

ضبط أكاسيد النيتروجين وثاني أكسيد الكربون لحجرة احتراق ثنائية المراحل باستخدام منظومة تحكم تعتمد المنطق الضبابي

الدكتور حبيب محمود*

الدكتور محمد ديوب**

(تاريخ الإيداع 9 / 10 / 2006. قبل للنشر في 13/2/2007)

□ الملخص □

يصف هذا المقال مفهوماً جديداً للتحكم بحجرة احتراق ثنائية المراحل ذات لهب انتشاري واستقرار دوامي، حيث إن المتحولين المراد التحكم بهما هما أكاسيد النيتروجين وثاني أكسيد الكربون CO_2 . إذ نعبر عن كلا هذين المتحولين بواسطة متحولات دخل لغوية (وهمية) إلى القوانين الخاصة بالمنطق الضبابي (العائم). وتضمن هذه القوانين استجابة ديناميكية سريعة وفعالة للحارق. ويتم وضع هذه القوانين بالاعتماد على الخبرة التي يكتسبها الإنسان من خلال تعامله مع الحارق. كما ويمكن تغيير هذه القوانين وفقاً للقيم المثلى لكل من NO_x و CO_2 ، وقد تم تضمين الإجراء التصميمي للمنظم في هذا المقال بالإضافة إلى نتائج المحاكاة التي تعطي أفضل استجابة لكل من المتحولين المضبوطين.

الكلمات المفتاحية: حجرة احتراق، التلوث، التحكم الضبابي.

* أستاذ مساعد في قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** مدرس في قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Controlling nitrogen Oxides and Carbon Dioxide from Staged Combustion Chamber Using FUZZY Control Logic

Dr. Habib Mahmoud *

Dr. Mohamad Dayob **

(Received 9 / 10 / 2006. Accepted 13/2/2007)

□ ABSTRACT □

This article describes a new control concept for a swirl-stabilized, diffusion flame, staged combustion chamber. The two controlled variables are the CO₂ and NO_x emissions. The NO_x and CO₂ are both used and expressed as linguistic input variables to fuzzy rules. Assignment decision rules ensure a fast dynamic response of the process. These rules come from the human expert and can be changed according to the NO_x and CO₂ reference profile. The design procedure of the controller is implemented in this paper. The simulation results showed the best response of the controller.

Key Words: Combustion chamber, Pollution, Fuzzy control.

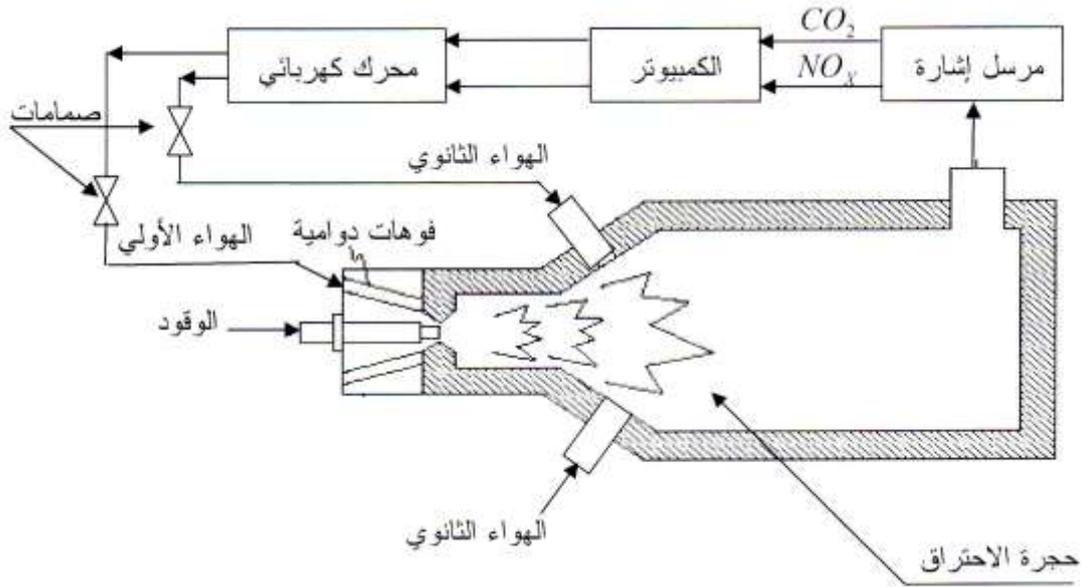
*Associate Professor, Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Assistant Professor, Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

1- مقدمة:

تسعى مراكز البحث العلمي بشكل حثيث في معظم بلدان العالم لتطوير حرق احتراق ذات تلوث بيئي منخفض، وذلك لمواجهة القوانين الصارمة التي تفرضها الهيئات الدولية والمحلية للحد من انبعاث الملوثات (أول أكسيد الكربون CO، وأكاسيد الكبريت SO_x وأكاسيد النيتروجين NO_x، علاوة على الهيدروكربونات HC وهباب الفحم Soot) من دون أن ينقص ذلك من فعالية الاحتراق [1]. وقد تم تطوير العديد من تقنيات التحكم لتحقيق هذه الغاية. إحدى التقنيات المتبعة لتحقيق هذه الغاية هي استخدام وقود نظيف، ويعتبر الغاز الطبيعي هو الوقود الأنظف والأكثر توفراً مقارنة مع الفحم والوقود السائل، إذ ينتج عن حرق هذا الغاز كميات لا تكاد تذكر من أكاسيد الكبريت والهيدروكربونات وهباب الفحم. كما أن الغاز الطبيعي يحتوي على القليل من غاز النيتروجين ذي الرابطة الأحادية، لذلك تكون انبعاثات NO_x (أول أكسيد النيتروجين NO وثاني أكسيد النيتروجين NO₂) قليلة جداً بالمقارنة مع انبعاثاته من أنواع الوقود الأخرى [2]. ولذا يعتبر الوقود الغازي إحدى الوسائل المستخدمة لإقلال انبعاثات NO_x. علاوة على ذلك هنالك العديد من التقنيات المستخدمة لضبط تشكل أكاسيد النيتروجين أثناء عملية الاحتراق والمتضمنة: الاحتراق على مراحل وحرق بخار الماء وتدوير غازات العادم. أيضاً يتأثر تشكل NO_x بعملية مزج الهواء والوقود وشدة الاحتراق ومستوى الهواء الزائد بالإضافة لدرجة الحرارة المحلية ومقدار تسخين الهواء قبل عملية الاحتراق [3]. وهنالك طرق أخرى للإقلال من انبعاثات أكاسيد النيتروجين، إذ تعمل هذه الطرق على إرجاع NO و NO₂ مرة ثانية إلى جزيئات من النيتروجين والماء. ويحصل هذا من خلال تفاعلات الإرجاع بعد عملية الاحتراق postcombustion، إذ يتم استخدام المحفزات الكيميائية مثل الأمونيا واليوريا التي تساعد على عملية التفاعل [4]. لقد تبين أن كل تقنية من هذه التقنيات تؤثر بشكل كبير على تراكيز أكاسيد النيتروجين المقاسة في مخرج حجرة الاحتراق (الحارق)، كما أن هنالك عدداً من البارامترات ذات تأثير خاص على انبعاثات NO_x، وكل بارامتر له قيمة مثلى يمكن عندها الوصول إلى أخفض مستوى من NO_x، وتعتبر عملية تحديد القيم المثلى لهذه البارامترات شاقة خاصة عندما يكون هنالك عدد من البارامترات التي يجب أن تؤخذ قيمها المثلى بالحسبان. في السنوات الأخيرة تم تطبيق تقنية التحكم الفعال لإقلال انبعاثات NO_x، وذلك من خلال تحديد القيمة المثلى لعملية مزج الهواء والوقود لكي يتم منع تشكل البقع ذات الحرارة العالية في حرق الاحتراق والتي تؤدي إلى إنتاج NO_x بنسب أعلى [5]. وقد استخدمت طريقة الحساب الوزني المثلى لتحقيق هذه الغاية [6].

نقدم في هذا المقال نتائج المحاكاة التي تم التوصل إليها من خلال تطبيق منطق التحكم الضبابي Fuzzy logic control على حجرة احتراق لحارق ثنائي المراحل ذي استقرار دوامي، كما هو موضح في الشكل (1). إذ من المعلوم أن الحارق هو جهاز المزج المسؤول عن حرق مواد التفاعل (وقود + هواء) في الفرن وعن الاستقرار الجيد للهب كما ويعتبر المسؤول عن فعالية الاحتراق العالية وعن مستوى منخفض من الملوثات المنبعثة [2]. وبالرغم من أن هنالك العديد من أساليب التحكم الفعال المطبقة على نظم الاحتراق [4]. فإنه يمكن لتقنية التحكم ذات المنطق الضبابي أن تقوم بضبط وتنظيم الآلات المعقدة ذات النماذج الرياضية المتغيرة وغير المعروفة [7]. ويعد منطق التحكم الضبابي والنظم الخبيرة والشبكات العصبية الصناعية واحدة من تقنيات الذكاء الصناعي artificial intelligence والتي لها تطبيقات تحكومية عديدة ولكن الإجراء التصميمي للمنظمات وفق المنطق الضبابي أبسط بكثير من أية طريقة تحكومية أخرى [8-9].



الشكل (1): رسم تخطيطي للنظام.

2-الهدف من البحث:

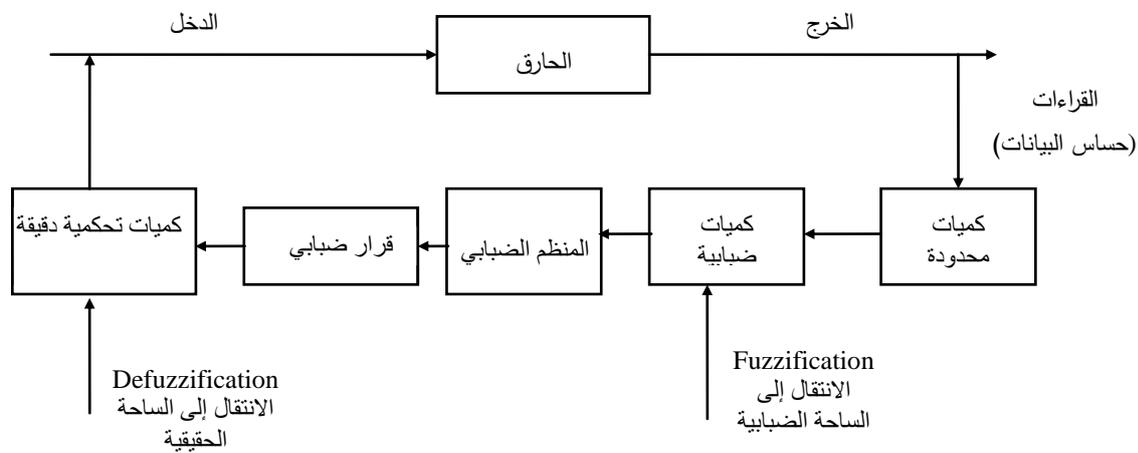
في هذه الدراسة قمنا بدمج تقنية التحكم الفعال مع تقنية الاحتراق على مراحل، وذلك لضبط أكاسيد النيتروجين ضمن الحدود المسموح بها. وقد ركزنا على دراسة تطبيق منطق التحكم الضبابي على الحارق لإقلال انبعاثات NO_x مع المحافظة على مردود احتراق عالي (CO_2 مرتفع) فوق مجال واسع من شروط التشغيل طالما أن أساليب التحكم التقليدي غير فعالة في نظم الاحتراق المستمرة والمضطربة.

3-تصميم منظومة التحكم الضبابية لحارق ثنائي المراحل:

إن تصميم المنظم وفق منطق التحكم الضبابي لا يحتاج نموذجاً عددياً أو تحليلياً تفصيلياً للنظام وإنما يكفي أن يمتلك المصمم بعض البديهيات والمعلومات الأولية حول كيفية التحكم بالنظام، ويتم الحصول على هذه المعلومات من خلال التحكم بالنظام يدوياً. وإذا كان من الممكن تحقيق المنظم الضبابي أثناء عملية المحاكاة قبل تطبيقه على النظام الفعلي عندها يكون من الممكن محاكاة النظام. أيضاً وعندما تكون لدينا المعرفة الكافية والمكتسبة من خلال ضبط النظام يدوياً يمكننا عندها تصميم المنظم الضبابي [10]. في عمليات ضبط انبعاث NO_x من الحارق مع المحافظة على فعالية احتراق عالية (CO_2 مرتفع) يمكننا الاعتماد على انبعاث NO_x و CO_2 كمتحولي خرج للعملية. والفرق ما بين القيمة المرغوبة والقيمة الفعلية لهذين المتحولين يمثل إشارة الخطأ التي يمكن حسابها. أما الفرق بين سرعة تغير القيمة المرغوبة لكل من هذين المتحولين وسرعة التغير الفعلية فيمثل سرعة تغير الخطأ. فيما يلي سوف نشرح كيفية معالجة أحد المتحولين وتكون معالجة المتحول الآخر مشابهة لمعالجة المتحول الأول.

إن المتحولات اللغوية linguistic variables التي تعرف كل من الخطأ وسرعة تغير الخطأ للمتحول CO_2 هي متحولات ضبابية ولكن القيم المقاسة وسرعة تغيرها بالإضافة إلى فعل التحكم النهائي المطبق على النظام فهي قيم

محدودة ودقيقة (precise (crisp). يبين المخطط الموضح في الشكل (2) المخطط التوضيحي لهذه الفكرة إذ إن دخل الحارق هو خرج المنظم (فعل التحكم) أما استجابة الحارق فهي الخرج الذي يتم قياسه بواسطة جهاز يعمل بالأشعة تحت الحمراء ومن ثم تقطيعه. يمكننا الانتقال من الساحة الحقيقية التي يكون فيها الخرج المقاس كمية محدودة دقيقة إلى الساحة الضبابية fuzzy logic من خلال التعبير عن الكمية المحدودة بواسطة مجموعات التحكم الضبابي fuzzified. عندئذ يكون الخرج الضبابي fuzzy output بمنزلة دخل إلى المنظم الضبابي fuzzy controller الذي يتكون من قوانين لغوية linguistic rules ويكون خرج هذا المنظم بمنزلة سلسلة أخرى من المجموعات الضبابية fuzzy sets. وبما أن معظم النظم الفيزيائية لا يمكنها فهم الأوامر الضبابية (المجموعات الضبابية)، فإن خرج المنظم يجب أن يحول إلى كميات محدودة دقيقة باستخدام طرق الرجوع إلى الساحة الحقيقية defuzzified [10]. عندئذ تصبح قيم الخرج المحدودة هي قيم الدخل للنظام الفيزيائي ومن ثم تتكرر هذه الدورة من جديد.

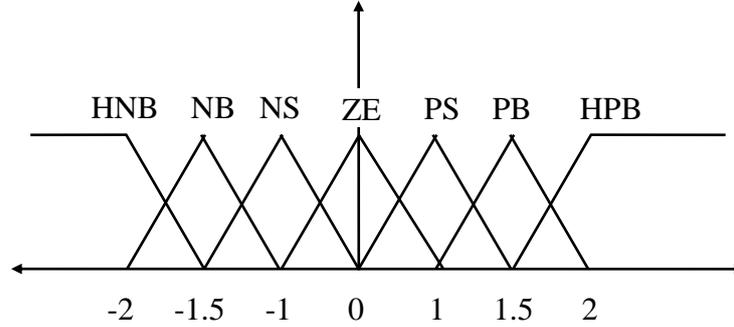


الشكل (2): الخطوات المتعددة لمنظومة التحكم المغلقة وفقاً لمنطق التحكم الضبابي.

3-1 الخطوات التصميمية للمنظم الضبابي:

1- التعبير عن القيمة المحدودة الدقيقة بدلالة متحولات دخل وخرج ضبابية. يمثل الخطأ e وسرعة تغير الخطأ $(e \text{ or } de/dt)$ متحولي الحالة للمنظم الضبابي (متحولي دخل للمنظم)، أما خرج المنظم فهو فعل التحكم U والذي هو بمنزلة دخل للعملية (معدل تدفق الهواء). أي إنه يجب تحويل الكميات المحدودة لكل من e و e' إلى كميات ضبابية من خلال التعبير عن هذه المتحولات بخريطة المجموعات الضبابية. ولذا يمكن أن يكون متحول الدخل المحدود عضواً في أكثر من مجموعة ضبابية. في الحقيقة سيكون متحول الدخل عضواً في كل مجموعة ضبابية عندما تتغير درجة العضوية لكل مجموعة ضمن المجال $[0, 1]$. وتشير العضوية ذات القيمة 1 إلى أن الكمية المحدودة هي ذات عضوية كاملة في المجموعة الضبابية. بينما تشير العضوية ذات القيمة 0 على أن الكمية المحدودة ليست عضواً في المجموعة الضبابية. وسوف نحدد الخطأ e بسبع متحولات لغوية هي (HNB, NB, NS, ZE, PS, PB, HPB) موزعة على مدى الخطأ المحدد في المجال $[-2, 2]$ ، وهذا المجال يمثل المدى الذي يتحرك فيه صمام إدخال الهواء الأولي والثانوي. ونحدد سرعة تغير الخطأ أيضاً بالمتحولات السبع نفسها والموزعة على فراغ سرعة تغير الخطأ المحدد في المجال $[-2, 2]$. ويمثل الرمز NB تغير كبير بالاتجاه السالب

والرمز NS تغير صغير بالاتجاه السالب والرمز ZE تغير صفري أم الرمز PS، فيمثل تغير صغير بالاتجاه الموجب والرمز PB تغير كبير بالاتجاه الموجب. أيضاً سوف نحدد الوظيفة العضوية لهذه الكميات ضمن المجال [3 -3] والذي يمثل الكمية المقاسة للمتحول المضبوط CO_2 بالفولت، كما هو موضح في الشكل (3). أيضاً متحول الخرج الضبابي والذي يمثل فعل المنظم U سوف يستخدم سبع متحولات في الساحة الضبابية على كامل مجال التحكم المحدد في المجال $-2 < U < 2$ ، الشكل (3).



الشكل (3): تقسيم الخطأ ومشتق الخطأ وفعل التحكم إلى سبعة مجموعات.

2- إنشاء جدول يتكون من تسعة وأربعين قانوناً على شكل ذاكرة ارتباطية في الساحة الضبابية fuzzy associative memory (FAM)، يبين الجدول (1) القوانين التي تم وضعها من أجل الحارق ثنائي المراحل والمتضمنة للعلاقة بين متحولي الدخل e و e' للمنتج الضبابي حيث يمكن قراءة القانون الأول كما يلي: إذا كان الخطأ كبير جداً وموجب والتغير في الخطأ كبير جداً وموجب عندئذ يصدر المنظم أمراً بتطبيق فعل تحكم كبير جداً وموجب بحيث يفتح صمام إدخال الهواء بشكل كبير جداً ليتم إنقاص مستوى المتحول المضبوط. إن هذه القوانين تحاكي المعلومات الأولية المتوفرة من قيام العامل البشري بتحقيق منظم ذي فعل تناسبي-تكاملي PI لضبط الحارق.

الجدول (1): الذاكرة الارتباطية (FAM).

e	VPB	PB	PS	ZE	NS	NB	VNB
e'	VPB	VPB	BP	PB	PB	PS	ZE
PB	VPB	PB	PB	PB	PS	ZE	NS
PS	PB	PB	PB	PS	ZE	NS	NB
ZE	PB	PB	PS	ZE	NS	NB	NB
NS	PB	PS	ZE	NS	NB	NB	NB
NB	PS	ZE	NS	NB	NB	NB	VNB
VNB	ZE	NS	NB	NB	NB	VNB	VNB

3- بالعودة ثانية إلى الساحة الحقيقية ذات الكميات المحددة والدقيقة Defuzzification step. لتحقيق عملية التحكم يجب إرسال كميات محدودة ودقيقة إلى الحارق حتى يتمكن من التعامل معها، إذ لا يمكن إرسال الكميات الضبابية التي تم الحصول عليها من المنظم الضبابي، لذا يجب تحويل المجموعات الضبابية لخرج المنظم إلى كميات محدودة من خلال عملية الرجوع إلى الساحة الحقيقية والتي تعتمد طريقة مركز الثقل centroid method للوصول

إلى الكميات المحدودة التي يفهمها النظام الفيزيائي. والعلاقة التي يمكن من خلالها حساب الكمية المحدودة للخروج O_k والتي تعتمد على التتابع العضوية لمجموعات الخرج الضبابية $\mu(x)$ هي:

$$O_k = \frac{\int_a^b \mu(x) x dx}{\int_a^b \mu(x) dx}$$

فإن الكميات الناتجة عن العلاقة السابقة التي هي ترجمة للقوانين المعبر عنها في الجدول (1) هي كميات محدودة ودقيقة يمكن أن يفهمها الحارق ويتعامل معها مما يؤمن لنا ضبط الحارق بالشكل المرغوب.

4- النموذج المستخدم لمحاكاة الحارق ثنائي المراحل:

إن تابع تحويل الحارق يربط ما بين خرج الحارق $y(t)$ والذي يمثله CO_2 ودخل الحارق الذي يمثله فعل التحكم $U(t)$ ، فإن تابع التحويل للحارق [11] هو:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = k \frac{e^{-t_d s}}{1 + \tau s}$$

حيث:

k هو كسب الحارق.

t_d هو التأخير الزمني أو الزمن الميت dead time، والمرتبطة بعملية الاحتراق نفسها وبعيد نظام القياس عن الحارق.

τ هو الثابت الزمني ويرتبط بعملية الاحتراق وبسرعة أجهزة تحليل الغازات.

إن هذه الثوابت ذات قيم متغيرة تبعاً لكميات الوقود والهواء الداخل إلى الحارق، مما يجعل عملية التحكم التقليدي غير ممكنة فوق مجال تشغيل واسع.

بتحويل هذه المعادلة من النطاق s إلى النطاق الزمني وكتابتها بشكل متقطع نجد:

$$Y(k) = \frac{\tau}{\Delta t + \tau} Y(k-1) + \frac{k * \Delta t}{\Delta t + \tau} U(k - \frac{t_d}{\Delta t})$$

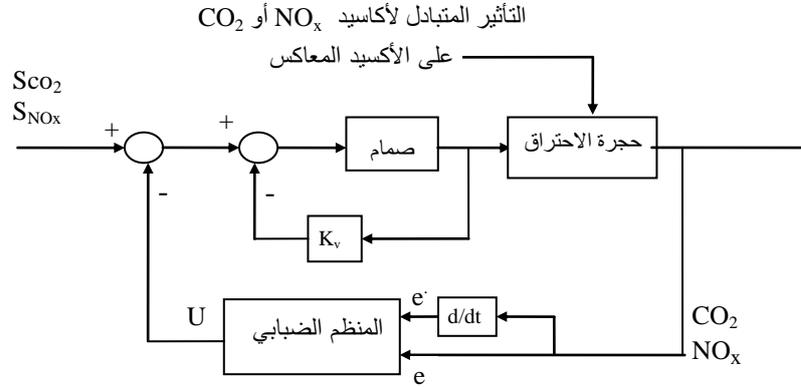
Δt هي الخطوة الزمنية (الفاصل الزمني بين قراءتين متتاليتين).

يمكننا باستخدام ملحق التحكم الضبابي Fuzzy control toolbox الموجود ضمن برنامج Matlab وإجراء عملية المحاكاة وتصميم المنظم الضبابي الذي يمكنه تلبية متطلبات عملية التحكم. من خلال تعديل وتوليف ثوابت الكسب المعياري، لهذا المنظم بحيث نأخذ بعين الاعتبار المعاملات المحدودة والمرتبطة بحدود متحولات الدخل والخروج. كما أن أفعال التحكم اللاخطية الناعمة والناتجة عن القواعد الضبابية تلغي عملياً مقدار التجاوز أثناء متابعة الخرج.

5- النتائج والمناقشة:

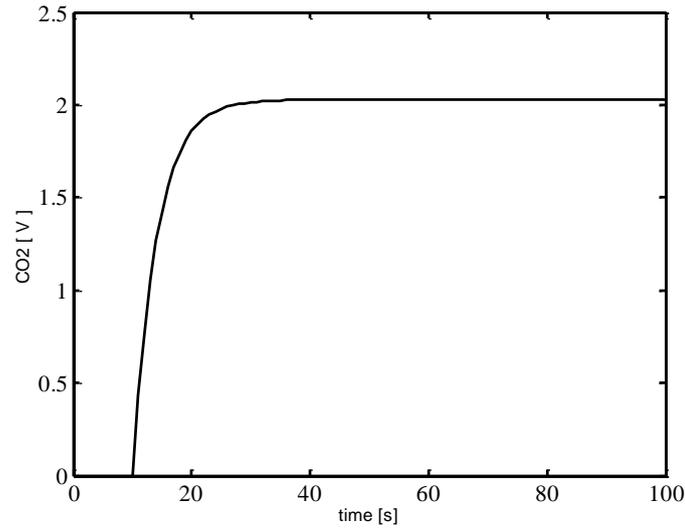
لقد أعتمدنا البارامترات التالية للنموذج الرياضي [11]: $k=1.88$ ، $t_d=20$ [s]، $\tau=7.3$ [s] وتمت دراسة الحارق في المرحلة الأولى على أنه نظام ذو دخل واحد يمثله الهواء الأولي وخرج واحد يمثله CO_2 كما وأخذنا بعين الاعتبار تأثير الهواء الثانوي على الهواء الأولي (أي أن تأثير أكاسيد النيتروجين NO_x كخرج على أكاسيد الكربون

تم أخذها بالحسبان). يبين الشكل (4) المخطط الصندوقي لمنظومة التحكم. في هذا الشكل يمثل k_v كسب حلقة التحكم الداخلية الخاصة بالصمام.

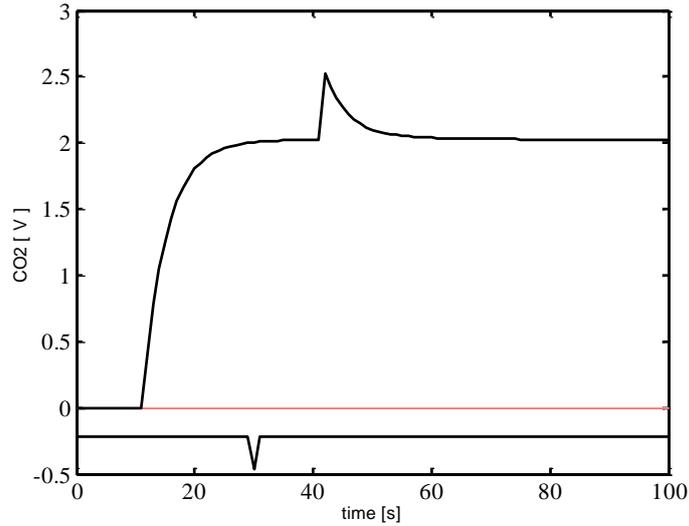


الشكل (4): المخطط الصندوقي للنظام.

يبين الشكل (5) قدرة المنظم على تحقيق القيمة المرجعية لأكاسيد الكربون CO_2 . حيث نلاحظ أن زمن

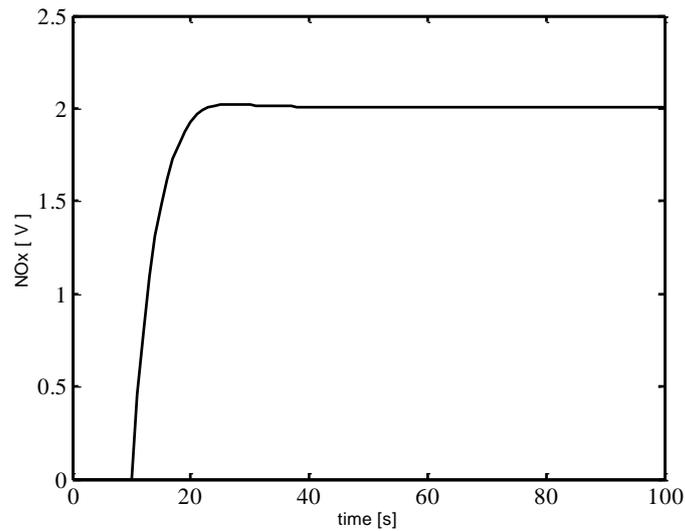


الشكل (5): ضبط أكاسيد الكربون عند القيمة المرجعية (2V).

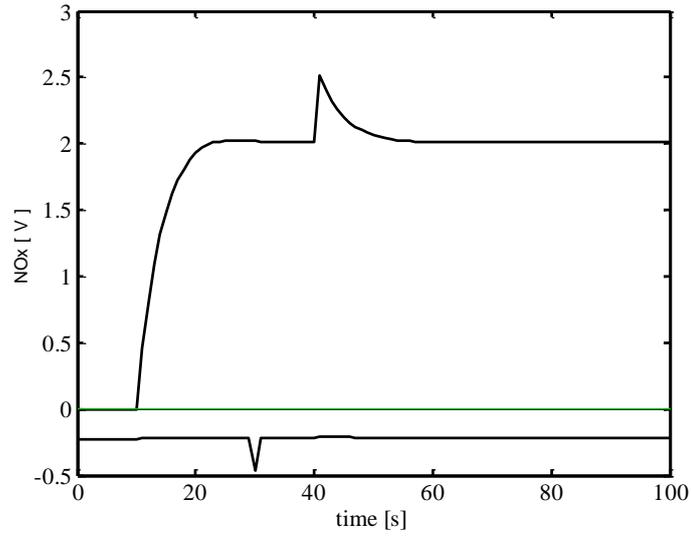


الشكل (6): تعرض الحارق لتشويش من الهواء الثانوي.

الاستقرار هو حوالي 35 s وخطأ الحالة الثابتة مهمل. أما قيم بارامترات المنظم التي تحقق هذه الاستجابة فكانت: كسب فعل التحكم هو $ku=0.25$ وكسب الخطأ هو $ke=0.8$ وكسب مشتق الخطأ فهو $kde=0.2$. يبين الشكل (6) قدرة المنظم على متابعة الخرج وضبطه عند القيمة المطلوبة على الرغم من إحداث تشويش في الحارق من خلال الهواء الثانوي بقيمة $0.25V$ ، حيث إن زيادة الهواء الأولي تؤدي لزيادة CO_2 بشكل ملحوظ. في المرحلة الثانية اعتبرنا الحارق كنظام وحيد الدخل (الهواء الثانوي) - وحيد الخرج (NO_x) وتم أخذ تأثير CO_2 على NO_x ، ويبين الشكل (7) قدرة المنظم على تحقيق القيمة المرجعية المطلوبة لأكاسيد النيتروجين، وذلك عند البارامترات السابقة للمنظم نفسها. وهنا نلاحظ أن زمن الاستقرار لأكاسيد النيتروجين حوالي 30 s وخطأ الحالة الثابتة معدوم. أيضا يبين الشكل (8) قدرة المنظم على متابعة الخرج وإلغاء التشويش عندما يتعرض الحارق لتشويش مقداره $0.25 V$ من الهواء الأولي حيث يزداد فعل التحكم ليزيد مقدار الهواء الثانوي ويضبط مستوى أكاسيد النيتروجين عند القيمة المرجعية.



الشكل (7): تحقيق القيمة المرجعية لأكاسيد النيتروجين.

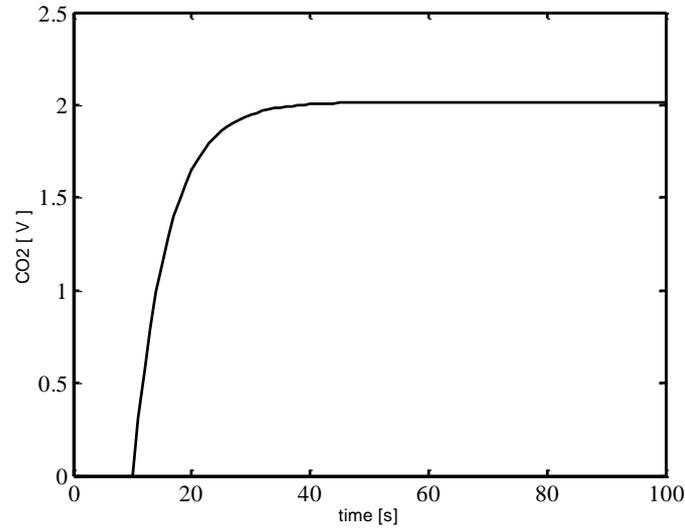


الشكل (8): تعرض الحارق لتشويش من الهواء الثانوي.

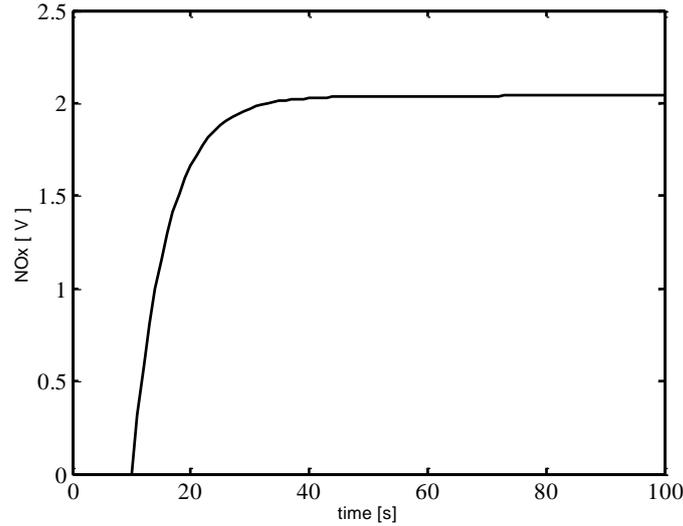
6- تحليل وثوقية المنظم:

إن تصميم منظومات التحكم يعتمد على نموذج الآلة، ولكن معظم النماذج التي يتم استخدامها هي نماذج تقريبية، لذلك يجب أن يكون المنظم ذو وثوقية عالية ليتمكن من المحافظة على أداء مقبول عندما يحصل تغير كبير في بارامترات الحارق.

وبما أن بارامترات عملية الاحتراق تتغير بشكل مستمر قمنا باختبار وثوقية هذا المنظم من خلال استبدال ثوابت تابع التحويل بقيم أخرى تمثل حالات تشغيل مختلفة للحارق مع المحافظة على قيم ثوابت المنظم كما هي.

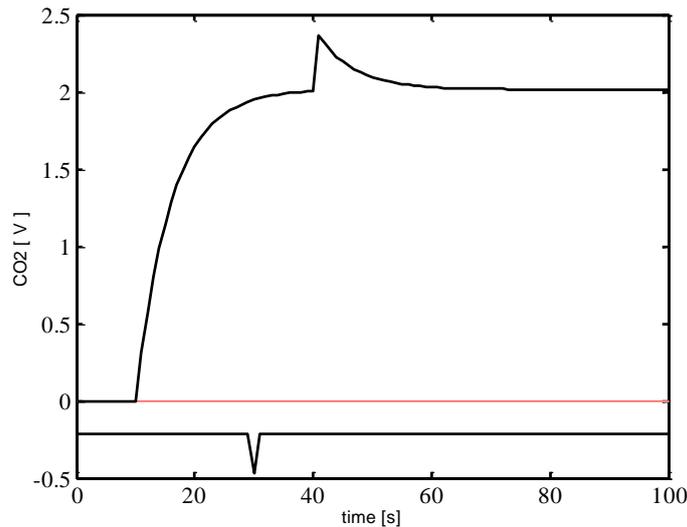


الشكل (9): قدرة المنظم على تحقيق القيمة المرجعية لأكاسيد الكربون عند وضعية التشغيل الجديدة.

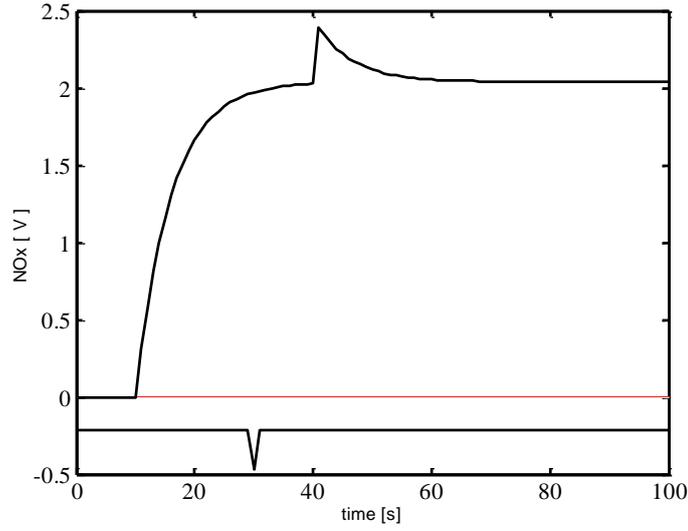


الشكل (10): قدرة المنظم على تحقيق القيمة المرجعية لأكاسيد النيتروجين عند وضعية التشغيل الجديدة.

ويبين الشكل (9) أن خطأ الحالة الثابتة لثاني أكسيد الكربون بقي قريباً من الصفر بالرغم من تغير قيم بارامترات العملية من $(\tau=7.3 \text{ s}, t_d=20 \text{ s}, k=1.88)$ إلى $(\tau=11 \text{ s}, t_d=18 \text{ s}, k=1.3)$ ، وكذلك التغير في أكاسيد النيتروجين مهملاً كما هو موضح في الشكل (10). أيضاً قمنا بتطبيق التشويش السابق على النموذج ذي البارامترات الجديدة، وتبين أن قدرة المنظم كبيرة على إلغاء التشويش ومتابعة الخرج، الشكل (11-12). عملياً يكون التغير الإجمالي في استجابة الحارق صغيراً جداً أي إن وثوقية المنظم وقدرته على إلغاء التشويش والتغير في بارامترات الحارق عالية. وهذا ما يميز المنظم الضبابي عن المنظم التقليدي إذ إن بارامترات المنظم الضبابي تتغير باستمرار من خلال المنطق الضبابي بحيث إنه إذا كان الخطأ كبيراً وسرعة تغيره كبيرة، فإن المنظم يفرض على الحارق أن يستجيب بسرعة والعكس صحيح.



الشكل (11): قدرة المنظم على تحقيق إلغاء التشويش من الهواء الثانوي ومتابعة الخرج عند وضعية التشغيل الجديدة.



الشكل (12): قدرة المنظم على تحقيق إلغاء التشويش من الهواء الثانوي ومتابعة الخرج عند وضعية التشغيل الجديدة.

الاستنتاجات والتوصيات:

تناولنا في هذا البحث استخدام منطق التحكم الضبابي للتحكم بحارق دوامي ثنائي المراحل وضبط فعالية الاحتراق (المتتمثلة بانبعاث ثاني أكسيد الكربون CO_2)، ومعدل انبعاث أكاسيد النيتروجين لنتمكن من مراعاة القيود المفروضة عالمياً للحد من انبعاثات NO_x . وقد بينت النتائج أن المنظم الضبابي يمكنه متابعة القيم المرجعية لكل من CO_2 و NO_x بدقة كبيرة جداً وضمن زمن استقرار صغير وفوق مجال واسع لتشغيل الحارق بالرغم من اللاخطية المتأصلة في نظم الاحتراق المستمر.

إن النتائج التي توصلنا إليها في هذا البحث تمثل الخطوة الأولى باتجاه تطوير منظومة تحكم تعالج مختلف أنواع الملوثات وتطبق على أنواع مختلفة من نظم الاحتراق وتسهم في تحسين مردود هذه النظم.

المراجع:

- 1-BOWMAN, C. T., *Control of Combustion-Generated Nitrogen Oxide Emissions: Technology Driven by Regulation*. Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1992, pp 859-878.
- 2-ARIA, N., *Emissions of Nitrogen Oxides From Stationary Combustion Sources*, J. Ins. Energy, 67, 1994, pp. 61-69.
- 3- GAPTA, A. K., and LILLEY, D. G., *Review: The Environmental Challenge of Gas Turbines*. J Inst Energy, 65, 1992, pp 106-117.
- 4-St.JOHN, D., and SAMUELSEN, S., *Optimal, Active Control of Oxides of Nitrogen (NOx) Emissions from Natural Gas-Fired Burner Using A simple Genetic A lgorithm*. Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1995, pp 673-678.
- 5-BEER, J. M., *Minimizing NOx Emissions from Stationary Combustion; Reaction Engineering Methodology*. Chemical Engineering Science, Vol.49,No.24A, 1994, pp 4067-4083.
- 6-BROUWER, J., AULT, B. A., BOBROW, J. E., and SAMUELSEN, G. S., *Active Control for Gas Turbine Combustors*. Twenty-third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1990, pp 1087-1092.
- 7-ROSS, T., J., *Fuzzy Logic With Engineering Applications*, McGraw-Hill, Inc., (1995).
- 8-TANG, Y., and Xu, L., *Fuzzy Logic Application for Intelligent Control of a Variable Speed Drive*, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 4, 1994, pp. 679-685.
- 9- PASSINO, K., M., *Intelligent Control For Autonomous Systems*, IEEE Spectrum June, 1995.
- 10-YASUNO, T., SUZUKI, T., KAMANO, T., FUKUMI, J. and HARADA, H., *Self-Tuning Fuzzy Feed forward Controller for Positioning System With Progressive Wave Type Ultrasonic Motor*, IPEC-Yokohama, 1995, pp. 1766-1771.
- 11-MAHMOUD, H., and HAMMAD S., *Active control of performance and NO_x emissions of staged gaseous fuel burner*, Proceedings of the 8th ASAT conference 1999, Military Technical College, Cairo, Egypt.