تصميم نظام تحكم ذكي باستخدام المنطق العائم لضبط ضغط الغاز المورد إلى العنفة الغازية في معمل الغاز

الدكتور المهندس أوس ناصيف عثمان

الملخص

يُستخدم غاز الميثان والإيثان في المعامل الغازية ومحطات توليد الطاقة الكهربائية من أجل تحويل الطاقة الحرارية الناتجة عن حرق هذه المركبات إلى طاقة ميكانيكية ومنها لتوليد الكهرباء. يتم بشكل دائم في المعامل الغازية تطوير وتحديث دارات التحكم ومعالجة المشاكل التي تواجه المشغلين في أثناء عمليات التشغيل، الإقلاع، والإيقاف.

تستخدم العنفة الغازية في معمل غاز جنوب الوسطى لتوليد الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل وحدات المعمل كأبراج التقطير، غرفة التحكم، نظام التحكم والمراقبة، نظام الاتصالات وغيرها من الوحدات الرئيسة والمساعدة واللازمة لضمان استمرار إنتاج الغاز ومعالجته.

يتميز التيار الكهربائي الذي تولّدُه العنفة الغازية بتردد محدد تعمل عليه جميع القطع الكهربائية في المعمل وفي حال وجود ذبذبات في التردد يؤدي ذلك إلى فصل المعدة وتوقفها عن العمل، لذا يعتبر من الأهمية القصوى تشغيل العنفة ومراقبتها والحفاظ على استقرارها. ويتم ذلك من خلال منظومة تحكم خاصة بالعنفة متصلة مع نظام التحكم والمراقبة الأساسي (DCS) في المعمل. من أهم الدارات التحكمية هي دارة التحكم بضغط الغاز الذي يغذي العنفة الغازية والذي يجب أن يكون (20 بار) وفي حال تفاوت قيم الضغط لفترات زمنية طويلة يؤدي ذلك إلى توقف العنفة عن العمل وخاصة في مرحلة الإقلاع.

تم في هذا البحث بناء نموذج رياضي لدارة التحكم بضغط الغاز المورد للعنفة الغازية ومحاكاة عمل صمام التحكم وإضافة متحكم تقليدي (PID) ومتحكم عائم Fuzzy–PI ومقارنة أداء كل منها.

الكلمات المفتاحية: العنفة الغازية، نظام التحكم بالضغط، النموذج الرياضي، التحكم العائم، PID, Fuzzy PI، MATLAB.

Design of an Intelligent Control System Using Fuzzy Logic to Regulate the Gas Pressure Supplied to the Gas Turbine in a Gas Processing Plant

Abstract

Methane and ethane gases are used in gas plants and electric power generation stations to convert the thermal energy resulting from the combustion of these compounds into mechanical energy, which is then used to generate electricity.

In gas plants, control systems are continuously developed and updated, and operational issues faced by operators during startup, shutdown, and normal operation are addressed.

The gas turbine at the South Central Gas Plant is used to generate the electrical energy required to operate the plant's units, such as distillation towers, the control room, the control and monitoring system, the communication system, and other main and auxiliary units necessary to ensure continuous gas production and processing.

The electrical current generated by the gas turbine operates at a specific frequency that powers all electrical equipment in the plant. Fluctuations in frequency can cause equipment to trip and cease operation. Therefore, operating, monitoring, and maintaining the stability of the turbine is of utmost importance. This is achieved through a dedicated turbine control system connected to the plant's main Distributed Control System (DCS).

One of the most critical control circuits is the gas pressure control circuit that supplies the gas turbine, which must be maintained at 20 bar. Prolonged deviations in pressure values can cause the turbine to shut down, especially during startup stage.

In this research, a mathematical model of the gas pressure control circuit for the gas turbine was constructed. The operation of the control valve was simulated, and both a conventional PID controller and a Fuzzy-PI controller were implemented and their performance compared.

Keywords: Gas turbine, pressure control system, mathematical model, fuzzy control, PID, Fuzzy PI, MATLAB.

1ـ مـقـــدمـــــــة:

تُعد معامل الغاز من المنشآت الصناعية الحيوية التي تتألف عادةً من عدة وحدات تشغيلية مترابطة، تعمل بشكل متكامل لضمان استمرارية الإنتاج وكفاءة المعالجة. ويُعتبر تأمين مصدر كهرباء موثوق لهذه الوحدات شرطًا أساسيًا للحفاظ على استقرار العمليات التشغيلية وضمان جودة المخرجات.

في المعمل موضوع هذا البحث، يتم تزويد جميع الوحدات بالطاقة الكهربائية عبر عنفة غازية رئيسية، الموضحة في الشكل (1)، والتي تُحوِّل الطاقة الحرارية الناتجة عن احتراق الغاز الطبيعي إلى طاقة ميكانيكية ثم كهربائية. وتتميز هذه المنظومة بقدرتها على توفير الكهرباء بشكل مباشر ومستمر، بما يتناسب مع متطلبات الأحمال الصناعية المختلفة.

تُغذَّى العنفة الغازية بالغاز الطبيعي عند ضغط محدد ومدروس، يضمن تحقيق الاستقرار في عملية الاحتراق وكفاءة تحويل الطاقة. إن التحكم في ضغط الغاز المغذي يُعد من العوامل الجوهرية التي تؤثر على أداء العنفة، حيث يرتبط بشكل مباشر بمستوى القدرة الكهربائية المنتجة، وبمدى موثوقية التزويد للطاقة داخل المعمل.

من هنا، تأتي أهمية دراسة العلاقة بين ضغط الغاز المغذي وأداء العنفة الغازية، وتأثير ذلك على استمرارية تزويد الوحدات المختلفة في المعمل بالكهرباء. إذ يُسهم هذا البحث في تقديم رؤية علمية حول كيفية تحسين كفاءة التشغيل وضمان الاعتمادية في منظومات توليد الطاقة داخل معامل الغاز.



الشكل (1) العنفة الغازية في معمل غاز الفرقلس

يتم تشغيل العنفة الغازية في المعمل عن طريق تزويدها بغاز طبيعي بضغط (20 بار)، إن عملية ضبط ضغط الغاز الداخل إلى العنفة ليست مجرد إجراء تشغيلي روتيني، بل هي شرط أساسي لنجاح مرحلة الإقلاع .ففي هذه المرحلة الحرجة، يجب أن يتم تخفيض الضغط من 40 بار إلى القيمة التشغيلية المثلى (20 بار) خلال زمن قصير جدًا لا يتجاوز بضع ثوانٍ. أي تأخير أو تجاوز في الضغط قد يؤدي إلى:

- فشل الإقلاع بسبب عدم استقرار اللهب داخل غرفة الاحتراق.
- توليد اهتزازات ميكانيكية تؤثر على شفرات العنفة.
- تفعيل أنظمة الحماية التلقائية وإيقاف التشغيل.
- خسائر تشغيلية وزمن توقف غير مرغوب فيه.

لذلك، فإن التحكم الدقيق والسريع في ضغط الغاز خلال مرحلة الإقلاع يُعد من أكثر المتطلبات حساسية في تشغيل العنفات الغازية، ويعتمد بشكل مباشر على أداء صمام التحكم بالضغط.

تشير التجارب العملية في معمل غاز جنوب الوسطى إلى أن استجابة صمام التحكم يجب أن تكون لحظية ومضبوطة، خاصة في مراحل الإقلاع والتحميل السريع، حيث يكون النظام في حالة غير مستقرة حراريًا وهيدروليكيًا.

يبين الشكل (2) خط الغاز المزود للعنفة الغازية ومركب عليه صمام التحكم بالضغط مع المقاييس الخاصة بالضغط.



الشكل (2) صمام التحكم بتدفق الغاز للعنفة مع منظومة قياس ضغط الغاز

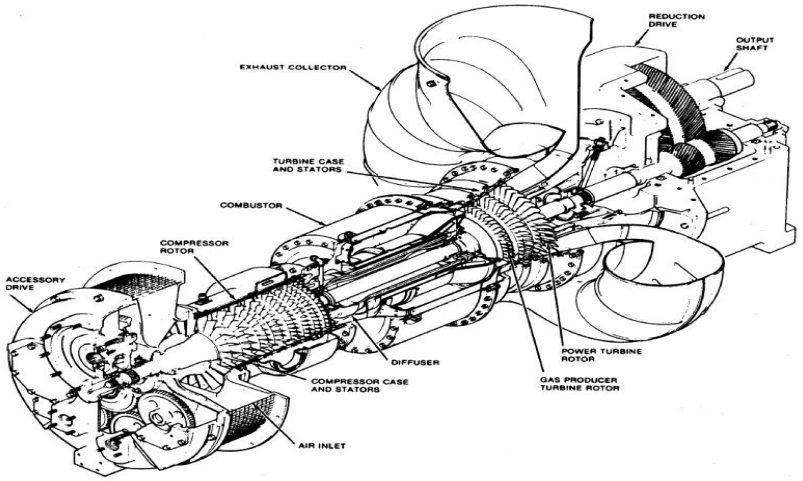
- **العنفة الغازية [5]:**

العنفة الغازية تعمل وفق دورة برايتون المفتوحة، حيث يتحول الهواء الخارجي إلى طاقة ميكانيكية عبر ثلاث مراحل رئيسية:

1. الضغط :يدخل الهواء من الجو عبر مدخل الهواء، ثم يُضغط بواسطة دوّار الضاغط والريش الثابتة داخل غلاف الضاغط، مما يرفع ضغطه ودرجة حرارته.

2. الاحتراق : يُرسل الهواء المضغوط إلى غرفة الاحتراق، حيث يُحقن الوقود (مثل الغاز الطبيعي) ويُشعل، مما ينتج غازات ذات حرارة وضغط عاليين.
3. التمدد وتوليد الطاقة :تمر الغازات الساخنة عبر دوّار عنفة إنتاج الغاز ثم دوّار عنفة القدرة، حيث تتمدد وتدير هذه الدوارات، مولدة طاقة ميكانيكية تُنقل عبر عمود الخرج إلى الحمل (مولد كهربائي أو مروحة دفع).

يبين الشكل (3) رسم توضيحي للعنفة الغازية [5]:



الشكل (3) رسم توضيحي لأجزاء العنفة الغازية

2-الدراسات المرجعية:

بمراجعة الأبحاث المنشورة في هذا المجال نجد أنه في **في عام 2026** قام الباحثون بتطوير استراتيجية تحكم هجين تعتمد على المنطق الضبابي بهدف تعزيز استقرار أنظمة القدرة الكهربائية متعددة المناطق، خصوصًا مع التوسع في استخدام مصادر الطاقة المتجددة. جاءت هذه الدراسة لمعالجة المشكلات الناتجة عن اللاخطية والاضطرابات السريعة التي تؤثر على دقة التحكم في التردد والجهد عند الاعتماد

على المتحكمات التقليدية. اعتمد الفريق البحثي على دمج متحكم PID متقدم مع نظام ضبابي من نوع Mamdani لتوفير استجابة أكثر ثباتًا تحت ظروف تشغيل متغيرة. وأظهرت نتائج المحاكاة أن النموذج الهجين قدّم أداءً أفضل من PID التقليدي من حيث سرعة الاستجابة وتقليل التجاوز وتحسين التخميد. وتشير النتائج إلى أن دمج المنطق الضبابي مع تقنيات التحكم الكلاسيكية يمكن أن يرفع موثوقية الشبكات الكهربائية الحديثة بشكل ملحوظ.[1]

عام (2025) قام الباحثون بإجراء دراسة لمنظومة التحكم بدرجة الحرارة في وحدة التكسير التحفيزي للسوائل في مصفاة النفط، حيث تم تصميم متحكمين للتحكم في درجة الحرارة في المفاعل (riser) وفي وحدة المجدد(ReGenerator) ، المتحكم الأول هو متحكم تقليدي من نوع PI والثاني متحكم ضبابي (Fuzzy Logic)ذو خمس مجموعات و25 قاعدة تحكم.

تم إجراء المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB، وأظهرت النتائج تفوق المتحكم الضبابي بشكل واضح على المتحكم التقليدي من حيث تحقيق استجابة أكثر استقراراً وزمن الوصول إلى استقرار المنظومة أقصر وسرعة التعامل مع الاضطرابات.**[2]**

في عام (2024) ناقش الباحث تطوير خوارزمية PID ثنائية الدرجات للتحكم بسرعة وضغط التوربينات الغازية البحرية. ويوضح أن التحكم التقليدي فعال في ظروف التشغيل المستقرة، لكنه يحتاج إلى ضبط دقيق للمعاملات لتجنب التذبذبات أثناء الإقلاع أو تغير الحمل [3].

- **أُجري في عام (2021)** تصميم هياكل مختلفة لمتحكمات العنفات الغازية باستخدام المنطق العائم. حيث يوضح الباحث أن التحكم العائم أكثر مرونة منPID ، ويستجيب بسرعة للتغيرات المفاجئة في ضغط الغاز، مما يجعله مناسبًا جدًا لمراحل الإقلاع [4] .
- **قدم الباحث في عام (2023)** حلاً عملياً للتحكم التكيفي في ضغط الوقود خلال الإقلاع والتشغيل. يوضح البحث أن التحكم التكيفي يُقلل من احتمالية فشل الإقلاع أو توقف العنفة، عبر تعديل الضغط بشكل ديناميكي وفق ظروف التشغيل الفعلية [5] .
- **وفي عام (2018) ناقش الباحث** تطبيق متحكم PID قوي على نظام توربين غازي يعمل بخلايا وقود صلبة ويوضح أن التحكم التقليدي PID يمكنه التعامل مع تأخيرات زمنية وعدم يقين في الكسب، مما يجعله مناسبًا لضبط ضغط الغاز وتدفقه بشكل مستقر في ظروف تشغيل مختلفة.[6]

3-مشكلة البحث:

تؤكد الأبحاث منشورة أن أي تذبذب في ضغط الغاز خلال الإقلاع يؤدي إلى اضطراب في معدل التدفق والاحتراق، مما يمنع العنفة من الوصول إلى سرعة التشغيل المطلوبة. وبالتالي تظهر في مثل هذه المنظومات أهمية استخدام وتطوير أنظمة التحكم المستخدمة في عمليات الضبط.

حيث يتم حاليا استخدام متحكم تقليدي (PID) لضبط صمام التحكم بالضغط المركب على خط الغاز للعنفة الغازية، إلا أن استخدام المتحكم التقليدي أظهر بعض المشاكل التشغيلية المتكررة عند عملية إقلاع العنفة الغازية نتيجة المدة الزمنية اللازمة لضبط ضغط الغاز عند القيمة المثالية للإقلاع، وانطلاقاً من هذه المشكلة تم إجراء هذا البحث لدراسة تصميم نظام تحكم ذكي للتحكم بضغط الغاز خلال الفترة الزمنية المسموح بها دون حدوث مشاكل الإقلاع والتشغيل.

4-هدف البحث:

الهدف الرئيس للبحث هو **تصميم منظومة تحكم ذكية** باستخدام المنطق العائم لضبط ضغط الغاز المورد إلى العنفة الغازية خلال زمن قصير جدًا، بما يضمن:

- استقرار عملية الاحتراق.
- تحسين كفاءة تحويل الطاقة الحرارية إلى ميكانيكية.
- حماية المعدات من الإجهادات الميكانيكية والحرارية.
- تقليل زمن التوقف وتحقيق تشغيل آمن ومستمر.

كما يسعى البحث إلى **مقارنة أساليب التحكم التقليدي** (PID) مع **أساليب التحكم الحديثة** (Fuzzy control) في تنظيم ضغط الغاز، لتحديد الأنسب منها في ظروف التشغيل المختلفة، وخاصة في مرحلة الإقلاع التي تتطلب استجابة لحظية ومرونة عالية.

5-مواد وطرق البحث: تم إنجاز هذا البحث عن طريق استخدام برنامج MATLAB/Simulink لمحاكاة عمل منظومة التحكم بضغط الغاز الحقيقية في معمل غاز الفرقلس حيث تم محاكاة عمل كل من:

- **منظومة توريد الغاز** :خط أنابيب رئيسي يورد الغاز الطبيعي بضغط يصل إلى 40 بار.

- **صمام التحكم بالضغط** :(Gas Control Valve) صمام تخفيض ضغط عالي الكفاءة، مزود بمشغل كهربائي–ميكانيكي يسمح بالاستجابة السريعة لتغيرات الحمل.
- **أجهزة القياس:**
- حساسات ضغط (Pressure Transducers) لقياس الضغط قبل وبعد الصمام.
- حساسات تدفق (Flow Meters) لمراقبة معدل الغاز الداخل.
- نظام تسجيل بيانات (Data Acquisition System) لتخزين وتحليل القراءات الزمنية.
- **وحدة التحكم الإلكترونية:**(Controller)
- متحكم تقليدي (PID Controller) لضبط الضغط وفق معادلات التناسبية والتكاملية والتفاضلية.
- متحكم عائم (Fuzzy Logic Controller) يعتمد على قواعد منطقية للتعامل مع التغيرات المفاجئة واللاخطية.

6–خطة ومنهج البحث:

- **المرحلة الأولى: جمع البيانات التشغيلية**
  - تسجيل قيم الضغط الداخل (40 بار) والضغط المطلوب عند مدخل العنفة (20 بار).
  - مراقبة زمن الاستجابة خلال مرحلة الإقلاع، حيث يجب أن يتم تخفيض الضغط خلال ثوانٍ معدودة.
- **المرحلة الثانية: النمذجة الرياضية**
  - صياغة نموذج رياضي يمثل دارة تدفق الغاز إلى العنفة الغازية مع الصمام ومصدر الغاز المضغوط والحساسات مع إضافة المتحكم اللازم للتحكم بتدفق الغاز.
- **المرحلة الثالثة: المحاكاة والتحليل**
  - إدخال معاملات التحكم التقليدي(PID)
  - تصميم متحكم عائم (Fuzzy) للتحكم بضغط الغاز
  - تشغيل النموذج تحت ظروف مختلفة (إقلاع، حمل ثابت، تغير مفاجئ في أحد البارمترات).
  - تقييم أداء كل نظام تحكم من حيث:
  - زمن الاستجابة.(Response Time)
  - استقرار الضغط.(Stability)

- منع تجاوز الضغط المسموح به.(Overshoot)

- **المرحلة الرابعة: التحقق العملي:**
- مقارنة النتائج النظرية مع البيانات التشغيلية الحقيقية من معمل غاز جنوب الوسطى.

منهجية المقارنة:

- **التحكم التقليدي** :(PID) يُختبر في ظروف تشغيل مستقرة لمعرفة مدى دقته في ضبط الضغط.
- **التحكم العائم** :(Fuzzy) يُختبر في ظروف الإقلاع والتغيرات المفاجئة لمعرفة قدرته على التعامل مع اللاخطية.
- **بارمترات تقييم الأداء:** زمن الاستجابة، نسبة الخطأ، الاستقرار الديناميكي، وكفاءة التشغيل.

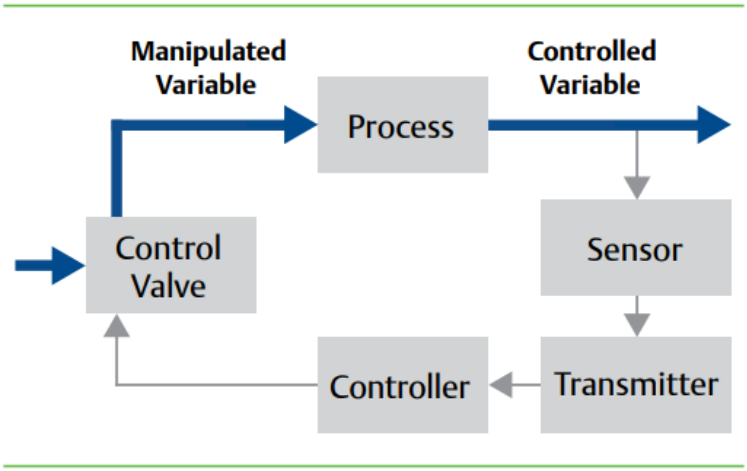
تُعد العنفات الغازية من نوع **MAN Turbo** من أهم المعدات التشغيلية في معامل الغاز، حيث تُستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل وحدات المعمل المختلفة مثل الضواغط، أنظمة التحكم، ووحدات المعالجة. تعتمد هذه العنفات على الغاز الطبيعي كمصدر رئيسي للطاقة، والذي يُورّد بضغط مرتفع يصل إلى 40 بار، ثم يُخفض عبر صمام تحكمي إلى الضغط التشغيلي المناسب (20 بار) قبل دخوله إلى غرفة الاحتراق.

- تتم عملية التشغيل وفق تسلسل محدد يبدأ بتوريد الغاز والهواء المضغوط إلى غرفة الاحتراق، حيث يحدث المزج والاشتعال لتوليد غازات ساخنة ذات ضغط وسرعة عاليين. هذه الغازات تمر عبر شفرات التوربين فتدفعها، محوّلة الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية، ثم تُستخدم هذه الطاقة في تدوير عمود متصل بمولد كهربائي، لينتج الكهرباء اللازمة لتشغيل المعمل بشكل مستقل وموثوق [7].
- إن نجاح هذه العملية يعتمد بشكل مباشر على ضبط ضغط الغاز خلال مرحلة الإقلاع، حيث يجب أن يتم تخفيض الضغط بسرعة ودقة لتفادي أي تجاوز يؤدي إلى فشل الإقلاع أو اضطراب الاحتراق. لذلك، يُعتبر التحكم في ضغط الغاز عبر صمام التحكم التنظيمي من أهم عناصر ضمان التشغيل الآمن والكفء للعنفات الغازية [8].

الصمام التحكمي [9][10] :

تستخدم محطات المعالجة الحديثة شبكة واسعة من الحلقات التحكمية لضبط متغيرات العملية مثل الضغط، التدفق، المنسوب، ودرجة الحرارة ضمن نطاق تشغيل محدد يضمن جودة المنتج النهائي. هذه

الحلقات تتعرض لاضطرابات داخلية وخارجية تؤثر على المتغيرات المُراقبة، مما يستدعي وجود آلية فعّالة لإعادة المتغير إلى القيمة المرجعية المطلوبة.



الشكل (7) حلقة التحكم المغلقة المستخدمة في تنظيم ضغط الغاز في منظومة التشغيل.

يقوم المتحكم بمعالجة المعلومات القادمة من المستشعرات والمرسلات، ويحدد الاستراتيجية المناسبة للتعويض عن الاضطرابات. وعند اكتمال عملية القياس والمقارنة والحساب، يتولى عنصر التحكم النهائي تنفيذ هذه الاستراتيجية. يُعتبر صمام التحكم (Control Valve) أكثر عناصر التحكم النهائية شيوعًا في الصناعات، حيث يقوم بتنظيم تدفق المائع (غاز، بخار، ماء، أو مركبات كيميائية) لتعويض تأثير الاضطرابات والتي قد تكون زيادة أو نقصان في أحد البارمترات كالحرارة، الضغط، التدفق والحفاظ على المتغير المُراقب قريبًا من القيمة المرجعية.

- **آلية عمل الصمام التحكمي:**

يعتمد الصمام على فتحة متغيرة القطر، عند تقليص الفتحة :يزداد فقدان الضغط عبر الصمام، فينخفض الضغط عند المخرج، عند توسيع الفتحة يزداد التدفق ويرتفع الضغط عند المخرج. يتم التحكم بالفتحة عبر مشغل (Actuator) كهربائي أو هيدروليكي يستجيب لإشارة من وحدة التحكم. وبالتالي فإن جوهر عملية التحكم بضغط الغاز تعتمد على التحكم بتدفق الغاز المار عبر الصمام، أي أنه في

حالة زيادة فتحة الصمام وبالتالي زيادة تدفق الغاز يؤدي ذلك إلى انخفاض الضغط والعكس صحيح، أي أن العملية يجب أن تكون دقيقة بحيث يتم تزويد العنفة الغازية بكمية الغاز اللازمة للتشغيل مع الحفاظ على الضغط ضمن القيم المطلوبة. بناءً عليه ستكون عملية النمذجة الرياضية للحصول على معادلة تربط بين تدفق الغاز وضغط الغاز.

- **المرحلة الثانية: بناء النموذج الرياضي [11]:**

في حالتنا الخليط الغازي المستخدم هو غاز طبيعي وفق النسب التالية:

C1=96.24(غاز الميتان)

C2=2.66 (غاز الإيتان)

C3=0.81 (غاز البروبان)

C4=0.29 (غاز البوتان)

في حالة جريان الغاز عبر صمام تخفيض ضغط نميز نوعين من التدفق. التدفق الحرج والتدفق غير الحرج ولمعرفة نوع تدفق الغاز في حالتنا هذه:

- **درجة حرارة الغاز**

$$T=25℃ = 298.15\ (K)$$

خواص الخليط الغازي المار عبر الصمام وهو خليط غاز من غازات الإيتان والميتان والبروبان والبوتان وغازات أخرى بنسب ضئيلة وبالتالي لحساب **الوزن الجزيئي المتوسط** (Molecular Weight) لخليط غازي، نستخدم العلاقة التالية:

$$MW_{mix} = \sum y_i * MW_i \qquad [11].....(1)$$

حيث:

y_i الكسر المولي لكل مكوّن.

MW_i الوزن الجزيئي للمكوّن.

ونبين في الجدول أدناه قيم الكسر المولي و الوزن الجزيئي لكل مركب من مركبات الغاز الطبيعي:

جدول (1) نسب و قيم الكسر المولي والوزن الجزيئي لمركبات الغاز الطبيعي

المركب الغازي	النسبة المئوية في الخليط	الكسر المولي	الوزن الجزيئي
C1 (الميثان CH_4)	93.28 %	y=0.9328	MW=16.04 g/mol
C2 (الإيثان $C_2\ H_6$)	2.66%	y=0.0266	MW=30.07 g/mol

C3 (البروبان $C_3 H_8$)	0.81%	y=0.0081	MW=44.10 g/mol
C4 (البيوتان $C_4 H_{10}$)	0.29%	y=0.0029	MW=58.12 g/mol

$$MW_{mix} = 16.29 \frac{g}{mol}$$

- **الكثافة النسبية للخليط:**

$$G_{air} = 28.97$$

$$G_{g-mix} = \frac{\mathrm{MW}mix}{G_{air}} = \frac{16.29}{28.97} = 0.562 \quad \ldots\ldots\ldots(2)$$

- **النسبة الحرارية النوعية للخليط الغازي (K)**

باستخدام المتوسط التقريبي للنسبة الحرارية النوعية لكل غاز بحسب نسبه المولية في الخليط، يمكن إيجاد النسبة الحرارية النوعية للخليط الغازي وفق المعادلة:

$$\mathrm{k_{mix}} = \sum_{i=1}^{n} y_i \cdot \mathrm{k_i} \quad \ldots\ldots\ldots(3)$$

حيث:

$\mathrm{k_{mix}}$ النسبة الحرارية النوعية للخليط.

y_i الكسر المولي (أو الكتلي) للمكوّن

$\mathrm{k_i}$ النسبة الحرارية النوعية لكل غاز منفرد.

وبالتالي بالنسبة للخليط الغازي المستخدم، نبين في الجدول أدناه السعة الحرارية والسعة الحجمية من أجل حساب السعة الحرارية النوعية لكل مركب:

جدول (2) خصائص المركبات الغازية المكونة للخليط			
الغاز	السعة الحرارية	السعة الحجمية	السعة الحرارية النوعية
	(C_p) $[J/mol \cdot K]$	$(C_v)[J/mol \cdot K]$	(K)
CH_4	35.7	27.0	1.31
C_2 H_6	52.5	44.0	1.19
C_3 H_8	73.6	65.1	1.13
C_4 $H_{1\ 0}$	97.5	89.0	1.09

k_{mix}=1.292

- **حساب نسبة انخفاض الضغط x:**

من العلاقة:

$$x = \frac{\Delta P}{P_1} \quad \text{.....(4)}$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad \text{.....(5)}$$

$$\Delta P = 40 - 20 = 20\ bar$$

$$x = 0.5$$

- **حساب معامل النسبة الحرارية النوعية للخليط الغازي** F_k:

$$F_k = \frac{k}{1.4} \quad \text{.....(6)}$$

الرقم (1.4) هو القيمة المرجعية للهواء الجاف عند الظروف القياسية.

$$F_k = \frac{1.292}{1.4} = 0.9229$$

يمكن تحديد حالة التدفق من خلال حساب الجداء $F_k . x_t$ حيث أن x_t **معامل الضغط الحرج للصمام** وهو معامل خاص بكل صمام تحكمي، يُعطى عادةً من الشركة المصنّعة، ويعتمد على **تصميم الصمام**

للصمام التحكمي المستخدم يكون $x_t = 0.75$

$$F_k . x_t = 0.9229 \,.\, 0.75 = 0.6922 \qquad .....(7)$$

وبما أن: $x = 0.5 < 0.6922$

فإن التدفق الغازي عبر الصمام غير حرج والمعادلة المستخدمة في حالة تدفق غير حرج:[12]

$$Q = N_1 . c_v . f_b . P_1 . y . \sqrt{\frac{x}{G_g . T . z}} \qquad .....(8)$$

وفي حال استخدام التدفق الكتلي للغاز بدلا من التدفق الحجمي تصبح المعادلة السابقة بالشكل التالي:

$$m = N_6 . c_v . f_b . y \sqrt{x . P_1 . \rho_1} \qquad .....(9)$$

وبتصحيح المعادلة للحصول على الضغط بدلالة التدفق الحجمي:

$$P_2 = P_1 - \frac{1}{\rho_1} . \left(\frac{m}{N . c_v . f_b . y}\right)^2 \qquad .....(10)$$

حيث أن ρ_1 الكثافة النوعية للخليط الغازي عند الشروط الابتدائية(الضغط الأولي) و التي يمكن إيجادها من العلاقة:

$$\rho_1 = \frac{P_1 . Mw_{mix}}{Z . R . T_1} \qquad .....(11)$$

Z=0.94 للخليط الغازي من غازي الميتان والإيتان .

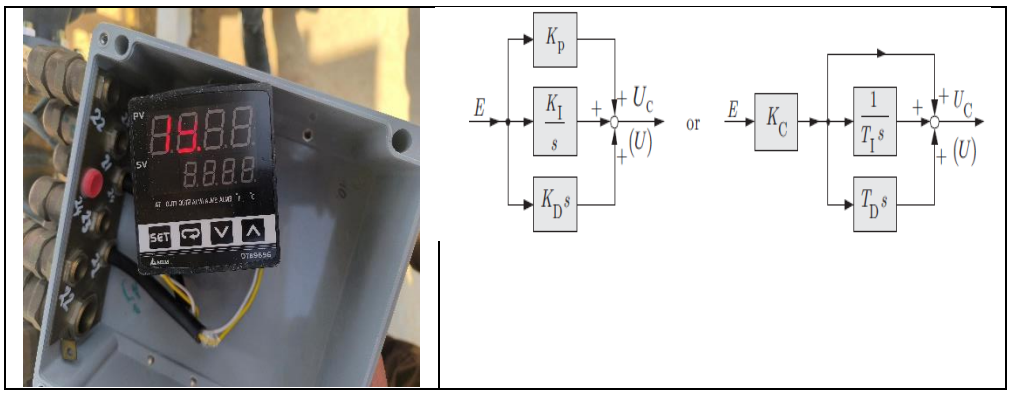
y : عامل التمدد، هو قيمة تعتمد على ضغط الخرج و بذلك فإن أفضل طريقة لإيجاد قيمة (y) هي طريقة التكرار العددية للحصول على قيمة توافق قيمة الضغط النهائي و نقوم باستخدام هذه القيمة في النموذج الرياضي

$$y = 1 - \frac{x}{3.F_k.x_t} \quad \text{.....(12)}$$

المرحلة الثالثة: محاكاة النموذج الرياضي:

المتحكم التقليدي (PID):[13]

يوضح الشكل (8) بنية المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي، والمتحكم التقليدي المستخدم في تنظيم ضغط الغاز للعنفة الغازية



الشكل (8) المخطط الصندوقي للمتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي

معادلة عمل هذا المتحكم [13]:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{..... (13)}$$

التابع التحويلي للمتحكم:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left[1+\frac{1}{T_i s}+T_d s\right] \quad \text{.....(14)}$$

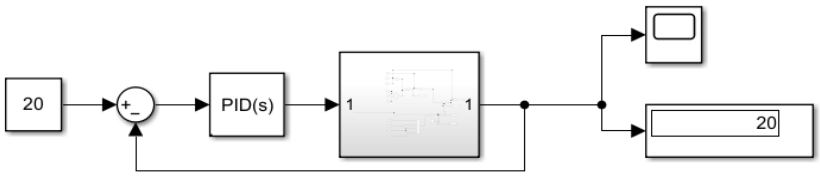
نطلق اسم متغيرات المتحكم على البارامترات المراد ضبطها أو توليفها حتى نحصل على استقرار النظام الصناعي المراد التحكم به وتكون بارامترات التوليف بالنسبة للمتحكم هي:

الكسب أو الربح: $K_c = K_P$

زمن الفعل التكاملي: $T_I = \frac{K_P}{K_I}$

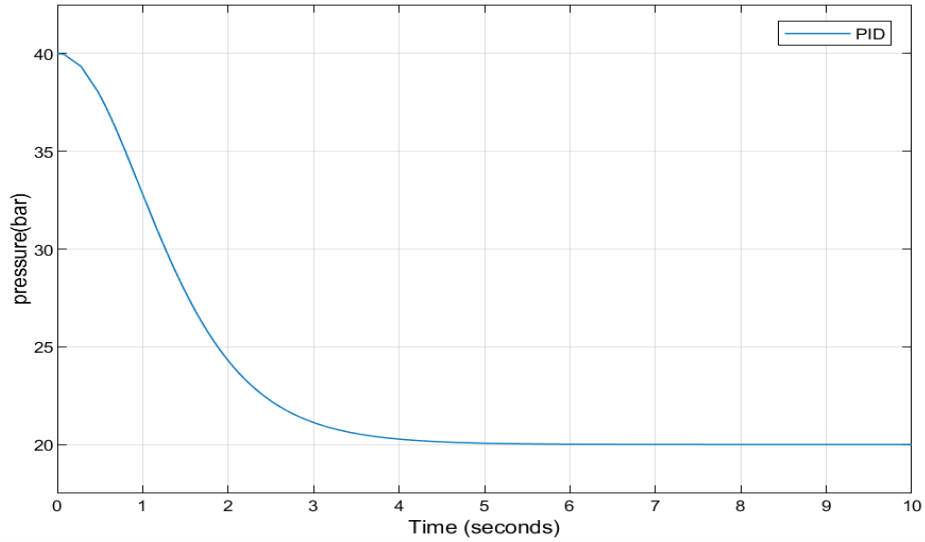
زمن الفعل التفاضلي: $T_D = \frac{K_D}{K_P}$

باستخدام برنامج MatLab، تم بناء نموذج رياضي يحاكي عمل الدارة التحكمية لصمام الغاز في بيئة Simulinkكما هو موضح في الشكل (9):



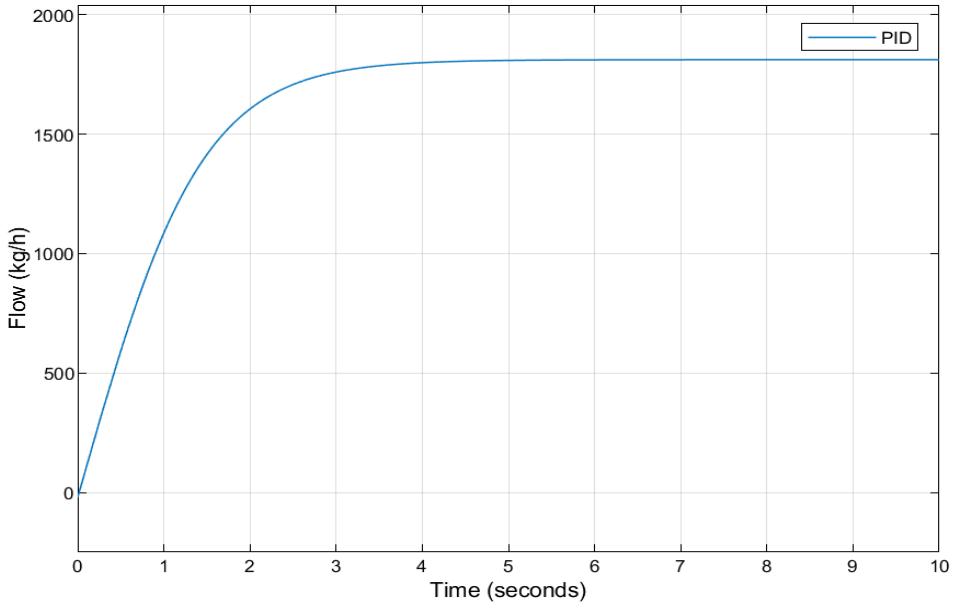
الشكل (9) النموذج الرياضي للدارة التحكمية لصمام تنظيم ضغط الغاز

ويبين الشكل (10) نتائج تطبيق المتحكم التقليدي على النموذج الرياضي:



الشكل (10) ضغط الغاز باستخدام المتحكم (PID)

ويبين الشكل (11) التدفق الكتلي عبر الصمام التحكمي باستخدام المتحكم التقليدي:



الشكل (11) التدفق الكتلي عبر الصمام التحكمي باستخدام المتحكم PID

- من الأشكال السابقة يتبين لنا أن المتحكم PID يعمل بكفاءة في تقليل الخطأ بسرعة دون تذبذب. والاستجابة تشير إلى تخميد جيد، أي أن النظام لا يعاني من اهتزازات أو تأرجح. ولا يوجد Overshoot إيجابي، بل هبوط مباشر نحو القيمة المرجوة، مما يناسب أنظمة الضغط التي تتطلب استقرارًا سريعًا

تحليل منحني الاستجابة:

- المرحلة الأولى (0–3 ثوانٍ):
  - استجابة هبوطية مفرطة التخميد أي أن المتحكم يطبّق جهدًا متوازنًا بين P و او Dلتقليل الخطأ دون تذبذب.
  - قوة التصحيح :متوسطة؛ لا يوجد قفزات حادة.
  - سلامة التشغيل :مناسبة للأنظمة الحساسة ميكانيكيًا.
- المرحلة الثانية (3–7 ثوانٍ):
  - اقتراب تدريجي من نقطة الضبط—المركّب التكاملي I يزيل الخطأ المتبقي ببطء.
  - مزايا :استقرار جيد، مقاومة للضجيج.
  - عيوب :زمن استقرار أطول، طاقة تصحيح موزعة على زمن أطول.
- المرحلة النهائية (7–10 ثوانٍ):
  - استقرار عند 20 بار—الخطأ في الحالة المستقرة يقارب الصفر.

القيم التشغيلية في المعمل:

تم في هذه المرحلة تجريب عدة قيم لبارامترات المتحكم التقليدي نبين بعضها في الجدول أدناه (الشكل (12):

الجدول (3) قيم تجريبية للمتحكم التقليدي (PID)				
الضغط النهائي	D	I	P	البارامتر
19.7	0	-55	1	تجربة (1)
19.6	0	-50	1	تجربة (2)
20	0	-63.3	1	تجربة (3)

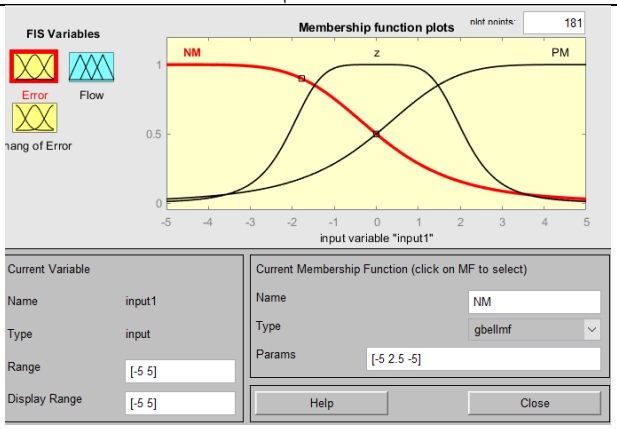
حيث أظهرت التجارب الأولية أن إضافة المركبة التفاضلية في متحكم PID أدّى إلى تضخيم الضوضاء وظهور اهتزازات غير مرغوبة في إشارة التحكم، مما انعكس سلباً على استقرار النظام، لذلك تم الاستغناء عن الجزء التفاضلي والاكتفاء بالمركبتين التناسبية والتكاملية لتحقيق استجابة أكثر ثباتًا ونعومة.



الشكل (12) قيم الضغط المقاسة وفق بارامترات مختلفة للمتحكم التقليدي

- **تصميم متحكم (Fuzzy-Pi) للتحكم بضغط الغاز:**

تم تحديد مداخل المتحكم بأنها الخطأ $(e(t))$ (الفرق بين القيمة المرجعية والقيمة الناتجة للضغط) بمجال عددي [-5,5] وتغير الخطأ ($\Delta(t)$) بمجال عددي [-5,5] والخرج (إشارة التحكم $u(t)$) هو تدفق الغاز المار عبر الصمام وبمجال عددي [-5,5]، وتم اعتماد متحكم عائم بثلاث توابع انتماء من نوع (g_ball) كما هو موضح في الشكل (13).



الشكل (13) توابع انتماء من شكل (**g_ball**)

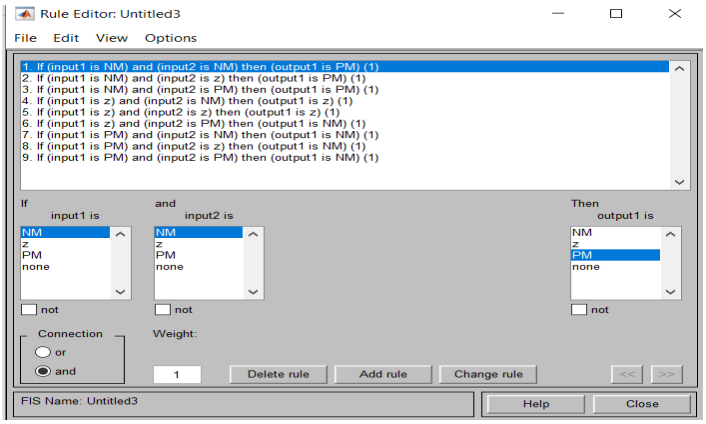
تحتاج عملية تصميم قواعد المتحكم العائم إلى معرفة جيدة بالعملية التشغيلية المراد التحكم بها، فالقواعد تمثل خبرة المراقب أو المشغل في صياغة ردود فعل النظام تجاه الحالات المختلفة[14] ، فمثلا في حالتنا هذه في حال كان الخطأ موجب وبالتالي فإن الضغط بعد عملية التحكم أصغر من القيمة المرجعية وبالتالي نحتاج إلى زيادة التدفق لتعديل القيمة ومن هذا الأساس تم بناء تسع قواعد للمتحكم المصمم **كما هو موضح في الجدول أدناه:**

جدول قواعد الخبرة للمتحكم الضبابي			
E(t) / $\Delta(t)$	**NM**	**Zero**	**PM**
NM	PM	Zero	NM
Zero	PM	Zero	NM
PM	PM	NM	NM

يمثّل العمود الأول في الجدول القيمَ اللغوية لتغيّر الخطأ، بينما يمثّل الصفّ الأول القيمَ اللغوية للخطأ نفسه. ويعبّر كل عنصر داخل الجدول عن القيمة اللغوية لخرج المتحكم الناتجة عن تقاطع قيمة الخطأ مع قيمة تغيّر الخطأ، كما يمكننا كتابة القواعد بطريقة أخرى، فنكتب القاعدة الأولى كالتالي

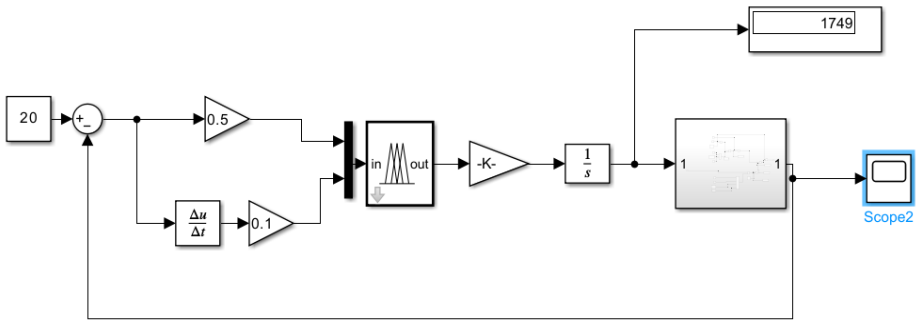
1- إذا كان الخطأ (دخل المتحكم الأول) سالب وتغيير الخطأ (دخل المتحكم الثاني) سالب فإن خرج المتحكم (إشارة التحكم) ستكون موجبة

ويوضح الشكل (14) قواعد الخبرة التي تم اعتمادها لتصميم المتحكم:



الشكل (14) قواعد الخبرة المستخدم في تصميم المتحكم العائم

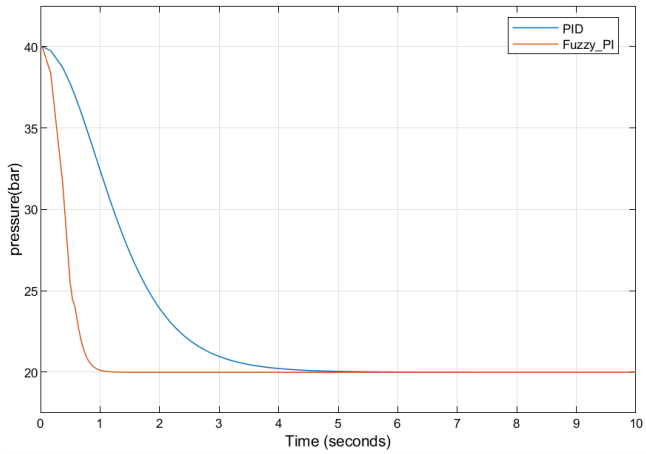
ويبين الشكل (15) محاكاة النموذج الرياضي للصمام التحكم باستخدام متحكم Fuzzy_PI:



الشكل (15) المتحكم العام Fuzzy_PI

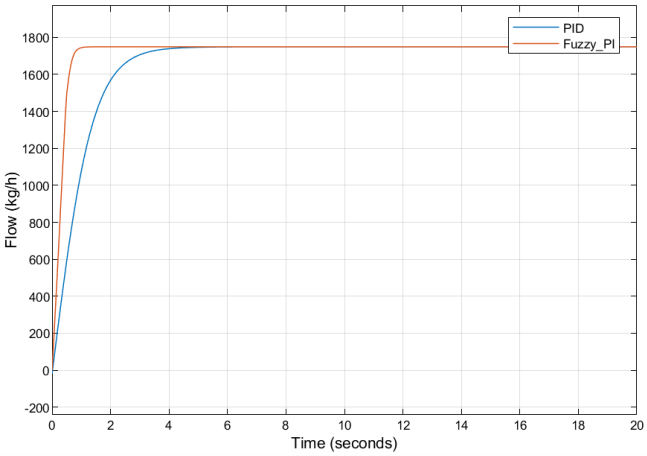
المقارنة:

أولاً: الحالة الأولى: التحكم بضغط الغاز دون وجود اضطراب: يبين الشكل (16) نتائج تطبيق كل من المتحكم التقليدي والمتحكم العائم:



الشكل (16) ضغط الغاز باستخدام المتحكم PID والمتحكم Fuzzy_PI

كما يبين الشكل (17) مقارنة بين تدفق الغاز في حالة استخدام متحكم تقليدي وفي حالة استخدام متحكم (Fuzzy_PI)



الشكل (17) تدفق الغاز باستخدام المتحكم PID والمتحكم Fuzzy_PI

تحليل منحنى الاستجابة:

- **المرحلة الأولى (0–1 ثانية):**
- هبوط حاد جدًا إلى نقطة الضبط—قواعد المنطق الضبابي تولّد جهد تصحيح كبير عند الخطأ العالي، مع كبح ذكي قرب نقطة الضبط.
- مزايا :زمن صعود شبه لحظي، تقليل الخطأ التكاملي بسرعة.
- مخاطر محتملة :إجهاد أعلى على المشغّل (Valve/Actuator) إن لم تُضبط حدود السرعة/التشبع.
- **المرحلة الثانية (1–2 ثانية):**
- تثبيت سريع دون تذبذب—المنطق الضبابي يخفّض الكسب تلقائيًا قرب الهدف.
- مزايا :عدم وجودOvershoot ، استقرار جيد.
- حساسية :قد يحتاج مرشحات للقياس إذا كان الضجيج عاليًا.
- **المرحلة النهائية (~2–10 ثوانٍ) :**
- ثبات عند 20 بار—الخطأ يقارب الصفر، لا انحرافات مرئية.
- مؤشر الأداء IAE/ITAE :منخفضان جدًا مقارنة بـ.PID

ونبين في الجدول (4) قيم مؤشرات الأداء لكل متحكم:

controller	RMSE	IAE	ITAE
PID	6.0901	27.6107	26.1743
Fuzzy	3.5307	8.3482	2.3137

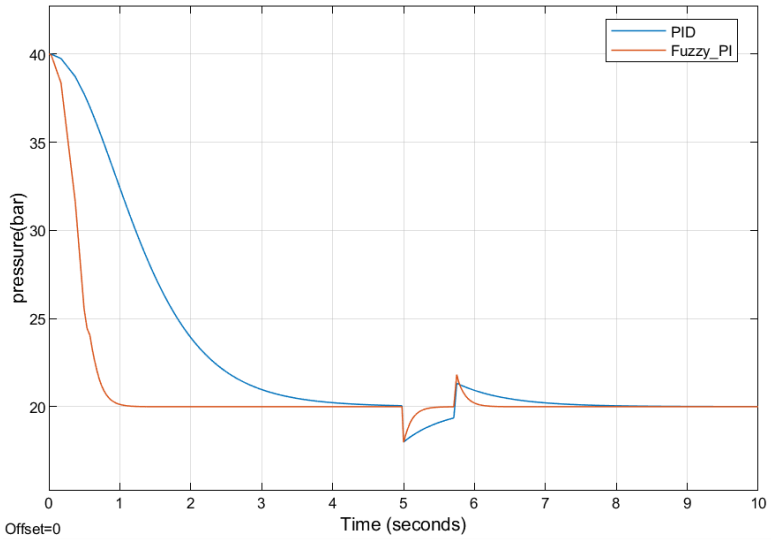
مقارنة الخصائص الأساسية للاستجابة مبينة في الجدول (5):

الجدول (5) الخصائص الأساسية للاستجابة لكل متحكم		
الخاصية	Fuzzy PI	PID
زمن الوصول إلى 20 بار	0.8–1.2 ثانية (هبوط سريع جدا)	3–7 ثوان (هبوط تدريجي)
زمن الاستقرار (Settling time)	1–2 ثانية	7–8ثوان

التذبذب/الاهتزاز	معدوم–استجابة حادة ومستقرة	معدوم تقريبًا–استجابة مفرطة التخميد
تجاوز القيمة(Overshoot)	لا يوجد تجاوز، تثبيت سريع	لا يوجد تجاوز إيجابي، هبوط مباشر
الخطأ في الحالة المستقرة	يقارب الصفر عند 20 بار	يقارب الصفر عند 20 بار
نعومة الإشارة	حادة وسريعة جدا	ناعمة لكن بطيئة
حساسية الضجيج	قد تكون أعلى إن لم تُرشّح الإشارة	أقل حساسية بسبب البطء

ثانياً: الحالة الثانية: التحكم بضغط الغاز في حالة وجود اضطراب:

قمنا بإجراء دراسة حالة وجود اضطراب يتمثل بزيادة مفاجئة بدرجة حرارة الغاز الوارد إلى العنفة الغازية ناتج عن ضعف في أداء المبادل الحراري الرئيس بزيادة مقدارها (30 k) عند زمن (t=5) من زمن المحاكاة، يبين الشكل (17) نتائج المحاكاة:



الشكل (17) ضغط الغاز في حال وجود اضطراب باستخدام المتحكمين

حيث نلاحظ أنه في حالة وجود الاضطراب فإن الزمن اللازم في حالة استخدام متحكم عائم لإعادة المنظومة لمرحلة الاستقرار أقل من الزمن اللازم باستخدام المتحكم التقليدي.
تبين نتائج المحاكاة أنه في حالة استخدام المتحكم التقليدي PID فإن الزمن اللازم لاستقرار المنظومة يقدر ب (7 ثواني) بينما في حالة استخدام المتحكم العائم فإن زمن الاستقرار لا يتجاوز (1.4 ثانية)، كما تبين النتائج عدم وجود تجاوز في القيمة المطلوبة (Overshoot) في حالة التشغيل المستقر.
أما في حالة وجود اضطراب فقد بلغت قيمة التجاوز في حالة استخدام المتحكم PID والمتحكم العائم نفس القيمة (18 Bar) بينما احتاج المتحكم PID إلى فترة زمنية قدرها (5 ثواني) للعودة إلى مرحلة الاستقرار، بينما احتاج المتحكم العائم إلى فترة أقل بكثير (1.3 ثواني) للعودة إلى مرحلة الاستقرار.

نبين في الجدول قيم مؤشرات الأداء لكل متحكم:

controller	RMSE	IAE	ITAE
PID	6.1050	29.3940	36.6326
Fuzzy	3.5385	8.8400	4.9960

حيث تظهر مؤشرات الأداء الثلاث تفوقاً واضحاً للمتحكم الضبابي مقارنة مع المتحكم التقليدي(PID)

فالمتحكم الضبابي حقق:

- **RMSE** أقل، مما يدل على دقة أعلى في تتبع الإشارة المرجعية وتقليل متوسط الخطأ الجذري.
- **IAE** أقل، وهو يعكس قدرة أفضل على تقليل مجموع الخطأ المطلق عبر الزمن.
- **ITAE** أقل بكثير، مما يعني أن المتحكم الضبابي يقلل الأخطاء المتأخرة بشكل كبير ويحقق استجابة أكثر استقرارًا ونعومة

وبشكل عام، تُظهر هذه النتائج أن المتحكم الضبابي يقدم **أداءً أدق، واستجابة أسرع، وخطأً تراكميًا أقل** مقارنة بمتحكمPID ، وهو ما ينسجم مع طبيعة المتحكمات الضبابية التي تتعامل بكفاءة مع اللاخطية وتغير ظروف التشغيل دون الحاجة إلى نموذج رياضي دقيق للنظام.

مقارنة خصائص الاستجابة:

نبين في الجدول (6) خصائص الاستجابة لكل متحكم:

الجدول (6) خصائص الاستجابة لكل متحكم في حال وجود اضطراب		
المعيار	Fuzzy PI	PID
سرعة الاستجابة	سريعة جدا	بطيئة نسبيا
الاستقرار	ممتاز وسريع	جيد لكن بعد وقت أطول
التعامل مع الاضطرابات	تصحيح سريع وفعال	تأخر في التصحيح
التذبذب	شبه معدوم	موجود بعد الاضطراب

7-الاستنتاجات:

1-يتضح لنا أن استقرار ضغط الغاز عند القيمة المرجعية خلال مرحلة الإقلاع أمر حاسم لنجاح تشغيل العنفة الغازية حيث أن أي تذبذب قد يؤدي إلى فشل الإقلاع أو توقف العنفة.

2-قصور المتحكم التقليدي (PID):

مع اختلاف ظروف التشغيل الحالية وعدم استقرار ضغط الشبكة الغازية لأسباب مختلفة مثل زيادة عدد آبار الغاز المستثمرة أو اختلاف تركيز الغازات ما يؤدي إلى اختلاف النسبة الحرارية النوعية للغاز أو غيرها من الظروف المختلفة قد يظهر المتحكم التقليدي بطء الاستجابة وصعوبة التكيف مع التغيرات المفاجئة مما يجعله غير مثالي خاصة لمراحل الإقلاع أو إعادة الإقلاع.

3-تفوق المتحكم العائم:

أظهر المتحكم العائم قدرة أعلى على التعامل مع اللاخطية والتغيرات السريعة والاضطراب، مما ساعد في تحسين زمن الاستجابة وتقليل التجاوزات في الضغط.

4-أهمية النمذجة الرياضية الدقيقة:

ساهم النموذج الرياضي المعتمد على خصائص الغاز الحقيقي في تحسين دقة المحاكاة مما أتاح تقييما واقعيا لأداء نظام التحكم.

5- تُظهر نتائج المحاكاة أن المتحكم الضبابي قدّم أداءً أفضل من متحكم PID في جميع مؤشرات التقييم المستخدمة، سواء من حيث قيمة الخطأ الجذري أو مجموع الخطأ المطلق أو الخطأ الموزون بالزمن. ويعود هذا التفوق بشكل أساسي إلى طبيعة المتحكمات الضبابية التي لا تعتمد على وجود نموذج رياضي دقيق للنظام، بل تستند إلى قواعد خبرة تسمح لها بالتعامل مع اللاخطية وتغيّر ظروف التشغيل بكفاءة أعلى.

8-التوصيات:

1-اعتماد المتحكم (Fuzzy-PI) للتحكم بضغط الغاز في العنفات الغازية نظرا لسرعة استجابته ومرونته العالية.

2-دمج أنظمة التحكم الذكية مع نظام التحكم والمراقبة (DCS): يجب تطوير تكامل المتحكمات الذكية مع أنظمة التحكم والمراقبة لضمان استجابة شاملة وسريعة.

3- إجراء اختبارات ميدانية موسعة: يوصى بتنفيذ تجارب ميدانية على الأنظمة الذكية في ظروف تشغيل مختلفة للتأكد من نتائج المحاكاة ومن فعالية النظام واستقراره على المدى الطويل.

9-الأبحاث المستقبلية:

تُظهر نتائج هذا البحث أن دمج تقنيات التحكم التقليدية مع تقنيات التحكم الذكية يفتح آفاقًا واسعة لتحسين أداء منظومات الضغط في العنفات الغازية. لذلك يُوصى بأن تتناول الدراسات المستقبلية ما يلي:

- تصميم متحكمات هجينة تجمع بين خصائص المتحكم PID واستجابة المتحكمات الضبابية (Fuzzy-PI)لتحقيق توازن بين سرعة الاستجابة والاستقرار طويل الأمد.
- تطبيق تقنيات التحكم التنبؤي والتحكم التكيفي لدراسة قدرة المنظومة على مواجهة ظروف تشغيلية أكثر تعقيدًا، مثل التغيرات المفاجئة في تركيب الغاز أو تقلبات الحمل الكهربائي.

- توسيع نطاق النمذجة والمحاكاة ليشمل سيناريوهات تشغيلية متعددة، بما في ذلك حالات الإقلاع والإيقاف، وذلك بهدف تحسين موثوقية الأداء تحت ظروف تشغيلية مختلفة.
- تحسين خوارزميات الضبط الذاتي لمعاملات المتحكمات بما يضمن سرعة التكيف مع التغيرات المستمرة في بيئة التشغيل.

إن التوجه نحو هذه المسارات البحثية سيسهم في رفع كفاءة منظومات التحكم الصناعي، ويعزز موثوقية تشغيل العنفات الغازية في المعامل ومحطات توليد الطاقة.

جدول (7) المصطلحات الخاصة بالشكل رقم (3) (أجزاء العنفة الغازية)	
الترجمة العربية	**المصطلح الإنجليزي**
وحدة القيادة الملحقة	ACCESSORY DRIVE
دوّار الضاغط	COMPRESSOR ROTOR
غلاف الضاغط والريش الثابتة	COMPRESSOR CASE AND STATORS
مدخل الهواء	AIR INLET
ناشر الهواء (موسع التدفق)	DIFFUSER
غرفة الاحتراق	COMBUSTOR
غلاف العنفة والريش الثابتة	TURBINE CASE AND STATORS
مجمع العادم	EXHAUST COLLECTOR
دوّار عنفة إنتاج الغاز	GAS PRODUCER TURBINE ROTOR
دوّار عنفة القدرة	POWER TURBINE ROTOR
وحدة تخفيض السرعة	REDUCTION DRIVE
عمود الخرج	OUTPUT SHAFT

الجدول (8) الرموز		
الرمز	**التعريف**	**الواحدة**
Q	معدل التدفق الحجمي	$\mathrm{Nm^3/h}$
$\dot{m}$	معدل التدفق الكتلي	$\mathrm{kg/h}$
C_v	معامل التدفق للصمام	بدون واحدة
P_1	ضغط الدخول المطلق	bar

P_2	ضغط الخروج المطلق	bar
ΔP	فرق الضغط	bar
x	نسبة انخفاض الضغط	بدون واحدة
T_1	درجة حرارة الدخول	K
G_g	الكثافة النسبية للغاز (الهواء = 1)	بدون واحدة
K	النسبة الحرارية النوعية cp/cv	بدون واحدة
Z	عامل الانضغاطية للغاز	بدون واحدة
x_t	نسبة انخفاض الضغط الحرجة للصمام	بدون واحدة
F_k	عامل تصحيح النسبة الحرارية	بدون واحدة
y	عامل التمدد للغاز	بدون واحدة
F_b	معامل تصحيح هندسة الأنابيب	بدون واحدة
N_1	ثابت تحويل الوحدات للتدفق الحجمي	بدون واحدة
N_6	ثابت تحويل الوحدات للتدفق الكتلي	بدون واحدة
ρ_1	كثافة الغاز عند ظروف الدخول	kg/m^3

[1]. Omar, M. H. T., Hamdy, R. A., & Kotb, H. (2026). A hybrid fuzzy-PIDD² control strategy for coordinated LFC and AVR in renewable-integrated multi-area power systems. Scientific Reports, 16, Article 3741

[2]. Atiyaha, S. K., Al-Timimi, B. A., Ali, A. Y., Ahmed, M. S., Albayati, T. M., Abdullah, G. H., & Mel, M. (2025). "Comparative Simulation of PI and Fuzzy Control for Fluid Catalytic Cracking Unit". Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE), Vol. 44, Issue 3, pp. 846-857

[3] A Novel CEM-Based 2-DOF PID Controller for Low-Pressure Turbine Speed Control of Marine Gas Turbine Engines –Processes ،MDP,2024.

[4]. Fuzzy Controller Structures Investigation for Future Gas Turbine Aero-Engines –International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power ، MDPI.2021 .

[5]. OpFlex Sliding Fuel Pressure Control – GE Vernova .

[6]. Apply Robust Proportional Integral Derivative Controller to a Fuel Cell Gas Turbine – ASME Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2018.

[7]. Boyce, M. P. (2012). Gas Turbine Engineering Handbook. Elsevier.

[8]. Kurz, R., & Brun, K. (2001). Gas Turbine Performance. ASME Press.

[9] . Holman, J. P. (2012). Experimental Methods for Engineers. McGraw-Hill.

[10]. Control Valve Handbook (5th Edition), Emerson Automation Solutions

[11]. Borden, G. (1998). Control Valves: Practical Guides for Measurement and Control. ISA.

[12]. "Industrial-process control valves - Part 2-1: Flow capacity - Sizing equations for fluid flow under installed conditions", International Society of Automation,(2007).

[13]. Borden, Control Valves: Practical Guides for Measurement and Control. Research Triangle Park, NC: ISA, 1998.

[14]. Carlos Dualibe.(2003) "Design Of Analog Fuzzy Logic Controllers In Cmos Technologies".Kluwer Academic Publishers 227p.