنيا والعليا لكل مركب كما هو موضح في جدول (3):

جدول (3): القيمة الحرارية الدنيا والعليا لمركبات الوقود

| اسم المركب | ميثان (CH_4) | ايثان (C_2H_6) | بروبان (C_3H_8) | بيوتان (C_4H_{10}) | بنتان (C_5H_{12}) |
|--------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| حرارة الاحتراق (Btu/lb) | الذ يا | 21520 | 20432 | 19944 | 19680 |
| | الع يا | 23879 | 22320 | 21661 | 21308 |
| | | | | | 21091 |

حساب القيمة الحرارية العليا للوقود:

$$HHV = (0.85 \times 23879) + (0.051 \times 22320) + (0.08 \times 21661) + (0.01 \times 21308) + (0.009 \times 21091)$$

$$HHV = 23571.25 \text{ Btu/lb}$$

حيث أن:

$$1 \text{ Btu/lb} = 2.326 \text{ kj/kg}$$

وبالتالي:

$$HHV = 23571.25 \times 2.326 = 54826.7 \text{ ki/kg}$$

حساب القيمة الحرارية الدنيا (الصافية) للوقود:

$$LHV = (0.85 \times 21520) + (0.051 \times 20432) + (0.08 \times 19944) + (0.01 \times 19680) + (0.009 \times 19517)$$

$$LHV = 21302 \text{ Btu/lb} = 49548.5 \text{ kj/kg}$$

لدينا تدفق الوقود الغازي لحراق واحد يساوي:

$$m_h = 1420 \text{ m}^3/h = 0.395 \text{ m}^3/sec = 0.3 \text{ kg/sec}$$

وبالتالي لحساب الطاقة الحرارية التي ينتجها الحراق نجد أن:

$$Q = (0.3)(49548.5) = 14864.55 \text{ kW}$$

تم قياس كمية الطاقة الحرارية الاجمالية في حجرة الاحتراق بعد إجراء عملية النمذجة للحراق حيث بلغت:

$$Q' = 15000 \text{ kW}$$

وبالتالي تكون النسبة المئوية للخطأ بين القيمة الحرارية المحسوبة والقيمة الحرارية التي تم الحصول عليها من النمذجة:

$$\text{Error \%} = \frac{|Q - Q'|}{|Q|} \times 100 = 0.92\%$$

وهذا يظهر توافق جيد بين القيمة الحرارية المحسوبة والقيمة الحرارية التي تم الحصول عليها من النمذجة.

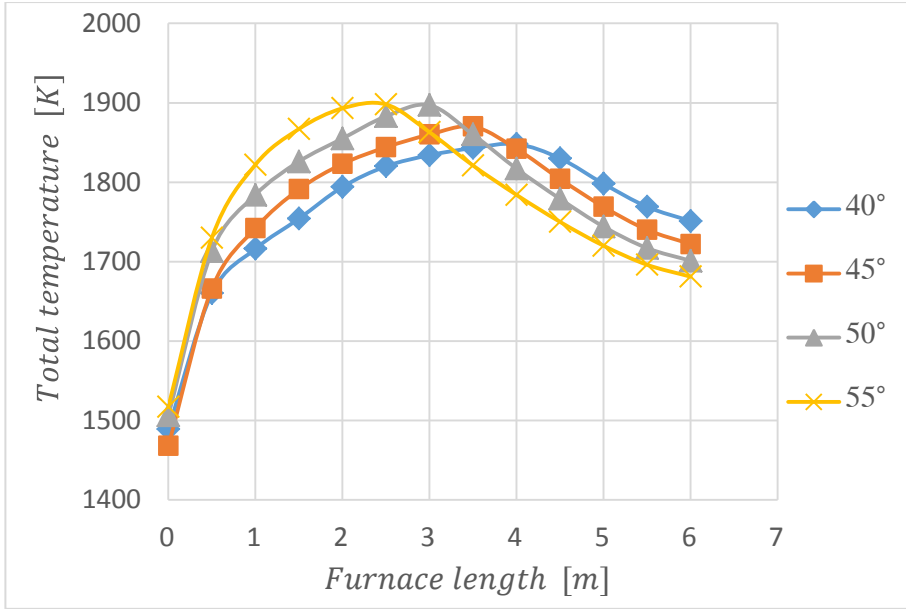
4- النتائج ومناقشتها:

4-1- توزيع درجات الحرارة عند قيم مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي:

تعتبر درجة الحرارة من المعطيات المهمة عند دراسة عمليات الاحتراق في المراحل والافران الصناعة، حيث أن درجات الحرارة العالية تؤدي الى تشكل أكسيد النتروجين بشكل كبير كما أن التوزيع الغير منتظم للحرارة في أماكن معينة في حجرة الاحتراق يؤدي الى تعرض جدرانها لإجهادات حرارية تؤدي الى تلفها.

يبين الرسم البياني في الشكل (9) قيم درجات الحرارة الكلية الوسطية لغازات الاحتراق على الطول المحوري لحجرة الاحتراق، وتوضح الأرقام بجانب المخطط قيم زوايا شفرات الهواء الرئيسي التي تم التعديل عليها، حيث نلاحظ من الشكل أن أعلى درجة حرارة يتم الحصول عليها عند كل زاوية تقترب من الجدار الامامي لحجرة الاحتراق مع زيادة زاوية شفرات الهواء الرئيسي من 40 الى 55 درجة، وهذا يتوافق مع النتائج الواردة في [9]، كما نلاحظ تميز الزاوية 55 درجة عن باقي الزوايا حيث كانت درجة حرارة مرتفعة في

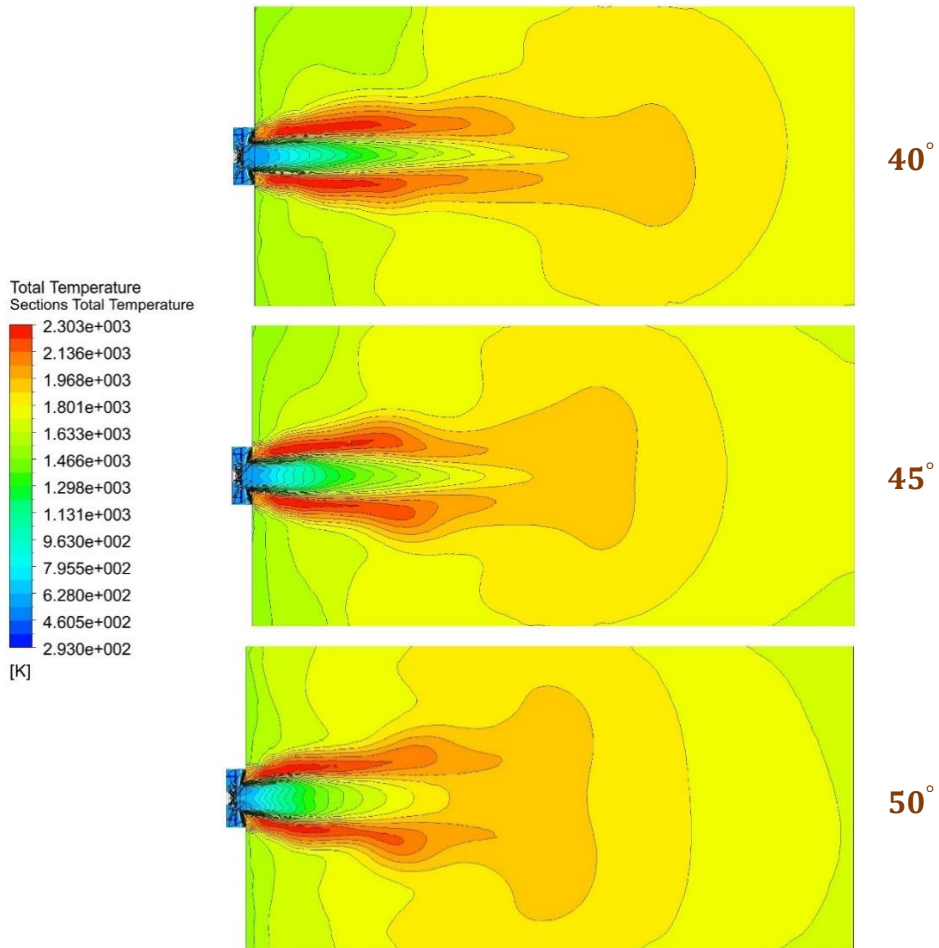
منتصف حجرة الاحتراق، ومن ثم تنخفض بشكل تدريجي لتبلغ أقل قيمة لها عند مخرج الحجرة.



الشكل (9): العلاقة بين درجة الحرارة الكلية الوسطية وطول حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي

بمقارنة جميع الحالات مع بعضها نلاحظ أن درجة الحرارة الوسطية الأعظمية التي تصل إليها غازات الاحتراق تبتعد عن الجدار الأمامي لحجرة الاحتراق مع انخفاض زاوية شفرات الهواء الرئيسي، كما نلاحظ ارتفاع درجة الحرارة الوسطية عند مخرج الحجرة أيضاً مع انخفاض زاوية شفرات الهواء الرئيسي، ويوضح الشكل (10) توزيع درجة الحرارة الكلية داخل حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي، ويلاحظ تركيز درجات الحرارة العالية في منتصف حجرة الاحتراق، ومن الشكل نجد أن عندما كانت زاوية الشفرات 55 درجة كانت الحرارة تتركز أكثر بالنصف الأول من الحجرة ومن ثم تنخفض بشكل تدريجي حتى نهاية حجرة الاحتراق لتبلغ أقل قيمة لها في هذه الحالة، كما نلاحظ مع زيادة زاوية الشفرات من 40 إلى 55 ينخفض طول اللهب في حجرة الاحتراق بالاتجاه المحوري ويتم توسيعه بشكل شعاعي، مما يعطيه وقت إضافي للاحتراق مما

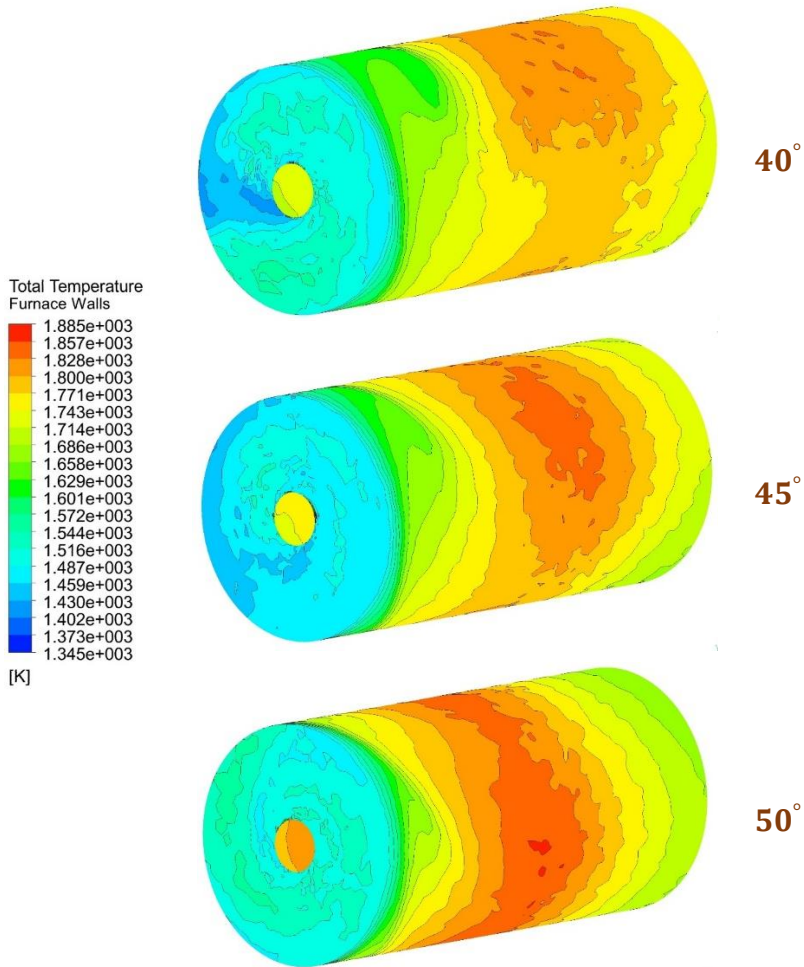
يجعله مشابهاً للهب الممزوج جزئياً، كما نلاحظ ارتفاع درجة حرارة الغازات عند المخرج في حالة 40 درجة حيث يفسر ذلك بطول اللهب الكبير وخروج المزيج من الحجرة بوقت قصير.

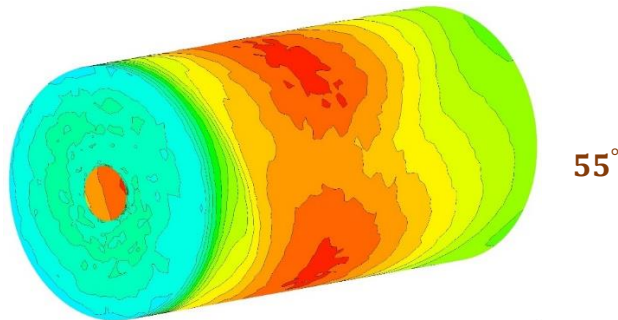


دراسة تأثير زاوية شفرات الهواء الرئيسي على خصائص الاحتراق والتوزيع الحراري لحراق دوامي باستخدام المحاكاة العددية



الشكل (10): توزيع درجات الحرارة الكلية داخل حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي





الشكل (11): توزع درجات الحرارة الكلية على جدران حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي
 نلاحظ من الشكل (11) توزع درجة الحرارة الكلية على جدران حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي، حيث كانت أعلى درجة حرارة للجدران عندما كانت زاوية الشفرات 55 درجة وتفسير ذلك هو أنه مع زيادة زاوية الشفرات يزداد قطر اللهب بالاتجاه الشعاعي، واقترب اللهب من الجدار الامامي لحجرة الاحتراق، وهذا سوف يؤدي بالنتيجة إلى اكتساب الجدران أكبر طاقة حرارية ممكنة من عملية الاحتراق، بينما كانت أقل درجة حرارة للجدران بحالة زاوية شفرات 40 درجة.

يظهر جدول (4) قيم درجات الحرارة الكلية الوسطية عند قيم مختلفة لزاوية شفرات الهواء الرئيسي، حيث نلاحظ أن أعلى درجة حرارة عند مخرج حجرة الاحتراق تصل 1751 K عندما تكون زاوية الشفرات 40 درجة، ويعود سبب ذلك إلى زياد الطول المحوري للهب على حساب القطر الشعاعي مما يؤدي إلى خروج غازات الاحتراق من الحجرة بوقت قصير حيث لا ينتهي للجدران امتصاص أكبر كمية من الحرارة بالإضافة الى عدم اكتمال عملية الاحتراق نظراً لعدم توفر الوقت الكافي لذلك، بينما كانت أقل درجة حرارة عند المخرج تساوي 1681 K عندما كانت زاوية الشفرات 55 درجة، وكما لاحظنا سابقاً أن أعلى حرارة للجدران كانت مع هذه الحالة حيث يكتسب المزيج وقت كافي للإتمام عملية الاحتراق ومن ثم انتقال الحرارة الى الجدران، بالتالي تعتبر الزاوية 55 درجة هي الأفضل بين الزوايا من حيث التوزع الحراري داخل حجرة الاحتراق.

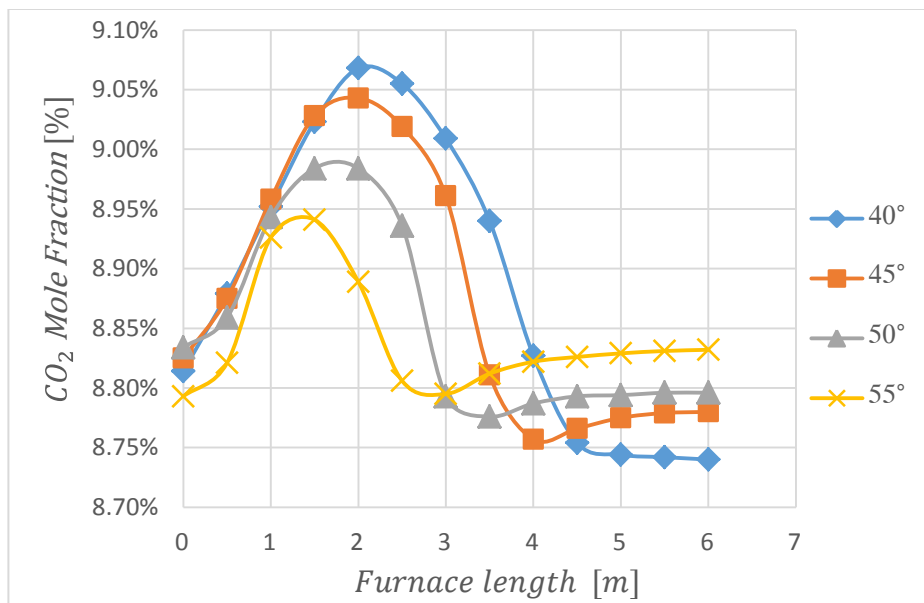
دراسة تأثير زاوية شفرات الهواء الرئيسي على خصائص الاحتراق والتوزيع الحراري لحراق دوامي باستخدام المحاكاة العددية

جدول (4): قيم درجات الحرارة الوسطية لغازات الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي

| درجة الحرارة الكلية الوسطية لغازات الاحتراق (K) | | | | | | الزاوية |
|---|------|------|------|------|------|---------|
| المسافة على الاتجاه المحوري لحجرة الاحتراق (m) | | | | | | |
| مخرج حجرة الاحتراق | 4 | 3.5 | 3 | 2.5 | 2 | |
| 1751 | 1848 | 1843 | 1834 | 1820 | 1794 | 40° |
| 1722 | 1842 | 1870 | 1860 | 1844 | 1823 | 45° |
| 1701 | 1817 | 1860 | 1897 | 1883 | 1855 | 50° |
| 1681 | 1784 | 1821 | 1863 | 1898 | 1893 | 55° |

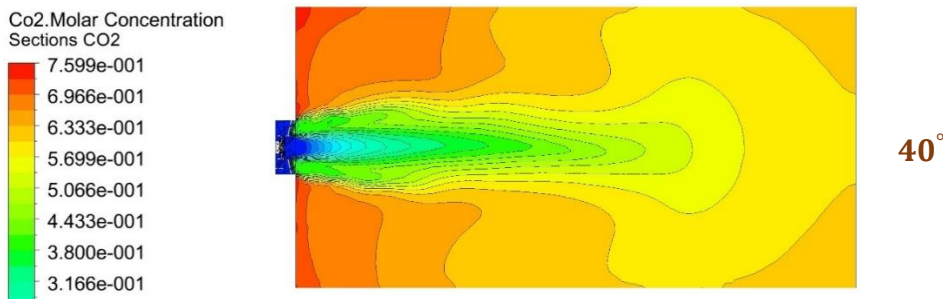
4-2- تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي:

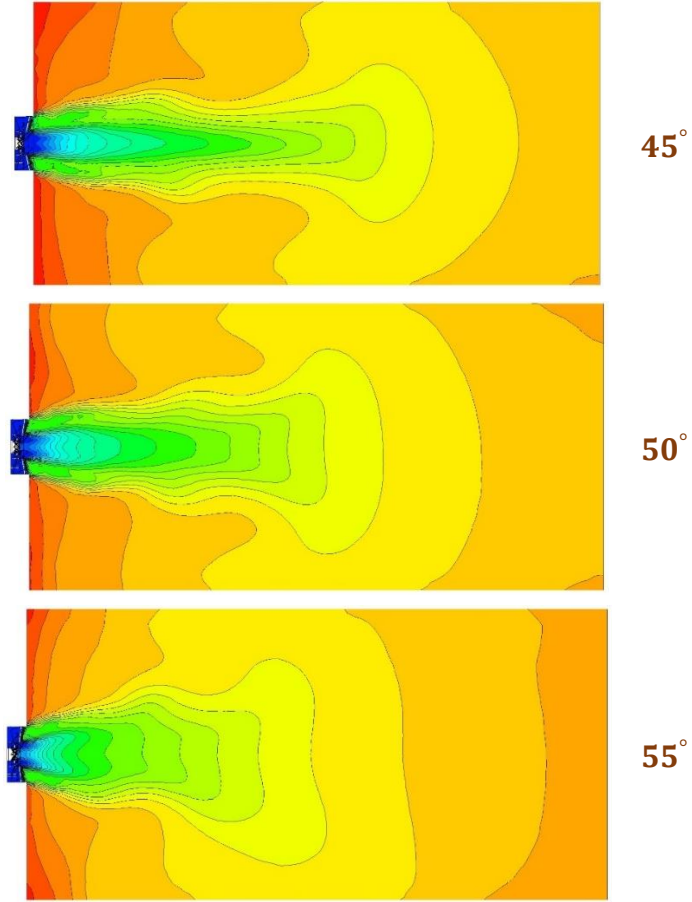
أن أهم المعايير التي تدل على جودة عملية الاحتراق هي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، حيث أنه كلما كان نسبته مرتفعة كانت عملية الاحتراق تتم بشكل أفضل، حيث يبين الرسم البياني في الشكل (12) قيم الكسر المولي الوسطي لغاز ثنائي أكسيد الكربون على الاتجاه المحوري لحجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي.



الشكل (12): العلاقة بين الكسر المولي الوسطي لثنائي أكسيد الكربون وطول حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي

يظهر الشكل (13) توزيع التركيز المولي لثنائي أكسيد الكربون داخل حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي، حيث نلاحظ انخفاض قيم التركيز في منطقة الاحتراق أمام الحراق مباشرة، ويعود سبب ذلك لعدم توفر الاكسجين الكافي في هذه المنطقة من أجل تحول أول أكسيد الكربون إلى ثاني أكسيد الكربون، هذا يتوافق مع [10]، كما نلاحظ زيادة نسبته عند الجدار الأمامي لحجرة الاحتراق، ويعود سبب ذلك الى تشكل منطقة إعادة تدوير خارجية، يؤدي تشكل هذه المنطقة الى تدوير الهواء غير المحترق الذي يحتوي على الاكسجين مما يساعد على تشكل غاز ثاني أكسيد الكربون.





الشكل (13): التركيز المولي لثنائي أكسيد الكربون داخل حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي

يوضح جدول (5) قيم الكسر المولي الوسطي لثنائي أكسيد الكربون على الطول المحوري لحجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة، ونلاحظ أن القيم متقاربة مع ملاحظة أن أعلى قيمة عند مخرج حجرة الاحتراق بلغت (8.832 %) مع زاوية شفرات 55 درجة أي أن عملية الاحتراق في هذه الحالة كانت أفضل من باقي الزوايا، ويعود سبب ذلك إلى أن المزيج في هذه الحالة يكتسب وقت أطول لإتمام عملية الاحتراق نتيجة تشكل دوامة إضافية في منطقة اللهب غير موجودة مع الزوايا الأخرى.

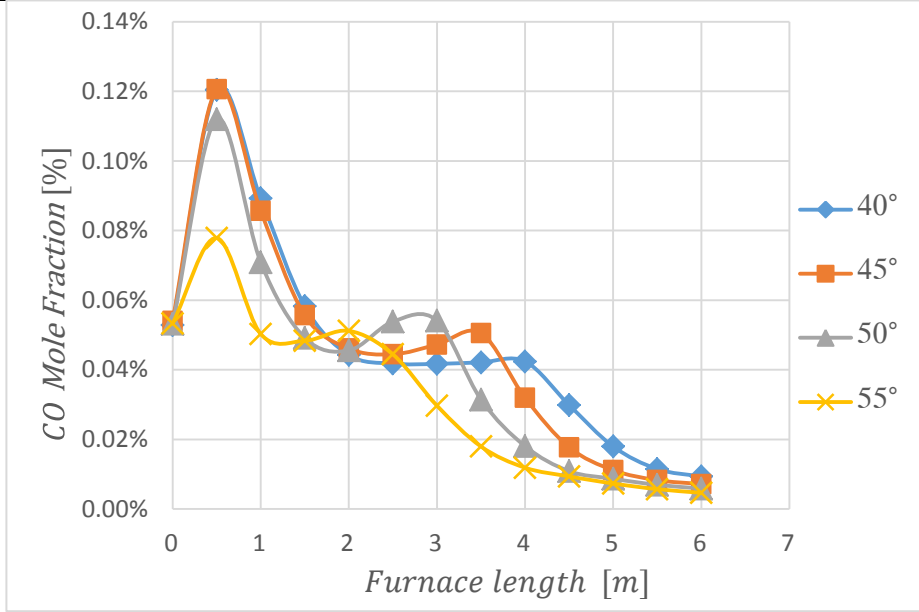
جدول (5): الكسر المولي الوسطي لثنائي أكسيد الكربون عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي

| الكسر المولي الوسطي لثنائي أكسيد الكربون عند زوايا مختلفة (%) | | | | | | | الزاوية |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| المسافة على الاتجاه المحوري لحجرة الاحتراق (m) | | | | | | | |
| مخرج حجرة الاحتراق | 4 | 3.5 | 3 | 2.5 | 2 | 1.5 | |
| 8.74 | 8.827 | 8.94 | 9.009 | 9.055 | 9.068 | 9.023 | 40° |
| 8.78 | 8.757 | 8.811 | 8.961 | 9.019 | 9.043 | 9.028 | 45° |
| 8.796 | 8.787 | 8.776 | 8.793 | 8.936 | 8.984 | 8.984 | 50° |
| 8.832 | 8.822 | 8.812 | 8.795 | 8.806 | 8.889 | 8.941 | 55° |

4-3- تركيز غاز أول أكسيد الكربون عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي:

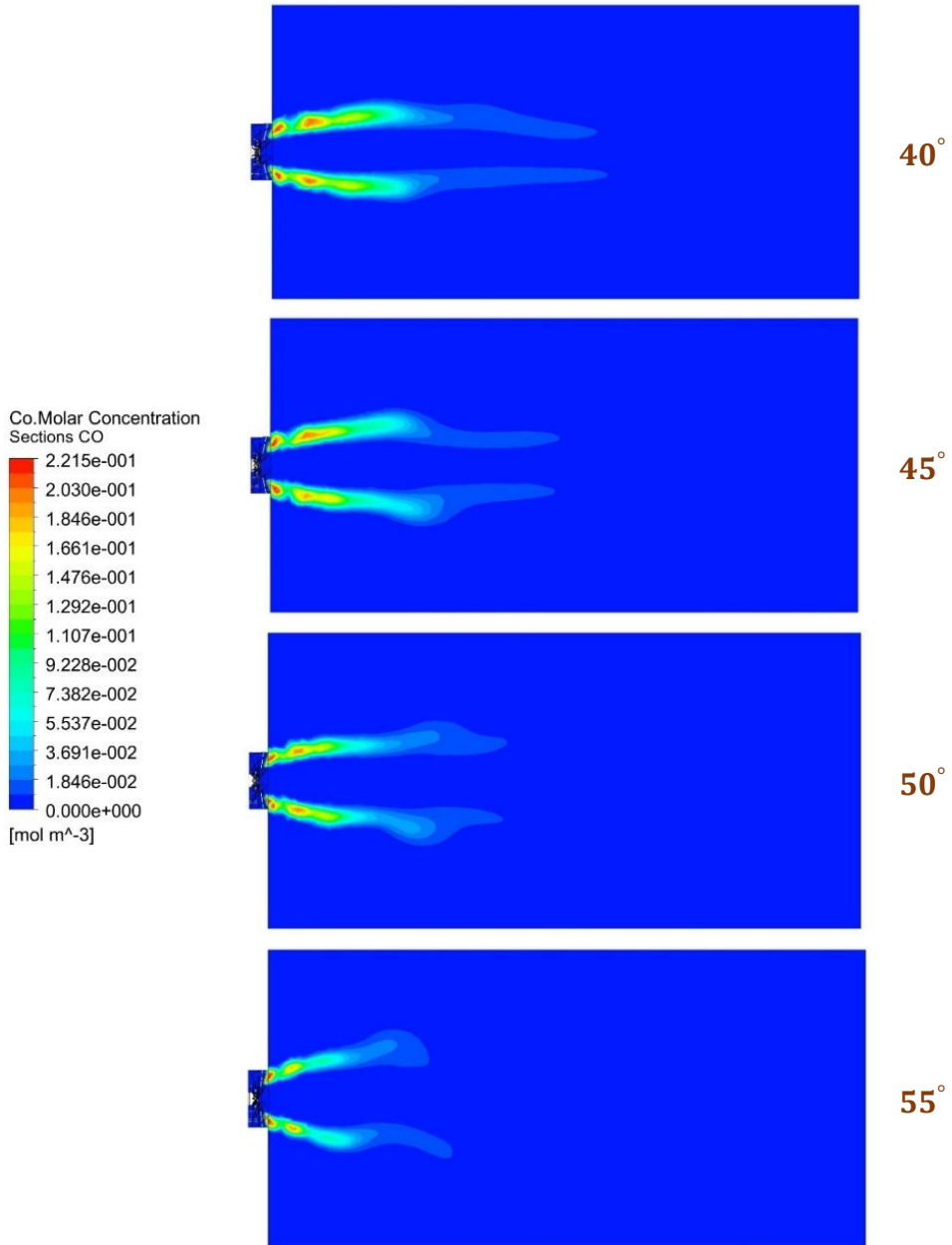
يعتبر تركيز غاز أول أكسيد الكربون من أهم المعايير التي تؤدي الى تقييم أداء معدات الاحتراق أو نظام الاحتراق المستخدم، حيث أنه كلما كانت نسبة التركيز منخفضة كانت الحراقات المستخدمة أو نظام الاحتراق ذات كفاءة أكبر، ويكون الاحتراق كاملاً عندما تبلغ قيمة التركيز صفر. يبين الرسم البياني في الشكل (14) العلاقة بين الكسر المولي الوسطي لأول أكسيد الكربون وطول حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي.

دراسة تأثير زاوية شفرات الهواء الرئيسي على خصائص الاحتراق والتوزيع الحراري لحراق دوامي باستخدام المحاكاة العددية



الشكل (14): العلاقة بين الكسر المولي الوسطي لأول أكسيد الكربون وطول حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي

يظهر الشكل (15) توزيع التركيز المولي لأول أكسيد الكربون داخل حجرة لاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي، حيث نلاحظ زيادة قيمة التركيز في منطقة الاحتراق وسبب ذلك كما ذكرنا سابقا عدم توفر الأكسجين الكافي من أجل تحول CO إلى CO_2 ، حيث يتم استهلاك الأكسجين بشكل كبير في هذه المنطقة لأن المنطقة تكون غنية بالوقود، وهذا يتوافق مع [10]، ومن ثم ينخفض التركيز في باقي حجرة الاحتراق نظراً لإتمام عملية الاحتراق، ومن الملاحظ أن قيم التركيز منخفضة في جميع الحالات، أي أنه يعتبر تغيير زاوية شفرات الهواء الرئيسي ذو تأثير منخفض على نسبة تراكيز CO ، حيث نلاحظ زيادة بسيطة في قيمة تراكيز CO في المنطقة المقابلة للحراق وذلك مع انخفاض زاوية الشفرات حيث تكون أعلى قيمة له مع زاوية شفرات 40 درجة.



الشكل (15): التركيز المولي لأول أكسيد الكربون داخل حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي

دراسة تأثير زاوية شفرات الهواء الرئيسي على خصائص الاحتراق والتوزيع الحراري لحراق دوامي باستخدام المحاكاة العددية

يوضح الجدول (6) قيم الكسر المولي الوسطي لأول أكسيد الكربون على طول حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي، حيث نلاحظ أن أعلى قيمة لتركيز بلغت (0.12 %) مع زاوية شفرات هواء رئيسي 40 و 45 درجة وعلى بعد 0.5 m، وبشكل عام نلاحظ انخفاض نسبة غاز أول أكسيد الكربون في جميع الحالات مع ملاحظة أن أقل قيمة للتركيز كانت عند المخرج مع زاوية شفرات هواء 55 درجة حيث بلغت قيمة التركيز حوالي (0.005 %)، أي أن القيمة قريبة من الصفر بالتالي يعتبر الاحتراق شبه كاملاً، ويعود سبب ذلك إلى أن المزيج يكتسب أكبر وقت ممكن من أجل تحول غاز CO إلى CO₂، كما نلاحظ في هذه الحالة انخفاض قيمة التركيز في منطقة الاحتراق بالمقارنة بالحالات الأخرى بسبب عملية المزج الأفضل.

جدول (6): الكسر المولي الوسطي لأول أكسيد الكربون عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي

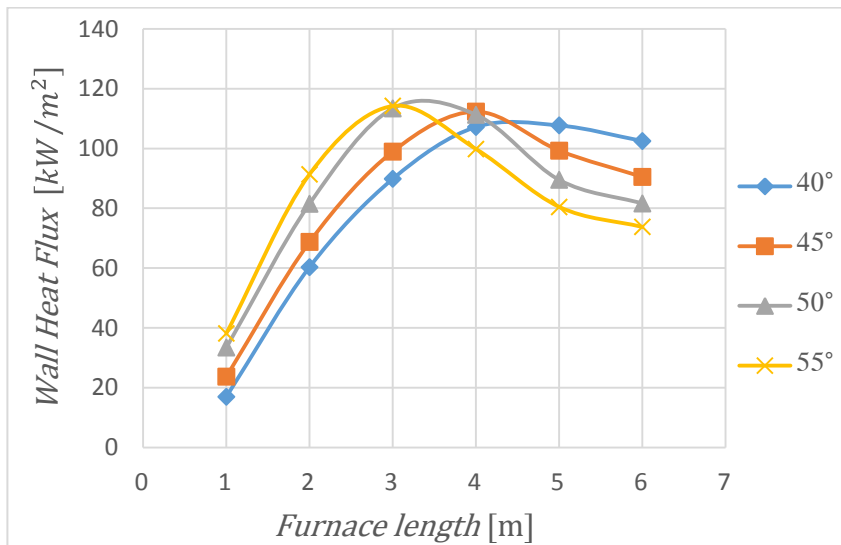
| الزاوية | الكسر المولي الوسطي لأول أكسيد الكربون عند زوايا مختلفة (%) | | | | | | |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| | المسافة على الاتجاه المحوري لحجرة الاحتراق (m) | | | | | | |
| | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | مخرج حجرة الاحتراق |
| 40° | 0.12 | 0.089 | 0.059 | 0.045 | 0.042 | 0.042 | 0.01 |
| 45° | 0.12 | 0.085 | 0.056 | 0.046 | 0.045 | 0.047 | 0.007 |
| 50° | 0.112 | 0.071 | 0.049 | 0.045 | 0.054 | 0.054 | 0.006 |
| 55° | 0.079 | 0.05 | 0.048 | 0.051 | 0.045 | 0.029 | 0.005 |

4-4- كمية الحرارة المتدفقة من جدران حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات

الهواء الرئيسي:

تعتبر كمية الحرارة المتدفقة من جدران الأفران وحجر الاحتراق من القيم الأساسية في تقييم أداء حجرة الاحتراق في امتصاص هذه الحرارة، وكلما كانت كمية الحرارة أكبر كانت كمية الحرارة التي يتلقاها الوسيط العامل أكبر، كما أن قيمة كمية الحرارة المتدفقة من مخرج حجرة الاحتراق تعبر عن الكمية المطروحة إلى الوسط الخارجي أي كلما كانت منخفضة كان أداء الحجرة أفضل، ويوضح الرسم البياني في الشكل (16) العلاقة بين

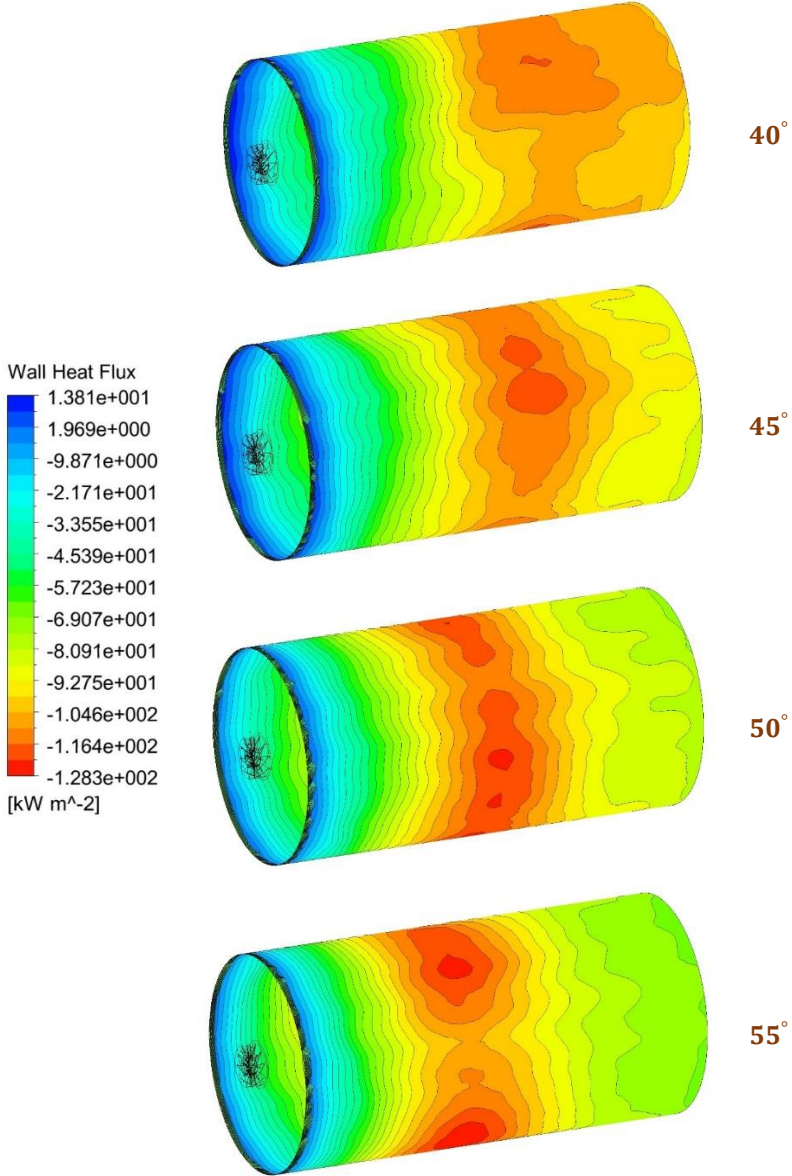
التدفق الوسطي للحرارة من جدران حجرة الاحتراق وطول حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي.



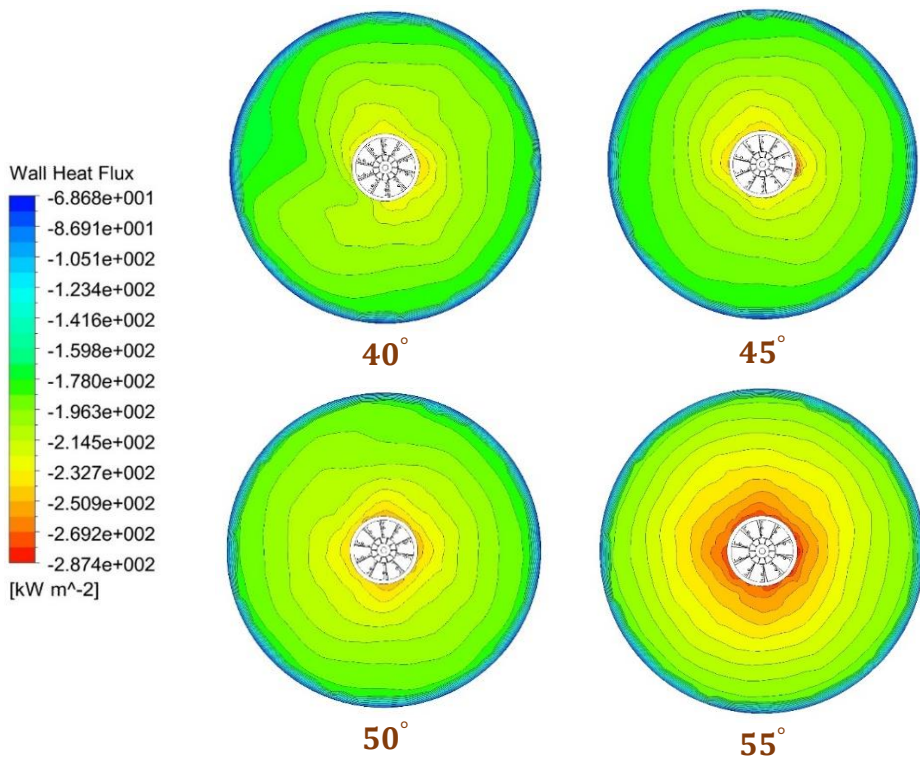
الشكل (16): العلاقة بين التدفق الوسطي للحرارة من الجدار المحوري لحجرة الاحتراق وطول حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي

يوضح الشكل (17) توزيع التدفق الحراري على الجدار المحوري لحجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي، حيث نلاحظ أن أكبر كمية حرارة يتلقاها الجدار كانت مع زاوية شفرات 55 درجة بالمقارنة مع الزوايا الأخرى، كما نلاحظ أن القيمة العظمى تكون في منتصف جدار حجرة الاحتراق ويتوزع بشكل كامل على حجرة الاحتراق، ويعود سبب ذلك إلى زيادة القطر الشعاعي للهب ونقصان الطول المحوري له، بعكس الحالة عندما كانت زاوية الشفرات 40 درجة حيث نلاحظ أن أعلى قيمة للتدفق الحراري كانت في نهاية حجرة الاحتراق بالتالي لا ينتهي للهب فقد كمية حرارة كبيرة قبل الخروج من حجرة الاحتراق، كما يوضح الشكل (18) توزيع التدفق الحراري على الجدار الأمامي لحجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي، ونلاحظ هنا أيضاً أن أكبر كمية حرارة يتلقاها الجدار الأمامي لحجرة الاحتراق كانت مع زاوية شفرات 55 درجة، وسبب ذلك هو أنه مع هذه الزاوية يصبح اللهب أقرب إلى الجدار مما يزيد من

حرارته وكمية الحرارة التي يمتصها، وبعكس الحالة عندما كانت زاوية الشفرات 40 درجة حيث نلاحظ انخفاض كمية الحرارة التي يتلقاها الجدار بشكل كبير.



الشكل (17): توزيع التدفق الحراري على الجدار المحوري لحرارة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي



الشكل (18): توزيع التدفق الحراري على الجدار الأمامي لحجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي

يوضح جدول (7) القيم الوسطية لكمية الحرارة المتدفقة من الجدار المحوري لحجرة الاحتراق ومن مخرج حجرة الاحتراق ومن الجدار الأمامي عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي، نلاحظ أن أقل كمية حرارة مطروحة من مخرج حجرة الاحتراق كان مع زاوية شفرات 55 درجة حيث بلغت كمية الحرارة (70.57 kW/m^2)، وبالتالي تكون الكفاءة الحرارية في هذه الحالة هي الأفضل حيث يتم انتقال أكبر كمية من الحرارة إلى الجدران، ويعود سبب ذلك إلى قصر طول اللهب وتوسع اللهب بشكل شعاعي، كما أن الغازات في هذه الحالة تبقى لفترة طويلة داخل حجرة الاحتراق نتيجة لدرجة التدويم الكبيرة، وبالتالي نقل القسم الأكبر من الحرارة إلى الجدران وتخفيض نسبة الضياعات الحرارية إلى أقل قدر ممكن، بالمقارنة مع القيمة عندما كانت زاوية الشفرات 40 درجة نلاحظ أن القيمة في هذه الحالة أكبر بحوالي 26% حيث بلغت قيمة التدفق (95.38 kW/m^2)، كما نلاحظ أن أكبر كمية حرارة مطروحة من الجدار الأمامي

دراسة تأثير زاوية شفرات الهواء الرئيسي على خصائص الاحتراق والتوزيع الحراري لحراق دوامي باستخدام المحاكاة العددية

لحجرة الاحتراق كانت أيضاً مع زاوية شفرات 55 درجة حيث بلغت قيمة التدفق (216.5 kW/m^2)، ويعود سبب ذلك إلى توسع قطر اللهب بشكل شعاعي وكذلك اقتراب اللهب من الجدار بشكل أكبر مما يؤدي إلى تلقي الجدار لأكبر كمية حرارة ممكنة والتي تنتقل بالنتيجة إلى الوسيط العامل بالتالي تكون الكفاءة الحرارية في هذه الحالة أكبر، وبالمقارنة مع كمية الحرارة المتدفقة من الجدار الأمامي عندما كانت زاوية الشفرات 40 درجة نلاحظ أن القيمة أقل بحوالي 10.3% حيث بلغت قيمة التدفق الحراري في هذه الحالة حوالي (194.1 kW/m^2).

جدول (7): القيم الوسطية لكمية الحرارة المطروحة عبر جدران حجرة الاحتراق عند زوايا مختلفة لشفرات الهواء الرئيسي

| كمية الحرارة المتدفقة عبر جدران حجرة الاحتراق (kW/m^2) | | | | | | الزاوية |
|---|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|---------|
| المسافة على الاتجاه المحوري لحجرة الاحتراق (m) | | | | | | |
| مخرج حجرة الاحتراق | 6 | 5 | 4 | 3 | الجدار الأمامي لحجرة الاحتراق | |
| 95.38 | 102.5 | 107.7 | 107.2 | 89.83 | 194.1 | 40° |
| 84.45 | 90.48 | 99.27 | 112.3 | 98.97 | 195.4 | 45° |
| 76.02 | 81.59 | 89.47 | 111.3 | 113.4 | 201 | 50° |
| 70.57 | 73.74 | 80.46 | 99.81 | 114.2 | 216.5 | 55° |

5- الاستنتاجات والتوصيات:

1. نلاحظ مع زيادة زاوية الشفرات ينخفض الطول المحوري للهب ويزداد القطر الشعاعي له، مما يعطي اللهب وقت أكبر داخل حجرة الاحتراق يؤدي إلى إتمام عملية الاحتراق وانتقال الحرارة بشكل أكبر إلى جدران حجرة الاحتراق حيث كانت أكبر درجة حرارة لجدران حجرة الاحتراق المحورية بالإضافة إلى الجدار الأمامي مع زاوية شفرات هواء رئيسي 55 درجة.

2. كانت أكبر نسبة لانبعاثات CO_2 عند مخرج حجرة الاحتراق مع زاوية شفرات هواء رئيسي 55 درجة، حيث بلغت حوالي (8.832 %) هذا يدل على أن عملية الاحتراق في هذه الحالة كانت أفضل بالمقارنة مع الزوايا الأخرى.
3. يمكن ملاحظة أن تأثير زاوية شفرات الهواء الرئيسي كان منخفض على انبعاثات غاز CO ، إذ نجد أن جميع القيم صغيرة جداً مع وجود فرق بسيط عند المخرج حيث بلغت أقل قيمة للانبعاثات عند المخرج حوالي (0.005 %) مع زاوية شفرات 55 درجة.
4. أفضل أداء حراري من حيث كمية الحرارة المطروحة من جدران حجرة الاحتراق كان مع زاوية شفرات 55 درجة، إذ بلغت كمية الحرارة المطروحة من الجدار الأمامي في هذه الحالة حوالي (216.5 kW/m^2)، مع ملاحظة تقارب الحالتين 55 و 50 درجة من حيث كمية الحرارة المطروحة من الجدران.
5. أقل كمية حرارة مطروحة من مخرج حجرة الاحتراق تتحقق مع زاوية شفرات 55 درجة حيث بلغت حوالي (70.57 kW/m^2)، بالتالي تكون الكفاءة الحرارية لحجرة الاحتراق هي الأفضل في هذه الحالة.

التوصيات:

1. دراسة تأثير تغيير زاوية شفرات الهواء الثانوي فقط على أداء الحراق الدوامي.
2. دراسة تأثير تغيير زاوية شفرات الهواء الرئيسي والثانوي معاً على أداء الحراق.
3. دراسة تأثير تغيير عدد شفرات الهواء الرئيسي والثانوي على كفاءة الحراق الدوامي.
4. دراسة الحراق المذكور عند عمل الحراق على الوقود السائل (فيول).

- [1] H. S. Hasan, Steam generators, Homs: Al-Baath University Publications, 2019, pp. 47–80, in Arabic.
- [2] N. Beér and J. Syred, "Combustion in Swirling Flows: A Review," *Sheffield University. Sheffield SI 3JD, Engbtrd*, pp. 144–152, 1974.
- [3] Prvi Brnenska Strojirna Company, Technical Book of Conditions for Requalification of Power Plant Blocks No.1, No.2 in Homs Refinery, Czech Republic: First Brno Engineering Works, 2008.
- [4] Prvi Brnenska Strojirna Company, Homs Refinery Extension VI: Built-Up Design, Prague: First Brno Engineering Works.
- [5] B. S. A. Alganash, Numerical investigation of the combustion processes of various combustion regimes, Glasgow, UK: University of Glasgow, 2015.
- [6] ANSYS Fluent Theory Guide 19.0, Canonsburg, PA, US: ANSYS, Inc., 2017.
- [7] W. Jones and J. Whitelaw, "Calculation methods for reacting turbulent flows: A review," *Combustion and Flame*, pp. 1–26, 1982.
- [8] V. Ganapathy, Steam Generators and Waste Heat Boilers: For Process and Plant Engineers, CRC Press, Taylor &

Francis Group, 2015, pp. 1–16.

- [9] I. Yılmaz, "Effect of Swirl Number on Combustion Characteristics in a Natural Gas," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 135, December 2013.
- [10] M. K. Büyükakın and S. Öztuna, "Study on nonpremixed methane/air combustion from flame structure and NOX emission aspect for different burner head structures," *International Journal of Energy Research*, 10 May 2019.

