

التحكم بالضغط داخل خزان تخمير باستخدام التحكم التنبئي العائم من النمط الثاني

بسام محمد *

مناف سليمان **

تاريخ الإيداع 29 / 1 / 2019 . قُبِلَ للنشر 13 / 3 / 2019

"الملخص"

من المعروف أنه في التحكم التنبئي العائم من النمط الأول يتم استخدام تقنية اتخاذ القرارات العائمة، عندما يكون من الممكن تمثيل أهداف النظام وقيوده بشكل مجموعات عائمة من النمط الأول، ولكن عند تمثيل أهداف النظام وقيوده على شكل مجموعات عائمة من النمط الثاني عندها يجب استخدام نظرية التحكم التنبئي العائم من النمط الثاني، وهي النظرية الجديدة التي يقدمها هذا البحث، حيث تم ابتكار طريقة جديدة لربط الأهداف والقيود ودمجها معاً للتحكم بالضغط داخل خزان تخمير باستخدام التحكم التنبئي العائم من النمط الثاني؛ ومقارنة النتائج مع المتحكم التنبئي العائم من النمط الأول. وبعد مقارنة النتائج تبين أن النتائج كانت أفضل عند استخدام التحكم التنبئي العائم من النمط الثاني؛ إذ حصلنا على نتائج أفضل لأداء النظام المتحكم به من خلال دراسة نتائج المحاكاة للنظام قيد الدراسة، باستخدام الأداة البرمجية Matlab and Simulink.

الكلمات المفتاحية : التحكم التنبئي - اتخاذ القرار العائم - المجموعات العائمة من النمط الثاني - الأهداف

العائمة - القيود العائمة.

* أستاذ مساعد في قسم الحواسيب والأتمتة - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - دمشق - سوريا
** طالب دراسات عليا (دكتوراه) في قسم الحواسيب والأتمتة - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - دمشق - سوريا

Pressure control in fermentation tank using Type-2 Fuzzy Model Predictive Control

Bassam Mohammad*
Monaf Solieman**

(Received 29 / 1 / 2019 . Accepted 13 / 3 / 2019)

ABSTRACT

Fuzzy decision making (FDM) is used in type-1 fuzzy model predictive control (T1FMPC) when the fuzzy goals and fuzzy constraints of the control problem are represented as a type-1 fuzzy sets. But when the fuzzy goals and fuzzy constraints are represented as a type-2 fuzzy sets we must use type-2 fuzzy model predictive control (T2FMPC) scheme. This paper introduces this new scheme and introduce a new aggregation operator to combine all goals and constrains to control pressure in fermentation tank. We compare the results, and we find from results that the performance of T2FMPC is better than T1FMPC the, we get results by simulate this system using Matlab and Simulink.

Key Words: Predictive Control, Fuzzy Decision Making, type-2 fuzzy sets, fuzzy goals, fuzzy constraints.

*Assistant Professor, Computer and Automation Department, Faculty of Mechanical & Electric Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

**Postgraduate student(PhD), Computer and Automation Department, Faculty of Mechanical & Electric Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

مقدمة :

يُعدّ التحكم العائم Fuzzy Control من أكثر تطبيقات المنطق العائم Fuzzy Logic انتشاراً، ويصنف أنه من أكثر النظريات المقبولة لتصميم متحكمات قادرة على تحقيق أداء جيد ومرضى، مع وجود الإبهام Uncertainty والغموض Imprecision ضمن النظام [1] [2]. حيث بينت أغلب الدراسات أنّ المتحكمات العائمة تتفوق على المتحكمات التقليدية وتعطي أداءً مشابهاً للعمليات البشرية وأفضل منها في أماكن عديدة. وذلك لأن المتحكمات العائمة هي متحكمات غير خطية قادرة على التحكم بنظم العالم الحقيقي بنحو أفضل من المتحكمات الخطية؛ باعتبار أنّ أغلب النظم الحقيقية بطبيعتها غير خطية، كما أن المعلومات المتعلقة بالنموذج الرياضي أو العملية المراد التحكم بها لا يمكن تمثيلها بنموذج رياضي دقيق، وهنا يتفوق التحكم العائم غالباً.

في هذا البحث تم التركيز على استخدام التحكم التنبئي العائم Fuzzy Model-Based Predictive Control (FMPC)، من خلال دمج تقنيات التحكم التنبئي مع تقنيات اتخاذ القرار العائم Fuzzy Decision Making (FDM)، والجدير ذكره أن FDM مستخدمة في العديد من المجالات وكانت موضوع العديد من الأبحاث [3] [4]، و كان Sousa and Kaymak أول من لجأ إلى الدمج بين كلتا التقنيتين؛ حيث وضح ذلك في العديد من الأبحاث [5] [6]، حيث وضح في أبحاثه أنّها قادرة على التعامل مع حالات عدم الدقة والغموض في النظم المرغوب التحكم بها [5]. كما أن استخدام FDM يساهم في حل العديد من مشاكل التحكم التنبئي، مثل حالات اللاخطية في النظم وحالات الغموض الناتجة مثلاً عن عدم دقة القياسات، كما تساعد على التعبير بدقة أكثر عن أهداف النظام وقيوده [7]، كما تتجنب مشكلة اختيار الأوزان في تابع الكلفة Cost Function الموجودة في التحكم التنبئي التقليدي. كما تمّ استخدام هذه التقنية في العديد من المجالات بدءاً بعمليات التحكم بمحطات الطاقة الشمسية [8]، والتحكم بالعملية الإنتاجية [9]، وصولاً لقيادة المحركات التحريضية [10] إلى ما هنالك من الاستخدامات.

جميع الأبحاث السابقة مثلت أهداف النظام وقيوده باستخدام مجموعات عائمة من النمط الأول Type-1 Fuzzy Sets (T1FS_s) وبالتالي يمكننا أن نسمي المتحكم الناتج بالمتحكم التنبئي العائم من النمط الأول Type-1 Fuzzy Model-Based Predictive Control (T1FMPC). بينما في هذا البحث تمّ اقتراح استخدام المجموعات العائمة من النمط الثاني Type-2 Fuzzy Sets (T2FS_s) ضمن المتحكم التنبئي العائم لما لها من أهمية متزايدة [11]، وبالتالي نحصل على المتحكم التنبئي العائم من النمط الثاني Type-2 Fuzzy Model-Based Predictive Control (T2FMPC). في هذا البحث سنلجأ إلى استخدام عملية دمج جديدة للتحكم بالضغط داخل خزان تخمير (نظام غير خطي) باستخدام التحكم التنبئي العائم من النمط الثاني ومقارنة النتائج مع المتحكم التنبئي العائم من النمط الأول.

أهمية البحث وأهدافه :

تكمّن أهمية البحث من أهمية استخدام التحكم بالنظم غير الخطية، والتي تتصف بكثير من الإبهام والغموض، كما تأتي أهمية البحث من أهمية استخدام المجموعات العائمة من النمط الثاني لتمثيل قيود النظام وأهدافه من خلال تمثيل جميع حالات الإبهام الموجودة في النظام، وبالتالي فإن عملية دمج التقنيات العائمة من النمط الثاني مع تقنيات التحكم التنبئي تُعدّ طريقة جديدة للتحكم، يمكن باستخدامها أن نحصل على أداء أفضل.

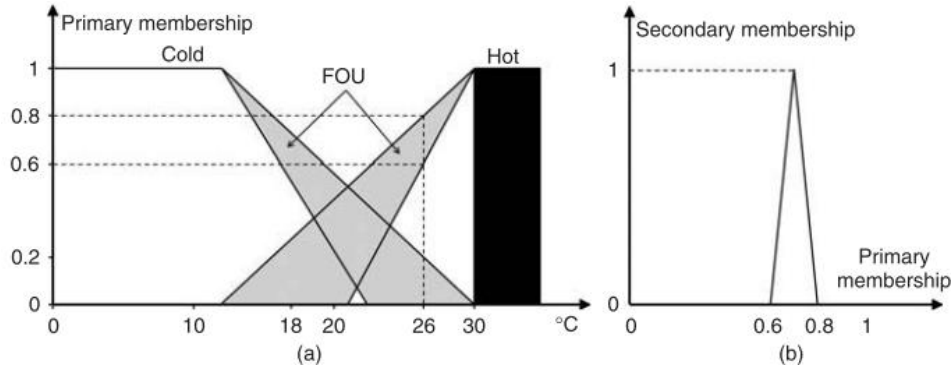
وبالتالي فإنّ الهدف من هذا البحث هو تصميم متحكم تنبئي عائم من النمط الثاني T2FMPC للتحكم بنظام غير خطي ممثل بنموذج عائم (الضغط داخل خزان تخمير)، ومقارنة أدائه مع المتحكم التنبئي العائم من النمط الأول T1FMPC.

طرائق البحث ومواده:

لقد أنجز هذا البحث اعتماداً على دراسة العديد من البحوث المنجزة في هذا المجال، والتوقف عند نتائجها و توصياتها ، ومحاولة سد الثغرة في المواضيع التي لم يتم التطرق إليها في هذه الأبحاث؛ من خلال دمج الأفكار المدروسة وصولاً إلى اقتراح نماذج رياضية جديدة ومبتكرة تختص بالمسألة المدروسة، ثم القيام بتمثيل ومحاكاة النماذج الرياضية باستخدام البيئة البرمجية Matlab and Simulink لتمثيل النماذج الرياضية المقترحة وتمثيل النموذج العائم للحالة المدروسة، ثم تصميم المتحكمات واستخلاص النتائج .

1- المنطق العائم من النمط الثاني (T2FL) fuzzy logic Type-2:

إن المنطق العائم التقليدي والمعروف جيداً يطلق عليه المنطق العائم من النمط الأول، وفيه تكون المجموعات العائمة محددة ومضبوطة بدقة؛ أي أن توابع الانتماء تكون محددة بدقة؛ وبالتالي لا تسمح بتضمين الإبهام المتعلق بقيم توابع الانتماء وهو أحد السيئات التي يتصف بها النمط الأول، أما بالنسبة إلى النمط الثاني Type-2 Fuzzy Sets (T2FS_s) فإن تابع الانتماء لها هو عبارة عن تابع عائم Fuzzy MF، حيث إن قيمة تابع الانتماء لأي عنصر من المجموعة هو مجموعة عائمة أيضاً تقع ضمن المجال [0,1]. وهذا يعني أن توابع الانتماء للمجموعات العائمة من النمط الثاني ثلاثية الأبعاد 3D وتحتوي منطقة تسمى ببصمة عدم اليقين Footprint Of Uncertainty (FOU) وهي المنطقة المظللة المبينة في الشكل (1-a). حيث يؤمن البعد الثالث حرية إضافية تسمح بإمكانية تمثيل الغموض المتعلق بتوابع الانتماء، يوضح الشكل (1) كيفية تمثيل المجموعات العائمة من النمط الثاني بشكل عام [11].



الشكل (1): المجموعات العائمة من النمط الثاني: (a) بصمة عدم اليقين FOU لتابع الانتماء الأولي، (b) تابع الانتماء الثانوي المثلي [11].

نلاحظ من الشكل (1-a) أنه عند الدرجة 26°C لا توجد قيمة حدية واحدة في تابع الانتماء Hot كما في النمط الأول بل يقابلها تابع قيمته ضمن المجال من 0.6 إلى 0.8 في تابع الانتماء الأولي، وهذا المجال يقابله تابع مثلي ثانوي كما نلاحظ في الشكل (1-b) حيث يطلق عليه تابع الانتماء الثانوي Secondary MF، وهذا التابع الثانوي يعطي أفضلية أعلى للقيم التي تقع في وسط المجال [0.6,0.8] وأفضلية أقل على الأطراف، وطبعاً يمكننا اختيار توابع ثانوية غير التابع المثلي وهذا يعني أن T2FS_s يمنح مرونة أعلى من النمط الأول.

2-نظرية اتخاذ القرار العائم (FDM):

تعرف نظرية اتخاذ القرار في البيئة العائمة FDM على أنه اتخاذ القرار عندما تكون قيود النظام وأهدافه ذات طبيعة عائمة وذلك بغض النظر إذا كان النظام عائماً أم لا [3] فالنظام يمكن أن يكون ممثلاً بتابع نقل تقليدي (ليس عائماً) أو ممثلاً بنموذج عائم Fuzzy Model، أما الأهداف والقيود العائمة فهي المعايير التي يجب مراعاتها (مثلاً السعر والموثوقية عند شراء سيارة)، أما في نظم التحكم فتكون هذه المعايير هي الخطأ وأمر التحكم على سبيل المثال.

كما يمكن تعريف الهدف العائم على النحو الآتي:

إذا اعتبرنا أن: A هي مجموعة البدائل المحتملة، والتي تحوي الحل لمسألة اتخاذ القرار .

G تمثل الهدف العائم وهو مجموعة عائمة معروفة باستخدام تابع الانتماء الآتي $[0,1] \rightarrow A : \mu_G$ وهذا التابع

يمثل الدرجة التي تحقق بها البدائل الهدف المحدد.

C يمثل القيد العائم وهو مجموعة عائمة معرفة بتابع الانتماء الآتي $[0,1] \rightarrow A : \mu_C$ وبالتالي يكون القرار

العائم D هو ناتج تقاطع مجموعة الأهداف ومجموعة القيود العائمتين ويمكن تمثيل القرار العائم باستخدام تابع انتماء كما في المعادلة (1)[6].

$$\mu_D(u) = \mu_G(u) \wedge \mu_C(u) \quad u \in A \quad (1)$$

حيث إن \wedge ترمز إلى عملية إيجاد القيمة الصغرى Min Operation.

ولإيجاد القرار المثالي u^* في عملية اتخاذ القرار العائم يجب البحث عن القرار صاحب أكبر قيمة لتابع الانتماء

ويسمى أيضاً القرار الأعظمي Maximizing Decision وهو معرف بالمعادلة (2)[10].

$$u^* = \arg \max_{u \in A} \mu_G(u) \wedge \mu_C(u) \quad (2)$$

سنستخدم في هذا البحث عملية اتخاذ القرار العائم المتعدد الخصائص Multi-Attribute Decision-

Making (MADM) والتي تقوم باختيار البدائل المناسبة من بين مجموعة منتهية وقابلة للعد مع الأخذ بعين الاعتبار عدد من المعايير Criteria المهمة، وهذه المعايير تُعدّ في مجال التحكم أهداف النظام وقيوده. حيث تقسم MADM إلى مرحلتين: [12]، مرحلة التقييم Rating و مرحلة الترتيب Ranking.

في مرحلة التقييم Rating نلجأ إلى منح قيم لكل بديل من البدائل، بحسب درجة ملاءمته للمعايير (الأهداف والقيود)، حيث نعبر عنها باستخدام توابع انتماء عائمة تمثل المعايير العائمة، وقيم هذه التوابع تحدد إلى أي درجة يحقق البديل المعيار المحدد، وهناك عدّة طرق لدمج هذه التوابع العائمة مع بعضها (تسمى عمليات الربط)، وعندما يرغب متخذ القرار بأخذ جميع المعايير (الأهداف والقيود) بشكل متوازٍ، يجب عليه اختيار عمليات الربط الثلاثية t -norm، مثل عملية إيجاد القيمة الصغرى Min Operation، وعملية ربط Yager، [13] وعملية ربط Schweizer. المعادلة (3) تبين عملية ربط Yager [13] حيث إن \bar{u} يمثل الشعاع المثالي لتغيرات الدخل. والمعادلة (4) تبين عملية ربط Schweizer [13]، حيث هناك العديد من طرق الربط وكلّ منها تعطي قيمة مختلفة لعملية دمج توابع الانتماء وبالتالي تختلف عملية تقييم البدائل من طريقة لأخرى وهو ما سنلاحظه لاحقاً عند المقارنة بين الطريقتين.

$$\mu_{D_{yager}}(\bar{u}) = \max \left\{ 0, 1 - \sqrt[s]{\sum_{l=1}^r (1 - \mu_l(u_l))^s} \right\}, \quad s > 0 \quad (3)$$

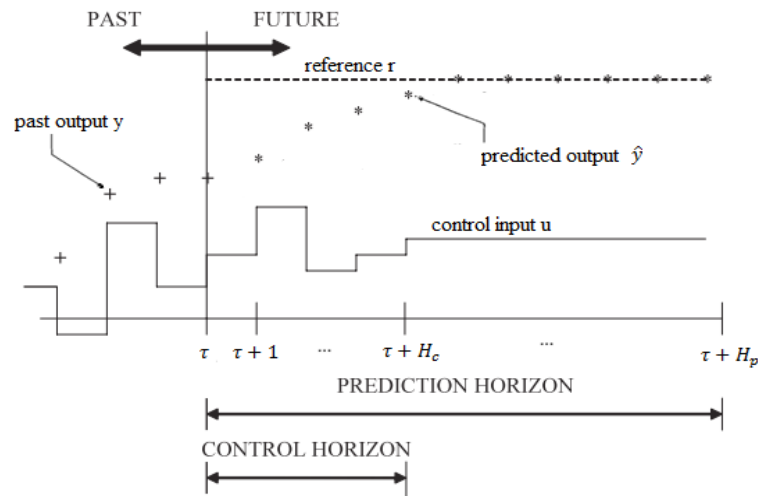
$$\mu_{D_{Schweizer}}(\bar{u}) = \sqrt[s]{\max\left(0, \sum_{l=1}^r \mu_l(u_l)^s - 1\right)} \quad , s > 0 \quad (4)$$

أما مرحلة الترتيب Ranking تعني ترتيب البدائل بحسب تقييمها الناتج عن عملية التقييم، حيث تُعدّ عملية الترتيب معقدة بعض الشيء عند استخدام مجموعات عائمة من النمط الثاني عكس عملية ترتيب البدائل من النمط الأول، حيث يكون خرج عمليات الربط المثلثية قيماً حدية Crisp بحيث يكون ترتيب البدائل ترتيباً عددياً مسألة بسيطة، أما عند استخدام مجموعات عائمة من النمط الثاني لتمثيل المعايير يكون خرج عمليات الربط قيماً عائمة وبالتالي سنحتاج إلى ترتيب عائم Fuzzy Ranking. ولتجنب عمليات الترتيب العائمة سوف نقترح صيغة جديدة من عملية الربط المثلثية كما هو موضح لاحقاً.

3- مفهوم التحكم التنبئي (MPC) Model Predictive Control:

يقوم مفهوم التحكم التنبئي MPC على استخدام النموذج الرياضي للنظام المراد التحكم به بالإضافة إلى القياسات الحالية من أجل حساب التصرف المستقبلي لخرج المتحكم من أجل العينة الآتية، بحيث يتم حساب أوامر المتحكم المستقبلية المثالية $\{u(\tau), \dots, u(\tau + H_c)\}$ ، والأمثلة في قانون التحكم تعني قدرة المتحكم على دفع الجملة لأفضل استجابة ممكنة بأقل استهلاك لموارد المتحكم. وهذا الأمر يعبر عنه بالكلفة، فلكي نحصل على أمر تحكم مثالي يجب تقليل كلفة تنفيذ هذا الأمر، مع المحافظة على الأداء الأعلى. لذلك فإن المتحكم التنبئي يقوم بتصغير تابع كلفة Cost Function للحصول على أوامر التحكم المثالية، وهذا يعني ببساطة إيلاء أهمية كبيرة لاختيار تابع الكلفة عند تصميم المتحكم التنبئي [14].

الشكل (2) يشرح مبدأ وطريقة عمل المتحكم التنبئي [15]، حيث H_p تمثل أفق التنبؤ Prediction Horizon (أي عدد العينات المستقبلية للخرج التي ستنبأ بها كل مرة)، و H_c تمثل أفق التحكم Control Horizon وهي عدد العينات التي تمثل تغيرات الدخل المحتملة التي يجب أخذها بالحسبان عند التنبؤ على كامل أفق التحكم وعند الوصول لآخر أفق التحكم H_c نقوم بتهيئة آخر قيمة للدخل كما هو موضح بالشكل (2). أي أنه فقط أول تغير في الدخل هو الذي يطبق من أجل العينة الحالية ثم نكرر العملية من جديد وهو ما يسمى بإزاحة الأفق.



الشكل (2) آلية عمل المتحكم التنبئي MPC [15].

4- مفهوم التحكم التنبئي العائم من النمط الأول Type-1 Fuzzy Model Predictive Control

(T1FMPC):

نحصل على التحكم التنبئي العائم FMPC عندما نستخدم خوارزمية التحكم التنبئي وتكون المعايير ذات طبيعة عائمة ويُعدّ FMPC تطبيقاً عملياً على مسألة اتخاذ القرار متعدد المراحل Multi Stage Decision Making، حيث تمثل البدائل قيم الدخل الممكنة وتتعلق بأفق التنبؤ H_c ، ومعيار اتخاذ القرار يكون معياراً تحكيمياً متعلقاً بالأداء، ومرحلة اتخاذ القرار تساوي أفق التنبؤ H_p فكل لحظة مستقبلية يمكننا اعتبارها مرحلة في عملية اتخاذ القرار. سنمثل كل هدف وكل قيد عائم بمعيار عائم Criteria μ_{d_j} ، حيث $j = 1, \dots, N$ تساوي مجموع الأهداف مع القيود عند كل خطوة، وبالتالي يكون عدد المعايير الكلي مساوياً لجداء أفق التنبؤ H_p بعدد المعايير عند كل خطوة N وستصبح المسألة مسألة اتخاذ قرار متعدد المعايير حيث سيدخل فيها توابع انتماء جميع الأهداف والقيود العائمة (المعايير) عند كل العينات المستقبلية على كامل أفق التنبؤ H_p .

في هذه الحالة يجب القيام بالبحث عن التسلسل المثالي لأوامر المتحكم والتي تمثل في هذه الحالة مجموعة البدائل الممكنة Alternatives. وليكن π عبارة عن تسلسل معين من الدخل (أوامر المتحكم)، أما تابع انتمائه فيرمز له بالشكل μ_π ويعطى بالمعادلة (5) [10].

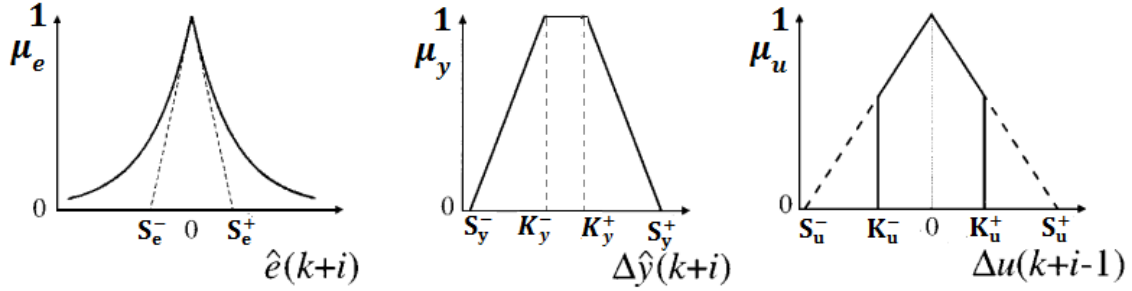
$$\mu_\pi = \left(\mu_{d_{11}} \otimes_g \dots \otimes_g \mu_{d_{1q}} \right) \otimes \left(\mu_{d_{1(q+1)}} \otimes_c \dots \otimes_c \mu_{d_{1N}} \right) \otimes \dots \otimes \dots \otimes \left(\mu_{d_{Hp1}} \otimes_g \dots \otimes_g \mu_{d_{Hpp}} \right) \otimes \left(\mu_{d_{Hp(q+1)}} \otimes_c \dots \otimes_c \mu_{d_{HpN}} \right) \quad (5)$$

حيث إن \otimes_g هي عملية ربط Aggregation Operation لدمج الأهداف، و \otimes_c هي عملية ربط لدمج القيود و \otimes هي عملية الدمج الكلية بين الأهداف والقيود، حيث يمكن استخدام عمليات الربط المتثنية t-norm في حال أردنا تضمين أو تحقيق جميع الأهداف والقيود على حدّ سواء. إن المعادلة السابقة (5) تعبر عن جميع تسلسلات الدخل الممكنة (أوامر التحكم)، وبالتالي يجب البحث عن التسلسل المثالي لأوامر المتحكم والذي يرمز له بـ π^* ، وبما أن المعادلة (5) ممثلة بتابع انتماء عائم فإن التسلسل المثالي لقيم الدخل هو التسلسل الذي يعطي أكبر قيمة لـ μ_π وهذا ما يمكن أن نعبر عنه بالمعادلة (6).

$$\pi^* = \arg \max_{\{u(\tau), \dots, u(\tau+Hp-1)\}} \mu_\pi \quad (6)$$

إن إيجاد أفضل تسلسل لـ π هي مسألة أمثلة غير محدبة Non-Convex، ولكن يمكن حلها باستخدام الطرق العددية مثل البرمجة الديناميكية [3].

الشكل (3) يوضح بعض توابع الانتماء لثلاث مجموعات عائمة لتمثيل المعايير مثل الخطأ ومعدل التغير في الخرج ومعدل التغير في أوامر التحكم، الجدير ذكره أنّ استخدام التوابع العائمة لتحديد المعايير المطلوبة يصف بدقة أكبر أهداف النظام وقيوده، كما أنه يقلل من الجهد اللازم لإيجاد القيم العددية لمعاملات الأوزان المستخدمة في التحكم التنبئي التقليدي، والجدير ذكره أنّ الخبرة البشرية في هذا المجال تلعب دوراً مهماً في تحديد الأهداف والقيود عند استخدام T1FMPC. والجدير ذكره أنّ توابع الانتماء المبينة بالشكل (3) هي توابع عامة لتوضيح الفكرة أما عند التطبيق فيجب إعطاء قيم محددة لجميع المتغيرات فعلى سبيل المثال يجب تحديد حدود تابع الانتماء للخطأ على الشكل الآتي $S_e^- = S_e^+ = 0.85$ وذلك بحسب معرفتنا وخبرتنا المتعلقة بالنظام قيد الدراسة.

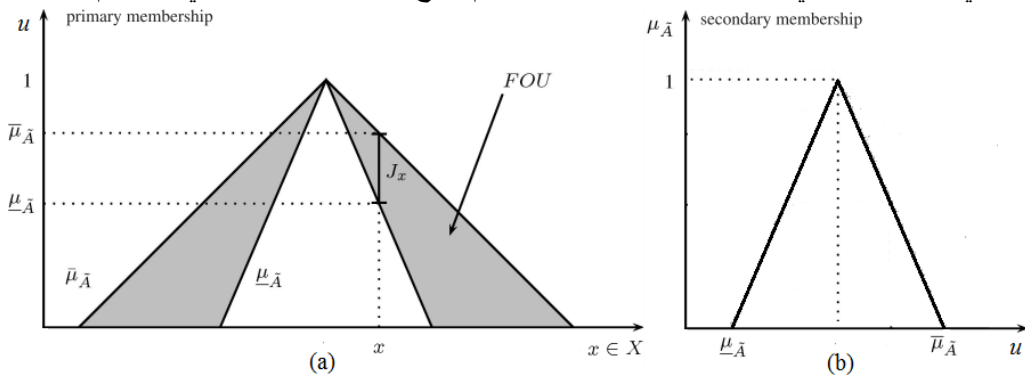


الشكل (3) تابع انتماء يمثل الخطأ، التغير في الخرج، التغير في أمر التحكم.

5- مفهوم التحكم التنبئي العائم من النمط الثاني المقترح Type-2 Fuzzy Model Predictive Control (T2FMPC):

Control (T2FMPC):

بشكل عام إنَّ التحكم التنبئي العائم من النمط الثاني T2FMPC يشابه إلى حدّ ما التحكم التنبئي العائم من النمط الأول T1FMPC خاصة عندما نمثل الأهداف والقيود باستخدام مجموعات عائمة من النمط الثاني كما يوضح الشكل (4-أ)، حيث $\bar{\mu}_{\bar{A}}(x)$ و $\underline{\mu}_{\bar{A}}(x)$ يمثل تابعين عائمين من النمط الأول (علوي وسفلي) يحيطان بمنطقة عدم اليقين FOU، بينما يوضح الشكل (4-ب) تابع انتماء ثانوي مثلثي وهذا التابع يعطي أفضلية للقيم الوسطى ضمن المجال $[\underline{\mu}_{\bar{A}}(x), \bar{\mu}_{\bar{A}}(x)]$. وبالتالي تمثل المسافة J_x كامل مجال القيم للتابع الثانوي. الشكل (4) يوضح مفهوم المتحكم التنبئي من النمط الثاني أما عند التطبيق فيجب استخدام توابع انتماء من النمط الثاني ذات قيم محددة.



الشكل (4) مجموعة عائمة من النمط الثاني: (أ) بصمة عدم اليقين، (ب) تابع انتماء ثانوي مثلثي.

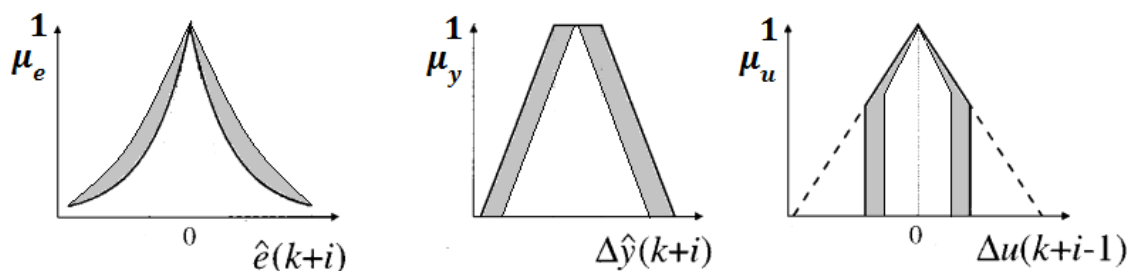
الهدف هنا هو البحث عن التسلسل المثالي لأوامر المتحكم التي تمثل مجموعة البدائل الممكنة. أيضا هنا يجب تمثيل كل هدف وقيود عائم بمعيار قرار عائم A_{d_j} وهنا المعيار عبارة عن مجموعة عائمة شبيهة بالشكل (4-ب) وليست قيمة حدية تمثل انتماء مفرد كما الحال في T1FMPC. المعادلة (7) تمثل تابع انتماء التسلسل المثالي لقيم الدخل μ_{π} .

واضح أنّ الفرق الوحيد بين المعادلة (5) والمعادلة (7) المطورة في هذا البحث هو بأنّه في المعادلة (7) نقوم بربط مجموعات عائمة وليس قيم حدية لتوابع انتماء، وهذا يعني أننا بحاجة لطريقة ربط جديدة لربط هذه المجموعات العائمة بحسب درجة تحقيقها للمعايير (أهداف النظام وقيوده) وذلك على طول أفق التنبؤ H_p .

$$\mu_{\pi} = (A_{d_{11}} \otimes_g \dots \otimes_g A_{d_{1q}}) \otimes (A_{d_{1(q+1)}} \otimes_c \dots \otimes_c A_{d_{1N}}) \otimes \dots \dots \dots \otimes (A_{d_{Hp1}} \otimes_g \dots \otimes_g A_{d_{Hpq}}) \otimes (A_{d_{Hp(q+1)}} \otimes_c \dots \otimes_c A_{d_{HpN}}) \quad (7)$$

واضح أنّه يتم استخدام المجموعات العائمة من النمط الثاني لتمثيل الأهداف والقيود لكونها قادرة على تمثيل الغموض بالنظم بدرجة أفضل من النمط الأول، ولكن عند دمج هذه المجموعات العائمة من النمط الثاني تكون النتيجة

عبارة عن مجموعة عائمة من النمط الأول [16] [17] [18]. الشكل (5) يوضح بعض توابع الانتماء لثلاث مجموعات عائمة من النمط الثاني والتي يمكن استخدامها لتمثيل المعايير مثل الخطأ ومعدل التغير في الخرج ومعدل التغير في أوامر التحكم على التوالي، حيث قمنا بعملية توسيع لتوابع الانتماء الموضحة بالشكل (3) للحصول على المجموعات العائمة من النمط الثاني الممثلة بالشكل (5). الشكل (5) يشرح مفهوم متحكم النمط الثاني المقترح في هذا البحث أما عند التطبيق فيجب إعطاء قيم محددة لتوابع الانتماء من النمط الثاني كما هو الحال مع مجموعات الانتماء من النمط الأول.



الشكل (5) تابع انتماء من النمط الثاني يمثل الخطأ، التغير في الخرج، التغير في أمر التحكم.

وبالنسبة إلى عمليات الربط المقترحة سنقوم باستخدام قاعدتي الربط المثلثيتين Yager و Schweizer وذلك بعد إجراء بعض التعديلات المتعلقة بعرض المجال لتابع الانتماء العلوي والسفلي، ولتوضيح ذلك نورد المثال الآتي: وإذا اعتبرنا لدينا ثلاث مجموعات عائمة A_1, A_2, A_3 موضحة بالشكل (6) والتي تمثل توابع انتماء ثانوية للمجموعات العائمة الموضحة بالشكل (5) على التوالي وذلك عند العينة $K + i$. عندها تصبح المعادلة (8) المشتقة من المعادلة (3) معبرة عن كيفية ربط هذه المجموعات باستخدام قاعدة ربط Yager الجديدة التي تمثل التعديلات المقترحة في هذا البحث حيث:

$$T_{yager}(A_1, A_2, A_3) = \max \left\{ 0, 1 - \sqrt[s]{\sum_{j=1}^3 J_j (1 - \mu_{\bar{A}_j})^s} \right\}, \quad s > 0 \quad (8)$$

- T_{yager} تعبر عن عملية ربط Yager.

- J_j يعبر عن كامل المجال للمجموعة العائمة أو عرض هذه المجموعة.

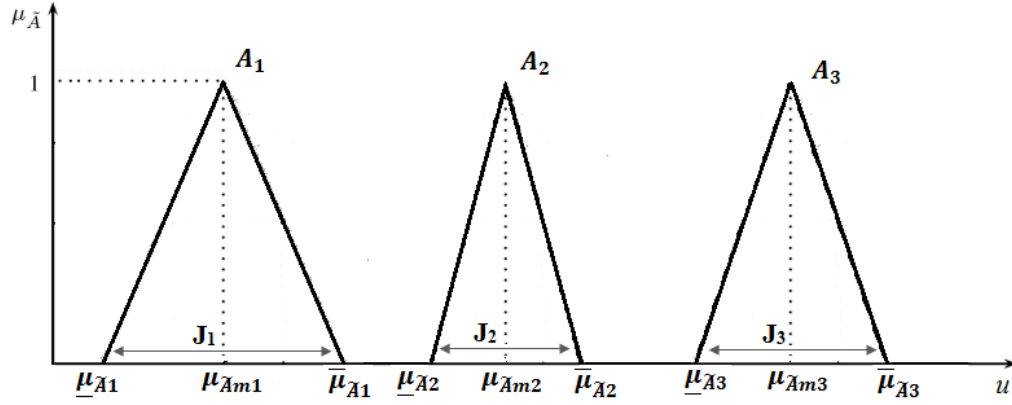
- $\mu_{\bar{A}_j}$ يعبر عن القيمة الوسطى للمجال $[\underline{\mu}_{\bar{A}_j}(x), \bar{\mu}_{\bar{A}_j}(x)]$.

وبالتالي يمكننا كتابة المعادلة (9) والتي تعبر عن عملية ربط الجديدة لـ N مرحلة. ويمكننا اعتبار قيم J_j عبارة عن أوزان وهذه الأوزان متغيرة لأنها تتعلق بقيمة الدخل وشكل المجموعة العائمة من النمط الثاني عند العينة $K + i$ ، أي يمكننا القول إننا حصلنا على أوزان متكيفة.

بطريقة مشابهة بإضافة التعديلات المتعلقة بعرض المجال لتابع الانتماء العلوي والسفلي نحصل على المعادلة (10) من بعد تطبيق هذه التعديلات على المعادلة (4) والتي تعبر عن عملية ربط Schweizer في النمط الثاني.

$$T_{yager}(A_1, A_2, \dots, A_N) = \max \left\{ 0, 1 - \sqrt[s]{\sum_{j=1}^N J_j (1 - \mu_{\bar{A}_j})^s} \right\}, \quad s > 0 \quad (9)$$

$$T_{\text{Schweizer}}(A_1, A_2, \dots, A_N) = \sqrt[s]{\max\left(0, \sum_{j=1}^N J_j \mu_{\tilde{A}m_j}^s - J_j + 1\right)}, \quad s > 0 \quad (10)$$



الشكل (6) توابع الانتماء الثانوية للمجموعات العائمة من النمط الثاني الموضحة بالشكل (5).

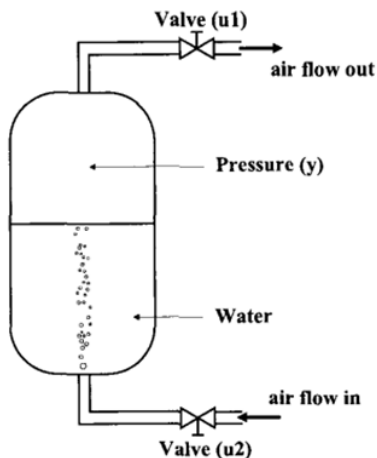
6- مبدأ عمل خزان التخمر fermentation tank

لفهم الآلية المقترحة لعمل نموذج T2FMPC وتقييم أدائها سنقوم بدراسة التحكم بالضغط داخل خزان تخمير. تُعدّ عملية التخمر من العمليات الصناعية المهمة، حيث يطلب التحكم بالضغط داخل خزانات التخمر كونه من أهم العناصر التي تؤثر على جودة عملية التخمر، وهذه العملية تُعدّ من العمليات الصعبة كون النظام يتمتع بلاخطية عالية [6]. يوضح الشكل (7) نموذج مخبرياً لخزان تخمير، وهو عبارة عن خزان أسطواني الشكل يتم ملؤه بالماء بنسبة محددة مسبقاً، كما يتم ادخال تدفق من الهواء إلى الماء بنسبة ثابتة وذلك عبر الصمام الثاني الموجود في الأسفل valve2، أما الضغط داخل الخزان فيتم التحكم به عبر الصمام العلوي valve1 عن طريق فتحه وإغلاقه بنسب معينة فعند الفتح يخرج الهواء مما يسبب بنقصان الضغط، وفي حال أردنا زيادة الضغط نبدأ بإغلاق الصمام. وبالتالي فإن خرج النظام المراد التحكم به هو الضغط داخل خزان التخمر P أما دخل النظام فهو مقدار إغلاق فتحة الصمام العلوي الذي يجب أن يغلق ضمن المجال $[0, 0.9]$.

الجدير ذكره أن المطلوب من هذه الدراسة هو التحكم بالضغط داخل خزان التخمر المذكور، حيث إن النظام السابق معبر عنه بنموذج عائم مفرد singleton، كما هو مبين بالمعادلة (11)، حيث إن $P(\tau + 1)$ هي الضغط داخل الخزان عند العينة الآتية وهي تابعة للضغط في اللحظة الحالية $P(\tau)$ ولمقدار إغلاق الصمام العلوي والذي يغلق ضمن المجال من 0% (أي الصمام مفتوح) حتى نسبة إغلاق 90% (أي أن الصمام مفتوح بنسبة 10% فقط). أما قواعد النموذج العائم من نوع singleton فهي موضحة بالجدول (1) ولتأخذ أول قاعدة والتي يمكن ترجمتها بالمعادلة (12)، نلاحظ أن الجدول (1) يحوي على 16 قاعدة. بينما الشكل (8a) يبين توابع الانتماء العائمة التي تمثل الضغط داخل الخزان والشكل (8b) يبين توابع الانتماء العائمة التي تمثل مقدار الإغلاق لفتحة الصمام. وهذا هو النموذج غير الخطي المعبر عن النظام والذي سنستخدمه للتنبؤ بخرج النظام المستقبلي. وكما ذكرنا سابقاً فإننا في هذه الدراسة لن ندخل في تعريف النموذج العائم identification بل سنستخدم نموذجاً جاهزاً معرّفلاً لنظام خزان التخمر تم الحصول عليه من [6].

$$P(\tau + 1) = f(P(\tau), u(\tau)) \quad (11)$$

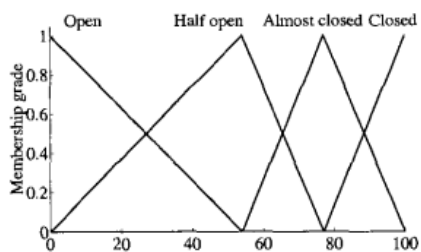
$$\text{IF } u(\tau) \text{ is Open and } P(\tau) \text{ is Low then } P(\tau + 1) = 1.06 \quad (12)$$



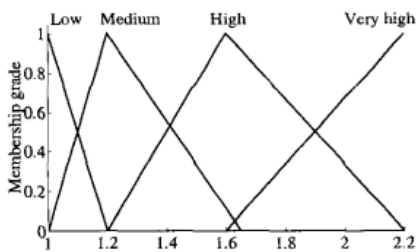
الجدول (1): القواعد التي تمثل النموذج العائم لنظام خزان التخمر [6]

Valve %Closed	Pressure			
	Low	Medium	high	Very High
Open	1.06	1.13	1.46	1.84
Half open	1.05	1.19	1.51	2.03
Almost closed	1.07	1.23	1.63	2.12
Closed	1.11	1.33	1.33	2.34

الشكل (7) خزان تخمير مخبري [6].



b. توابع الانتماء لنسبة إغلاق الصمام $u(\tau)$

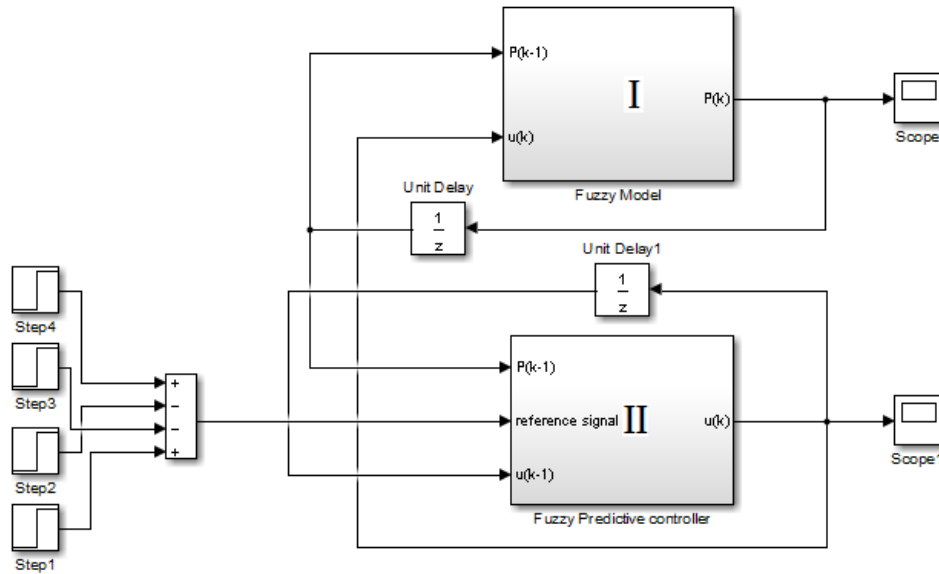


a. توابع الانتماء للضغط $P(\tau)$

الشكل (8) توابع الانتماء للنموذج العائم [6].

1-6 نمذجة نظام التحكم بخزان التخمر باستخدام المفهوم الجديد:

يوضح الشكل (9) المخطط الصندوقي لنموذج النظام المقترح باستخدام Simulink لتمثيل مفهوم المتحكم العائم من النمط الثاني وللتأكد من أداء هذا النموذج بعد مقارنته بمتحكم النمط الأول. حيث إن النموذج العائم المعبر عن النظام عبارة عن كود تم تضمينه في الصندوق I (Fuzzy Model)، وبرنامج المتحكم عبارة عن كود تم تضمينه في الصندوق II (Fuzzy Predictive controller)، وقمنا بدراسة استجابة النظام لعدة قفزات من تغيرات الضغط بزمن أخذ عينات يساوي 5s، كما قمنا بدراسة استجابة النظام في حال استخدام متحكم تنبئي عائم من النمط الأول T1FMPC، وفي حال استخدام متحكم تنبئي عائم من النمط الثاني T2FMPC وقد استخدمنا أفق تنبؤ $H_p = 3$ وأفق تنبؤ $H_c = 2$ في كلا المتحكمين.



شكل (9) نموذج النظام باستخدام Simulink

بالنسبة إلى المتحكم التنبئي العائم من النمط الأول T1FMPC فقد تم استخدام توابع انتماء عائمة لكل من الخطأ وتغيرات الدخل وتغيرات الخرج كما هو موضح بالشكل (3) حيث نلاحظ شكل تابع انتماء الخطأ وهو تابع أسّي لا يصل إلى قيمة الصفر وقد تم اختيار القيم الآتية $S_e^- = S_e^+ = 0.85$ وهي قيمة تقريبية واقعية لأن الخرج يتغير ضمن المجال [1,2.4]، أما بالنسبة إلى تابع انتماء تغيرات الخرج فيمكن إعطاء القيم الآتية حتى نتجنب التغيرات السريعة في الخرج $S_y^- = S_y^+ = 0.006$. أما تغيرات الدخل Δu فيجب الالتزام لحد ما بالقيود المفروضة على تغيرات فتحة الصمام وتم اختيار القيم الآتية لتحقيق هذا الشرط بدرجة مقبولة كما يوضح الجدول (2):

الجدول (2): قيم توابع الانتماء لمتحكم النمط الأول T1FMPC.

$S_e^- = S_e^+$	$S_y^- = S_y^+$	$S_u^- = S_u^+$	$K_u^- = K_u^+$	$K_y^- = K_y^+$
0.85	0.006	0.8	0.4	0.1

أما بالنسبة إلى المتحكم التنبئي العائم من النمط الثاني T2FMPC فقد تم استخدام توابع انتماء عائمة من النمط الثاني لكل من الخطأ وتغيرات الدخل وتغيرات الخرج وهي موضحة بالشكل (5)، حيث قمنا بعملية توسعة للتوابع المستخدمة في T1FMPC بالاتجاهين، فحصلنا على بارامترات التوابع العلوية $\bar{\mu}_{\bar{A}}(x)$ والسفلية $\underline{\mu}_{\bar{A}}(x)$ كما يوضح الجدول (3).

الجدول (3): قيم توابع الانتماء لمتحكم النمط الثاني T2FMPC (قيم انتماء التوابع العلوية والسفلية).

	$S_e^- = S_e^+$	$S_y^- = S_y^+$	$S_u^- = S_u^+$	$K_u^- = K_u^+$	$K_y^- = K_y^+$
$\bar{\mu}_{\bar{A}}(x)$	1	0.007	1	0.5	0.15
$\underline{\mu}_{\bar{A}}(x)$	0.6	0.005	0.6	0.3	0

أما بالنسبة إلى توابع الربط فقد تم استخدام تابع ربط Yager الموضح بالمعادلة (3) بالنسبة إلى المتحكم التنبئي العائم من النمط الأول T1FMPC وذلك على فرض $s = 2$. أما بالنسبة إلى المتحكم التنبئي العائم من النمط الثاني T2FMPC فقد تم استخدام قاعدة ربط Yager الجديدة المقترحة في هذه الدراسة والموضحة بالمعادلة (9) وذلك على فرض $s = 3$ ، كما تم استخدام تابع ربط Schweizer الموضح بالمعادلة (4) بالنسبة إلى المتحكم التنبئي العائم من النمط الأول T1FMPC وذلك على فرض $s = 2$. أما بالنسبة إلى المتحكم التنبئي العائم من النمط الثاني

T2FMPC فقد تم استخدام قاعدة ربط Schweizer الجديدة المقترحة في هذه الدراسة والموضحة بالمعادلة (10) وذلك على فرض $s = 2$.

وبالتالي يمكننا تلخيص خوارزمية عمل المتحكم التنبئي من النمط الثاني على النحو الآتي:

1. التنبؤ بسلوك النظام باستخدام النموذج العائم (أي استخدام توابع الانتماء المبينة بالشكل (8) والقواعد المبينة بالجدول (1))، وذلك على كامل أفق التنبؤ $H_p = 3$ ومن أجل جميع تسلسلات الدخل الممكنة على كامل أفق التحكم $H_c = 2$.

2. باستخدام الشكل (5) (بعد تحديد القيم العلوية والسفلية) يتم إيجاد توابع الانتماء الثانوية لكل من الخطأ والتغير في الخرج والتغير في أمر التحكم والتي تمثل المعايير Ad_j وذلك باستخدام القيم السابقة المتنبأ بها في الخطوة 1 والقياسات الحالية للنظام.

3. مرحلة التقييم: وهي عملية دمج هذه المعايير باستخدام المعادلة (7)، حيث إن عملية الربط \otimes ممثلة بالمعادلة (9) مع Yager أو بالمعادلة (10) مع Schweizer.

4. مرحلة الترتيب: وهي إيجاد أفضل تسلسل لأوامر المتحكم بالاستفادة من مرحلة التقييم وبما أن خرج المرحلة السابقة قيم حدية فعلية ترتيب النتائج من الأصغر للأكبر تُعدّ عملية سهلة.

5. إزاحة الأفق أي تطبيق أول قيمة من قيم التسلسل المثالي (هنا مقدار إغلاق الصمام كنسبة مئوية)، ثم إزاحة أفق التنبؤ وأفق التحكم عينة إلى اليمين وبدء الخوارزمية من جديد حسب مبدأ التحكم التنبئي.

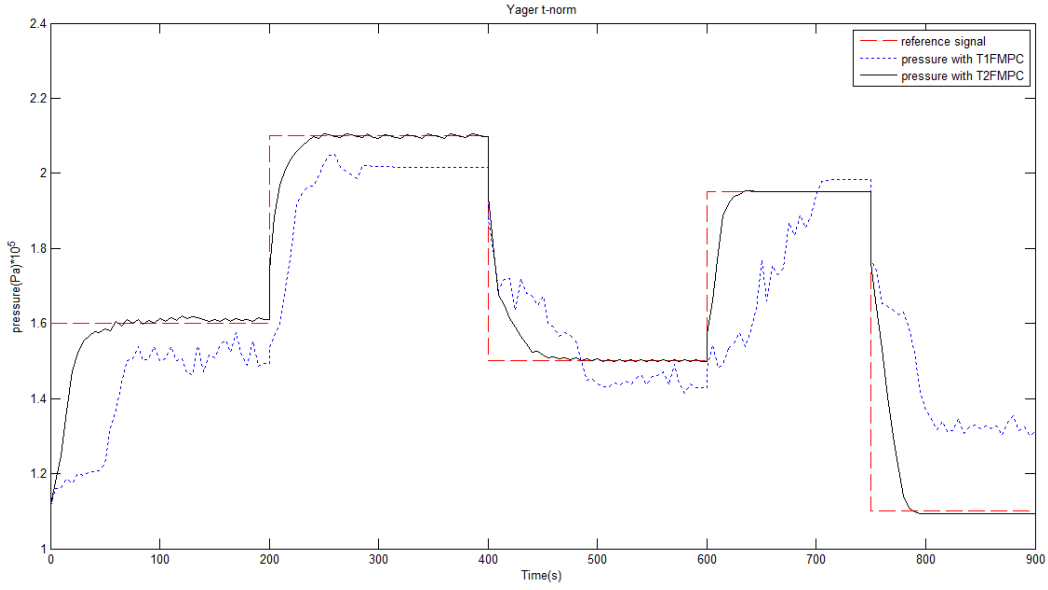
6. الخطوة الأولى تتم ضمن الصندوق I والذي يحوي كود matlab قمنا بكتابته.

7. الخطوات من 2 إلى 5 تتم ضمن الصندوق II والذي يحوي أيضاً كود matlab قمنا بكتابته.

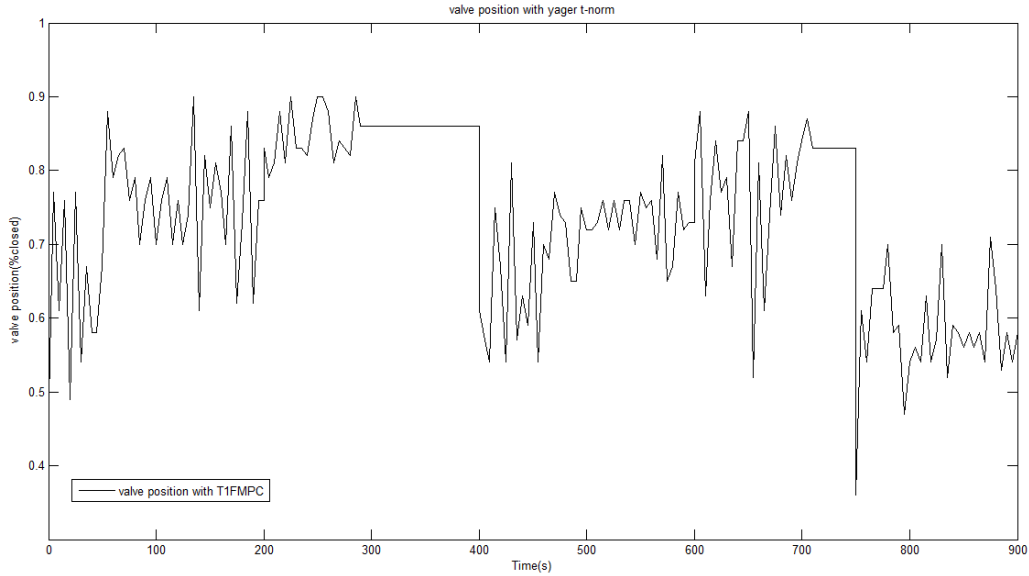
النتائج و المناقشة:

عندما نقوم برسم استجابة النظام مع الزمن باستخدام عدة قفزات لتغيرات الضغط المطلوبة نحصل على المنحني الموضح بالشكل (10) وهو يقارن استجابة النظام عند استخدام متحكم النمط الأول T1FMPC ومتحكم النمط الثاني T2FMPC المقترح في هذا البحث عند استخدام قاعدة ربط Yager من النمط الأول والثاني، واضح من الشكل (10) أن استجابة متحكم النمط الثاني تتفوق على متحكم النمط الأول من حيث سرعة الاستجابة ودقة ملاحقة تغيرات الضغط. الشكل (11) يوضح أوامر المتحكم أو مقدار إغلاق فتحة الصمام بالنسبة إلى متحكم النمط الأول أما الشكل (12) يوضح أوامر المتحكم أو مقدار إغلاق فتحة الصمام بالنسبة إلى متحكم النمط الثاني. ونلاحظ أن متحكم النمط الثاني يقوم بفتح الصمام وإغلاقه بفعالية أكبر بسبب قدرته على ملاحقة تغيرات الضغط.

الشكل (13) يقارن استجابة النظام عند استخدام متحكم النمط الأول T1FMPC وعند استخدام متحكم النمط الثاني T2FMPC وذلك باستخدام قاعدة ربط Schweizer من النمط الأول والثاني، نستنتج من الشكل السابق أن استجابة متحكم النمط الثاني تتفوق على متحكم النمط الأول فمتحكم النمط الأول عند استخدام قاعدة ربط Schweizer لا يستطيع ملاحقة تغيرات الضغط نهائياً بل تبقى ثابتة. ولكن بمقارنة الشكل (13) مع الشكل (10) نلاحظ أن قاعدة ربط Yager تتفوق على قاعدة ربط Schweizer عند استخدام متحكم النمط الثاني.

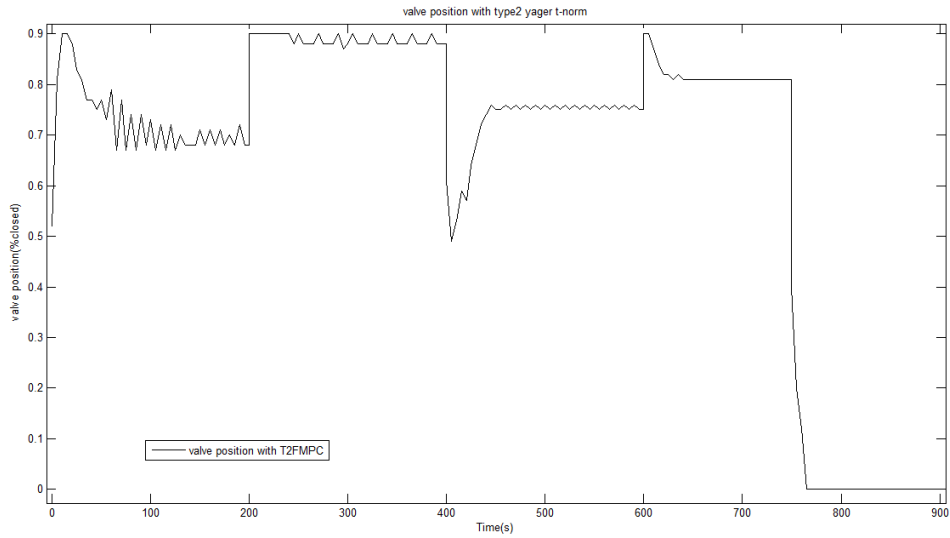


شكل (10) استجابة النظام لتغيرات الضغط عند استخدام متحكم T1FMPC ومتحكم T2FMPC وقاعدة ربط Yager.

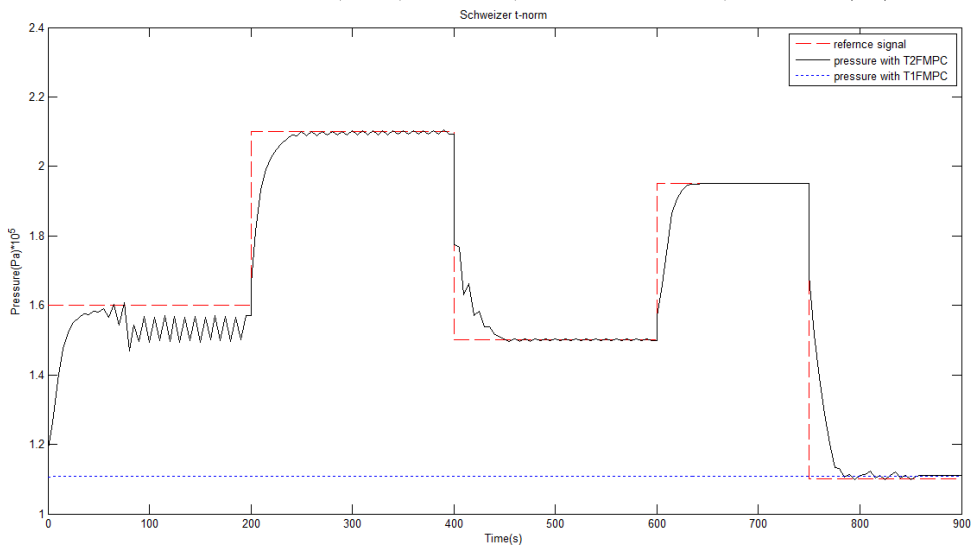


شكل (11) أوامر المتحكم أو مقدار إغلاق الصمام عند استخدام متحكم T1FMPC وقاعدة ربط Yager.

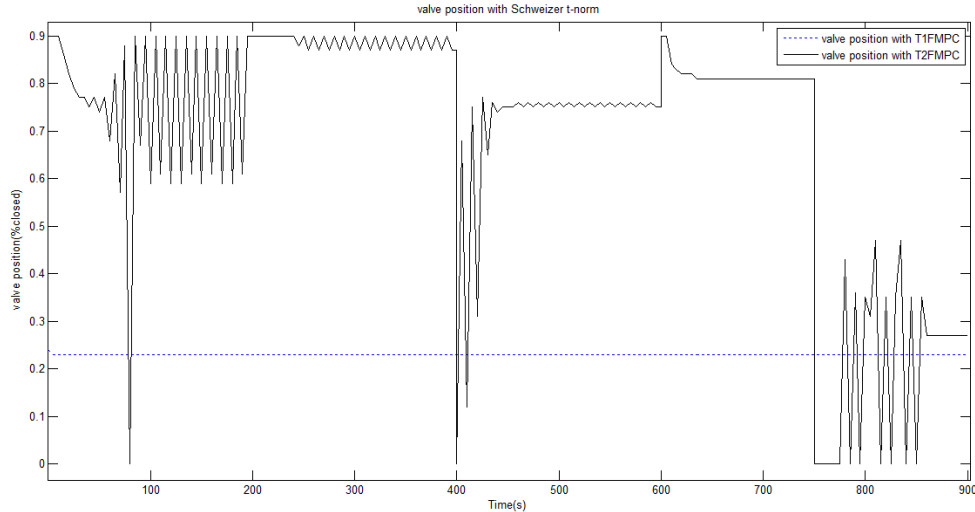
أما الشكل (14) فيوضح أوامر المتحكم أو مقدار إغلاق فتحة الصمام بالنسبة إلى متحكم النمط الأول T1FMPC وبالنسبة إلى متحكم النمط الثاني T2FMPC ونلاحظ أن متحكم النمط الأول عند استخدام قاعدة ربط Schweizer لا يقوم بفتح الصمام وإغلاقه بسبب عدم قدرته على ملاحقة تغيرات الضغط. أما متحكم النمط الثاني يقوم بفتح الصمام وإغلاقه بفعالية أكبر بسبب قدرته على ملاحقة تغيرات الضغط.



شكل (12) أوامر المتحكم أو مقدار إغلاق الصمام عند استخدام متحكم T2FMPC وقاعدة ربط Yager.



شكل (13) استجابة النظام لتغيرات الضغط عند استخدام متحكم T1FMPC ومتحكم T2FMPC وقاعدة ربط Schweizer.



شكل (14) أوامر المتحكم أو مقدار إغلاق الصمام عند استخدام متحكم T1FMPC ومتحكم T2FMPC وقاعدة ربط Schweizer.

الاستنتاجات و التّوصيات :

تمّ وضع الأسس النظرية والعملية للتحكم التنبئي من النمط الثاني T2FMPC من خلال دمج كل من تقنية اتخاذ القرار العائم من النمط الثاني مع تقنية التحكم التنبئي، كما تمّ إيجاد المعادلات الرياضية اللازمة لتمثيل المتحكم التنبئي العائم من النمط الثاني.

قمنا بالتحكم بنظام غير خطي ممثل بنموذج عائم مفرد باستخدام المتحكم التنبئي العائم من النمط الأول T1FMPC، ومتحكم النمط الثاني T2FMPC، كما تم تعديل طريقتي ربط وهما Yager و Schweizer لتتمكننا من ربط المجموعات العائمة من النمط الثاني.

تمّ التأكد باستخدام المحاكاة من أنّ استخدام اتخاذ القرار العائم FDM مع التحكم التنبئي يساعد في التعامل مع حالات عدم اليقين، مما يساعد في توصيف قيود النظام وأهدافه بشكل أكثر دقة. إنّ استخدام المجموعات العائمة من النمط الثاني منحت مرونة أكثر للمصمم في توصيف أهداف النظام وقيوده، كما سمحت بالتعبير عن حالات الإبهام والغموض بدقة أكثر من المجموعات العائمة من النمط الأول.

تمّ التأكد من تفوق المتحكم المقترح (النمط الثاني T2FMPC) على متحكم النمط الأول T1FMPC كما تتفوق طريقة ربط Yager على طريقة ربط Schweizer وذلك بالنسبة إلى النظام المدروس، من خلال محاكاة نظام الضغط داخل خزان التخمر باستخدام الأداة البرمجية Matlab and Simulink.

يمكن الاستفادة من نتائج هذا البحث وتطبيق المتحكم المقترح في هذه الدراسة للتحكم بنظم لاهطية أخرى.

المراجع :

1. LEE, C. C. 1990, *Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-Part I*. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 20, no. 2, 404–418.
2. FENG, G. 2006, *A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems*. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol. 14, 676–697.
3. BELLMAN, R.E and ZADEH, L.A. 1970, *Decision-making in a fuzzy environment*. Management Science, vol.17, 141–164.
4. KACPRZYK, J. 1986, *Towards 'human consistent' multistage decision-making and control models using fuzzy sets and fuzzy logic*. Fuzzy Sets & Systems, 18, 299–314.

- 5.KAYMAK, U ; SOUSA, J. M. and VERBRUGGEN, H. B. *Influence of decision functions in fuzzy predictive control*. Proceedings of the EUFIT, vol. 96, 1996, 990–994.
- 6.SOUSA, J.M.C and KAYMAK, U. 2002, *Fuzzy Decision Making in Modeling and Control*. World Scientific, Singapore, 335.
- 7.THOMPSON, R and DEXTER, A.L. 2005, *A fuzzy decision-making approach to temperature control in air conditioning systems*. Control Engineering Practice, vol. 13, 689–698.
- 8.FLORES, A; SAEZ, D; ARAYA, J; BERENGUEL, M and CIPRIANO, A. 2005, *Fuzzy Predictive Control of a Solar Power Plant*. IEEE Transactions on Fuzzy systems, VOL. 13, 1063-6706.
- 9.MANIKANDAN, P; GEETHA, M and JEROME, J. 2014, *Weighted Fuzzy Fault Tolerant Model Predictive Control*. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, vol. 14, 83-90.
- 10.CHRISTIAN, A; RODRIGUEZ, R.J; Kouro,S; and Villarroel, F. 2016, *Multiobjective Fuzzy Predictive Torque Control of an Induction Motor Drive*. IEEE, Transactions on Power Electronics, vol.10, 30-45.
- 11.MENDEL ,J.M. and JOHN, R.I. 2002, *Type-2 fuzzy sets made simple*. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol. 10, no. 2, 117–127.
- 12.DEXTER, A.L. 2012, *Monitoring and control of information-poor systems*. John Wiley & Sons, New Delhi, India, 313.
- 13.YAGER, R. R. 1994, *Aggregation operators and fuzzy systems modeling*. Fuzzy Sets and Systems, vol.67, 129-145.
- 14.KOUVARITAKIS, B; and CANNON, M. 2001, *Nonlinear Predictive Control theory and practice*. IET Control Engineering Series 61, UK , 261.
- 15.ZHENG, T. 2010, *Model Predictive Control*. Sciyo , India, 304.
- 16.Wu, Q; Wang, F; Zhou; L and Chen; H. 2017, *Method of Multiple Attribute Group Decision Making Based on 2-Dimension Interval Type-2 Fuzzy Aggregation Operators*: Springer. International Journal of Fuzzy Systems, vol.10, 125-142.
- 17.YAGER, R. R; and KELMAN, A. 1996,. *Fusion of fuzzy information with considerations for compatibility, partial aggregation and reinforcement*: International Journal of Approximate Reasoning, 15, 93–122.
- 18.WU, D; and MENDEL ,J.M. 2007, *Aggregation using the linguistic weighted average and interval type-2 fuzzy sets*: IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol.15, no. 6 , 1145-1161.
- 19.DRIANKOV, D and PLAM, R. 1998, *Advances in Fuzzy Control*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 417