

تأثير حاملات اللهب الانتشاري في تفاعل وقود غاز البترول المسال مع الهواء في الحراقات الصناعية

م. جاسم محمد عبد الكريم*

أ.د. عبد الحسن عبد كرم الله***

أ.د. محمد جلال الملقى**

الملخص

تشكل دراسة تطور اللهب الانتشاري أهمية خاصة في تطبيقات الحراقات الصناعية وتصميمها، من أجل ذلك صُنِعَ حراق انتشاري من معدن الفولاذ. كما أعدت ثلاثة نماذج ذات أشكال هندسية مختلفة لحاملات اللهب هي: حامل اللهب ذو الشكل المتباعد من الداخل والخارج (Diverge Inside Outside Bluff-Body)، وحامل اللهب ذو البروزات (Rods Bluff-Body) وحامل اللهب المركب (Combined Bluff-Body). فضلاً عن ذلك صُمِّمَتْ وأُعدَّتْ منصة تجارب متكاملة مع مجموعة من منظومات التحكم بجريان الوقود والهواء لتهيئة ظاهرة الاحتراق المدروسة. كما أُعدَّتْ منظومة شليرن بصرية ليزيرية (Schlieren Photography)، حيث قيس طول اللهب الدوامي الانتشاري وارتفاعه (Diffusion Recirculation Flame) وتمَّ الحصول على نتائج واسعة في حقل التفاعل والانتشار من خلال تحليل صور شليرن لجبهة اللهب، وتلك الأبعاد بمقدار ($H_{Vorticity} = 54\text{mm}$ و $W_{Vorticity} = 52.5\text{mm}$) مما يؤدي إلى توسيع مجالات استقرارية جبهة اللهب فوق الحراق. دُرِسَ تأثير الدوامات والانتشار في معامل طول السخام الحر Soot Free Length Fraction إذ يُعدُّ من المحددات المهمة في التطبيقات الصناعية للحراقات، المؤدية إلى تقليل انبعاث الملوثات والغازات السامة، وتم التوصل إلى نتائج ذات مجالات واسعة هي ($SFLF=0.2$) لم يتم التوصل إليها مسبقاً مقارنةً بنتائج البحوث المنشورة.

الكلمات المفتاحية : اللهب الانتشاري - الحراقات الصناعية

* أَعَدَّ البحث في سياق رسالة الدكتوراه للطالب جاسم محمد عبد الكريم بإشراف الدكتور محمد جلال الملقى ومشاركة الدكتور عبد الحسن عبدكرم الله.

** قسم هندسة الميكانيك العام - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

*** قسم هندسة المكائن والمعدات - الجامعة التكنولوجية - العراق.

1. مقدمة عامة

في حالة اللهب الانتشاري (Diffusion Flame) يدخل الوقود والمؤكسد (Fuel and Oxidizer) بشكل منفصل، وتقل بذلك مخاطر الاحتراق المفاجئ أو الانفجار (Explosion) بشكل كبير، على عكس ما هو عليه الحال في اللهب مسبق الخلط (Premixed Flame).

يتشكل اللهب الانتشاري نتيجة لحركة الوقود والهواء (المؤكسد) باتجاهين متعاكسين، حيث يحدث الخلط الجزئي بينهما، ومن ثم الاشتعال وتشكيل اللهب. يرتبط معدل احتراق الوقود بكل من إجراء الخلط الجزئي (Molecular Mixing) والتفاعلات الكيميائية، وتحدث الأخيرة بسرعة كبيرة نسبياً، فيما يؤدي تسريع الخلط إلى زيادة معدلات الاحتراق بشكل عام [2].

بمتابعة البيانات العملية من الدراسات السابقة [2]، نجد أن منطقة التفاعل في اللهب الانتشاري تكون رقيقة تماماً (Thin) عند الخلط المتجانس، وبذلك يمكن عدّها كجبهة لهب (Flame Front).

تتشكل جبهة اللهب عادة عندما يحقق جريان المركبات الأصلية في منطقة الاحتراق شرط الخلط الكيميائي المثالي (Stoichiometric Ratio). وتصل درجة حرارة الغازات المحترقة إلى درجة الحرارة الأديباتية للاحتراق الكيميائي المثالي، لاحظ الشكل (1) [3].

يمكن الافتراض، (في شروط الحصول على أعلى درجات الحرارة في منطقة التفاعل)، بأن الانتشارية الحرارية والكتلية لكل من المركبات المتفاعلة والنتيجة متساوية تقريباً.

يعدّ طول اللهب من المحددات المهمة والرئيسة في اللهب الانتشاري. ولتحديد طول اللهب الانتشاري يفترض أنّ قمة اللهب واقعة تقريباً عند النقطة المحورية التي يصل عندها الهواء إلى خط محور نفاث الوقود (Centerline Jet) [2]، وعن ذلك نجد أنه يمكن وصف طول اللهب

من خلال معادلات تأخذ بالحسبان الزمن المطلوب لجريان الهواء حتى يصل إلى خط المركز عن طريق الانتشار:

$$t_d \mathbf{p} \frac{r_j^2}{D_{if}} \quad (1)$$

إذ إنّ (r_j) نصف قطر نفاث الوقود، و (D_{if}) هي انتشارية الكتلية.

إذ يعدّ (t_d) المدة الزمنية اللازمة لوصول جريان الهواء الحلقي إلى خط مركز نفاث الوقود والاختلاط بين الوقود. والهواء عند ذلك الخط. ومسافة انتقال الوقود خلال زمن الانتشار يعبر عنها بالمعادلة:-

$$L_f \mathbf{p} t_d \cdot V_j \quad (2)$$

إذ (V_j) تمثل سرعة الوقود الخارج من المنفذ و (L_f) ارتفاع اللهب، ومن ثم نحصل على:

$$L_f = \frac{r_j^2 \cdot V_j}{D_{if}} \mathbf{p} \frac{\mathcal{G}_f}{D_{if}} \quad (3)$$

وتمثل (\mathcal{G}_f) معدل التدفق الحجمي للوقود.

إن لحامل اللهب دوراً مهماً وأساسياً في تثبيت استقرارية اللهب الانتشاري، ذلك لتأثيره البالغ في شكل وديناميكية الجريان، الذي بدوره يسيطر على استقرارية اللهب. لذا يركز أكثر الباحثين على الشكل الهندسي له عند تصميم الحراقات الصناعية، [1]. إنّ خصائص اللهب الانتشاري المستقر فوق جسم حامل اللهب وتركيبه تمر بسلسلة من الإجراءات:

عند سرعة جريان الهواء الحلقي غير العالية تتشكل جبهة لهب انتشاري صفائحي متناظر ومستقر فوق حامل اللهب، وتؤدي زيادة سرعة الهواء (U_a) إلى ظهور الطور الانتقالي، لأنّ ظاهرة الاستقرارية تتغير من اللهب

الاحتراق الصناعي (Industrial Combustion System) والمرجل البخارية الصناعية، فضلاً عن استخدامه في دراسة المبادئ الأساسية لخصائص اللهب الاضطرابي [12].

إن إنتاج وتصميم آلية عمل الحراقات لها تأثير كبير في استقرارية عالية وعند شروط الاحتراق الانتشاري يتطلب إجراء دراسات تجريبية تساعد في توضيح التحولات الفيزيائية والكيميائية في منطقة الاحتراق، وهذا بدوره يؤدي إلى تحسين شروط الاحتراق باتجاه تخفيض نواتج الاحتراق غير التام والملوثات البيئية.

وصف منصة التجارب

تتألف منصة التجارب التي أُعدت في بحثنا الحالي من مجموعة منظومات تساعد في إعداد ظاهرة الاحتراق الانتشاري، وهي نظام إمداد الوقود والهواء، والحرارة الانتشاري، ومنظومة شليرن البصرية. والشكل (2) يبين صورة فوتوغرافية متكاملة لمنصة التجارب.

1- نظام امداد الوقود والهواء

من أجل الحصول على استقرارية تدفق الوقود والهواء المجهز وانتظامه استُخدم عدد من الصمامات ذات النوع الإبري والكروي ومنظمات الضغط من النوع النابض المحمل (Spring Loaded Valve) وجرى التحكم بوحدة تجهيز وقود غاز البترول المسال (Liquefied Petroleum Gas) (LPG) من خلال صمام تحكم كروي ومنظم ضغط يوضعان بعد إسطوانة الوقود القياسية. أمّا وحدة تجهيز الهواء فهي ضاغط ترددي ذو ضغط (11bar). يجهز كل من الوقود والهواء خلال مقاييس التدفق (Flowmeters) لغرض قياس معدل التدفق الحجمي للوقود والهواء.

الانتشاري التقليدي إلى الإجراءات الاستقرارية للهب الانتشاري المعقد، وتتضمن منطقة الانتقال هذه ثلاثة أشكال للهب وبشكل متعاقب:

أولاً: يتشوه مظهر جبهة اللهب وبعدها يصل اللهب إلى سلوك يتصف بالانتفاخ (Bulge Flame)، من ثم يصل إلى حالة السخام.

ثانياً: ينفصل اللهب وتقل الاستقرارية (Detached).

ثالثاً: في نهاية الطور الانتقالي، يتحرك اللهب مع الجريان باتجاه الاستقرارية مرة أخرى، ويستقر على سطح حامل اللهب. حيث تدعى بمنطقة إعادة الاتصال (Reattached). هذه هي آلية الاستقرارية للهب الانتشاري باستخدام جسم حامل اللهب [11].

قام الباحثون [8,9,15] بدراسة شروط الاستقرارية باستخدام حامل اللهب، ولوحظ وجود تأثير أساسي له في استقرارية اللهب، ووجدوا أنه عند سرعات الوقود المتدنية، سيتحول اللهب الانتشاري إلى ثلاث مناطق لهب مستقرة هي: لهب منطقة الدوامات، لهب النفث المركزي السائد، واللب النفث.

إذ تعتمد أنواع اللهب المذكورة أعلاه على شكل حامل اللهب، ونسبة سرعة الهواء الحلقي إلى سرعة تدفق الوقود المركزي.

قام الباحثون [4] بدراسة تأثير سمك حافة حامل اللهب في استقرارية اللهب الانتشاري، وفي خصائص ومتغيرات فيزيائية أخرى مثل طول اللهب ومعامل الإشعاع الحراري (Radiant Fraction) ومنحنى توزيع درجة الحرارة وخصائص الغازات السامة المنبعثة (NO_x)، في تلك التجارب استخدم وقود مؤلف من غاز البترول المسال (LPG) مع الهيدروجين.

يعدُّ جسم حامل اللهب ذا أهمية كبيرة في التأثير في استقرارية اللهب الانتشاري، لأنه يستخدم في منظومات

2-تصميم الحراق

صُمِّمَ وصُنِّعَ الحراق الانتشاري من معدن الفولاذ بطول (900mm) وبقطر جريان هواء حلقي ($D_a=55mm$)، وكذلك استخدم أنبوب لفتت الوقود من مادة النحاس بقطر ($D_f=4mm$) يوضع في مركز أنبوب الحراق. الشكل (3) يبين مخططاً لشكل الحراق والتفاصيل الداخلية.

ومن أجل الحصول على منطقة دوامات لغرض التفاعل والانتشار صُمِّمَت وصُنِّعَت ثلاثة أنواع لحاملات اللهب من معدن الفولاذ ذات أشكال هندسية مختلفة، توضع في قمة الحراق . بسمك (10mm) وقطر (35mm) والشكل (4) يبين ثلاثة نماذج لحاملات اللهب صُمِّمَت واستُخدِمَت في البحث الحالي بنسبة الإعاقة (Blockage Ratio) ($BR=0.636$)، وحُسِبَت كما هو مبين في المعادلة:

$$BR = \frac{D_b}{D_a} \quad (4)$$

وتمثل (D_b) قطر جسم حامل اللهب و (D_a) قطر الحلقي لجريان الهواء. تعتمد حراقات اللهب الانتشاري على سلوك جريان الهواء وآلية استقراره وانسيابه، لذلك صُمِّمَت مجموعة استقرار جريان الهواء، وتتكون من قرص معدني على شكل خلية النحل (Honeycomb) تحوي على عدد كبير من الثقوب بقطر (2mm)، ويركب فوقها حاجز شبكي دائري الشكل (Mesh Screens) مكون من أسلاك دقيقة. ويوزع فوق هذا الحاجز عدد من الكرات المعدنية (Stainless Steel Balls) بقطر (3mm)، ومن ثم يوضع فوقها حاجز شبكي آخر.

3-منظومة شليرن البصرية

تتصف التقنيات البصرية المعاصرة المستخدمة في اللهب الانتشاري بإمكانية قياس توزيع مركبات السرعة، وقياس كل من الضغط، ودرجات الحرارة، وتراكيز المكونات، كذلك قياس كمية انتقال الحرارة والكتلة. إنَّ تطبيقات رؤية الجريان تغطي الحيز الأوسع في علوم الهندسة،

والتجارب الفيزيائية، ويعود استخدامها في بحوث الاحتراق إلى القرن الماضي. لكن أدى اكتشاف الليزر إلى تسهيل تطبيق هذه التقنيات واستعمالها بشكل خاص، خصوصاً عندما يكون تغير الكثافة في الجريان ضئيلاً، ولهذا السبب تستعمل في دراسة توزيع درجات الحرارة والسرعة عند جبهة اللهب، وتطبيقات هذه التقنية استعملت من قبل [7].

يعدُّ التفاعل الدوامي في الاحتراق الانتشاري العنصر الأهم والأساس في فعالية الحراقات الصناعية، وقد سلَّط الضوء عليه من قبل عدد كبير من الباحثين، حيث عُدَّ شكل التفاعل الدوامي من قبلهم [6,10,11] قاعدة للفهم الحقيقي لاستقرار اللهب الانتشاري المتذبذب، لذا قيس مجال السرعة داخل اللهب باستخدام تقنية صورة سرعة الجزيئات (Particle Image Velocimetry).

أ - ترتيب منظومة شليرن البصرية واختيارها

تعدُّ منظومة شليرن واحدة من الأنظمة البصرية المعتمدة على بعض الاعتبارات في حقل البصريات الهندسية والموجية [14]. ويمكن تصميم منظومة شليرن باستعمال عناصر بصرية مثل المرايا أو العدسات، لأنها تعطي تبايناً بدقة عالية لغرض تمييز الحالة المدروسة بواسطة العين المجردة أو فلم تصوير. في هذا البحث استخدمت العدسات في إظهار معالم الصورة البصرية المطلوبة، أي في تركيب المنظومة أو ماتسمى بمعالجة شليرن البصرية.

ب - تصميم مجموعة موسع الحزمة

في تصميم أي نظام قياس بصري يجب أولاً اتخاذ القرار بشأن مجال حقل الدراسة الذي سوف يغطيه، وثانياً تحديد متطلبات الوضوح بالحدود القصوى من التباين ومقدار سطوع الجسم، وغيرها من المتطلبات.

في البحث أُجريت تجارب عملية على نماذج حاملات اللهب ذات الأشكال الهندسية المختلفة للحصول على أفضلها من ناحية عملية خلط الهواء والوقود، ومن ثم الحصول على أعلى حدود لاستقرارية اللهب الانتشاري.

أ- إعداد منظومة شليرن البصرية

إن من أهم الأمور الواجب مراعاتها في المنظومة البصرية هي:

1- نظافة العدسات إذ تشمل عملية التنظيف استعمال الكحول وورق تنظيف خاصاً أو قطناً.

2- تركيب كل عدسة على الحامل وتنظيم محاورها، حيث يتم التأكد من ذلك عن طريق تشغيل جهاز الليزر وإسقاط حزمة الشعاع الموسع على الشاشة (Screen) المكونة من ورقة بيضاء مثبتة على لوح قابل للحركة فيجب أن تعطي صورة دائرية متناظرة تماماً على الشاشة وخالية من مناطق حيود داكنة أو بقع.

3- تحديد موقع المستوى القاطع، إذ يعدُّ ذا أهمية كبرى في منظومة تصوير شليرن ويحتاج ذلك على دقة عالية لأنه باختلاف هذا الموقع تفشل صورة شليرن وتصبح صورة متداخلة بين منطقة الظل ومنطقة شليرن، ويكون هذا الموقع تحديداً بين بؤرة العدسة المركزة للأشعة والبؤرة المكافئة للكاميرا.

ب- قياس عرض دوامات جبهة اللهب وارتفاعها

تعدُّ هذه التجربة لمعرفة مدى التفاعل والانتشار للوقود والهواء فوق منطقة حامل اللهب، أُجريت هذه التجربة بحسب الفقرات أدناه:

1- تثبت سرعة الوقود خلال طول مدة التجربة كلياً.

2- نبدأ بزيادة سرعة الهواء إلى حين الحصول على أول قراءة تحدث عندها الدوامات عند

بالإضافة من مواصفات الحراق يتبين أنَّ مجال حقل الدراسة يتناسب وارتفاع منطقة دوامات اللهب الانتشاري وعرض حاملات اللهب المصممة كلياً في هذا البحث. وعلى أساس هذا التخمين يمكن عدُّ عرض حقل الدراسة وارتفاعه أقل من (90mm)، إذا يعدُّ قطر العدسات (100mm) يغطي بشكل مناسب مجال حقل الدراسة المطلوب.

تتكون مجموعة موسع الحزمة من عدد من العدسات (L_1, L_2, L_3) الموضحة بالشكل (5) [13]، رتبت العدسات بالإضافة من عمل تلسكوب (غاليليو) الذي ينص على أن يكون البعد البؤري المكافئ لمنظومة التلسكوب (le) غير محدد.

$$le = \frac{l_1 \cdot l_2}{l_1 + l_2 - l_3} = \infty \quad (5)$$

يأخذ البعد البؤري (l_1) قيمة سالبة، أي بمعنى استعمال عدسة سالبة، وبذلك تكون قيمة البعد البؤري (l_2) أقل من (l_1) وهذه النتيجة تساعد في تقليل المسافة بين العدسات.

ج- تصميم مجموعة مركز الحزمة

تتألف هذه المجموعة من العدسة (L_4) ذات قطر (100mm) وبعد بؤري (339mm)، ومن مستوي قاطع (CO) متمثل بسلك رقيق قطره (0.25mm)، حيث تُظهر من خلال هذه المجموعة صورة شليرن على شاشة العرض أو فلم التصوير. الشكل (5) يوضح الترتيب البصري لعناصر مجموعة مركز الحزمة وطريقة ملاعته مع الكاميرا.

4- شروط إجراء التجارب العملية

المبدأ الأساس لرفع كفاءة الحراقات الانتشارية هو زيادة إيروديناميكية الهواء ودرجة اضطراب منطقة إعادة التدوير (Recirculation Zone) التي تسبب زيادة الدوامات (Vorticity) في منطقة حامل اللهب.

$$SFLF = \frac{L_b}{L_f} \quad (6)$$

د - تسجيل صورة شليرن للهب الانتشاري

باستخدام كاميرا نوع (NIKON) سُجِّلَتْ صور شليرن للهب الانتشاري، بالاعتماد على نسب الخلط لخليط (غاز البترول المسال مع الهواء) لثلاثة نماذج من حاملات اللهب، وهذه الكاميرا لها إمكانية تصوير خمس وعشرين صورة في الثانية الواحدة، ويمكن مشاهدة نموذج لنتائج التصوير في الشكل (8). للحصول على الأبعاد الحقيقية في الشكل الهندسي لارتفاع اللهب الدوامي وعرضه استُخدمَ محدد قياس بفتحة مقدارها (14mm)، كما هو موضح في الأشكال السابقة ويوضع بمحاذاة جبهة اللهب الانتشاري.

هـ معالجة صور شليرن

بعد أن أُعِدَّتِ الترتيبات الضرورية كُلِّها في الفقرات السابقة بغرض إجراء التجارب النهائية، تُوخِّدُ صور متتالية للهب الانتشاري. ويمكن مشاهدة نموذج لنتائج التصوير في الشكل (8)، أمَّا الشكل (9) فيبيِّن سلوك اللهب الدوامي من مقطع أفقي لجبهة اللهب الانتشاري وباختلاف شكل حاملات اللهب.

ولترجمة هذه الصور إلى أرقام أُدخِلَتْ إلى الحاسوب باستعمال جهاز الماسح (Scanner) بتباين (Resolution) عالٍ أكبر أو يساوي (400 Pixel/cm)، بعدها تُفْتَحُ ملفات الصور باستعمال البرنامج الجاهز (Adobe Photo Shop CS5)، إذ يمكن بواسطته تكبير الصورة مع الاحتفاظ بمواصفاتها البصرية، كذلك يحوي البرنامج على الإحداثيات التي يمكن بواسطتها استخراج نقاط السطح بدقة عشر المليمتر، وهي عرض دوامات اللهب، وارتفاع دوامات اللهب وأي بعد آخر يراد قياسه في اللهب. أعطت الإشارة أعلاه لهذا البرنامج مدى الفائدة

$$(Re_a=1150.5)$$

3- باستخدام منظومة شليرن البصرية نعمل على قياس ارتفاع الدوامات ($H_{vorticity}$) وعرض الدوامات ($W_{vorticity}$).

4- نعمل على زيادة سرعة الهواء أكثر، ومن ثم نقيس منطقة أخرى لارتفاع الدوامات وعرضها، وهكذا حتى نصل إلى آخر قيمة لسرعة الهواء التي تحدث عندها الدوامات عند ($Re_a=3963$).

5- تعاد التجارب عند القيم نفسها لسرعة الهواء والوقود ولأنواع نماذج حاملات اللهب كُلِّها. الشكل (3) يبيِّن الأبعاد الهندسية للهب الانتشاري.

ج - حساب معامل طول السخام الحر SFLF

أُجريت التجربة بحسب الفقرات الآتية:

1- تثبت سرعة الوقود عند حد معين خلال مدة التجربة.

2- نعمل على زيادة سرعة الهواء إلى حين الحصول على اللهب الأزرق (L_b) (Blue Flame Length) بالقرب من فوهة الحراق، كما هو موضح بالشكل (6).

3- نقيس طول اللهب الكلي (L_f) (Flame Length) وطول اللهب الأزرق (L_b).

4- تُوخِّدُ قراءات أخرى بزيادة سرعة الهواء ونقيس (L_f & L_b) وهكذا حتى آخر قيمة لسرعة الهواء التي يحدث عندها اللهب الأزرق والشكل (7) يوضح تغيُّر طول اللهب مع رقم رينولدز وسرعة الهواء لثلاثة نماذج حاملات اللهب.

5- تحسب قيمة معامل السخام الحر (SFLF) لكل نقطة حُدِّدَتْ باستخدام العلاقة:

لارتفاع الدوامات، في حين يعطي حامل اللهب ذا البروزات أعلى قيمة لعرض الدوامات لذلك ابتكر النموذج الثالث (حامل اللهب المركب)؛ وذلك للحصول على أعلى قيمة لارتفاع الدوامات وعرضها، والتي أساسها التيارات المرتدة ومنطقة إعادة التدوير الناتجة من التأثيرات الايروديناميكية لجريان الهواء. تعطي منظومة شليرن البصرية دقة عالية في القياس لاعتمادها على معاملات انكسار أشعة الليزر خلال منطقة التفاعل، ولا توجد أية عوامل سلبية أو مؤثرات جانبية في دقة القياس، كما هو الحال في استخدام تقنيات أخرى مثل تقنية نشر الجزيئات.

يعد معامل طول السخام الحر واحداً من أهم معايير قياس مدى التلوث البيئي المستخدم في بحوث الاحتراق، وقد حُسب هذا المحدد لحاملات اللهب كلها كما هو مبين في الأشكال (14،15،16،17)، إذ نلاحظ انخفاض مستوى السخام والغازات الملوثة المنبعثة والتوصل إلى نتائج جيدة بسبب كفاءة المزج لحاملات اللهب مقارنة بدراسات البحوث السابقة.

الاستنتاجات

- 1- من دراسة تغير طول اللهب لوحظ أن تزايد تدفق الهواء يؤدي إلى تناقص طول اللهب. كما وجد أن طول اللهب في الحامل المركب اقل بنسبة (20%) لمقارنة بالأنواع الأخرى وضمن مدى (2700 → 1200 Rea) وخارج هذه الحدود يقصر طول اللهب ولكن بنسبة أقل.
- 2- يعطي حامل اللهب ذو النوع المتباعد من الداخل والخارج أعلى قيمة لارتفاع الدوامات (Height Vorticity)، في حين يعطي حامل اللهب ذو البروزات أعلى قيمة لعرض الدوامات (Width Vorticity)، لهذا السبب ابتكر تصميم وتصنيع حامل اللهب المركب الذي يكامل الشكل

منه ومن مميزاته في تحليلات اللهب وخصوصاً اللهب الانتشاري المضطرب. والشكل (10) يوضح إمكانية معالجة صورة شليرن ببرنامج Adobe Photo CS5 (Shop).

مناقشة النتائج

إن الهدف الأساس للدراسة الحالية هو كيفية الحصول على أفضل عملية خلط وانتشار لتيارات الهواء الحلقي مع الوقود النفاث عن طريق التغيير في الشكل الهندسي لحاملات اللهب، إذ تعد من أهم المحددات المؤثرة في الحصول على كفاءة مزج عالية للمفاعلات في اللهب الانتشاري.

من خلال الشكل (7) يلاحظ أن طول اللهب يتناقص مع تزايد عدد رينولدز لجريان الهواء الحلقي ولأنواع حاملات اللهب المستخدمة، كلها والسبب يعود في زيادة سرعة الهواء الحلقي على مسار خط نفث الوقود. حيث تحصل عملية خلط أكثر تجانساً مما يؤدي إلى توجه نفث الوقود باتجاه تيارات الهواء (إلى الأسفل)، ومن ثم تؤدي إلى نقصان طول اللهب.

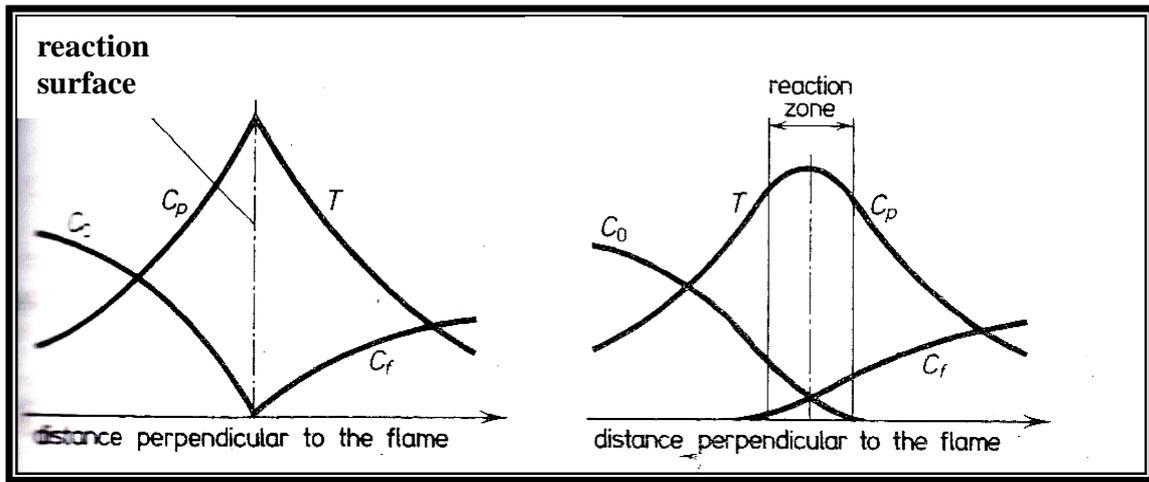
أجريت الدراسة خلال منطقة استقرار جبهة اللهب وللجريان الصفائحي والاضطرابي، لكن مع زيادة رقم رينولدز للوقود تتفصل قاعدة جبهة اللهب عن الفوهة (blow-off) وترتفع مع بقاء جبهة اللهب مستقرة فوق الحراق، تؤدي بزيادة رقم رينولدز الحرج للوقود إلى انخفاض سرعة التفاعل والانتشار بسبب قلة انتقال الحرارة بين المتفاعلات وبالنهاية يحصل تخامد للهب (blow-out). الأشكال (11،12،13) توضح تأثير تغيير سرعة تيارات الهواء على عرض الدوامات وارتفاعها، من خلال تحليل صور شليرن البصرية التي تمت خلال القياسات التجريبية لاستخراج الأبعاد الهندسية لجبهة اللهب لكل نوع من حاملات اللهب، وقد وجد أن حامل اللهب المتباعد من الداخل والخارج يعطي أعلى قيمة

4- حُسِبَتُ مدى تخفيض السخام والغازات الملوثة المنبعثة وجرى الحصول على نتائج جيدة لمعامل طول السخام الحر (SFLF) باستخدام حامل اللهب المركب، انخفض هذا المحدد بمعدل (15%) مقارنة بأنواع الحاملات الأخرى، وبمقدار (60%) مع بحوث الدراسات السابقة. كما موضحة الفروقات في الشكل (17).

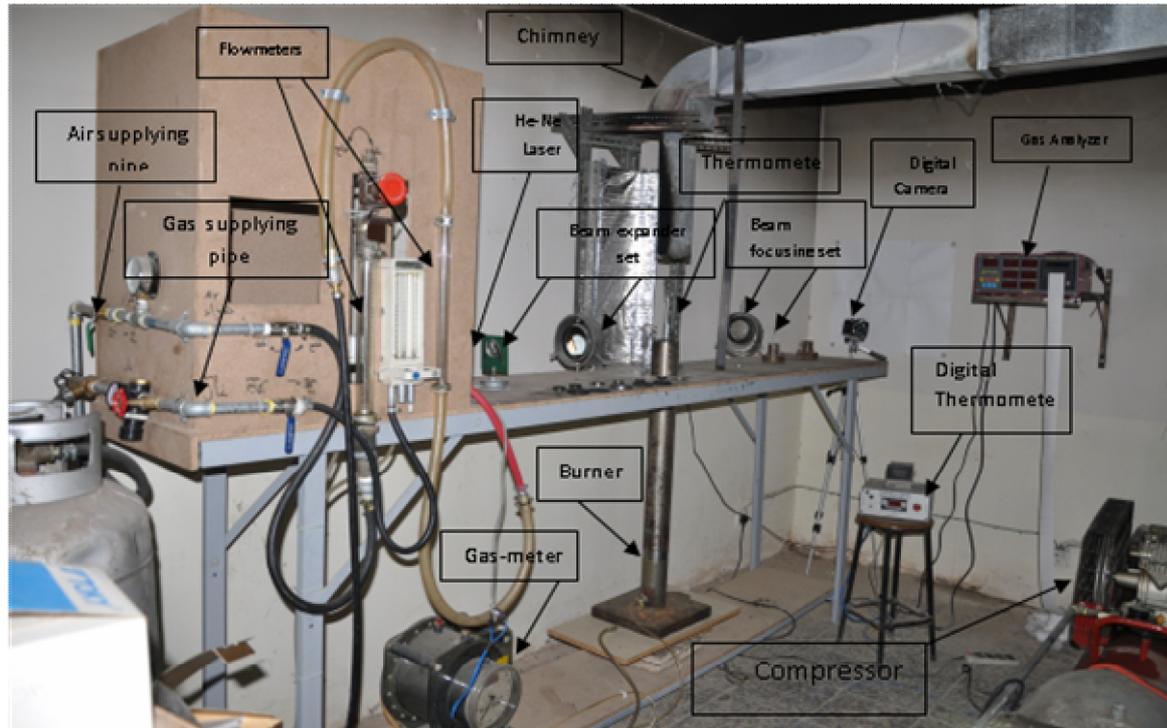
5- بزيادة معدل تدفق جريان الهواء الحلقي تزداد قيمة معامل طول السخام الحر (SFLF) ولأنواع حاملات اللهب المستخدمة جميعها وحتى قيمة (s) $(a=4276 \text{ cm}^3/\text{s})$

الهندسي للنوعين السابقين، وذلك للحصول على أعلى قيم دوامات لجبهة اللهب بنموذج واحد لحامل اللهب. وأدى الشكل الهندسي المتباعد لسطح حامل اللهب وكذلك البروزات المحيطة به إلى توليد دوامات بكل من الاتجاهين العمودي والأفقي، وبالنتيجة تم الحصول على أفضل عملية خلط واستقرار لجبهة اللهب الانتشاري؛ وذلك بحدود ($W_{\text{vorticity}}=52.5\text{mm}$ و $H_{\text{vorticity}}=54\text{mm}$). كما هو موضح في الأشكال (11) و (12) و (13).

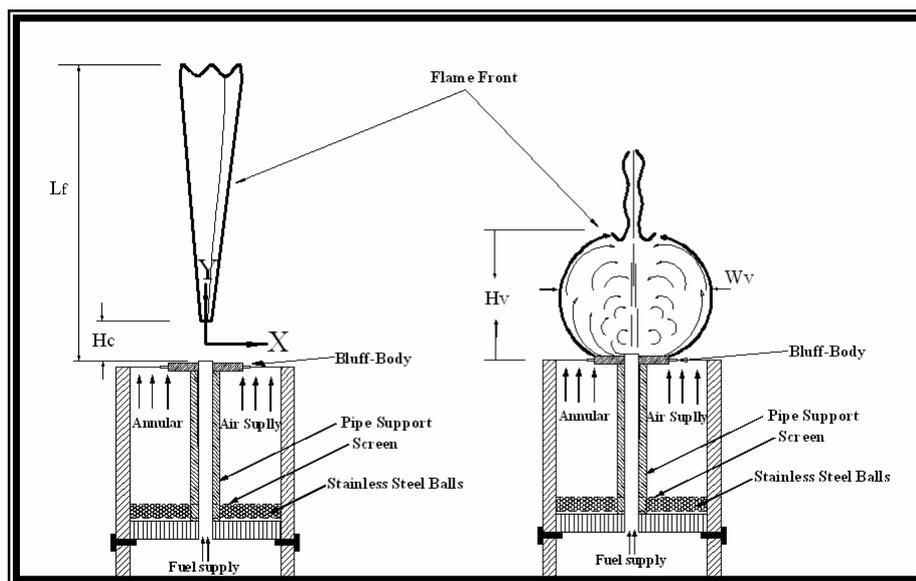
3- أثبت استخدام تقنية شليرن البصرية الليزرية تحقيق دقة عالية لتحليل جبهة اللهب من خلال النتائج التي تم التوصل إليها في بحثنا الحالي.



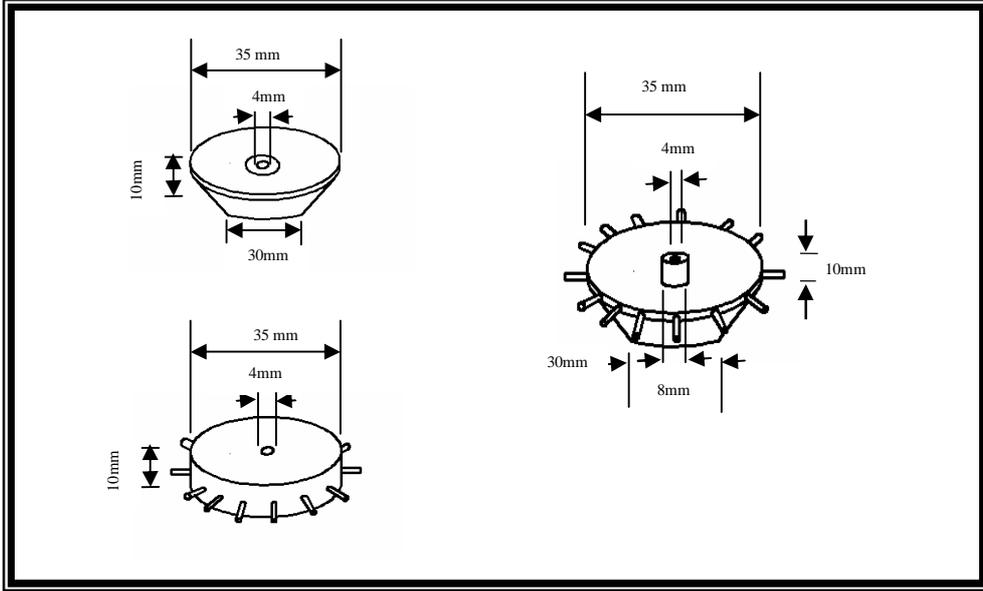
الشكل (1) توزيع محددات اللهب الانتشاري الحقيقي والمثالي [3].



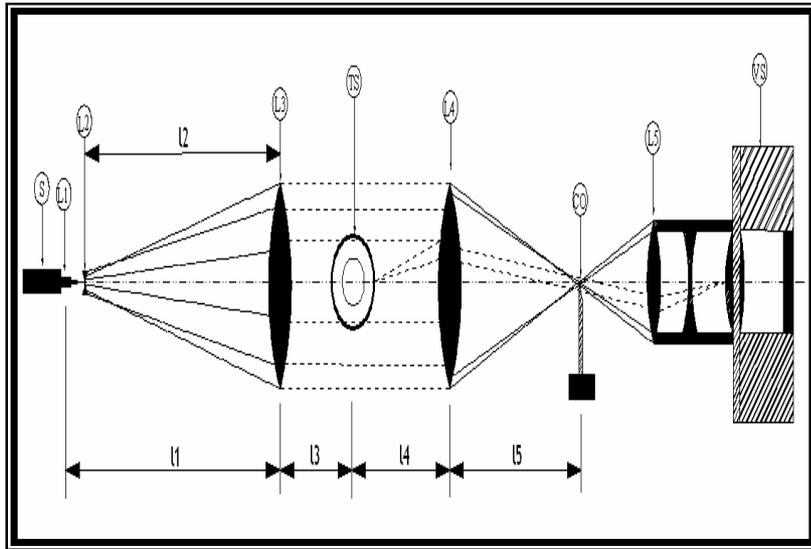
الشكل (2) صورة فوتوغرافية لمنصة التجارب العملية



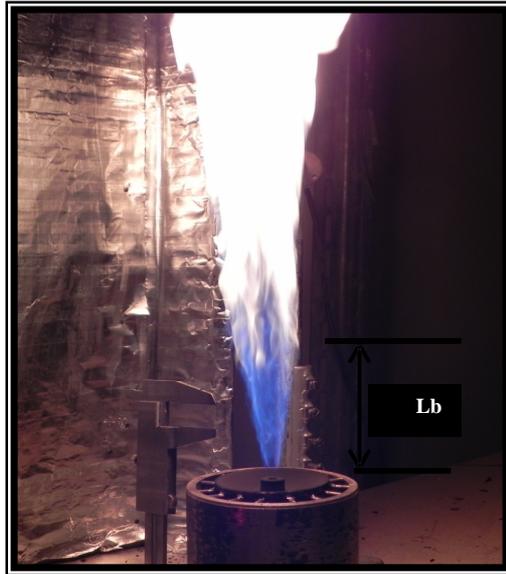
الشكل (3) الحراق الانتشاري والأبعاد الهندسية للهب الانتشاري.



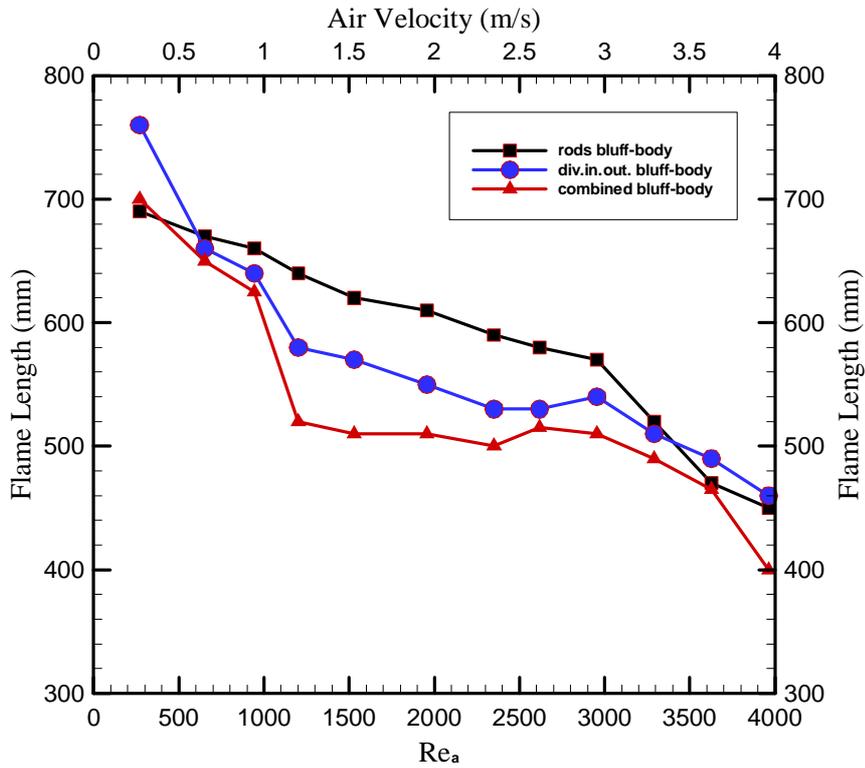
الشكل (4) التفاصيل الهندسية لحاملات اللهب بنسبة حجز (BR=0.636)



الشكل (5) الترتيب البصري لمنظومة شليرن المستخدمة في البحث [13].



الشكل (6) يبيّن نسبة لطول جبهة اللهب الانتشاري.



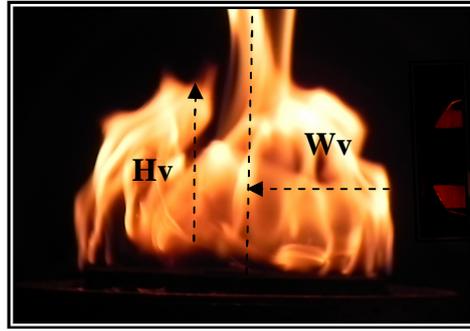
الشكل (7) تغيير طول اللهب مع رقم رينولدز وسرعة الهواء.



Diverge Inside-Outside Bluff-Body



Rods Bluff-Body



Combined Bluff-Body

الشكل (8) نموذج من جبهة لهب انتشاري لنماذج مختلفة من حاملات اللهب بنسبة حجز ($BR=0.636$)



Diverge Inside-Outside Bluff-Body

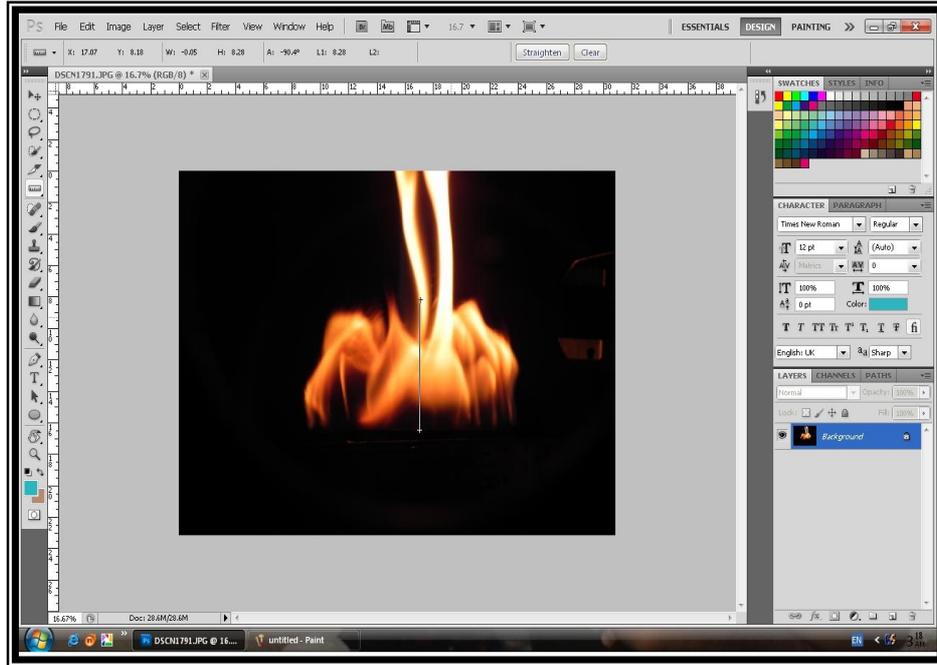


Bluff-Body
Rods

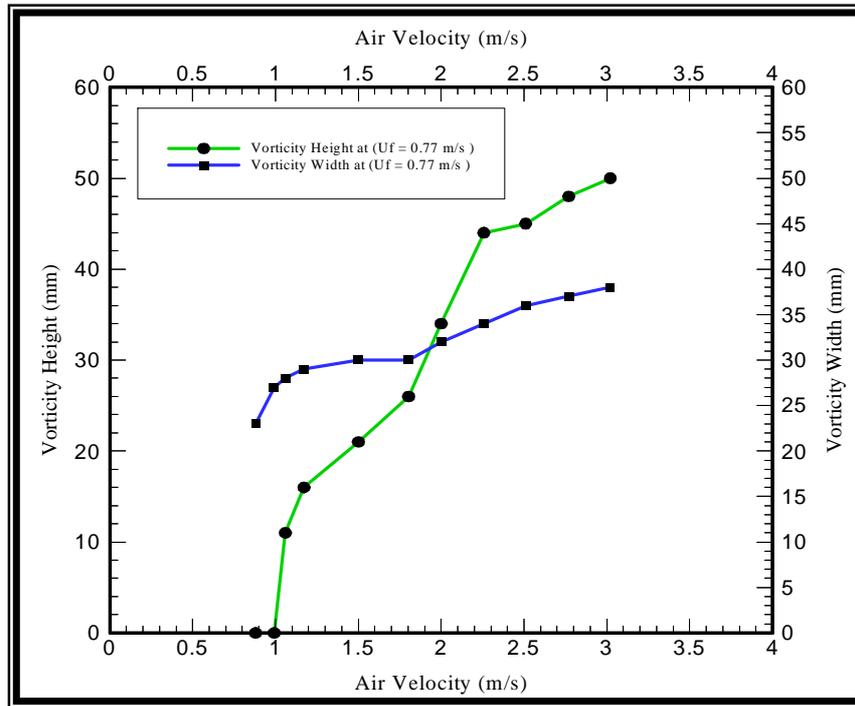


Combined Bluff-Body

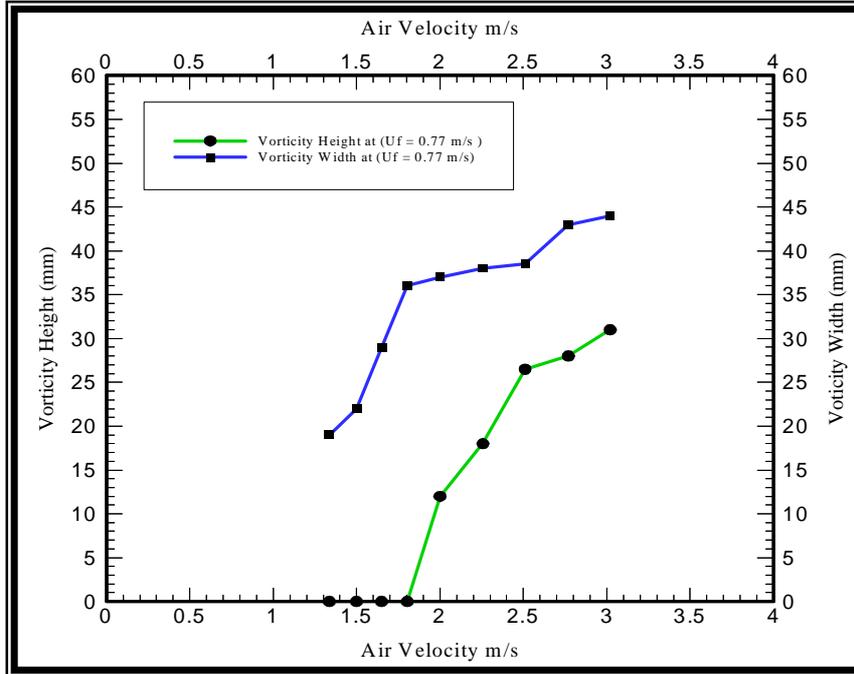
الشكل (9) شكل اللهب الدوامي من مقطع أفقي لجبهة اللهب الانتشاري باختلاف شكل حاملات اللهب.



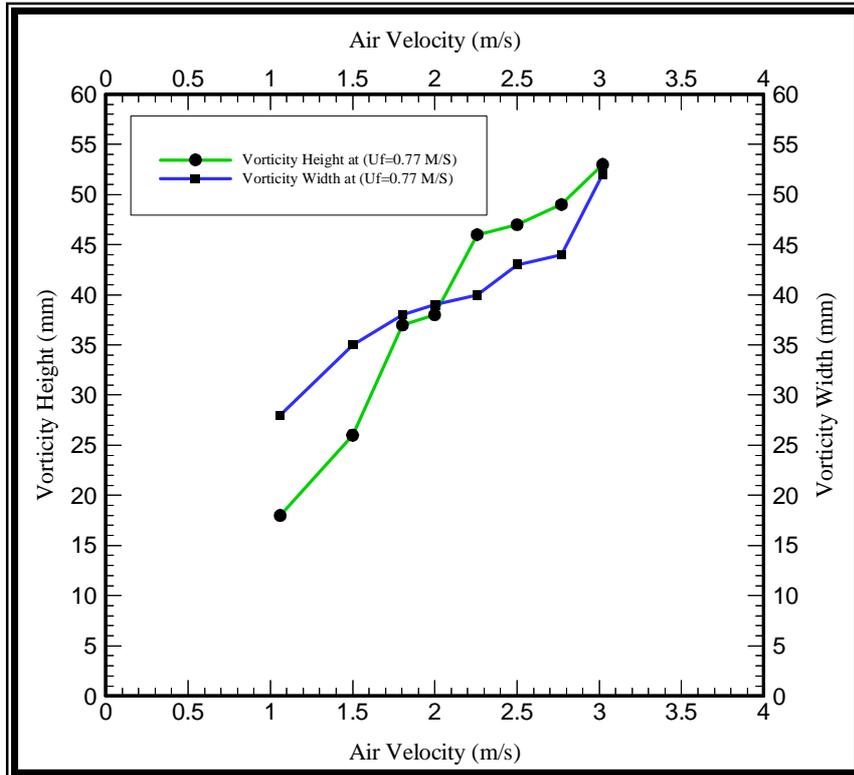
الشكل (10) معالجة صورة شليرن ببرنامج (Adobe Photo Shop CS5).



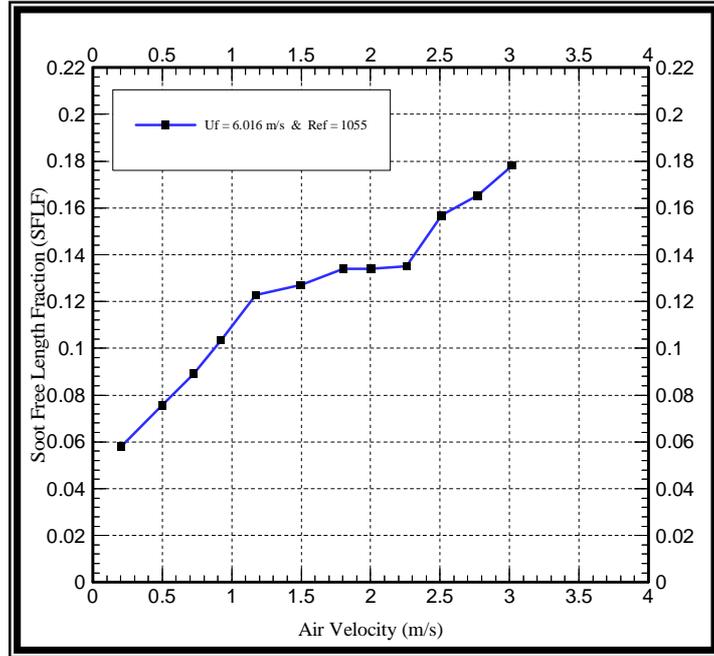
الشكل (11) أبعاد اللهب الدوامي لحامل اللهب متباعد من الداخل والخارج.



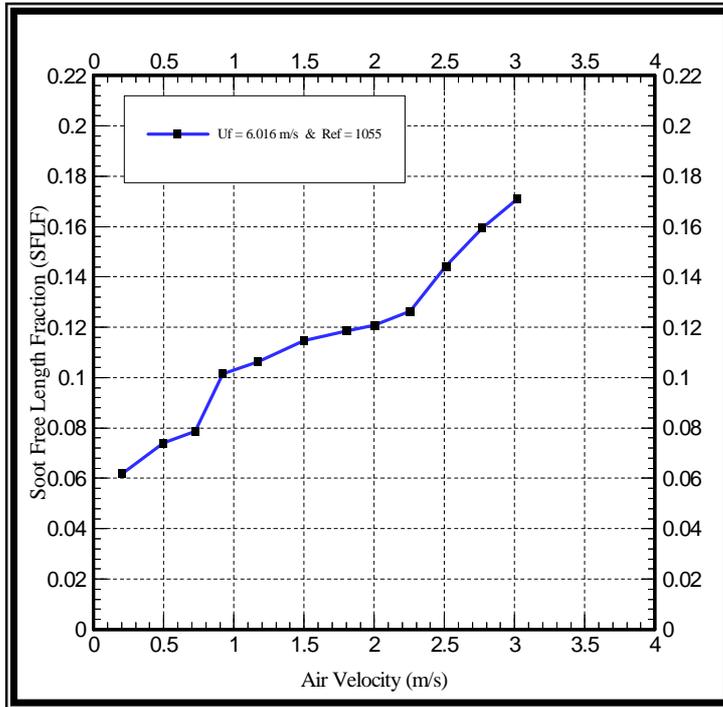
الشكل (12) أبعاد اللهب الدوامي لحامل اللهب ذي البروزات.



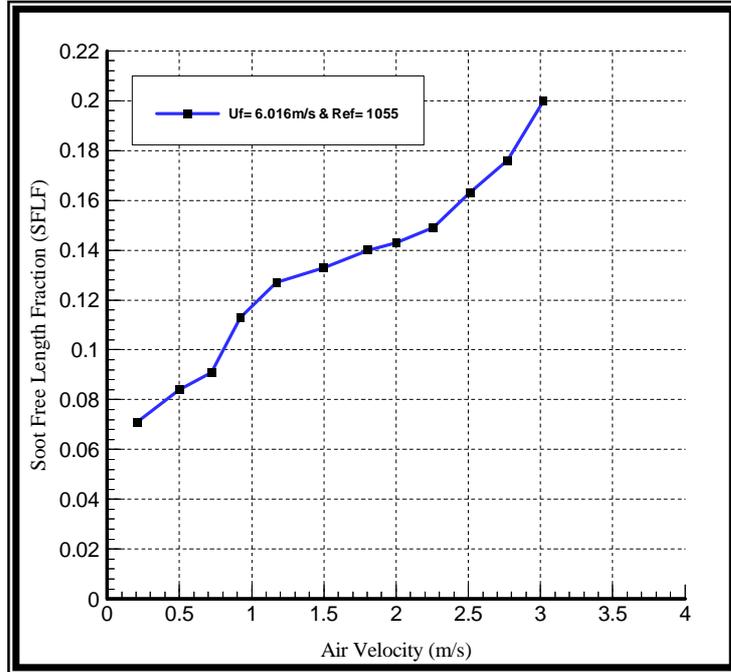
الشكل (13) أبعاد اللهب الدوامي لحامل اللهب المركب.



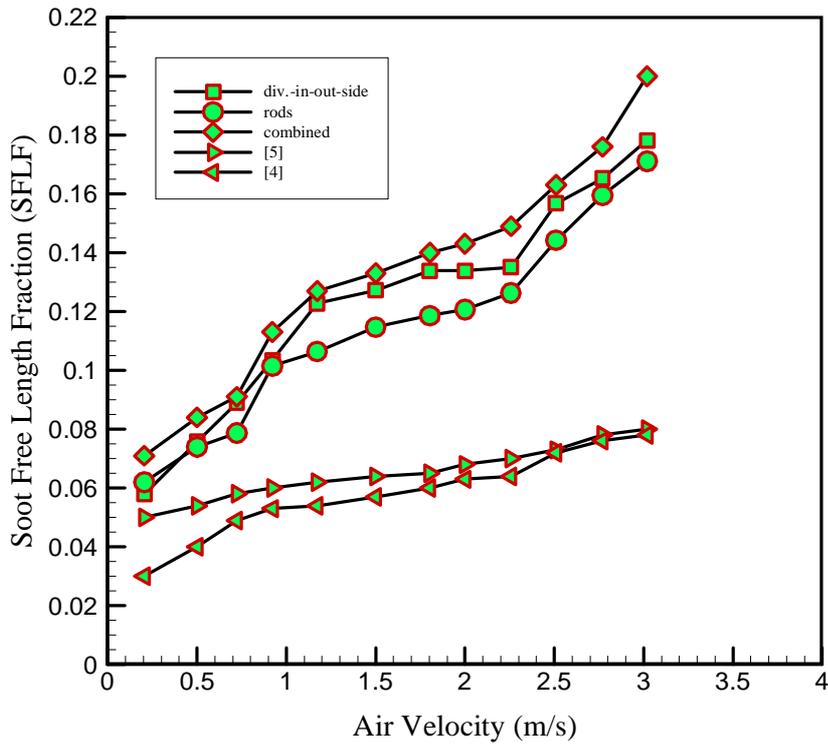
الشكل (14) معامل طول السخام الحر لحامل اللهب متباعد من الداخل والخارج.



الشكل (15) معامل طول السخام الحر لحامل اللهب ذي البروزات.



الشكل (16) معامل طول السخام الحر لحامل اللهب المركب.



الشكل (17) مقارنة قيم (SFLF) بين حاملات اللهب.

قائمة الرموز

المراجع:

- 1- Esquiva-Dano, I., Nguyen, H. T., and Escndie, D., Combustion and Flame 127: 2167-2180 (2001).
- 2- [http:// www.google](http://www.google) . Notes on Non-premixed Flame (Diffusion Flame) Last updated: Oct 13, 2007.
- 3- Jerzy, C., combustion A Study in Theory Fact and Application, (1990).
- 4- Kumar, P., Mishra, D. P., International Journal of Hydrogen Energy 33:2578-2585 (2008).
- 5- Kumar, P., Mishra, D. P., International Journal of Hydrogen Energy 33:225-231 (2008).
- 6- Kurimoto, N., Suzuki, Y., and Kasagi, N., 12th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, July (2004).
- 7- Larjo, J., Vattulainen, J. and Hernberg, R., Applied Physics, B., 62: 71 (1996).
- 8- Ma HK, Js. International Journal Heat Mass Transfer 37: 2957-2967.
- 9- Newbold, G., Nathan, JR., Nobes, GJ., Turns, SR. In: Proceedings of 28th International Symposium on Combustion, P. 7-481 (2000).
- 10- Papadopoulos, G., Bryant, R. A., Pitts, W.M., Experiments in Fluids 33: 472-481 (2002).
- 11- Rong, F.H., Shun, C. Y., Combustion and Flame 155: 539-556 (2008).
- 12- Santosh, J. S., Sajjad, H., Tim, L., Progress in Energy and Combustion Science., 35:98-120 (2009).
- 13- Settles, G. S., International Journal Heat and Fluid Flow, 6:3 (1985).
- 14- Watson, J., "Optoelectronics", Van Nostrand Reinhold (U.K.) Co. Ltd., (1988).
- 15- Yung -Cheng, C., Chia-Chi, C., Kuo-Long, P., and Jing-Tang, Y., Combustion And Flame 115: 51-65 (1998).

الرمز	المصطلح بالعربي	المصطلح بالانكليزي	الوحدة
BR	نسبة الحجز (الأعاقة)	Blockage ratio	-
D _a	قطر الحلقي لجريان الهواء	Annular outer diameter of air flow	mm
D _b	قطر جسم حامل اللهب	Bluff-body diameter	mm
D _{if}	انتشارية الخليط	Diffusivity Mixture	m ² /s
H _c	ارتفاع طول اللهب الحرج	Critical Lift-off Flame	mm
L _f	ارتفاع اللهب أو طوله	Flame height	mm
L ₁ →L ₅	عدسات منظومة شليرن	Lenses of Schlieren system	-
L _b	طول اللهب الأزرق	Blue Flame Length	mm
L ₁ →L ₅	أبعاد منظومة شليرن	of Schlieren Length system	-
r _j	نصف قطر نفاث الوقود	Radius of Jet	mm
SFLF	معامل طول السخام الحر	Soot Free Length Fraction	-
V _j	سرعة الوقود عند المنفذ	Velocity of fuel at nozzle exit	m/s
V _f , Q _f	معدل جريان الحجمي للوقود	Volumetric flow rate of fuel	Cm ³ /s
W _v	عرض الدوامات	Vorticity Width	
H _v	ارتفاع الدوامات	Vorticity Height	
τ _d	زمن اختلاط الهواء مع الوقود	Air Fuel Mixing Time	S
LPG	غاز البترول المسال	Liquefied Petroleum Gas	-
Re _a	رقم رينولد للهواء	Air Reynolds Number	-